ISSN 0910－1160

研　究　紀　要

第　50　号

平 成 24 年 3 月

RESEARCH REPORTS

OF

KOBE CITY COLLEGE OF TECHNOLOGY

NO. 50

MARCH, 2012

神戸市立工業高等専門学校

目　　次

論　　文

麻繊維の引張強度特性　尾崎　純一 …… 1

三軸加速度センサを用いた詳細歩行能力解析と歩行支援のためのリハビリテーション・トレーニング方法の検討
黒住　亮太，田中　基史，倉本　圭，小橋　昌司，畑　豊 …… 7

レスキューロボット UMRS2010 搭載消防探査用システムの開発
八島　裕紀，極樂地　恭平，小林　滋，藤長　大祐，高森　年 …… 11

レスキューロボット UMRS2010 走行系の設計と性能評価
極樂地　恭平，八島　裕紀，小林　滋，藤長　大祐，高森　年 …… 17

変位出力を用いた二次のプロパーなコントローラによる柔軟宇宙構造物の位置と姿勢制御
河野　佑，小林　洋二 …… 23

新方式リニア駆動ユニットのクランプ装置としての適用
新堀　正博，貞広　恵輔，村尾　良男，中辻　武 …… 27

新方式リニア駆動ユニットの立ち上がり補助座椅子への適用
貞広　恵輔，新堀　正博，村尾　良男，中辻　武 …… 33

重量物の浮上移動装置に関する基礎研究
石本　悠真，塩崎　由樹，赤山　優太，鈴木　隆起，赤対　秀明 …… 39

低カロリーバイオマスガスの火炎挙動と燃焼特性に関する研究　芦田　龍郎，吉本　隆光 …… 45

水平噴流放射状拡散火炎の火炎挙動と安定に関する基礎的研究　出口　幸治，吉本　隆光 …… 51

材料工学学習 Web アプリケーションの開発および運用　早稲田　一嘉，藤原　真人，藤本　健司 …… 57

汎用マーカーAR システムの開発　藤本　健司，山口　剛平，早稲田　一嘉 …… 63

ニューラルネットワークによる背景想起を利用した物体抽出システムの開発　藤本　健司，神田　嵩臣 …… 69

2 台のカメラを用いた手話動作の 3 次元取得とその表示に関する研究　大嶋　崇之，戸崎　哲也 …… 75

専門教科で英文教科書を用いた若年からの国際技術者教育　～ 電気工学科 2 年生でのデジタル回路における試み ～
佐藤　徹哉 …… 81

簡単に始められる大気圧低温プラズマジェットの実験　赤松　浩，金田　知大，市川　和典 …… 87

潜熱蓄熱器を有する熱電発電器の最適制御に関する研究　津吉　彰，藤原　隆太郎 …… 93

2 リンクロボットアームの単純適応制御（SAC）　浜田　健太，笠井　正三郎 …… 97

レーンキーピングアシストシステムの実装開発　沼野　剛志，笠井　正三郎 … 103

ミヤコグサ ALMT 1 遺伝子の性状解析　下村　憲司朗，米田　裕基 … 109

明石川河口における地形・水環境の時空間変動　新井　淳平，宇野　宏司 … 113

植生による飛砂の捕捉効果　中西　宏彰，宇野　宏司 … 119

動的有限要素法による水平成層地盤モデルを用いた振幅・位相特性
河里　康平，江本　浩樹，山下　典彦，森　源次 … 125

直接基礎で支持される道路橋の地震応答変位の片寄り　島袋　武，藤田　麗，山下　典彦 … 131

高齢化社会における公共交通の有効性と利用に関する研究　橋本　渉一 … 137

オリジナル資史料に基づく古典教育の可能性　舟見　一哉 … 146

クルージウスにおける「蓋然性の方法」の展開　手代木　陽 … 147

契丹陶磁の「周縁性」に関する検討（２）－唐代の三彩窯との比較を通して－　町田　吉隆 … 157

検索可能計画の構成と検索確率による比較　末次　武明 … 163

遷移金属錯体を用いたチオールとヒドロシランの脱水素縮合反応
福本　晃造，笠実　千穂，大家　創，中沢　浩 … 173

手作り瞬間冷却材の製作
難波　真大，伊藤　健，木村　優友，福原　一平，渡邉　大生，正戸　麻樹葉，
馬場　雅也，布浦　博之，吉本　隆光，八木　善彦，大多喜　重明，福本晃造 … 177

日本手話の視覚表現に基づく虚構移動　今里　典子 … 181

新しい LL 教室の紹介　上垣 宗明 …… 187

資　　料

ＰＬＣを用いたアーチェリー競技用信号灯の開発　和田　明浩，笠井　正三郎 … 193

英賀城およびその周辺の時系列地理情報データベースの作成　小西　良幸，中尾　幸一 … 197

数式処理での数学問題の解答　八木　善彦 … 201

CONTENTS

PAPERS

Tensile Properties of Hemp Fiber — Jun-ichi OZAKI ····· 1

Fine Walking Analysis using Tri-axis Accelerometer and Consideration of Walking Ability Improvement for Rehabilitation and Training
Ryota KUROZUMI, Motoshi TANAKA, Kei KURAMOTO, Syoji KOBAYASH and Yutaka HATA ····· 7

Development of Search System on Rescue Robot UMRS2010
Yuki YASHIMA, Kyohei GOKURAKUJI, Shigeru KOBAYASHI, Daisuke FUJINAGA, Toshi TAKAMORI ····· 11

Design of Running System and Performance Evaluation for Rescue Robot UMRS2010
Kyohei GOKURAKUJI, Yuki YASHIMA, Shigeru KOBAYASHI, Daisuke FUJINAGA, Toshi TAKAMORI ····· 17

Position and Attitude Control of Flexible Space Structures by a Second Order Proper Controller Using Displacement Output
Yu KAWANO, Yohji KOBAYASHI ····· 23

Application to the Clamp Equipment of New Type Linear Drive Unit
Masahiro SHINBORI, Keisuke SADAHIRO, Yoshio MURAO, Takeshi NAKATUJI ····· 27

Application to the Assistant Chair Use for Standing up of New Type Linear Drive Unit
Keisuke SADAHIRO, Masahiro SHINBORI, Yoshio MURAO, Takeshi NAKATUJI ····· 33

Study on Floating-Device to Move Heavy Product
Yuma ISHIMOTO, Yuki SHIOZAKI, Yuta AKAYAMA, Takaoki SUZUKI, Hideaki SHAKUTUI ····· 39

Research into Flame Behavior and Combustion Characteristics of Low calorie Biomass Gas
Tatsuro ASHIDA, Takamitsu YOSHIMOTO ····· 45

Flame Behavior and Stability on Radial Horizontal Jet diffusion Flame
Koji IDEGUCHI, Takamitsu YOSHIMOTO ···· 51

Development and Management of Web Application for Material Engineering
Kazuyoshi WASEDA, Masato FUJIWARA, Kenji FUJIMOTO ····· 57

Development of Marker AR Systems Available without Programming
K enji FUJIMOTO, Kohei YAMAGUCHI, Kazuyoshi WASEDA ····· 63

Development of Object Extraction Using Recalling Background by Neural Network
Kenji FUJIMOTO, Takaomi KANDA ····· 69

Three Dimensional Data Acquisition of Sign Language using Two Digital Video Cameras and Visualization
Takayuki OHSHIMA, Tetsuya TOZAKI ····· 75

A Study on Early Engineering Education for Prospective International Engineers Using an English Textbook for a Basic Engineering Subject
~ A Trial on the 2nd Year Class in Dept. of Electrical Engineering ~
Tetsuya SATO ····· 81

An Atmospheric Pressure, Low Temperature Plasma Jet for Laboratory Work
Hiroshi AKAMATSU, Tomohiro KANEDA, Kazunori ICHIKAWA ····· 87

Optimal Control of the Thermoelectric Generator Attached with PCM(phase changing material) Accumulator
Akira TSUYOSHI, Ryutaro FUJIWARA ···· 93

Simple Adaptive Control of Two Link Robot Arm Kenta HAMADA, Shozaburo KASAI ····· 97

Development of Lane Keeping Assistance System Implementation
Tsuyoshi NUMANO, Shozaburo KASAI ···· 103

Characterization of *Lotus japonicus* ALMT1 gene Kenshiro SHIMOMURA, Yuki YONEDA ····· 109

Temporal and Spatial Variability of Topography and the Water Environment in Akashi River Mouth
Junpei ARAI, Kohji UNO ···· 113

Effect on Trapping the Blown Sand by Vegetation Hiroaki NAKANISHI, Kohji UNO ····· 119

Amplitude and Phase Characteristics of Horizontally Layer by Dynamic Finite Element Method
Kohei KAWASATO, Hiroki EMOTO, Norihiko YAMASITA, and Genji MORI ···· 125

Asymmetry of Seismic Displacement Response of Highway Bridge Supported by Spread Foundation
Takeshi SHIMABUKURO, Rei FUJITA, Norihiko YAMASHITA ····· 131

Application and Utilization of Public Transportation in Aging Society Shoichi HASHIMOTO ···· 137

Japanese Classics Education Employing Original Materials Kazuya FUNAMI ···· 146

Die Entwicklung des Wegs der Wahrscheinlichkeit bei Crusius Yo TESHIROGI ···· 147

Examining on the Border Character of the Kitai Pottery in China(2)
: To compare with the Kilns which to produce Tricoloured Pottery in the Tang Dynasty
Yoshitaka MACHIDA ····· 157

Construction of Search Designs and Comparison of Designs Using Search Probabilities
Takeaki SUETSUGU ····· 163

Synthesis of Silylthioether via Dehydrogenation of Thiol and HydrosilaneCatalyzed by a Transition Metal Complex
Kozo FUKUMOTO, Michiho KASA, Tsukuru OYA, Hiroshi NAKAZAWA ····· 173

Formation of a Disposable Coolant
Mao NAMBA, Takeshi ITO, Yuu KIMURA, Ippei FUKUHARA, Taisei WATANABE
Makiha SHOTO, Masaya BABA, Hiroyuki NUNOURA, Takamitu YOSHIMOTO
Yoshihiko YAGI, Shigeaki OHTAKI, and Kozo FUKUMOTO ···· 177

Fictive Motion in the Visual Expressions in Japanese Sign Language Noriko IMAZATO ···· 181

The Introduction of the New LL Muneaki UEGAKI ···· 187

RESEARCHES AND FINDINGS

Development of Signal Light for Archery using PLC Akihiro WADA, Shozaburo KASAI … 193

Creation of Multi-temporal Geographic Information Database of Aga Castle and the Neighberhood
Yosiyuki KONISI, Kouichi NAKAO … 197

Mathematics Problem Solving with Computer Algebra Systems Yoshihiko YAGI …. 201

麻繊維の引張強度特性

尾崎 純一*

Tensile Properties of Hemp Fiber

Jun-ichi OZAKI*

ABSTRACT

Mechanical properties of the hemp fiber of two kinds were examined. Sisal hemp and manila hemp fibers were divided into two groups by the diameter of the fiber, and the tensile test was carried out. In addition, the tensile test of the fiber which conducted a heat treatment in order to investigate the effect of a heat on tensile properties was also carried out. Tensile strength and fracture strain of both hemp fiber varies widely as well as other natural fiber. It was shown that the tensile strength of manila hemp fiber was higher than that of the sisal hemp fiber. However, the tensile strength of the sisal hemp fiber was improved by the heat treatment. In the other, the tensile strength of the manila hemp fiber lowered by the heat treatment. However, the decrease of the tensile strength is slight. As a result, it was shown that both fibers were useful as a reinforcement of the composite material.

Keywords: natural fiber, hemp, mechanical property, tensile strength, green composite

１．はじめに

FRP(Fiber Reinforced Plastic)は，軽量，高強度，錆びないなどの優れた特性を有することから，スポーツ用品から船舶，航空機に至るまで幅広い分野で利用されている．しかし，製品寿命を迎え使用済みになったFRPの処理は大きな問題となっている．FRPはプラスチックとガラス繊維や炭素繊維という性質が大きく異なる材料から構成されているため，分離が非常に困難である上,強度が高いため切断･破砕も容易でない．このため，ある程度の大きさに粉砕した後，埋立てや高温焼却等により処理されているのが現状であり，環境に優しくない材料となっている．

この問題を解決するために，マトリックスには生分解性プラスチックを用い，強化材には天然繊維を利用した廃棄時にも環境に負荷をかけることがない複合材料，すなわちグリーンコンポジットが開発さている．現在，グリーンコンポジットの強化材となる天然繊維には竹繊維[1)~3)]，麻繊維[4)~7)]，が多く検討されている．また，この他にもクワラ繊維[8)]，綿繊維[9)]，落花生[10)]などいわゆるバイオマスの有効利用の検討が活発に行われている．

これら様々な天然繊維の中でも，麻繊維は昔から麻袋や麻紐として利用されているように天然繊維のなかでも強度特性が優れていることで知られており，グリーンコンポジットの強化材として期待されている．「麻」とは，いくつもの植物から採取される繊維を総称した呼称であり，繊維を採取する部位により，茎または幹のじん皮から採取されたじん皮繊維と葉部から採取される葉脈繊維とに大別される．**表１**に主な麻の種類とその特徴を示す．グリーンコンポジットの強化材として麻繊維を扱った報告は，じん皮繊維であるジュート麻，ラミー麻を対象としたものが多く，葉脈繊維であるマニラ麻，サイザル麻を対象にした報告は少ない．

本研究では，葉脈繊維であるマニラ麻，サイザル麻を対象に繊維の引張特性について調べ，グリーンコンポジットの強化材としての適用可能性について検討を行った．

２．実験方法

2.1 供試材

供試材には，葉脈繊維であるサイザル麻とマニラ麻を使用した．これらは，いずれも麻紐として市販されているものであり，単繊維を撚って紐状にしたものである．使用した麻繊維を**図１**に示す．この麻紐を手でほぐせる範囲の単繊維にして用いた．

2.2 測定方法

繊維の直径は，非接触のレーザ変位計（KEYENCE VG-035）により測定した．繊維の測定箇所を**図２**に

* 機械工学科 准教授

示す．麻繊維は長さ100mmに切り出し，長手方向に３箇所，円周方向に２カ所測定し，その平均を繊維の直径とした．

麻は天然の素材であるため，化学繊維のように直径が一定ではない．このため，麻繊維の直径は0.1～0.4mmの範囲でばらつきが見られた．そこで，繊維直径の違いにより引張強度に差がでるかどうか確認するため，0.2mmを基準に直径が小さいグループと大きいグループの２つのグループに分類して結果を整理した．

2.3 引張試験

引張試験にはインストロン型万能試験機（インストロン社，型番5565，容量5kN）を用いた．単繊維をそれぞれ10本ずつ用意して引張試験を行なった．試験片の模式を**図３**に示す．麻繊維を厚紙の台紙の上にセロハンテープで固定して試験片とした．標点距離（チャック間距離）は60mmである．引張試験は，室温で行い，引張速度は2mm/minとした．

また，繊維をグリーンコンポジットの強化材に適用することを想定して，グリーンコンポジット成形時に受ける加熱の影響を調べるため，麻繊維に熱処理を行った後に引張試験を行った．熱処理は，電気炉に麻繊維を入れて，電気炉の設定温度を100℃，120℃，140℃，160℃，180℃として与えた．麻繊維は設定温度に達してから10分間保持した後，電気炉から取り出した． 熱処理を行った麻繊維について走査型電子顕微鏡（日本電子株式会社，JSM-5400）を用いて繊維の表面観察を行なった．

３．実験結果および考察

3.1 引張試験

サイザル麻繊維の応力－ひずみ線図を**図４**に示す．図中の線図は，すべて同一条件で引張試験を行った結果である．（以下，同様） これより，サイザル麻では引張開始直後は弾性率がわずかに小さくでるものの，その後は破断するまで応力とひずみがほぼ比例しているのがわかる．最大応力を示した後は，破断に至り弾性的な挙動を示している．(a)D>0.2mmでは，引張強度は100～300MPaまで約３倍のばらつきがあり，破断ひずみでも2～5%までばらついている．これに対して，(b)D<0.2mmでは，D>0.2mmに比べると引張強さ，破断ひずみともばらつきは比較的小さくなっていることが分かる．

図５にマニラ麻繊維の応力－ひずみ線図を示す．(a)D>0.2mmでは，引張強さ，破断ひずみともに最小値と最大値で３倍以上の差が生じており，サイザル麻と同様にかなりばらつきがあることがわかる．破断に至るまでの線図を見ると，最大応力を示す少し手前で降伏するような挙動が見られるものがある．これに対して，(b) D<0.2mmでは，破断ひずみのばらつきは小さいことがわかる．引張強さは，ばらつきは大きいも

表１　麻の主な種類 [11)]

	種　類	種　別	主な産地	主な用途
靭皮繊維	亜麻 (リネン)	亜麻科 一年生	欧州 中国 ロシア	衣料 寝装
	苧麻 (ラミー)	葦麻科 多年生	中国 ブラジル フィリピン	衣料 寝装
	黄麻 (ジュート)	田麻科 一年生	インド ﾊﾞﾝｸﾞﾗﾃﾞｨｯｼｭ 中国	麻袋 紐 カーペット基布
	洋麻 (ケナフ)	綿葵科	タイ インド 中国	ひも パルプ代用 壁材
	大麻 (ヘンプ)	アサ科 一年生	イタリア 中国 フィリピン	ロープ 衣料
葉脈繊維	マニラ麻 (アバカ)	芭蕉科 多年生	フィリピン エクアドル	ロープ 魚網 帽子
	サイザル麻	石蒜科 多年生	フィリピン ケニア タンザニア	ロープ 敷物



(a) サイザル麻　　(b) マニラ麻

図１　麻繊維

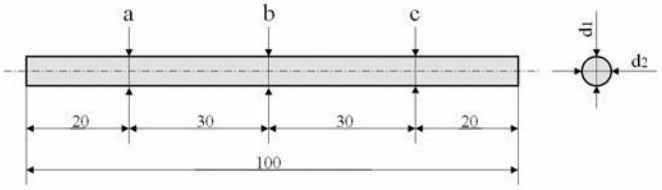


図２　繊維の直径測定

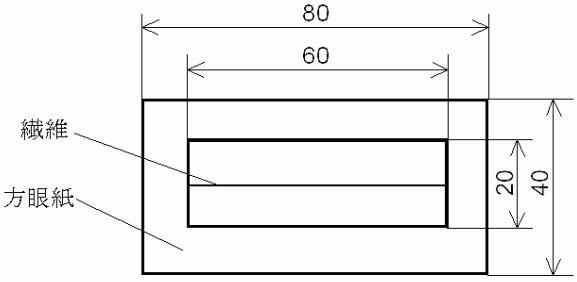
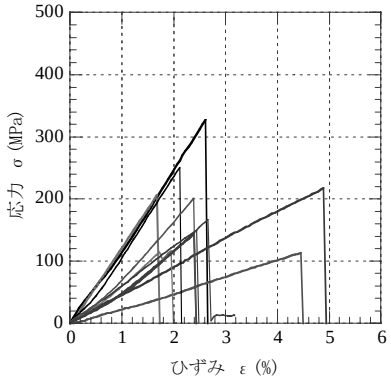
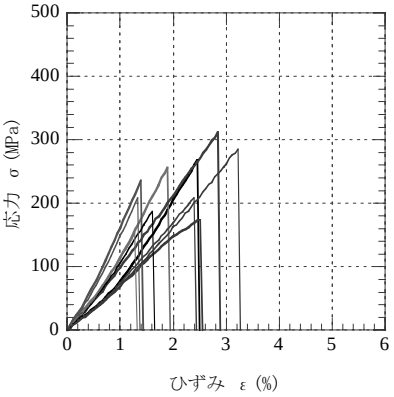


図３　引張試験片

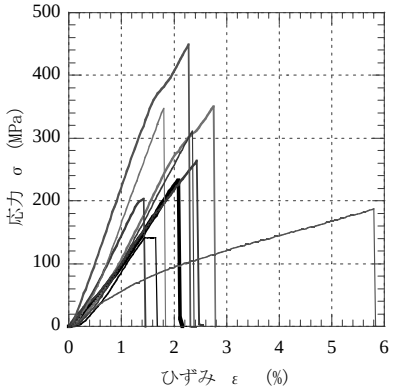


(a) D>0.2mm

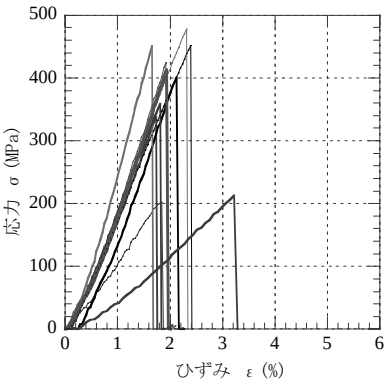


(b) D<0.2mm

図４　サイザル麻の応力－ひずみ線図



(a) D>0.2mm



(b) D<0.2mm

図５　マニラ麻の応力－ひずみ線図

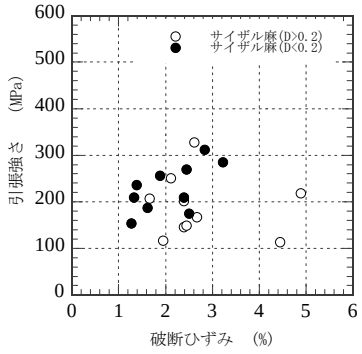
のD>0.2mmの場合に比べて総じて高い値が得られている．サイザル麻と比べると，マニラ麻の方がサイザル麻よりも引張強さは総じて大きい．

3.2 引張強さと破断ひずみの関係

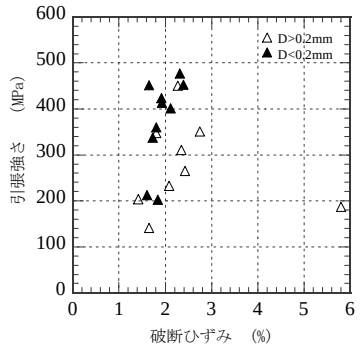
図６に各繊維の引張強さと破断ひずみの関係を示す．これより，サイザル麻は，直径による差はあまり見られないが，マニラ麻の方では，D<0.2mmの方が引張強度が高く，破断ひずみのばらつきも小さくなっていることから，強度の面から見れば，マニラ麻の方がグリーンコンポジットの強化材に適していると判断できる．

3.3 熱処理後の麻繊維引張試験

図７に熱処理を行ったサイザル麻とマニラ麻の繊維の応力－ひずみ線図を示す．これらの応力－ひずみ線図と熱処理を行っていない応力－ひずみ線図(図４，図５）をそれぞれ比べてみると，サイザル麻（図７(a)）では，引張直後のヤング率の低下が見られるが，引張強さや破断のびについてはほとんど低下していないことがわかる．一方，マニラ麻（図７(b)）では引張強さが低下し，破断のびが増加する傾向にあることがわかる．また，最大応力手前で生じていた降伏現象のような挙動もより明瞭になっているのが分かる．

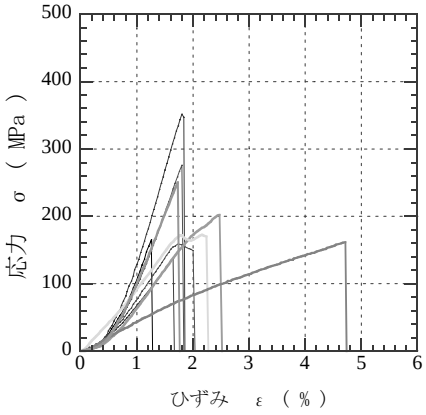


(a) サイザル麻

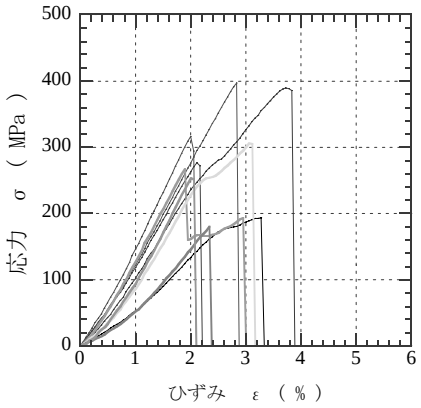


(b) マニラ麻

図６　引張強さと破断ひずみの関係

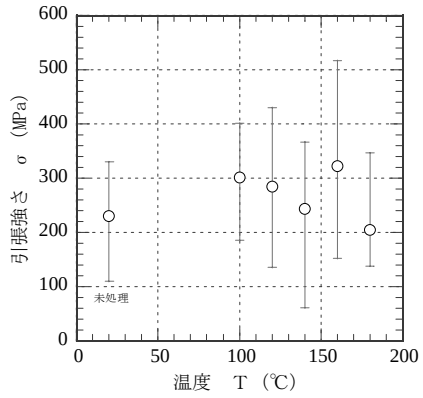


(a) サイザル麻

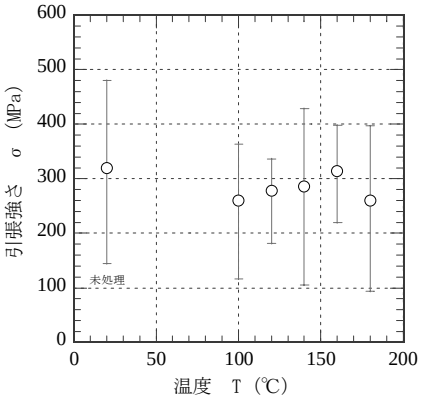


(b) マニラ麻

図７　熱処理後の応力－ひずみ線図



(a) サイザル麻



(b) マニラ麻

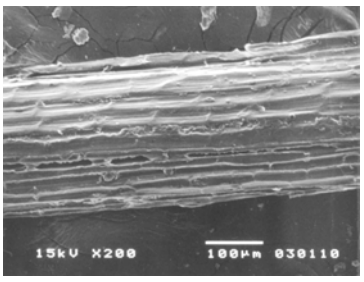
図８　引張強さに及ぼす熱処理の影響

3.4 強度特性に及ぼす熱処理の影響

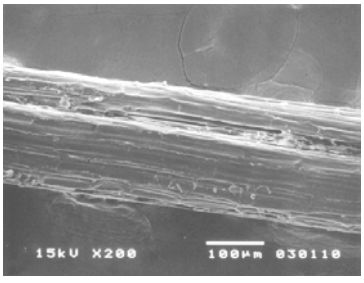
図８にサイザル麻繊維およびマニラ麻繊維の引張強さに及ぼす熱処理の影響についてまとめたものを示す．これより，サイザル麻（図８(a)）では熱処理をしたことにより強度低下が見られないだけでなく，むしろ引張強度が向上する傾向にあることがわかる．麻繊維の一種であるジュート繊維でも熱処理により引張強度が向上したという報告[12]があることから，サイザル麻特有の特性ではないといえる．ホットプレス成形などグリーンコンポジットを製造する際にマトリックスを融点以上に加熱することが一般的であることから，加熱処理により繊維の強度が向上するという特性は非常に好ましい特性といえる．

マニラ麻（図８(b)）ではサイザル麻のような強度向上は見られず，わずかではあるが，強度低下が生じている．ただし，本実験で与えた程度の熱処理であれば，引張強度を大きく損うことはないと思われる．

図９にサイザル麻について未処理と熱処理を施した後の繊維の表面写真を示す．これより，未処理の写真では表面にあるくぼみがはっきり確認できるが，熱



(a) 未処理



(b) 熱処理後(180℃)

図９　サイザル麻の表面状態

処理後の繊維では表面の凸凹が少なくなっており平滑になっていることが分かる．引張強さが向上する理由として，繊維表面が平滑になることにより，引張試験時に応力集中が生じにくくなり結果的に引張強さが向上することが一因になっているのではないかと推察されるが，水分の影響や微視的構造が影響していることも考えられ，より詳細な検討が必要である．

以上より，熱処理の影響から見れば，グリーンコンポジットの強化材としてはサイザル麻の方が適していると判断できるが，強度特性に及ぼす熱処理の影響についてはさらに詳細な検討が必要である．

4．おわりに

天然繊維であるサイザル麻およびマニラ麻の単繊維の引張試験を行ない，その強度特性について調べ，グリーンコンポジットの強化材としての適用可能性について検討を行なった．その結果，以下のことが分かった．

(1) 熱処理をしていないマニラ麻の引張強さは，サイザル麻よりも高い．ただし，他の天然繊維と同様に強度のばらつきは非常に大きい．

(2) サイザル麻は，本実験で行った熱処理条件であれば引張強さが向上する．一方，マニラ麻では強度向上は見られないが，熱影響は少ない．

(3) 同種の繊維において，直径が大きくなると，強度，破断ひずみともにばらつきも大きくなる．これに対して，繊維直径が小さければ比較的安定して高い強度が得られる．

(4) マニラ繊維では，繊維直径が小さくなると，強度向上がみられた．また，破断ひずみのばらつきも小さくなった．

謝辞

本研究を遂行するに当たり，実験に協力頂いた当時の本校機械工学科卒研生　岩川太平君に謝意を表します．

参考文献

1) 藤井透，大窪和也：“持続的再生産可能天然資源としての竹の有効利用”，成形加工，Vol.15-9，pp.605-611，2003.

2) 奥野秀明，高木均：“竹繊維強化グリーンコンポジットの試作”，第 34 回 FRP シンポジウム講演論文集，pp.123-125，2005.

3) 高橋明宏，山元直行：“竹繊維の変形および破壊挙動のその場観察”，日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集，pp.549-550，(2005).

4)合田公一，浅井隆，山根達也，高木均：“麻繊維を利用した生分解性複合材料の創製”，第 31 回 FRP シンポジウム講演論文集，pp.311-312，2002.

5)竹村兼一，銭花圭：“繊維の加熱処理がジュート繊維強化複合材料の引張り強度に及ぼす影響”，J-COM-36 講演論文集，pp.268-270，2007.

6) 越智真治，高木均：“マニラ麻繊維束強化グリーンコンポジットの生分解速度制御”，第 33 回 FRP シンポジウム講演論文集，pp.24-27，2004.

7) 邊吾一，木原裕一：“生分解性樹脂とケナフ繊維からなるグリーンコンポジットの開発と機械的特性”，第 35 回 FRP シンポジウム講演論文集, pp.138-141, 2006.

8) 松尾貴則，Alexandre Gomes，田辺克典，合田公一，大木順司：“クラワ繊維グリーンコンポジットの作製と高靭化・高強度化”，第 35 回 FRP シンポジウム講演論文集，pp.125-129，2006.

9) 木村照夫，黄彩虹：“廃棄布団わたを用いた多孔質複合材料の成形”，第 35 回 FRP シンポジウム講演論文集，pp.217-219，2006.

10) 西川康博，長瀬尚樹，福島清：“落花生粉末の充填剤としての活用”，J-COM-36 講演論文集，pp.280-283，2007.

11) 日本麻紡績協会，“天然繊維「麻」，http://www.asabo.com/asa/asa.html（参照日 2011 年 10 月 24 日）

12) 竹村兼一，斉藤淳仁：“加熱処理を施したジュート繊維を用いた複合材料の引張り強度特性”，日本機械学会 2006 年年次大会講演論文集(1), pp.389-390, 2006.

三軸加速度センサを用いた詳細歩行能力解析と歩行支援のためのリハビリテーション・トレーニング方法の検討

黒住 亮太*，田中 基史**，倉本 圭**，小橋 昌司**，畑 豊**

Fine Walking Analysis using Tri-axis Accelerometer and Consideration of Walking Ability Improvement for Rehabilitation and Training

Ryota KUROZUMI*, Motoshi TANAKA**,Kei KURAMOTO **, Syoji KOBAYASHI**
and Yutaka HATA**

ABSTRACT

We are performed the walking analysis using three-dimensional accelerometer and develop the real-time walking analysis system. We are investigated the relation between maximum acceleration value in walking and several personal properties such as age, weight, height and we found the correlation between maximum acceleration in sagittal plane and age. We considered walking ability improvement for rehabilitation and training by concluding fine walking analysis.

Keywords: walking analysis, three-dimensional accelerometer, rehabilitation, training

1. 緒言

近年、メタボリックシンドロームなど生活習慣病の問題が注目される中、ヘルスケアに対する社会的意識が向上し、歩行計測が身近なものになりつつある。携帯電話等の小型通信機器にも３次元加速度センサが搭載されるようになり、歩数計測等に利用され、利用者のヘルスケアモニタリングの道具として活用がなされるようになっている。また得られた情報を無線または有線のネットワークを通じてストレージに保存し、長期間にわたる情報を自動的に蓄積できるシステムも盛んに開発され、加速度計の他にも体温計・パルスオキシメータ・脈拍・血圧計・体重計などさまざまな機器から身体情報を計測、記録保存し、そのデータを活用することができるシステムの開発が進められている(1)。また成人病だけでなく、高齢者の健康維持に大きく関わる、歩行能力や運動能力の計測や評価技術も重要な事項である。歩行支援や、リハビリテーション・トレーニングについて考える上で重要であると考える。

本研究で用いる、３次元加速度センサから得られる情報はさまざまであるが、生活中における動態の特徴量抽出の一例として、歩行時の３次元加速度データと被験者情報（ここでは特に年齢を対象とした）の相関を調べ、健康モニタリングシステム構築を試みた。歩行速度、歩行周期、離地接地力などの情報を取得することで被験者の転倒リスクを予想するシステムなど高齢者の健康保持のためのシステムを提案できる可能性のあるデータを取得することができる。歩行時の３次元加速度の測定例を図１に示す。３次元加速度センサは胴体部に装着し測定を行い、サンプリングは１秒間に１０点の速度で行った。

図１に示される加速度データの経時変化をみると、進行方向、垂直方向、上下方向の加速度変化に特徴があり、かかと着地(ヒールストライク)し、つま先で離地(トゥオフ)するタイミングがピークよりわかる。

*神戸市立工業高等専門学校　機械工学科　講師
** 兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻

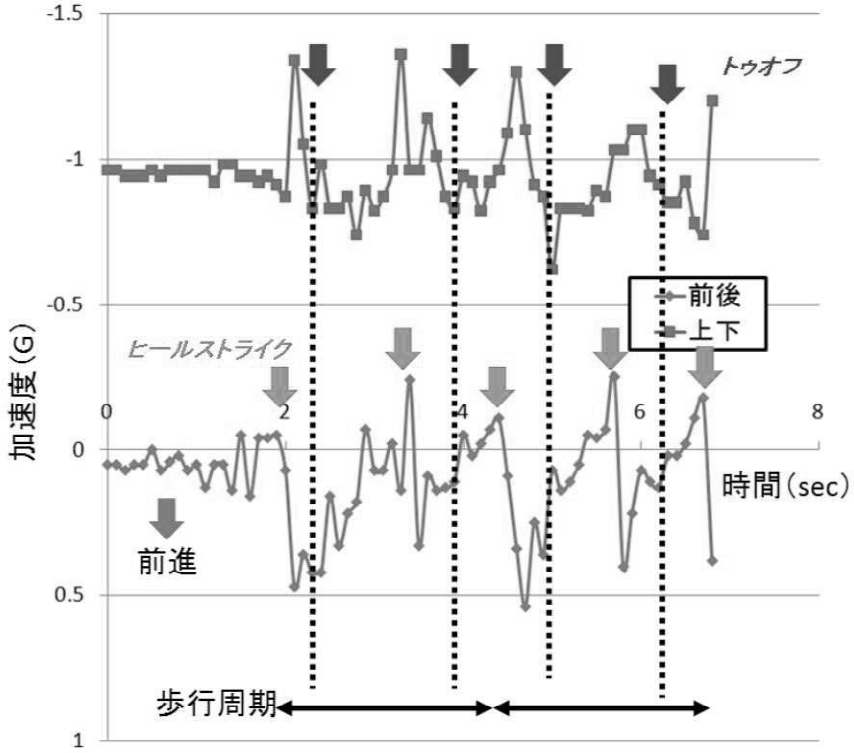


図 1　歩行時の加速度情報の経時変化例

歩行分析時の特徴量で注目される事項として、歩行周期時間、ステップ長、歩行速度、足関節最大底屈角、膝関節最大伸展モーメント等がある。また、得られた量を積分等の処理によりエネルギー等の計算も可能である。歩行周期はイニシャルコンタクト位置に関わらず、同じ位相となる時刻間の時間差がわかれば計測可能である。図 1 に示す加速度情報から歩行周期を算出することは比較的容易である。ステップ長を正確に測定するには加速度データに混入する重力加速度成分や装着のゆるみによる加速度計のゆれを得られたデータより取り除く必要があり、計測やデータ処理を正確に行う必要性がある。ステップ長と歩行周期が計測できればそこから歩行速度を算出することができる。歩行速度は年齢と相関があることが知られ、歩行能力を表す指標としてこれらの情報の利用が可能と考える。しかし簡易な計測条件では加速度計から歩行速度を算出することは難しく歩行速度と年齢の相関の定量化は困難なため異なる特徴量抽出が必要となる。本研究では矢状面における加速度情報の経時変化や最大値・最小値に注目し、年齢などの個人情報との相関の有無を調べた。

2. 歩行データ計測方法

歩行時加速度データ取得実験の詳細について次に述べる。実験では 20 代から 60 代の健常者 49 名に対して歩行時の加速度変化についてデータ取得を行った。測定条件の一覧を表 1 に示す。

表 1　測定条件

歩行条件	全周 30m のトラック
加速度計位置	下胴体部
サンプリング速度	128Hz
サンプリング時間	180 秒

加速度情報の経時変化のプロファイルと年齢等との相関を検討した。20 代から 60 代までの全員について相関は見られなかったが 45 歳以上の被験者（16 名）は、けり上げ時の力と相関すると考えられる上下方向（重力加速度方向）の最大加速度と年齢については、1 次の相関がみられた。それを図 2 に示す。男性、女性に分けた場合についても相関がみられた。これについても図 2 に示す。また最大加速度と身長・体重との相関についても調べ相関が認められた。

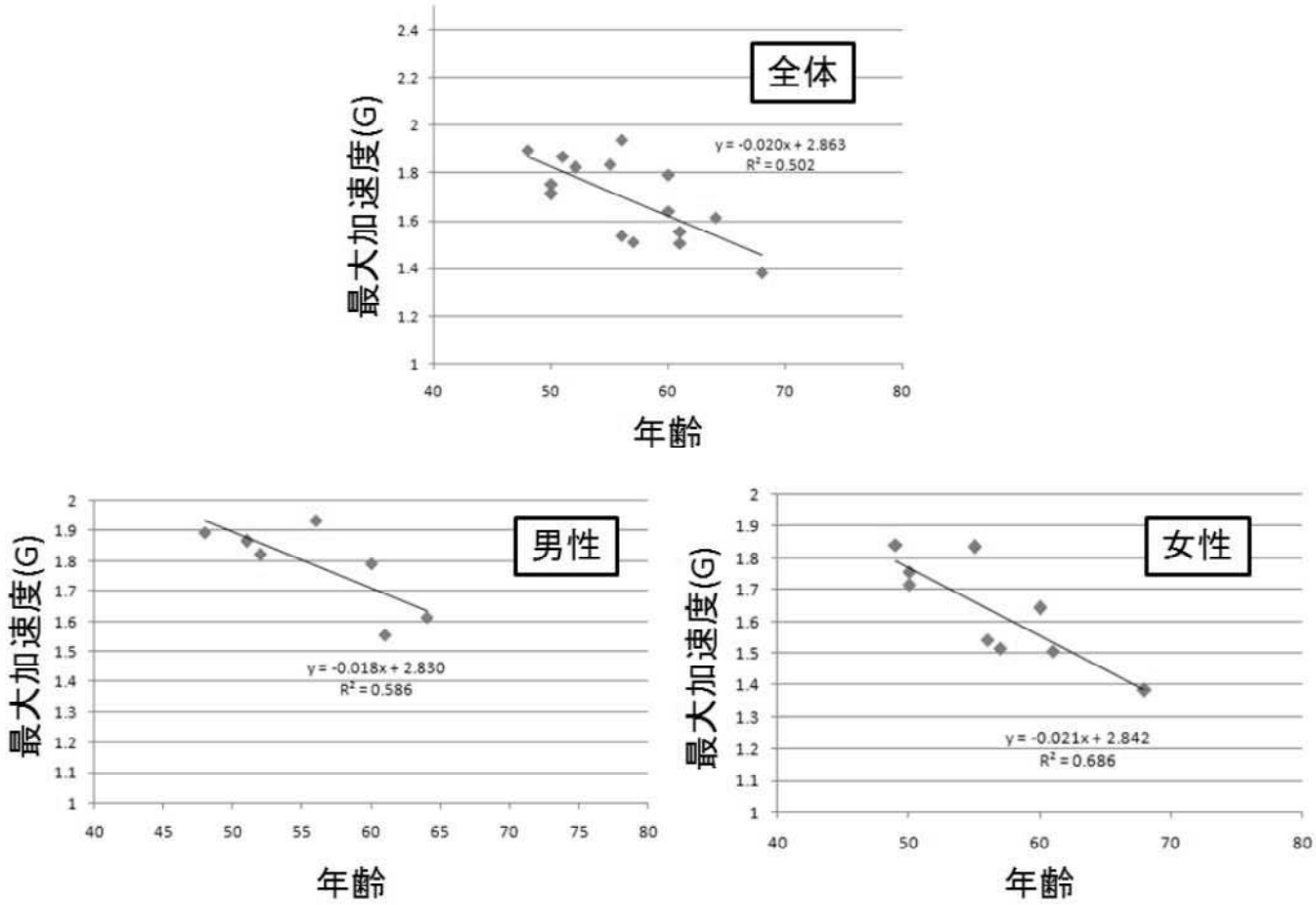


図 2　上下方向(矢上面)の最大加速度と年齢との相関

3. 結果と考察

3.1 年齢との相関 45 歳以上の被験者について

上下方向（矢状面）の加速度と年齢の相関を調べると、$R^2=0.502$ となった。また男女別の最大加速度と年齢の 1 次の相関をとってみると先のデータより R^2 値が増加した。男性の場合のデータで $R^2=0.586$ であり、女性の場合のデータで $R^2=0.686$ であった。これらのデータは、年齢とともに身体能力が低くなる傾向がみられることを加速度情報から得られることを示唆している。身体能力は個人差があるため、必ずしも年齢と相関するとは限らないが、サンプル数が多くなっても傾向は変わらないと考える。上下方向の加速度は、図 1 に示したとおり、トゥオフの運動と関係しており、つま先のけり上げる力と相関していると考える。正常な歩行は、かかとで着地し、つま先でけり上げる動作であり、このつま先でけり上げる力がなくなると転倒につながることが想定される。本実験の手法からつま先のけり上げ力が推算できれば転倒リスクの評価の指標の一つとして加速度情報利用の可能性が考えられる。市販の転倒防止用靴下は、つま先をあげることで正しい歩行動作を促すものである。その効果の実証に提案する解析手法を用いることの有用性が考えられる。

3.2 身長・体重との相関

3.1 と同様に、上下方向最大加速度と身長・体重の相関を確認した。体重と最大加速度の 1 次の相関について調べると、$R^2=0.646$ であった。また、身長と最大加速度の相関の $R^2=0.650$ であった。身長または体重と身体能力との相関を直接考察することはできないが、つま先のけり上げる力は筋肉量と関係があることが推測され、以上の結果になったと考えている。いずれにしても 3.1 のように年齢との相関だけでなく、身長や体重との相関もみられたことを学習データとして逆に利用すると歩行時の加速度情報からさまざまな情報を推算することができる。サンプル数が少ないため精度は低いが歩行時の加速度情報からおおよその年齢や体重・身長が推測できることになる。今後さらにさまざ

ま情報との相関を解析する必要があるが、加速度情報から得られる新しい特徴量があることがこの結果より示唆される。

4. 歩行能力改善に向けた取り組み

前節において、つま先の蹴り上げる力、すなわち筋肉量が歩行能力に関係する可能性が示された。そこで、現在開発が進められている新方式リニア駆動ユニットを応用した立ち上がり補助座椅子[2]のリニア駆動ユニットを、適応学習制御を用いた力制御[3]をすることによって、つま先の立ち上がりを支援しつつつま先の蹴り上げ力を向上させるトレーニングを行い、年齢に応じてつま先の蹴り上げ力が低下する傾向をおさえ、歩行能力を改善する研究を行っている。

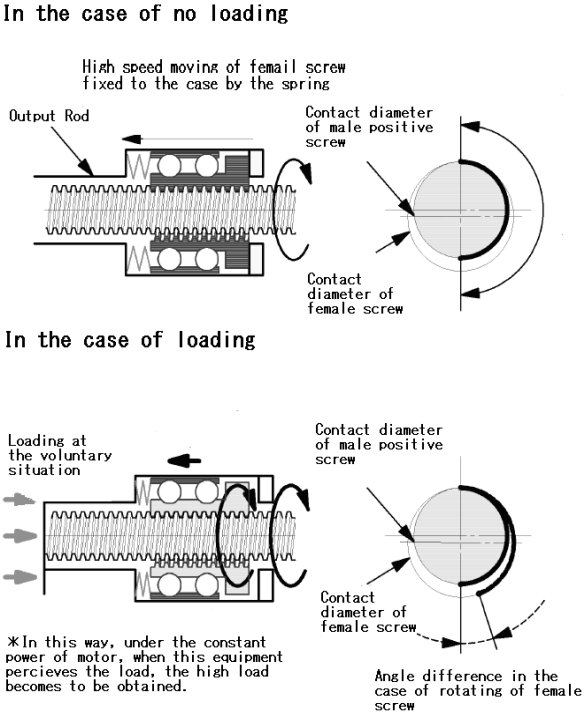


図３　新方式リニア駆動ユニット



図４　新方式リニア駆動ユニットを応用した立ち上がり補助座椅子

5. まとめ

3 次元加速度センサで得られる情報は様々だが、生活動態の特徴量抽出の一例として歩行時の 3 次元加速度データと被験者情報（ここでは特に年齢を対象とした）の相関を調べた。歩行速度、歩行周期、離地接地力などの情報を取得することで被験者の転倒リスクを予想するシステムなど高齢者の健康保持のためのシステムを提案できる可能性のあるデータを取得した。20 代～60 代の健常者 49 名に対し歩行時の加速度変化についてデータを取得し、加速度変化のプロファイルと年齢との相関について検討した。20 代～60 代までの全員について調べても相関は見られなかったが 45 歳以上の被験者（16 名）について、けり上げ時の力と相関すると考えられる上下方向の最大加速度と年齢については１次の相関が示された。男性・女性について分けて相関をとるとそれぞれ R^2 値が向上した。また、体重、身長と歩行時の上下方向の最大加速度の相関についても検討を行い、身長・体重と最大加速度についても１次の相関が示された。年齢及び身長をファクターとした関数を作成するとさらに最大加速度との相関が良いデータを得た。今後さらに被験者数を増やす必要、それぞれのファクターが歩行に与える影響について詳細に調べる必要があるが、年齢、身長等の特徴量の入力により歩行に関する評価精度の向上が示唆された。また、評価の結果を生かした支援・リハビリ機器の開発も合わせて行っていく予定である。

参考文献

（1）B.Piniewski et al,”Empowering helthcare patients with smart technology”, Computer, IEEEComputer Society, pp.27-34 , 2010

（2）新堀ら,”新方式リニア駆動ユニットの応用に関する研究”, 日本高専学会誌, Vol.16, No.3, pp.17-22 , 2011

（3）R. Kurozumi et al,”Development of a Training Equipment with Adaptive and Learning Mechanism Using a Balloon Actuator-Sensor System”, Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference, pp.2624 - 2629, 2007

レスキューロボット UMRS2010 搭載消防探査用システムの開発

八島裕紀 *　極樂地恭平 *　小林滋 **　藤長大祐 ***　高森年 ***

Development of Search System on Rescue Robot UMRS2010

Yuki YASHIMA*　Kyohei GOKURAKUJI*　Shigeru KOBAYASHI**
Daisuke FUJINAGA***　Toshi TAKAMORI***

ABSTRACT

A rescue robot is used in order to ensure the safety of the rescue team member who works in a disaster site, and search for disaster victims efficiently. However, since a disaster site has the possibility of fire, explosion, and an outflow of a harmful substance, the site is in an unknown environment. In this study, we aim at developing rescue robot “UMRS2010” which can work under adverse environment and can get the information on the site. We decided to make the robot which was based on rescue robot “UMRS2009” developed mainly by IRS, and took in explosion-proof structure. Now, we have finished making the robot body and the prototype of the system which can check the combustible sensor etc. that are carried on the deck of the robot by remote control. For the future, we will conduct the performance evaluation test of the robot equipped with the sensor system jointly with Kobe City fire department.

Keywords: UMRS, rescue robot, anti-explosive, ambient measurement, ambient monitoring

１．はじめに

阪神淡路大震災や東日本大震災をはじめ，我が国は非常に地震の多い国といえる．海外でも，中国・四川大地震やインドネシア・スマトラ島沖地震などが発生しており，地震による被害は人々の生活に大きな影響を及ぼす．地震以外の災害では近年，異常気象によるゲリラ豪雨やそれらに伴う土砂災害，ハリケーンなどによる自然災害が多発している．一方で，人為的な災害（テロリズムなど）も多く発生している．このような天災や人災によって発生した災害現場は瓦礫の崩壊などの危険性のほか，可燃性ガスの漏えいによる火災や爆発，人体に有害な物質の流出といった外部からは予測が困難な環境下にあることも十分に想定できる．これらの状況下で二次災害によるレスキュー隊員の事故防止，効率的な被災者の探索等のために，レスキュー隊員の侵入に先行してレスキューロボットを現場に送り込むことが有効である．しかし仮に現場が，可燃性ガスと空気が混合し，爆発限界内の雰囲気（以下，爆発性雰囲気という）が形成された状態となっている場合，安全対策を取っていないロボットでは自らが着火源となって爆発を引き起こす可能性がある．またレスキュー隊員が侵入可能な環境か，または人体に有害な環境かどうかの判断を下すセンシングが必要となる．

本研究室では，国際レスキューシステム研究機構（IRS）におけるレスキューロボット UMRS（Utility Mobile Robot for Search ）シリーズ[(1), (2)]の開発に参画しており，既に開発されている 2009 型が 2010 年 9 月から 2011 年 2 月まで神戸市消防局にて試験運用され，このロボットにおいて消防局から，災害現場での活用を前提とした改善すべき点が指摘されている．そこで本研究では，指摘された項目に対する対策として，2009 型の走破性を維持しながら爆発しにくい性能を持つロボット「UMRS2010」を開発することを目的とした．また消防局からの要望により，レスキュー隊員の代わりに現場の環境センシングを行えるようなシステムを開発し，UMRS2010 への搭載を目指した．

２．防爆について

２．１　防爆の基本概念　防爆で対象とする爆発は，可燃性ガスと空気が混合して生成される爆発性雰囲気と，アーク放電・火花放電といった着火源が同時点共存することで引き起こされる．すなわち両者のうちの一方が単独で存在しても爆発は誘発されない．したが

*　専攻科　機械システム工学専攻
**　機械工学科　教授
***　国際レスキューシステム研究機構

って爆発性雰囲気の形成を排除するか，あるいは着火源となりうる電気エネルギーの発生を抑制することで爆発の発生を防ぐというのが防爆の基本概念である[3].

２．２　開発するロボットの基本条件　本研究で開発するロボットは，爆発性雰囲気内で活動しても爆発を誘発しない，防爆仕様を備えることを目的としており，ロボット自らが着火源とならないような構造とする必要がある．そのため以下に示す項目を開発上の基本条件とした．

(1) 通常時ロボット自らはできるだけ火花を出さない
　ロボットは駆動するために電気エネルギーを用いるため，これに起因して火花が発生する可能性がある.したがってできる限り火花の発生を抑制するか，ロボット内部に爆発性雰囲気が形成されないように外部気体が侵入するのを防ぐ必要がある．

(2) 静電気による火花をできるだけ出さない
　ロボットのボディは走行している間に周囲の物体と接触することが想定される．接触時にボディに電荷が帯電し静電気が発生するが，この静電気が放電する際に火花を生じると着火源となって爆発を引き起こす可能性があるため，できる限り静電気による火花の発生を抑える必要がある．

３．ロボット車体の設計変更

本研究の対象となるロボット UMRS2010 は，既に開発されている実用化プロトタイプモデルである UMRS2009 を基に開発が進められている．ここでは，UMRS2010 のフリッパーアームおよびフリッパー駆動系の設計変更，また車体表面の改良について述べる．図 1 に UMRS2009 の外観を示す．

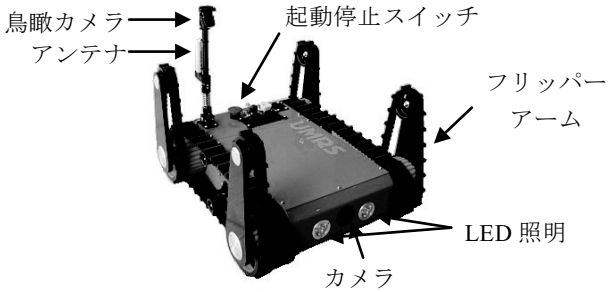
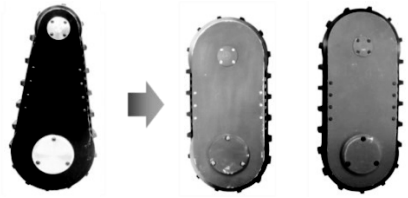


図 1　UMRS2009

３．１　フリッパーアームの設計変更　階段の段差や瓦礫などを上る際に必要なフリッパーアームについて，2009 型では収納性の高さからアームの先端が細い形のものを使用している．しかし先端が細い形状のアームの場合，瓦礫等の上を走行する際にアームの先端が瓦礫等の隙間に引っかかりやすくなるという欠点がある.そこで 2010 型のアームでは,先端の車輪(従輪)の径を根元のプーリの径と等しくなるように大きくすることとした．

また，ロボットの特性として，ロボットが階段を昇降する際は，ロボットの前方・後方アームのベルト下面，ロボット本体のベルト下面が，常に段鼻（階段の蹴上と踏板が交差したところ）の 3 点に接触した状態であれば，ロボットは安定して階段を昇降できる．そのため短いアームよりも長いアームの方がより安定して走行できると考えられるが，アームが長すぎるとロボット全体の重さが増加して走行時にロボットに掛かる負荷も増大してしまう.これを考慮し,アームには,従輪とプーリとの軸間距離が短いものと長いものの 2 種類を用意することにした．短いものはアームに取り付けるクローラベルトを 2009 型のものと同一長さにして互換性を持たせることで，アームのベルトが破損しても 2009 型のベルトが代用可能となる．一方，長い方のアームはベルト表面の歯数を一つ増やし，そのベルト延長量に合わせてアームの長さも延長した．設計変更前と変更後のアームを図 2 に示す．また設計変更後のアームの仕様を表 1 に示す．



変更前 (UMRS2009)　　短いアーム　長いアーム 変更後 (UMRS2010)

図 2　フリッパーアームの比較

表 1　設計変更後のフリッパーアームの仕様

	短いアーム	長いアーム
大きさ(W×H×L) [mm]	42×140×314	42×140×333
軸間距離 [mm]	172	191
重量 [kg]	1.0	1.2
クローラベルトの歯数	20	21

３．２　フリッパー駆動系の設計変更　2009 型では，フリッパー駆動用モータに DC モータを使用しているが，DC モータは構造上，回転時に整流子とブラシが接触するため接触火花が発生し着火源となりうる．このことから 2010 型では気密性の高いボディとするが，仮に可燃性ガスがロボット内部に侵入してきても発火しないように，駆動用モータにはブラシを必要としないブラシレス DC モータを使用することにした．なおフリッパーアームはロボットの前方と後方の左右両側にあり，前後をそれぞれ独立して動かすためモータとその伝達系を 2 セット使用した．

モータ選定のため，モータに必要なトルクの計算を行った．フリッパー駆動部に最大のトルクがかかるのは，ロボットがフリッパーアームを用いて自らの車体を持ち上げる時である．フリッパーアームを用いてロ

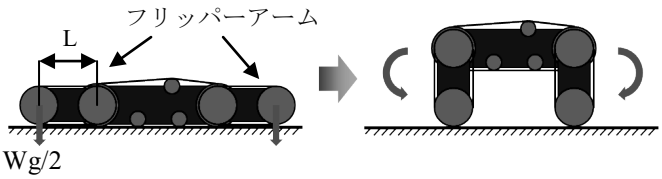


図 3　フリッパーアームによりロボット車体を持ち上げる様子

ボット車体を持ち上げる様子を図 3 に示す.

この時，フリッパー駆動軸 1 本あたりに発生するトルク T_F は，

$$T_F = \frac{W}{2} \times g \times L \qquad (1)$$

で求められる．ここで，W はロボットの自重，g は重力加速度 ，L はフリッパーアームの長さ（軸間距離）である.

フリッパー駆動軸は歯車を用いて，モータと組み合わせた減速機に繋げる．モータとフリッパー駆動軸との減速比を γ とするとモータに必要なトルク T_M は，

$$T_M = \frac{1}{\gamma} \times T_F \qquad (2)$$

となる.

2009 型がオプション機器を搭載した場合の重さを参考に，ロボットの自重 W を 36 kg とした．またフリッパーアームの長さ L については，必要トルクが大きくなる長いタイプのアームを用いて 0.191 m とした. 減速比については，2009 型のフリッパー駆動部で用いられている実績のある値と同じ $\gamma = 120$ となるように設定した．これらの数値を用いて式(1)を計算すると，T_F= 33.6924 Nm となり，これを式(2)に代入すると，T_M= 0.28 Nm となった.

算出されたモータに必要なトルク T_M ならびに，ロボット車体内部のスペースを考慮して今回は，マッスル株式会社の CM2-□-60A10A というモータ（定格トルク：0.32Nm）を選定した．また，このモータに組み合わせる減速機として減速比が 60 のものを選定した. トルク計算時に減速比 $\gamma = 120$ と設定したため，これに合うように減速機とフリッパー駆動軸を繋げる歯車の選定も行った．なお，使用モータや減速機の変更に伴い，フリッパー駆動部の設計変更も行った.

３．３　ボディ表面の塗装　　2009 型では行っていなかった静電気対策として，2010 型のボディ表面には導電塗料による塗装を施した．これは本体外部に電荷が帯電して静電気による火花が発生するのを防ぐためで，このボディにアースをとり地面との電位差をなくすことで静電気の発生を防ぐことができるとわかっている. そのため，導電性のワイヤーをボディに取り付けて地面に垂らして運用する.

４．UMRS2010 の概要

先に述べたようなロボット車体各部の設計変更を経て，本研究のベースとなるロボット車体の製作を行った. 製作したロボット UMRS2010 の外観を図 4 に示す. また 2009 型と 2010 型の仕様を表 2 に示す.

2010 型は 2009 型を基に設計製作したロボットであり，2009 型が消防局での試験運用を通して指摘された改善すべき項目に対する対策として，ロボット車体に防爆性能を持たせた．これに伴い，主にロボットの駆動用モータが大型化したことで 2010 型の車体重量は 2009 型よりも 9kg 増加した．しかし，ロボットの最高速度と登坂能力は 2009 型と同等であり，2010 型は 2009 型の走破性を維持しながら防爆性能を持つロボットであるといえる.

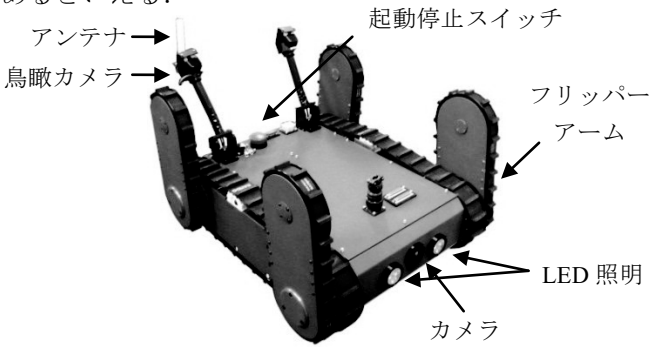


図 4　UMRS2010

表 2　UMRS2009 と UMRS2010 の仕様

	UMRS2009	UMRS2010
大きさ (W×H×L) [mm]	500×250×590	512×450×585
重量 [kg]	23	32 (長いアーム着用時)
最高速度 [km/h]	5	5
登坂能力 [°]	45	45
電源供給	Li-Fe バッテリ	Li-Fe バッテリ
制御方式	無線遠隔操作	無線遠隔操作
カメラ	3 (前後各 1 台，鳥瞰 1 台)	4 (前後各 1 台，鳥瞰 2 台)

５．消防探査用システム

消防局のレスキュー隊員が出動要請を受けるのは，人命に関わる事件や事故が発生した場合である．特に地震災害やテロリズムが発生したときに，初めから救出すべき被災者の位置や，その場所の環境状況が完全に把握できていることは稀であるため，災害現場において環境センシングを行いながら探索する必要がある. そのため，レスキュー隊員は可燃物センサなどのセンサを常時携行しながら探索活動を行う．ここではロボットにその任務を行わせるために，レスキュー隊員が携行する各種消防探査センサをそのままロボットに搭載してセンサが取得した情報の確認や，センサを遠隔操作するシステムの開発を行った．また被災者を発見した際にその被災者との連絡を取るための双方向音声通信システムを搭載した.

５．１　搭載センサ・機器　消防局のレスキュー隊員からの要望を基にロボットへの搭載を検討しているセンサ・機器を以下に記す．なお，(1)～(3)の各センサは消防局が所有しているものである．

(1) 可燃物センサ

このセンサは炭化水素系の可燃性ガスや硫化水素などの有毒ガス濃度を検知することができる．ガス濃度はリアルタイムでセンサの液晶画面に表示される．

(2) 特殊ガスセンサ

このセンサは，可燃物センサにおいて検知することができない，サリンガスやマスタードガスといった化学兵器や幅広い有毒有害化学物質の検知・識別をすることができる．センサの液晶画面には，検知された化学剤の種類・濃度が表示される．

(3) 気体収集装置

図 5 に気体収集装置（GasID Pump, Smith Detection 製）を示す．この装置は，上述のセンサで検知・識別できない未知のガスを専用のガス分析装置により分析するためにガスを収集するものである．装置上のボタン 2 つ（図 5 中の○印部分）を同時に押すことで，ポンプを作動・停止させることができる．

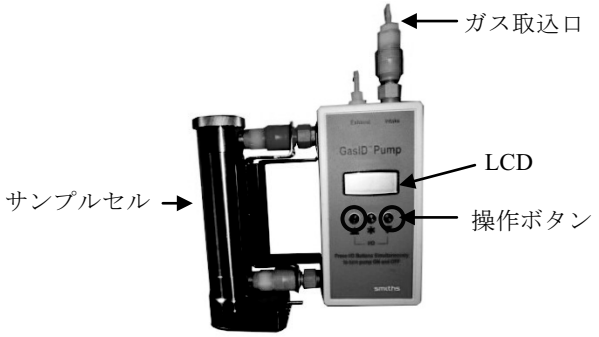


図 5　気体収集装置 (GasID Pump)

(4) 音声通信システム

災害現場での探索中に被災者を発見した際，レスキュー隊員がその被災者と直接連絡を取ることができれば詳しい被災状況・周辺環境の把握が可能となる．このとき，電話機のように被災者と対話ができればより迅速な対応が可能になると考えられる．そのため，双方向での音声通信ができるように，送信機および受信機各 1 個を 1 組として 2 組用意し，1 組はロボットに搭載して，もう 1 組はロボット操作側に用いることにした．またロボットに搭載する送信機側にはマイクとアンプ，受信機側にはスピーカーとアンプをそれぞれ設ける．

無線 LAN（2.4GHz 帯）に使用されるような波長の短い電波は波長の長いものに比べ直進性が高いため回折しづらく，障害物が多く存在すると通信が困難になると考えられる．また，2010 型ロボットの通信に 2.4GHz 帯の電波を使用しているため，その帯域の電波を使用すると干渉する可能性がある．これらを考慮して音声通信用の送受信機には，無線 LAN で使用するものより波長の長い電波を利用することにした．表 3 に送受信機の仕様を示す．

表 3　送信機・受信機の仕様

送受信周波数	807.750 [MHz]
到達距離	50 [m]　(見通し)
周波数特性	50 [Hz] ~ 15 [kHz]
動作電圧	送信機: 3 ~ 9 [V] 受信機: 3 ~ 12 [V]
消費電流	送信機: 25 [mA] 受信機: 30 [mA]

５．２　センサの確認　消防探査センサが取得した情報はセンサの液晶画面に表示されるので，これをロボット上のカメラで確認する．なお，設置スペースの問題からセンサの確認に使用するカメラは小型のものとし，各センサに 1 台ずつカメラを用いることにした．

センサ確認用の小型カメラを選定するために，ロボット車体に使用しているものと同等の性能を持つ車載バックカメラ A と，それより画角の狭い小型 CCD カメラ B を候補に挙げ，両者の視認性比較実験を行った．その結果，B による画像の方が被写体の歪曲が小さいことがわかった．センサ確認は，センサの液晶画面に表示される文字情報をカメラ映像から読み取ることで行う．そのため文字を認識しやすい映像を撮影できるカメラ，すなわち被写体の歪曲が小さいカメラを用いた方が良いと考え，センサ確認カメラには B のカメラを用いることにした．また災害現場が建物内の場合，ロボットは暗闇の中で活動する可能性があるため，センサの液晶画面を確認する際は LED 照明を用いることにした．

５．３　センサの制御　各消防探査センサのうち，気体収集装置についてはロボットへ搭載した後に，装置のボタン（図 5 中の○印部分）を操作する必要がある．そのため，DC ソレノイドを用いてボタンを押下することにした．図 6 にボタン押下機構の概略図（側面図）を示す．DC ソレノイドに電流を流すと可動鉄心がソレノイドから引力を受け，それにより鉄心に結合されたレバーが降下して装置のボタンを押す．ソレノイドに電流を流すのを止めると可動鉄心は引力を受けなくなるので，装置のボタンの自己復帰力によりレバーは初期位置（図中の位置）に戻る．

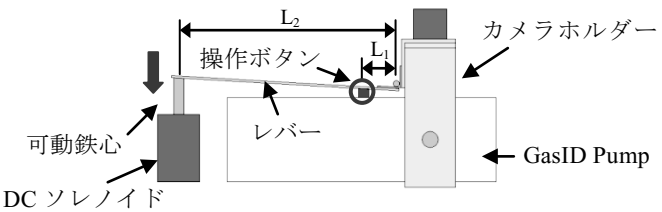


図 6　操作ボタン押下機構

図 6 に示したように，レバーの支点から装置のボタンまでの距離を L_1，支点からソレノイドの鉄心までの距離を L_2 とすると，装置のボタンを押す力 F_1 と鉄心の受ける引力 F_2 との間には，

$$L_1 \times F_1 = L_2 \times F_2 \quad (3)$$

という関係が成り立つ．

装置のボタン1つを押すのに必要な力は2.2Nであるため，ボタン 2 つを同時に押す力は F_1= 4.4N となる．また装置の設置スペースを考慮して設計した結果 L_1= 10mm，L_2= 103mm となった．これらの数値を式(3)に代入して F_2 を計算した結果 F2= 0.427 N となった．

なお設計より，ボタンを押下する際に必要なソレノイドのストロークは約 8.5mm であることがわかった．よって最大ストロークが 8.5mm 以上，且つストローク 8.5mm 時の引力が 0.427N 以上のプル型 DC ソレノイドを使用することにした．製作したボタン押下機構の外観図を図 7 に示す．

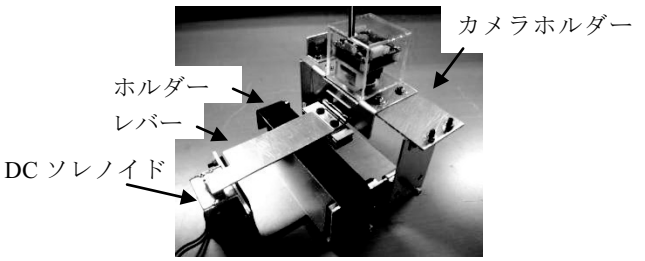


図 7　操作ボタン押下機構の外観図

５．４　センサ確認・制御　ロボットデッキに搭載するセンサシステムの概要図を図 8 に示す．UMRS2010 には鳥瞰カメラが 2 台設置されているが，1 台を無くしてその分の信号線をセンサ確認用カメラの出力信号に使用する．ただしセンサ確認カメラは合計 3 台あるため，それらの出力信号から 1 台分の信号を選択する必要がある．そこで無線コントローラを用いた無線遠隔操作で IC スイッチを切り替え，カメラ信号を選択することとした．

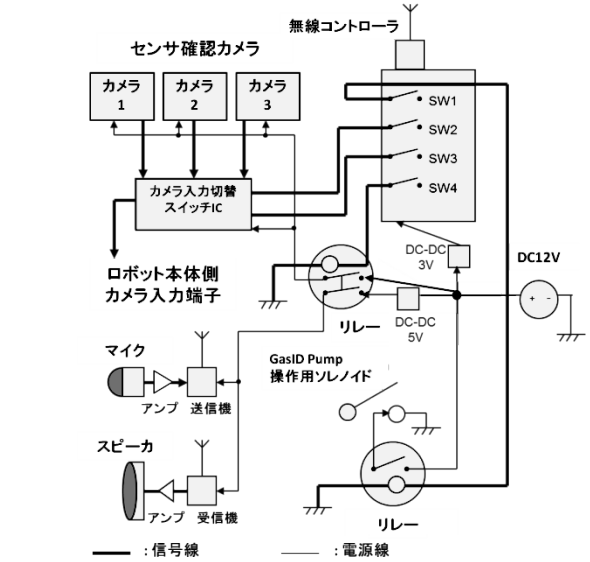


図 8　UMRS2010 のセンサシステム（ロボット側）

図 8 中の無線コントローラは受信機とスイッチ回路を有しており，ロボット操作側（送信側）のコントローラから送られてくる信号により，スイッチ 1～4 を作動させる．例えば，送信側のコントローラにてスイッチ 1 を ON にすると受信側のコントローラのスイッチ 1 が ON となる．図のシステムにおいてスイッチ 1 では気体収集装置のボタン操作用ソレノイドを作動させる．またスイッチ 2，3 では，3 台分のカメラ信号から 1 台分の信号を選択する．さらにスイッチ 4 では 3 台のカメラと音声通信システムの電源を ON-OFF する．

５．５　センサユニットの概要　センサをロボットデッキに固定するホルダーとカメラ固定用ホルダーを試作した．また前節で述べたセンサシステムと，それをロボット操作側から制御するためのコントローラボックスも製作した．ロボットに搭載したセンサユニットの外観を図 9 に示す．試作したセンサユニットは 2 段構成で，下段には音声通信システム用のスピーカーとマイクを一体にしたボックス，センサシステム回路基板・音声通信装置（送受信機）・音声用アンプを収納したボックス，ユニット用バッテリを設置している．上段には試作した各種センサ用ホルダーとセンサ確認用カメラを設置している．

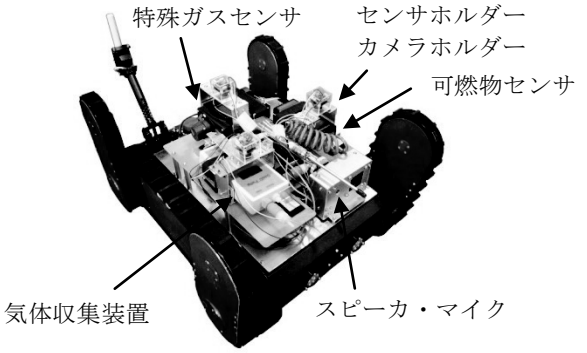


図 9　UMRS2010 のセンサユニット

６．センサユニットの動作確認

試作したセンサユニットが，コントローラボックスの操作により正常に動作するかどうかを確認した．その結果，センサ確認用カメラの切り替え等，全てにおいて正常に動作した．しかし，センサ確認用の LED 照明において問題点が確認された．図 10 にロボット操作卓の画面に表示された可燃物センサの液晶画面を示す．

図に示すように，LED 照明の反射によりセンサ液晶画面の右側がぼやけており，情報の確認が困難であった．この問題を解消するには，LED 照明を現状よりも液晶画面から遠ざけた位置に設置するか，LED 照明に半透明のカバーを設置して半間接照明とする方法が考えられる．前者の場合，画面への照明の反射を抑えることができたとしても，照明から最も離れた位置では



図 10　操作卓上での可燃物センサ液晶画面

照度が低下して，液晶表示の確認が困難となると考えられる．一方後者の場合は，画面への光の反射を抑えることができ，また光を拡散するため現状の直接照明よりも照度を均一にできると考えられる. ただし, LED 照明は使用中高温になるため，カバーには耐熱性のある半透明の材料を使用する必要があると考える．これらは今後，検証試験を行って評価する必要がある．

７．音声通信システムの評価

センサユニットに搭載している音声通信システムについて性能評価するため，スピーカーから出力される音の周波数毎の音圧レベルを測定した．

７．１　測定方法　コントローラボックスのマイク端子にファンクションジェネレータ（以降，FG という）の出力信号を入力し，音声通信装置（送受信機）およびアンプを介してスピーカーから音を出力させる．スピーカーの中心軸上に，1m の距離をとって騒音計を設置し，FG で出力信号の周波数を変化させながら周波数毎の音圧レベルを読み取って記録を行った．なお測定周波数範囲は, 5.1(4)で示した音声通信装置の仕様から 50Hz～15kHz とした．また音圧レベルは，A 特性により測定した．ここで A 特性は，測定した音圧レベルを人間の聴覚特性に近似させるための特性であり，このフィルタをかけることで測定値を人の耳に聞こえる音の大きさで表すことができる[(4)].

７．２　測定結果および考察　図 11 に測定結果を示す．この結果から，1kHz～4kHz までは音圧レベルがほぼ一定であり，1kHz 以下および 4kHz 以上の周波数帯では音圧レベルが低下していることがわかる．この値は A 特性で測定したものであるので，音圧レベルが低下している周波数帯では人間の耳においても音が小さく聞こえているということになる．人間の日常話声の周波数はおおよそ 100Hz～1kHz の間であるが，これは人間の耳の感度が低下している音域である．測定結果から，その音域での最小音圧レベルは約 50dB であることがわかる．一般に，普通の声で話す人間から 1～2m の位置での音圧レベルは 60dB 前後であるから，音圧レベルが 60dB 以下の音域（200Hz 以下）においては音がより小さく聞こえることになる．実際に音声通信システムを使用する際も 100Hz～1kHz 付近の音域を中心に扱うと考えられるため，スピーカーを通して聞こえる音声がよく聞き取れず実用性に欠ける時にはアンプにより全体の音量を上げるか，イコライザにより低音域を増幅させる必要があると考える．

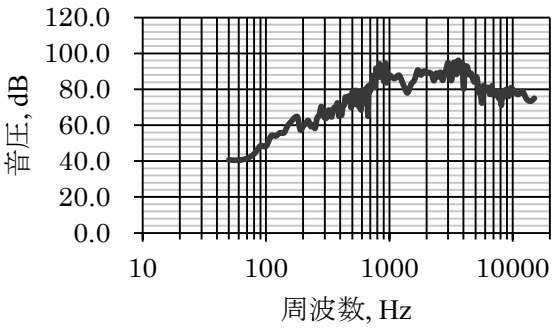


図 11　音声通信システムの周波数特性（A 特性）

８．おわりに

本研究では，IRS を中心に開発されたレスキューロボット UMRS2009 を基に，新たに爆発しにくい性能を持たせたロボットを開発するため，これまでロボット車体各部の設計変更を行い，本研究のベースとなるロボット UMRS2010 を製作した．また，このロボットに災害現場で環境センシングを行わせるため，各種消防探査センサや音声通信システムをロボットデッキに搭載して，無線遠隔操作でセンサの情報を確認できるセンサユニットのプロトタイプを開発した．しかしセンサユニットにおいて問題点が確認されたため，これに対する改善策を示した．消防局での試験運用に際しては，このプロトタイプを基に焼付け基板等をおこし，信頼性を増したものを消防局で使用してもらうことを考えている．

本研究で開発した 2010 型は爆発しにくい性能を持つため，災害現場での使用に際して，2009 型よりも安全性が高まっていると考えられる. この 2010 型にセンサユニットを搭載することで，実運用配備に向けたロボットにより近づけることができると考える．

参考文献

(1) Shigeru Kobayashi, et al.: “Development of a Door Opening System on Rescue Robot for Search UMRS-2007”, Proceedings of The Society of Instrument and Control Engineers (SICE) Annual Conference 2008, pp.2062-2065, 2008

(2) Toshi Takamori, et al.: “Development of a UMRS (Utility Mobile Robot for Search) and a Searching System for Casualties Using a Cellphone”, System and Human Science For Safety, Security and Dependability, ELSEVIER, CHAPTER 26, pp.353-366, 2005

(3) 鈴木健二 :「国際標準に沿った“防爆”事始め(Ⅰ)」, 電気学会誌, Vol.125, No.8, pp.510-511, 2005

(4) 社団法人　日本音響学会 :「新版　音響用語辞典」, コロナ社, p.165, 2003

レスキューロボットUMRS2010走行系の設計と性能評価

極樂地 恭平[*]　八島 裕紀[*]　小林 滋[**]　藤長 大祐[***]　高森 年[***]

Design of Running System and Performance Evaluation for Rescue Robot UMRS2010

Kyohei GOKURAKUJI[*]　Yuki YASHIMA[*]　Shigeru KOBAYASHI[**]

Daisuke FUJINAGA[***]　Toshi TAKAMORI[***]

ABSTRUCT

Rescue robot searches for victims in a man-made disaster and a natural calamity, and does efficient rescue activity. So it is demanded to correspond to unknown danger. Especially, if the rescue robot does a search activity in the combustible gases, the robot may ignite by sparks from motors, electrostatic sparks and friction sparks. But any countermeasures to those robot explosions have not been taken systematically yet. One of my research purposes is to remove the causes of the explosion, and we have produced the prototype rescue robot that introduces the explosion-proof construction. Also we evaluated the performance of the robot. The robot has brushless DC motor and doesn't spark from brushes. The surface of the robot is coated a paint which prevents to store static electricity in it. The bottom of the robot suppresses friction sparks by using the resin. We did various evaluation tests and evaluated maneuverability of the robot. As a result, we confirmed that UMRS2010 was maintaining the fundamental performance.

Keywords: UMRS, rescue robot, explosion-proof, performance evaluation

1. はじめに

レスキューロボットは，地震などの天災ばかりでなく，テロリズムなどの人災においても被害をできる限り小さくし，かつ効率的な活動を行うためのものである．そのため，レスキューロボットはレスキュー隊員の探索活動に先立ち，危険と思われる場所に入っていき，人命発見や環境確認を行う必要がある．したがって，未知の危険性にも対応することが求められる．特に，災害現場において，可燃性ガスが充満しているような悪環境下で探索活動を行う場合，ロボットから発せられる火花によってロボット自体が発火し，爆発を引き起こしてしまう危険性が考えられるが，それらの対応はまだ体系的には行われていない．そのため，ロボット自体が発する火花によって爆発を引き起こしてしまう危険を少なくし，より安全に救助活動を行えるレスキューロボットを開発することが求められる．

本研究室では，これまでIRS(国際レスキューシステム研究機構)にてレスキューロボット UMRS(Utility Mobile Robot for Search)シリーズ[(1)]の開発に参画してきた．このUMRSシリーズは，災害時の建物や地下街などで被災者の発見や，現場の環境確認，情報収集を行うためのレスキューロボットとして開発されている．

本研究では，このUMRSシリーズ開発の延長として，災害現場の外部雰囲気と，ロボット自体が発する火花による爆発のリスクをより低減するため，これまでのUMRSシリーズには無かった「防爆構造」を取り入れたレスキューロボットUMRS2010の開発を行った．なおUMRS2010は，以前開発されたレスキューロボットUMRS2009の車体形状を基に設計・製作を行った．さ

*　専攻科　機械システム工学専攻
**　機械工学科　教授
***　国際レスキューシステム研究機構

らに開発したロボットで運動能力を評価するため，階段や段差など基本的な障害物を走破する各種標準的な走行試験を行い，ロボットの運動能力を評価した．

2. 防爆について

爆発は，爆発性雰囲気と着火源が同時に存在することにより発生する．そのため，爆発性雰囲気か着火源のどちらか一方しか存在しない場合，爆発は起こらない．また，可燃性ガスの濃度が爆発限界にない場合も爆発は起こらず，そのような環境は爆発性雰囲気とは言わない．したがって，爆発性雰囲気の生成を排除するか，着火源となり得る電気エネルギーの発生を制御するかにより，防爆性能が確保されるというのが防爆の基本概念である[(2)]．

UMRS2010 ではロボットから火花が出る問題に対して，次に示す 3 つの対策を行った．なお，ここで言う防爆構造とは，爆発リスクをできるだけ低減させるための各種対策を施した構造を指し，”爆発しない”構造ではなく，”爆発しにくい”構造の事を言っている．

2.1 モータ火花対策　UMRS2010 では走行中，モータから火花を出さないように，走行用モータにブラシレス DC モータを使用した．これまでの UMRS シリーズでは走行用モータに DC モータが使用されていたが，DC モータの特性上，モータが駆動している時に整流子とブラシ間の摩擦により，火花や熱を生じてしまう．この状態で救助活動を行うと，可燃性ガスに引火し，爆発を引き起こす危険がある．一方，ブラシレス DC モータはブラシ，整流子がないためモータ回転時に接触部分がない．したがって，ブラシレス DC モータではこのブラシ火花による可燃性ガスへの引火で爆発を引き起こす心配がない．ただし，電子回路を内蔵しているため，モータが大きくなるという欠点がある．

2.2 静電気火花対策　これまでの UMRS シリーズでは，ロボットボディに静電気に対する対策が施されていなかった．そのため，探索活動を行う際に静電気が帯電し，外部物体との接触で発生する静電気火花により，爆発を引き起こす危険が考えられた．そこで静電気の対策として，UMRS2010 ではロボット表面の塗装に導電性塗料を使用し，静電気の発生を抑えた．

2.3 摩擦火花対策　レスキューロボットが，地震などが起きた災害現場で活動を行っている場合，周囲の瓦礫や破片など様々なものと接触して擦り合った際に，火花が発生してしまう可能性がある．特にロボット走行中は，平坦な道があまりないと考えられるため，ロボット底部が最も周囲の物体と接触し，摩擦火花を引き起こす危険性が高い．UMRS2010 では車体の材料として CFRP を使用しているため，この状態で探索活動を行った場合，周囲の物体と接触した際に火花を散らし，爆発を誘発してしまう可能性がある．したがって UMRS2010 には，周囲の物体と接触しやすいと考えられる車体底部に，摩擦火花が発生しにくい樹脂材料として超高分子量ポリエチレンプレートを使用した．

3. 走行系の設計

前章で述べたように，これまでの UMRS シリーズとは違い，UMRS2010 では走行用モータ，フリッパ用モータにブラシレス DC モータを使用した．それに伴い，UMRS2010 では新たなモータに合わせて，その仕様条件に見合うように各部品の選定や，モータハウジング等を設計する必要があった．そのため，UMRS2010 を製作するにあたり，走行系を主としてトルク計算や部品の設計・製作を行った．

3.1 走行系のトルク計算　UMRS2010 の走行系のトルク計算では，UMRS2009 の重量や車輪半径の寸法等を参考にした．UMRS2009 はロボット重量が，23kg であったが今回はブラシレス DC モータを使用したことから，UMRS2009 よりも重量がこのモータや関連部分にて重くなることが予想されたため，完成した UMRS2010 の重量が約 36kg になると仮定し，トルク計算を行った．

ロボットが坂で静止しているときには，Fig.1 に示す力が働いている．また，坂を登るためには，走行用モータのトルクが十分であることはもちろん，走行用ベルトと地面との静止摩擦力が，ロボットが重力によって斜面を滑り落ちる力より大きい必要がある．ロボットが斜面を登っている際に必要なトルク T は，

$$T = \frac{R \cdot M \cdot g \cdot \sin\theta}{r} \tag{1}$$

T:トルク[Nm]　　r:歯車とプーリによる総減速比
M:車体重量[kg]　　g:重力加速度[m/s^2]
R:車輪半径[m]　　θ:坂の傾斜角度[deg]

で求めることができる[(3)]．また，UMRS2010 には走行用モータが 2 つあるので，モータ 1 つあたりに必要なトルクは，

$$T = \frac{R \cdot M \cdot g \cdot \sin\theta}{r} \cdot \frac{1}{2} \tag{2}$$

で求めることができる．ここで，モータにトルクが最も必要な場合を考える．ロボットが自重を垂直に引き上げる力がある(θ=90°)とすると，モータ 1 つあたりにかかるトルクは，UMRS2009 のデータから走行用車輪の半径を R=0.075m とし，また減速比を r=14 と設定した場合，式(2)から，

$$T = \frac{0.075 \cdot 36 \cdot 9.8 \cdot \sin 90°}{14} \cdot \frac{1}{2} = 0.95[\mathrm{Nm}] \tag{3}$$

となる．この値から，今回は特注仕様のモータとして，マッスル株式会社の CM2-60A20A というモータを使用した．このモータではロボットの使用条件に合わせて，モータメーカにて巻き線の巻き方を変更することができたため，Fig.2 に示すように通常のモータトルクを高出力化させることで，必要なモータトルクを満た

す性能を得ることができた.

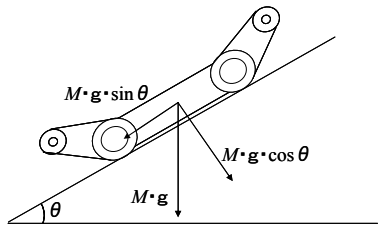


Fig.1　登坂中ロボットにかかる力

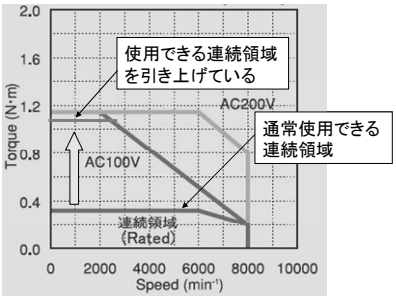


Fig.2　モータ特性

3.2　走行機構部の設計製作　　車体内部の構造は，ロボット重量が重くなることや，ロボットの携行性の問題から，車体をできるだけコンパクトに作らなければならなかった．そのため，限られたスペース内で，使用するモータの仕様条件を満たす減速比になるように小歯車，大歯車の選定，また，プーリ等各部品の選定を行った．さらにこれらの製品に合うように，モータから動輪が取り付けられている走行軸に至る伝達機構とモータハウジングの設計を行った．また，プーリに使用するためのプーリベルトは使用中に伝達動力と巻きつけ角の関係から，場合により歯飛びを起こし，走行用モータからの出力をうまく伝達できない可能性が考えられた．そのためベルトを張るためのテンショナー部の設計も行った．走行系周りにおけるモータからのトルク伝達機構部の構成イラスト図を Fig.3 に示す.

走行用モータ及びフリッパ用モータはロボットの左右に 1 つずつ搭載されており，右側と左側の走行機構を別々に駆動させることで，信地旋回を行うことができる.

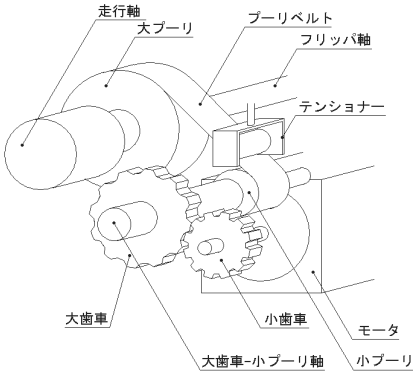


Fig.3　走行動力伝達系の構成

4.　UMRS2010 の概要

レスキューロボット UMRS2010 の外観図を Fig.4 に，主な仕様を Table 1 に示す．UMRS2010 は災害後のビルなど閉鎖された空間に進入し，人命，環境などを探査することが目的である．レスキュー隊員 1 人でもロボットを背負って災害現場付近の安全な場所まで急行し，遠隔操作で災害現場の探索活動を行うことができる．また，内部部品を固定するために施された車体各部の貫通穴には，ネジを通した後に接着剤による密封を行った．これによりネジの緩み防止と共に，防塵防水対策の強固，ならびに外部雰囲気の内部への進入を防いだ.

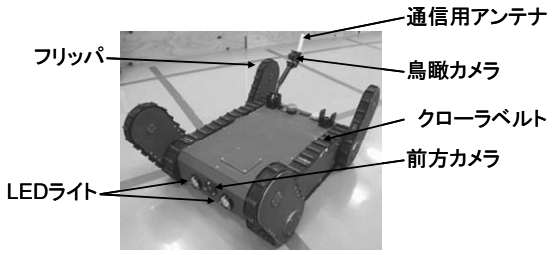


Fig.4　UMRS2010 の外観図

Table 1　UMRS2010 の主な仕様

外形寸法	W512×H450×L585[mm]
重量	32[kg]
最高速度	5[km/h]
電源	Li-Fe バッテリ(DC100V)
防塵防水対策	IP64

5.　性能評価試験

5.1　研究目的　　レスキューロボットの性能評価の方法として，NIST(アメリカ国立標準技術研究所)が提唱している標準テスト方法[4]がある．この標準テスト方法の目的は，レスキューロボットの総合能力を定量化して測定することである．IRS の実験室では，この NIST により提唱されている標準テストに基づいて運動能力を評価するため，階段，段差，傾斜，対称ステップフィールドにおけるロボットの運動能力評価試験が行えるテストフィールドが用意されている．UMRS2010 に対してこれら 4 つの評価試験を行った．なお UMRS2010 の試験では，それぞれの評価試験を行う前に 2 周練習を行ってから試験を行った．また，試験結果の比較対象として，UMRS2009 の試験結果を参考にした．ただし，本研究中に東日本大震災が発生したため，UMRS2009 の試験用機材が震災の対応用に緊急改造しなければならなかった．この影響により，UMRS2009 原型での試験時間を十分に取れなかったため，各評価実験も短縮した形で実施して，比較のみに使用できる形とした．そのため，UMRS2009 の試験結果は，階段，段差が 3 周，傾斜が 10 周，対称ステップ

フィールドが 1 周での試験結果となった.

5.2 性能評価試験(階段)

5.2.1 試験方法 この試験の目的は，ロボットの階段昇降能力を定量的に評価することである．IRS では 35°，40°，そして最大 45°の傾斜を持つ階段が用意されており，表面材質は木材である(今回行った全てのテストフィールドの材質は同様に木材が使用されている)．階段の形状は蹴上・踏面共に 20cm となっており，滑り止めはない．IRS のテストフィールドに用意されている階段を Fig.5 に示す．階段昇降におけるロボットの性能評価は以下の手順で行う．

(1) ロボットを階段前のテスト開始位置に置く．
(2) ロボットを動かしたらタイマーを起動し，往復時間を測定する．
(3) この往復時間の測定を 10 回行う．

なお，階段における走行試験は，ロボットが登れる最大の傾斜を持つ階段で行う．



Fig.5 階段の形状

5.2.2 階段昇降特性 ロボットが階段を昇降しているときの姿勢は，Fig.1 に示すように平滑斜面を走行している場合と同一の姿勢となる．そのため，式(2)から 45°の階段を登る時に必要なトルクは，0.59Nm となる．またロボットが階段を安定して昇降するためには，Fig.6 のように階段とロボットの走行ベルトが 3 点で接していることが望ましい．また，階段昇降中は階段と走行ベルトの摩擦力よりも，階段の角部と走行ベルトの歯のかみ合いが重要となる．したがって，走行中の振動等により階段と走行ベルトのかみ合いが浅くなり，ベルトの歯が階段から滑り落ちることがない限り，階段を走行することができる．

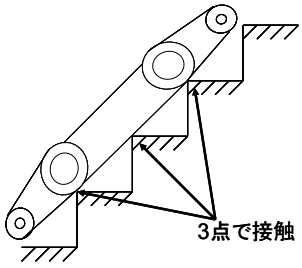


Fig.6 理想的な階段昇降姿勢

5.2.3 試験結果及び考察 UMRS2010 では 45°の階段を登れたため，この階段にて試験を行った．階段昇降の試験結果を Table 2 に示す．UMRS2009 と UMRS2010 の平均時間を比較すると，UMRS2010 の方が往復時間はやや早いが，両方の有意差はあるとは言えない．そのため階段昇降能力において，UMRS2009 と同等の運動能力を維持できたと考えられる．

Table 2 階段昇降の試験結果

	往復時間	平均時間
UMRS2010	12 分 00 分 57(10 往復)	1 分 12 秒 057
UMRS2009	3 分 41 秒(3 往復)	1 分 14 秒

5.3 性能評価試験(段差)

5.3.1 試験方法 この試験の目的は，ロボットの段差を登って超えていく能力を定量的に評価することである．IRS のテストフィールドに用意されている段差を Fig.7 に示す．この評価試験は，円筒の外周方向に自由に回転するプラスチック製のパイプ(内径 10cm, 外径 11.4cm)を使用し，段差を登り，降りてくるまでの時間を測る．パイプの本数は変更することができ，パイプをセットすることで，段差の高さを変更することが可能である．段差能力におけるロボットの性能評価は以下の手順で行う．

(1) テストフィールドに設置するパイプ本数を調整し，試験を行う段差高さにする．
(2) ロボットを段差前のテスト開始位置に置く．
(3) ロボットを動かしたらタイマーを起動し，往復時間を測定する．
(4) この往復時間の測定を 10 回行う．

なお，この試験ではロボットが乗り越えられるパイプの最大本数で試験を行う．



Fig.7 段差の形状

5.3.2 段差昇降特性 ロボットが段差を乗り越えるには，ロボットに装着されているフリッパを駆使して段差を登る必要がある．そのためには，フリッパによりロボット本体を Fig.8 のように持ち上げなければならない．ロボットが走行中にフリッパの回転角度を維持するために必要な最大トルク T_fは，フリッパ 4 本(フリッパ用モータ 2 つ)で車体を支えている時に発生する．UMRS2010 は車体重量 M=32kg，フリッパの軸間距離 L=0.191m, フリッパ減速比 r_f=120 であるため，

$$T_f = \frac{M}{2} \times g \times L \times \frac{1}{r_f} = \frac{32}{2} \times 9.81 \times 0.191 \times \frac{1}{120} = 0.25[\mathrm{Nm}] \quad (4)$$

となる．フリッパ用モータの定格トルクは 0.32Nm で

あるため，段差を登る際のトルクは十分であることがわかる．また，段差を登ることができる最大高さは，ロボット重心位置が段差上面の上にあることが必要となる．Fig.8 から，ロボットが乗り越えられる最大高さ H を求める．まず，地面から重心までの距離 h_1 は，

$$h_2 = \frac{1}{2}L_1 \sin\theta + L_2 \tag{5}$$

となる．段差上面から重心までの距離 h_2 は，

$$h_2 = \frac{R}{\cos\theta} \tag{6}$$

となる．したがって，乗り越え可能な高さ H は，

$$H = h_1 - h_2 = \frac{1}{2}L_1 \sin\theta + L_2 - \frac{R}{\cos\theta} \tag{7}$$

となる．上式に UMRS2010 の寸法 L_1=0.430m，L_2= 0.273m，R= 0.075m，および θ =50°を代入すると，H= 0.32m となる．なお θ =50°という値は，θ = 50°付近で最も乗り越え可能な高さが大きくなったためである．

段差昇降試験に用いたパイプ 1 本あたりの外径は 11.4cm であるため，

$$22.8\text{cm} > H = 32\text{cm} > 34.2\text{cm} \tag{8}$$

となり，理論上パイプ 2 本の高さまで段差を乗り越えられることがわかる．

UMRS2010 の段差乗り越え最大高さは H=0.32m であることがわかったため，実際に UMRS2010 の乗り越え可能な段差高さを調査した．パイプを 1 本ずつ加えていき，段差高さを高くした結果，パイプ 2 本では段差の昇降が可能であり，パイプ 3 本では段差の乗り越えが不可能であった．このことから，実際の段差昇降特性が式(8)を満たしていることがわかった．

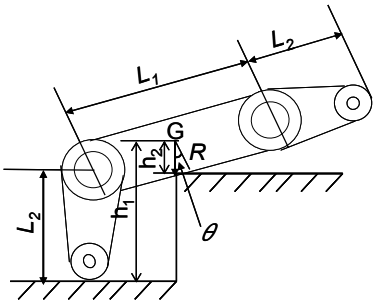


Fig.8　段差昇降図

5.3.3　試験結果及び考察　パイプ 2 本の段差高さにて段差昇降を行った試験結果を Table 3 に示す．段差昇降の試験結果でも，階段昇降の試験結果と同様に UMRS2009 と UMRS2010 で往復時間に大きな差異は確認されなかった．そのため，UMRS2010 の段差昇降における運動能力も UMRS2009 と同等の運動能力を維持していることが確認できた．ただし，UMRS2009 より重量が重くなったことで段差を降りる際の衝撃力が強くなったため，より丁寧にフリッパを用いて，段差を降りる際の衝撃を和らげる必要がある．

Table 3　段差昇降の試験結果

	往復時間	平均時間
UMRS2010	7 分 58 秒 42(10 往復)	47 秒 842
UMRS2009	2 分 28 秒(3 往復)	49 秒

5.4　性能評価試験(傾斜)

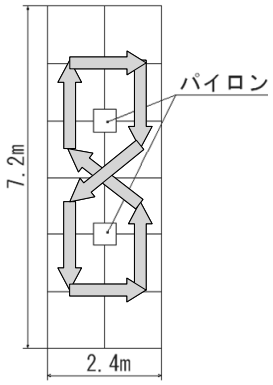
5.4.1　試験方法　この試験の目的は傾斜面におけるロボットの走行能力を定量的に評価することである．

テストフィールドの形状を Fig.9(a)に示す．このテストフィールドの傾斜は 15°となっており，フィールドの幅は 2.4m，奥行きは 7.2m となっている．また，試験は Fig.9(b)に示す矢印のように，2 つのパイロンにより 8 の字状の経路を辿り，ロボットの走行を行う．傾斜面におけるロボットの性能評価は以下のような手順で行う．

(1) ロボットを試験開始位置に置く．
(2) ロボットを動かしたらタイマーを起動し，往復時間を測定する．
(3) 全ての反復が終了(試験コースを 10 周)するまで 8 の字状に経路を横断し続ける．



(a) 傾斜の形状



(b) 走行ルート

Fig.9　テストフィールド

5.4.2　試験結果及び考察　傾斜走行の試験結果を Table 4 に示す．傾斜走行における運動能力では UMRS2009 の試験結果に比べ，22 秒程度，往復時間が遅くなっており運動能力の低下が見られた．原因として考えられるのは，1 つ目に，UMRS2010 を傾斜上で信地旋回を行った際に，ロボットが傾斜を滑り落ち目標の場所まで移動することが難しかったことが挙げられる．2 つ目に，操作者の習熟度が関連する可能性が考えられる．特に傾斜は階段や段差に比べテストフィールドが複雑なため，操作者の技量が特に重要となる．NIST における試験では，ロボット操作者の，操縦における習熟度を除外するような指標がないため，操作者の習熟度によって試験時間が大きく変化する可能性がある．これらの理由のため，UMRS2009 に比べ 22 秒程度，試験終了時間に差異が生じたと考えられる．

Table 4　傾斜走行の試験結果

	往復時間	平均時間
UMRS2010	16 分 48 秒 20(10 往復)	1 分 40 秒 82
UMRS2009	13 分 00 秒(10 往復)	1 分 18 秒

5.5 性能評価試験(対称ステップフィールド)

5.5.1　試験方法　この試験の目的は，対称ステップフィールドにおける走行能力を定量的に評価することである．このテストフィールドは，Fig.10 のように 10cm 四方で長さが異なる木材(10cm，20cm，30cm，40cm，50cm)で構成されている．また，テストフィールドの大きさは傾斜走行試験のフィールドと同様で幅 2.4m，奥行き 7.2m となっており，試験方法も同様に，2 つのパイロンにより 8 の字状の経路を辿り，ロボットの走行を行う．対称ステップフィールドにおけるロボットの性能評価は以下のような手順で行う．

(1) ロボットを試験開始位置に置く．
(2) ロボットを動かしたらタイマーを起動し，往復時間を測定する．
(3) 全ての反復が終了(試験コースを 10 周)するまで 8 の字状に経路を横断し続ける．

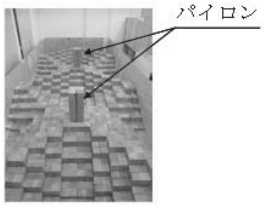


Fig.10　対称ステップフィールドの形状

5.5.2　試験結果及び考察

対称ステップフィールドの試験結果を Table 5 に示す．対称ステップフィールドにおける運動能力評価試験では，UMRS2009 に比べ，UMRS2010 では約 13 秒往復時間が遅くなっており，運動能力の低下が見られた．原因としては，傾斜走行試験と同様に，操作者の習熟度が関連する可能性が考えられる．対称ステップフィールドもフィールドが複雑なため，操作者の技量が特に重要となり，UMRS2009 と UMRS2010 の結果に差が出た可能性がある．また，UMRS2009 はロボット重量が 23kg であるのに対し，今回製作した UMRS2010 は防爆構造を施すためにブラシレス DC モータ(1 つあたり 1.7kg)を使用したため，モータ重量やモータ周りのハウジング等の影響でロボット重量が 32kg になった．このテストフィールドは凹凸が激しいため，重量の大きい UMRS2010 は UMRS2009 に比べ，ロボット走行中に，より強い衝撃が与えられることが考えられた．例えば，50cm の木材から 40cm や 30cm の木材へ走行を行った場合，フリッパを用いて衝撃をうまく和らげることができなければロボットに強い衝撃を与えてしまう．そのため，重量が大きい UMRS2010 では衝撃力が強くなることから，車体内部の各部品への負荷を軽減させることが必要であると考えられたため，より丁寧な操縦が必要となった．そして，車体も UMRS2009 より一回り大きくなったため，小回りがしにくくなったことも結果に差が出た原因と考えられる．

Table 5　対称ステップフィールド走行の試験結果

	往復時間	平均時間
UMRS2010	56 分 33 秒 79(10 往復)	5 分 39 秒 379
UMRS2009	5 分 26 秒(1 往復)	5 分 26 秒

6.　おわりに

今回，爆発の危険性を低減したレスキューロボット UMRS2010 を開発し，運動能力について評価を行った．

UMRS2010 の防爆構造では，新たにブラシレス DC モータを使用し，モータからの火花の発生を防いだ．また，ロボット表面には導電性塗料を使用することで，静電気火花が出るリスクを低減した．加えて，ロボットが走行中に，瓦礫等に最も接触しやすいロボット底部には，超高分子量ポリエチレンプレートを用いることで，摩擦火花の発生を抑えることができた．

UMRS2010 の走行性能評価では，階段，段差，傾斜，対称ステップフィールドの性能評価試験を行った．その結果，UMRS2009 の性能評価試験結果と比べて，階段，段差では大きな変化が見られなかった．傾斜，対称ステップフィールドでは，UMRS2009 に対して若干の性能の低下が見られた．これは，傾斜，対称ステップフィールドの場合，テストフィールドが複雑で障害物となるものが多かったため，より重量の重い UMRS2010 では衝撃が強くなってしまうことや，UMRS2009 に比べ，円滑な走行が難しかったことが原因であると考えられた．しかし，走行不能に陥ることや UMRS2009 と大幅な時間変化がなかったことから，基本的な運動性能は維持していることが確認された．

参考文献

(1)Shigeru Kobayashi et al.: “Development of a Door Opening System on Rescue Robot for Search UMRS-2007”, Proceedings of The Society of Instrument and Control Engineers (SICE) Annual Conference 2008, pp.2062-2065, 2008.
(2)鈴木健二: “国際標準に沿った”防爆”事始め(Ⅰ)”, 電気学会誌 Vol.125 (2005 年 8 月号), pp.510-511, 2005.
(3)楠本正史: “レスキューロボットの走破性向上に関する研究”, 神戸市立工業高等専門学校専攻科 特別研究論文, pp.8-11, 2007.
(4)Adam Jacoff, et al.: “Standard Test Methods For Response Robots”, NIST, pp.36-39, 2011.

変位出力を用いた二次のプロパーなコントローラによる柔軟宇宙構造物の位置と姿勢制御

河野 佑*，小林 洋二**

Position and Attitude Control of Flexible Space Structures by a Second Order Proper Controller Using Displacement Output

Yu KAWANO*，Yohji KOBAYASHI**

ABSTRACT

This paper considers robust control synthesis for flexible space structures with collocated sensors and actuators. A second order proper controller is introduced at the input channel to control position and attitude of the structures. It is shown that the closed-loop system becomes robustly stable against uncertainty of characteristics in the structures by choosing the controller parameters appropriately.

Keywords: large space structures, second order controller, proper controller, displacement feedback

1. はじめに

宇宙太陽光発電衛星 [1] のような大型柔軟宇宙構造物の位置と姿勢を制御するための有効な手法の一つとして，センサとアクチュエータを同位置，同方向に配置するセンサ／アクチュエータ・コロケーションのもとで変位と速度の静的フィードバックを行う Direct Velocity and Displacement Feedback(DVDFB)[2] が提案されている．DVDFB は，特性パラメータに不確かさをもつ柔軟宇宙構造物の閉ループシステムをロバスト安定化し，ある二次形式評価関数に対して最適レギュレータを構成するなど優れた制御性能をもっている．しかしながら，DVDFB を実装するためには，変位センサに加えて速度センサが必要となり，このことはコストと信頼性の面から望ましくない．

この問題を解決するために文献 3) では，変位センサから得られる情報のみを用いて，一次のプロパーな伝達関数で表されるコントローラによって DVDFB の特性を近似的に実現し，構造物の特性パラメータの不確かさに対して閉ループシステムをロバスト安定化する方法が提案された．本稿ではこの方法を拡張し，二次のプロパーなコントローラを用いて柔軟宇宙構造物の閉ループシステムをロバスト安定化する方法を述べる．

2. 制御対象の記述

柔軟宇宙構造物の運動は，つぎの二階微分方程式で表される．

$$M\ddot{q}(t) + D\dot{q}(t) + Kq(t) = Lu(t) \tag{1}$$

ここで，$q(t) \in \Re^n$ は変位／角変位を表すベクトル，$u(t) \in \Re^r$ は力／トルクを表す操作入力ベクトル，M, D, $K \in \Re^{n\times n}$ はそれぞれ質量，減衰，剛性を表す対称行列で，M は正定行列，D, K は半正定行列である．D, K の半正定性は宇宙空間における剛体モードの存在によるものである．

(1) 式において行列 $L \in \Re^{n\times r}$ は，宇宙構造物への入力の伝わり方を示し，アクチュエータの配置によって決まる．ここでは，DVDFB の前提条件と同様にセンサ／アクチュエータ・コロケーションが実現されているものとする．このとき変位出力 $y(t) \in \Re^r$ は次式で表される．

$$y(t) = L^T q(t) \tag{2}$$

この係数行列 L^T は操作入力 $u(t)$ の係数行列 L と転置の関係になる．なお，(1)，(2) 式の宇宙構造物について剛体モードは可制御かつ可観測であると仮定し，次式が成り立つとする．

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} K & L \end{bmatrix} = \mathrm{rank}\begin{bmatrix} D & L \end{bmatrix} = n \tag{3}$$

3. 二次のプロパーなコントローラによる閉ループシステムのロバスト安定化

(1)，(2) 式の構造物への入力を次式の入出力関係で表されるコントローラによって与える．

$$u(s) = -\frac{\gamma(s+\alpha_1)(s+\alpha_2)}{(s+\beta_1)(s+\beta_2)} Ry(s) \tag{4}$$

ただし，α_1, α_2, β_1, β_2, γ はそれぞれ正のスカラ，$R \in \Re^{r\times r}$ は任意の正定対称行列である．

* 機械システム工学専攻 (2008 年度 修了)
** 機械工学科 教授

(1)，(2) 式の構造物と (4) 式のコントローラによって構成される閉ループシステムは次式で記述される．

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \tag{5}$$
$$x(t) = \left[\begin{array}{cccc} z(t)^T & \dot{z}(t)^T & \ddot{z}(t)^T & \dddot{z}(t)^T \end{array}\right]^T$$
$$A = \left[\begin{array}{cccc} 0 & I_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_n \\ -M^{-1}\bar{A}_4 & -M^{-1}\bar{A}_3 & -M^{-1}\bar{A}_2 & -M^{-1}\bar{A}_1 \end{array}\right]$$

ただし，$z(t) \in \Re^n$ はベクトルであり，行列 $\bar{A}_1$，$\bar{A}_2$，$\bar{A}_3$，$\bar{A}_4$ は次式で与えられる．

$$\bar{A}_1 = D + (\beta_1+\beta_2)M$$
$$\bar{A}_2 = K + (\beta_1+\beta_2)D + \beta_1\beta_2 M + \gamma LRL^T$$
$$\bar{A}_3 = (\beta_1+\beta_2)K + \beta_1\beta_2 D + \gamma(\alpha_1+\alpha_2)LRL^T$$
$$\bar{A}_4 = \beta_1\beta_2 K + \gamma\alpha_1\alpha_2 LRL^T$$

なお，これらの行列中の $aD + bLRL^T$，$aK + bLRL^T$ (a, b は正のスカラ) なる形の行列は，(3) 式の仮定より正定対称になる．

(5) 式の閉ループシステムに対してつぎの定理が成り立つ．

定理 1　(4) 式のコントローラのパラメータが次式を満たすとき，(5) 式の閉ループシステムの原点は漸近安定である．

$$\beta_1\beta_2 - \alpha_1\alpha_2 \geq 0 \tag{6}$$
$$\beta_1 + \beta_2 - \alpha_1 - \alpha_2 \geq 0 \tag{7}$$
$$\alpha_1\beta_1(\beta_2 - \alpha_2) + \alpha_2\beta_2(\beta_1 - \alpha_1) > 0 \tag{8}$$

（証明）　(5) 式の閉ループシステムに対する Lyapunov 方程式

$$PA + A^T P = -Q \tag{9}$$

において，行列 Q をつぎのように与える．

$$Q = \left[\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{array}\right] \tag{10}$$
$$Q_{22} = 2\beta_1^2\beta_2^2 D + 2\gamma\{\alpha_1\beta_1(\beta_2 - \alpha_2) + \alpha_2\beta_2(\beta_1 - \alpha_1)\}LRL^T$$
$$Q_{33} = 2(\beta_1^2 + \beta_2^2)D + 2\gamma(\beta_1 + \beta_2 - \alpha_1 - \alpha_2)LRL^T$$
$$Q_{44} = 2D$$

このとき，Lyapunov 方程式の解 P は次式になる．

$$P = \left[\begin{array}{cccc} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ P_{12}^T & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{13}^T & P_{23}^T & P_{33} & P_{34} \\ 0 & P_{24}^T & P_{34}^T & P_{44} \end{array}\right] \tag{11}$$

$$P_{11} = \beta_1\beta_2(\beta_1\beta_2 K + \gamma\alpha_1\alpha_2 LRL^T)$$
$$P_{12} = (\beta_1 + \beta_2)(\beta_1\beta_2 K + \gamma\alpha_1\alpha_2 LRL^T)$$
$$P_{13} = \beta_1\beta_2 K + \gamma\alpha_1\alpha_2 LRL^T$$
$$P_{22} = 2\beta_1\beta_2(\beta_1 + \beta_2)D + \beta_1^2\beta_2^2 M + (\beta_1 + \beta_2)^2 K + \gamma\{(\beta_1\beta_2 - \alpha_1\alpha_2) + (\beta_1 + \beta_2)(\alpha_1 + \alpha_2)\}LRL^T$$
$$P_{23} = 2\beta_1\beta_2 D + \beta_1\beta_2(\beta_1 + \beta_2)M + (\beta_1 + \beta_2)K + \gamma(\alpha_1 + \alpha_2)LRL^T$$
$$P_{24} = \beta_1\beta_2 M$$
$$P_{33} = 2(\beta_1 + \beta_2)D + (\beta_1 + \beta_2)^2 M + K + \gamma LRL^T$$
$$P_{34} = (\beta_1 + \beta_2)M,\ P_{44} = M$$

(5) 式の閉ループシステムの原点が漸近安定であるための必要十分条件は，(10) 式の Q が半正定でかつ $(Q,\ A)$ が可観測対であるときに (11) 式の行列 P が半正定になることである [4]．

まず，(3) 式と (8) 式より Q_{22} は正定，(3) 式と (7) 式より Q_{33} が正定もしくは半正定，$D \geq 0$ より Q_{44} は半正定となることから行列 Q は少なくとも半正定であることがわかる．つぎに，$(Q,\ A)$ が可観測対であることは，以下のように示せる．

$$\mathrm{rank}\left[\begin{array}{c} sI_{4n} - A \\ Q \end{array}\right]$$
$$= \mathrm{rank}\left[\begin{array}{cccc} sI_n & -I_n & 0 & 0 \\ 0 & sI_n & -I_n & 0 \\ 0 & 0 & sI_n & -I_n \\ M^{-1}\bar{A}_4 & M^{-1}\bar{A}_3 & M^{-1}\bar{A}_2 & sI_n + M^{-1}\bar{A}_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{array}\right]$$
$$= \mathrm{rank}\left[\begin{array}{cccc} sI_n & -I_n & 0 & 0 \\ 0 & sI_n & -I_n & 0 \\ 0 & 0 & sI_n & -I_n \\ \bar{A}_4 & \bar{A}_3 & \bar{A}_2 & sM + \bar{A}_1 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{array}\right]$$
$$= \mathrm{rank}\ \bar{A}_4 + \mathrm{rank}\ I_n + \mathrm{rank}\ I_n + \mathrm{rank}\ Q_{22}$$
$$= \mathrm{rank}\left(\beta_1\beta_2 K + \gamma\alpha_1\alpha_2 LRL^T\right) + 2\,\mathrm{rank}\ I_n + \mathrm{rank}\,(\beta_1^2\beta_2^2 D + \gamma\{\alpha_1\beta_1(\beta_2 - \alpha_2) + \alpha_2\beta_2(\beta_1 - \alpha_1)\}LRL^T)$$
$$= 4n \tag{12}$$

最後に行列 P が半正定となるための条件を導く．そのためにつぎの直交行列 T を用いて行列 P を相似変換する．

$$T = \left[\begin{array}{cccc} 0 & 0 & I_n & 0 \\ I_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_n \end{array}\right] \tag{13}$$

$$T^T \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ P_{12}^T & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{13}^T & P_{23}^T & P_{33} & P_{34} \\ 0 & P_{24}^T & P_{34}^T & P_{44} \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} P_{22} & P_{23} & P_{12}^T & P_{24} \\ P_{23}^T & P_{33} & P_{13}^T & P_{34} \\ P_{12} & P_{13} & P_{11} & 0 \\ P_{24}^T & P_{34}^T & 0 & P_{44} \end{bmatrix} \tag{14}$$

このとき，次の (15) ～ (17) 式が成り立てば P は半正定となる．

$$1)\ \ P_{11} = \beta_1\beta_2\left(\beta_1\beta_2 K + \gamma\alpha_1\alpha_2 LRL^T\right) > 0 \tag{15}$$

$$2)\ \ P_{44} = M > 0 \tag{16}$$

$$3)\ \ \begin{bmatrix} P_{22} & P_{23} \\ P_{23}^T & P_{33} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{12}^T & P_{24} \\ P_{13}^T & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{44} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{12} & P_{13} \\ P_{24}^T & P_{34}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{P}_{11} & \hat{P}_{12} \\ \hat{P}_{12}^T & \hat{P}_{22} \end{bmatrix} \geq 0 \tag{17}$$

$$\hat{P}_{11} = 2\beta_1\beta_2(\beta_1+\beta_2)D + \gamma(\beta_1\beta_2 - \alpha_1\alpha_2)LRL^T + \frac{\gamma(\beta_1+\beta_2)}{\beta_1\beta_2}\{\alpha_1\beta_1(\beta_2-\alpha_2) + \alpha_2\beta_2(\beta_1-\alpha_1)\}LRL^T$$

$$\hat{P}_{12} = 2\beta_1\beta_2 D + \frac{\gamma}{\beta_1\beta_2}\{\alpha_1\beta_1(\beta_2-\alpha_2) + \beta_2\alpha_2(\beta_1-\alpha_1)\}LRL^T$$

$$\hat{P}_{22} = 2(\beta_1+\beta_2)D + \frac{\gamma}{\beta_1\beta_2}(\beta_1\beta_2 - \alpha_1\alpha_2)LRL^T$$

1)，2) の条件は，(3) 式と $M > 0$ より成り立つ．3) の条件が成り立つことは以下のように示すことができる．(6)，(8) 式より

$$\begin{aligned}\hat{P}_{11} &= 2\beta_1\beta_2(\beta_1+\beta_2)D + \gamma(\beta_1\beta_2 - \alpha_1\alpha_2)LRL^T \\ &\quad + \frac{\gamma(\beta_1+\beta_2)}{\beta_1\beta_2}\{\alpha_1\beta_1(\beta_2-\alpha_2) + \alpha_2\beta_2(\beta_1-\alpha_1)\}LRL^T \\ &\geq 2\beta_1\beta_2(\beta_1+\beta_2)D \\ &\quad + \frac{\gamma(\beta_1+\beta_2)}{\beta_1\beta_2}\{\alpha_1\beta_1(\beta_2-\alpha_2) + \alpha_2\beta_2(\beta_1-\alpha_1)\}LRL^T \\ &> 0\end{aligned} \tag{18}$$

が成り立つことと (7) 式の関係に注意すると

$$\begin{aligned}\hat{P}_{22} - \hat{P}_{12}^T\hat{P}_{11}^{-1}\hat{P}_{12} &\geq 2(\beta_1+\beta_2)D + \frac{\gamma}{\beta_1\beta_2}(\beta_1\beta_2 - \alpha_1\alpha_2)LRL^T \\ &\quad - \frac{1}{\beta_1+\beta_2}\left[2\beta_1\beta_2 D + \frac{\gamma}{\beta_1\beta_2}\{\alpha_1\beta_1(\beta_2-\alpha_2) + \alpha_2\beta_2(\beta_1-\alpha_1)\}LRL^T\right] \\ &= \frac{2(\beta_1^2+\beta_1\beta_2+\beta_2^2)}{\beta_1+\beta_2}D \\ &\quad + \frac{\gamma}{\beta_1+\beta_2}(\beta_1+\beta_2-\alpha_1-\alpha_2)LRL^T \geq 0\end{aligned} \tag{19}$$

となることから 3) の条件が成り立つ．　**（証明終わり）**

定理 1 によれば，閉ループシステムの安定性は M, D, K などの宇宙構造物の特性パラメータの値には依存せず，(4) 式のコントローラのパラメータが (6) ～ (8) 式を満たせば保証される．つまり，(6) ～ (8) 式を満たすようにコントローラのパラメータを選んでおけば，構造物の特性パラメータに不確かさが存在しても，(5) 式の閉ループシステムをロバスト安定化できることを意味している．

定理 1 の条件を満たすコントローラのパラメータを決定する一つの方法としては，

$$0 < \alpha_i < \beta_i,\ i = 1, 2 \tag{20}$$

と選べばよい．このとき，(6) ～ (8) 式は必ず満たされる．この条件は，(4) 式のコントローラにおいてコントローラの入力と出力の信号間の位相が 0° より遅れないようにコントローラパラメータを選択することを意味している．

コントローラパラメータにおいて $\alpha_1 = \beta_1$ と選ぶと，(4) 式のコントローラの伝達関数は次式になる．

$$u(s) = -\frac{\gamma(s+\alpha_2)}{(s+\beta_2)}Ry(s) \tag{21}$$

このとき，(8) 式の条件は

$$\alpha_2 < \beta_2 \tag{22}$$

となり，これにより (6)，(7) 式も満たされる．この条件はコントローラが位相進み補償器となることを意味しており，文献 3) の一次のプロパーな近似 DVDFB における安定化条件と一致する．したがって，定理 **1** の安定化条件は，文献 3) の安定化条件を二次のプロパーなコントローラの場合へ拡張したものになっていることがわかる．

4. 数値シミュレーション

例として **Fig. 1** のように矩形の剛体 1 と 2 を，バネとダンパで近似される柔軟なリンク $c_k\,(k = 1, 2, 3)$ によって横方向に柔結合して構成される宇宙構造物 [5] を考える．各剛体 $i\,(i = 1, 2)$ は，x_i 方向と y_i 方向の並進運動と質量中心 O_i 回りに θ_i 方向の回転運動を行うものとする．各剛体の質量を m_i，慣性モーメントを J_i で表し，剛体を結合するリンクのバネとダンパの定数を k_{ck}, d_{ck} $(k = 1, 2, 3)$ で表す．なお，センサとアクチュエータは，剛体 1 の質量中心に設置されるものとする．(なお，この構造物の数式モデルについては，文献 5) に記載されている．)

制御系設計に用いる宇宙構造物の数式モデルにおける剛体の質量と慣性モーメント，結合に用いる柔軟なリンクのバネとダンパの定数のノミナル値を **Case 1** のように与える．ノミナル

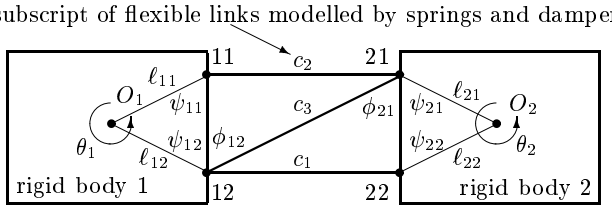


Fig. 1　A flexible space structure

な特性パラメータと実際の構造物の特性パラメータの間にはパラメータ誤差が存在する状況を想定し，実際の構造物の特性パラメータは **Case 2** のように与えられるものとする．

$$\textbf{Case 1} \quad m_i = 1.0,\ J_i = 0.5,\ k_{ck} = 1.0,\ d_{ck} = 0.016 \qquad (23)$$

$$\textbf{Case 2} \quad \tilde{m}_i = 1.5,\ \tilde{J}_i = 1.1,\ \tilde{k}_{ck} = 0.8,\ \tilde{d}_{ck} = 0.08 \qquad (24)$$

剛体 i の質量中心 O_i と結合点 ij までの距離 ℓ_{ij}，質量中心 O_i と結合点 ij を結ぶ線と剛体の辺がなす角度 ψ_{ij}，結合点 ij において剛体の辺と構造物のリンクがなす角度 ϕ_{ij}, 伸縮量が 0 のときのリンク c_1, c_2 の長さ L の値はそれぞれ次式で与える．

$$\ell_{ij} = 1.0,\ \psi_{ij} = \pi/3.0,\ \phi_{ij} = \pi/3.0,\ L = 2.0$$

コントローラパラメータは，定理 **1** の条件を満たすように次式のように決定した．

$$\alpha_1 = 2.3 \times 10^{-2},\ \alpha_2 = 9.5 \times 10^{-1}$$
$$\beta_1 = 4.7 \times 10^{-2},\ \beta_2 = 1.9$$
$$\gamma = 10.0,\ R = I_3$$

このコントローラのボード線図を Fig. 2 に示す．

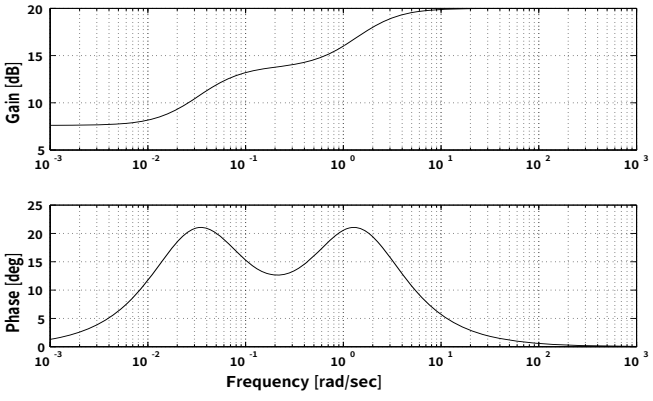


Fig. 2 Bode diagram of a proposed controller for the flexible space structure in Fig. 1

初期変位を (25)，(26) 式のように与えたとき，閉ループシステムにおける剛体 1, 2 の x_i, y_i 方向の変位と θ_i 方向の角変位の初期値応答はそれぞれ **Fig. 3** の実線，破線，一点鎖線となる．

$$x_1(0) = 1.0,\ y_1(0) = -1.0,\ \theta_1(0) = -0.5 \qquad (25)$$

$$x_2(0) = y_2(0) = \theta_2(0) = 0 \qquad (26)$$

この図より，提案法によって閉ループシステムは安定化されていることがわかる．

つぎに閉ループシステムのロバスト安定性を示すために，同じコントローラによって **Case 2** の特性パラメータをもつ構造物を制御した場合を考える．このとき，(25)，(26) 式の初期変位に対する剛体 1, 2 の x_i, y_i 方向の変位と θ_i 方向の角変位の初期値応答はそれぞれ **Fig. 4** の実線，破線，一点鎖線となる．この図より構造物の特性パラメータに誤差が存在した場合でも，提案法によって閉ループシステムは，ロバスト安定化されていることがわかる．

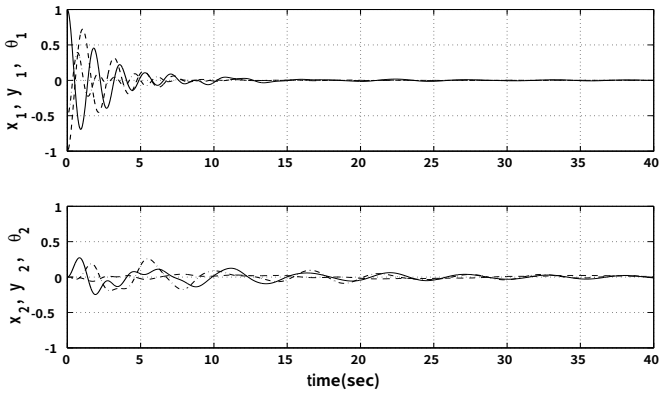


Fig. 3 Initial-state responses of x_i, y_i, and θ_i (Case 1)

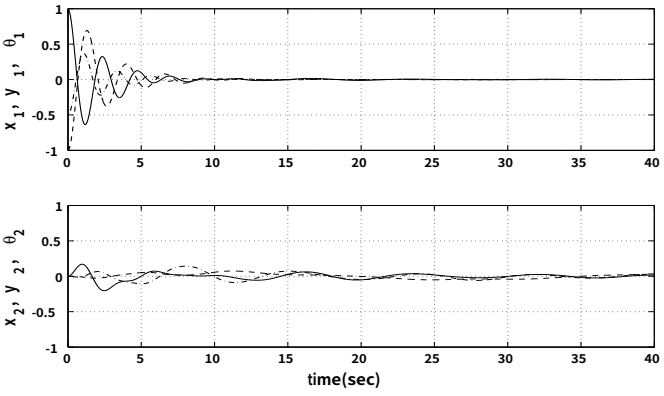


Fig. 4 Initial-state responses of x_i, y_i, and θ_i (Case 2)

5. おわりに

本稿では，センサとアクチュエータがコロケートされた柔軟宇宙構造物の位置と姿勢を制御する手法について述べた．変位センサから得られる情報のみを用いたニ次のプロパーなコントローラを提案し，閉ループシステムをロバスト安定化するためにコントローラパラメータが満たすべき条件を導出した．最後に，提案法によって柔軟宇宙構造物をロバスト安定化できることを数値例で示した．

参考文献

1) Mankins J. C. : The Space Solar Power Option, *Aerospace America*, Vo.**35**, pp.30-36 (1997)

2) 糀谷，池田，木田：Collocated Feedback による宇宙構造物の最適制御, SICE 論文集, Vol.**25**-8, pp.54-60 (1989)

3) 河野，小林 : 変位出力を用いたプロパーなコントローラによる柔軟宇宙構造物のロバスト安定化, 第 51 回自動制御連合講演会, pp.1174-1175 (2008)

4) 井村：システム制御のための安定論，コロナ社，pp.75-78 (2000)

5) 小林，鹿田，姜，山中： プロパーな近似 DVDFB による柔軟宇宙構造物の周波数依存型評価関数に対する最適制御, 神戸高専研究紀要, No.48, pp.33-38 (2010)

新方式リニア駆動ユニットのクランプ装置としての適用

新堀正博* 貞広恵輔* 村尾良男** 中辻 武***

Application to the Clamp Equipment of New Type Linear Drive Unit

Masahiro SHINBORI* Keisuke SADAHIRO* Yoshio MURAO** Takeshi NAKATUJI***

ABSTRACT

Since almost the linear drive mechanisms of being used in actual production spot have large energy consumption due to use mainly the air cylinders, the usage has been needed to be improved. Moreover, the larger equipment having a gearing and a ball screw also has been sometimes used. Therefore, we have developed a new type drive unit having two steps operation system, which filled the necessity for energy saving and the demand of an equipment miniaturization. This equipment can remarkably reduce energy consumption comparing with air cylinder as the same specification. And, It is expected that this equipment will be applied to the robot actuater and the assistant chair use for standing up etc..

This report describes the action mechanism, durability and energy consumption of a new type linear drive unit as a clamp use.

Keywords : new type linear drive unit, two steps operation system, energy saving, miniaturization, development, durability

１．緒言

自動車等の 1 個流し生産ラインにおけるクランプ機構にはリニア駆動機構が用いられている．その主なものは，電気モータの回転出力をギヤ減速し，減速後に軸受会社が開発したボールねじ等を用いた回転ー直線運動変換を行って使用する．もしくは，空気圧・油圧等を専門にするメーカーが開発した空気圧シリンダを用いる方法である．これらはクランプ機構に代表される通り，高速・低推力と低速・高推力移動の組み合わせ運動である．しかしながら，前者は装置全体が大きくなり過ぎてしまう，後者はエネルギ消費が大きいという欠点を有している．省エネルギは CO_2 排出削減につながる．

そこで，新しいねじ機構を開発して，リニア駆動に応用し，これらの問題に対処する方法について検討を試みた．その結果，動力伝達要素としてのねじ機構は，精度の観点から雄ねじと雌ねじの大きさは同じであらねばならないという，従来の発想を転換した．そして，雄ねじと偏心してかみ合せた径の大きな雌ねじを組み合わせた．それにより，簡潔な構造の直線運動型駆動機構を持つねじ機構が考案された． このねじ機構にばねを追加し，自律的に負荷を検知して直線移動速度を減速することで推力を増幅する省エネでコンパクトな 2 段階作動方式リニア駆動ユニットを考案した．この考案システムは，国際特許として出願・受理されている（PCT/JP2005/016818）．このように，本機構は，クランプ用として開発した．しかし，停電時の機械的な位置確保や負荷時に減速する特性を有しているので，アウトリガー・リハビリ用立ち上がり補助座椅子・安全性を有するロボットのアクチュエータとして利用できると考えている．本報では第一段階として，クランプ用ユニットとしての使用を目指し，リニア駆動ユニットの作用機構とクランプ用としてのユニットの耐久性および省エネ性について報告する．

* 専攻科 機械システム工学専攻

** サイエンティフィックテクノロジーズ会社

*** 機械工学科 教授

２．リニア駆動ユニットの作用機構

図 1，図 2 に無負荷時，負荷時における，新方式リニア駆動機構の構造・原理を示す．

新方式リニア駆動機構は，構造として雄ねじよりも径が大きい雌ねじ，ばね，ベアリング，ケース，駆動モータから構成されている．原理としては，負荷が作用していないときは式（1）のように通常のねじ運動を行い，ねじのピッチと回転数の積で雌ねじが高速移動する．

$$L_f = \frac{\theta_r}{2\pi} p \qquad \cdots (1)$$

L_f は無負荷時の雌ねじ進み距離[mm]，θ_r は雄ねじ回転角度，p はねじピッチ[mm]である．しかし，負荷が加わると雌ねじは径の違いで式（2）のように差動回転する．

$$L_R = \frac{\theta_r - \Theta_R}{2\pi} p \qquad \cdots (2)$$

L_R は負荷時の雌ねじ進み距離[mm]，Θ_R は雌ねじ回転角度である． r を雄ねじ接触点半径、R を雌ねじ接触点半径とすれば、差動回転時には接触点移動距離は等しいので

$$r \bullet \theta_r = R \bullet \Theta_R \qquad \cdots (3)$$

となり、以上から減速比γは

$$\gamma = \frac{L_f}{L_R} = \frac{R}{R-r} \qquad \cdots (4)$$

で表すことができ、差動回転時にはねじが高速移動時の約 1/γの速度で低速移動するようになる．
モータ出力によって回転する雄ねじのねじ面を押す力 F’は次式で表される．

$$F' = \frac{F}{\cos\beta} \qquad \cdots (5)$$

F’はねじ面を押す力[N]，F はねじ推力[N]，β はねじ山半角である．このとき，摩擦係数μをもちいて摩擦抵抗μF’は次式で表される．

$$\mu F' = \frac{\mu}{\cos\beta} F = \mu' F \qquad \cdots (6)$$

μ′は相当摩擦係数である．また相当摩擦係数μ′=μ/cosβに対して，φ′=tan^{-1}(μ′)なる変数φ′を導入すると，締付力 f[N]は次式で表される．

$$f = F \bullet \tan(\alpha + \phi') = F \frac{\tan\alpha + \dfrac{\mu}{\cos\beta}}{1 - \tan\alpha \dfrac{\mu}{\cos\beta}} \qquad \cdots (7)$$

αはねじリード角である．そして，入力トルク T は次式で表される．

$$T = fr = Fr \frac{\tan\alpha + \dfrac{\mu}{\cos\beta}}{1 - \tan\alpha \dfrac{\mu}{\cos\beta}} \qquad \cdots (8)$$

T は入力トルク[Nmm]，r はねじ接触点の半径[mm]である．
よって，ねじ推力 F と入力トルク T の関係は次式となる．

$$F = T \frac{1 - \tan\alpha \dfrac{\mu}{\cos\beta}}{r\left(\dfrac{\mu}{\cos\beta} + \tan\alpha\right)} \qquad \cdots (9)$$

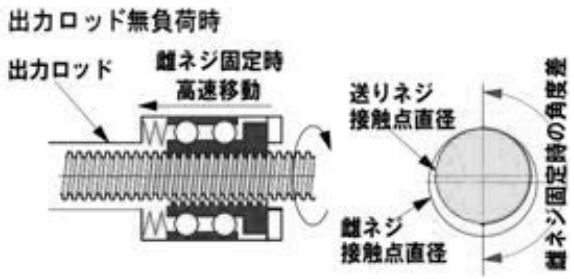


図 1　新方式リニア駆動機構の構造・原理(無負荷時)

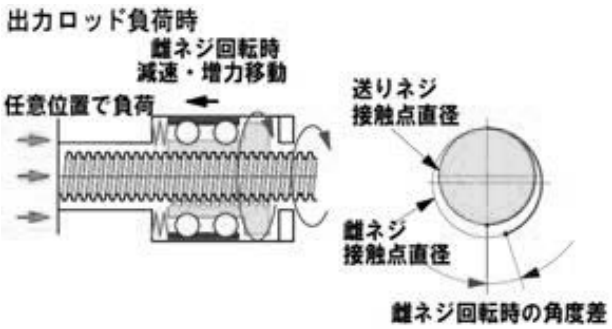


図 2　新方式リニア駆動機構の構造・原理(負荷時)

新方式リニア駆動機構の負荷時の推力増加は，一定のモータ動力(100W)のもとにおける減速による．しかし，その減速は，ねじ伝達が高速のすべりから約1/10減速の差動転がり伝達へ移行することによる．

図 3 に，TR20×4 の雄ねじと TR22×4 の雌ねじの組合せにおける，負荷時の入力トルクとねじ推力の式(9)による理論計算値を示す．それに加え，同ねじの組合せにおけるねじ推力の測定結果を示す．

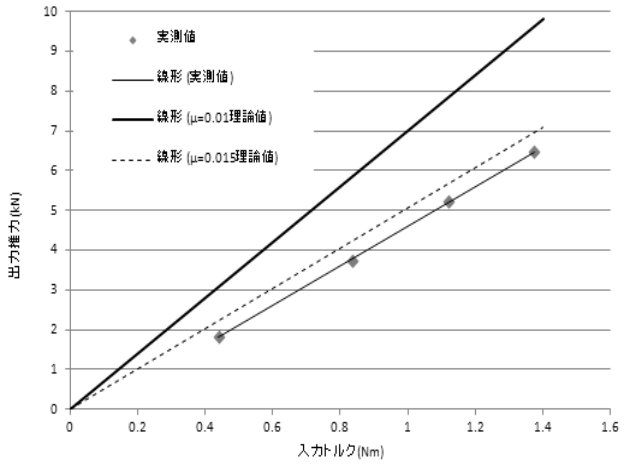


図 3　入力トルクー推力特性

図3からわかるとおり，実測値は，送りねじとガイドベアリング間の摩擦を含むので，入力トルクと出力推力が 0 で一致しない．しかし，その摩擦はごくわずかであり，理論計算から得たねじ面摩擦係数（μ=0.015）の出力直線とほぼ並行な直線であり，同じ勾配であるといえる．よって，組合せたねじのねじ面摩擦係数がμ＝0.015 であると予想できる．よって，負荷時にはすべり摩擦（μ=0.1～0.2）の約 1/ 10 となりほぼ転がり摩擦に転じていることが判明した．その結果，式(9)より，推力増加は約 10 倍になることがわかる．そのときの雌ねじの移動速度は，モータ回転数 1500rpm のとき無負荷時は 100mm/s，負荷時は 10mm/s となる．またモータ回転数 4300rpm のとき無負荷時は 290mm/s，負荷時は 29mm/s となる．

３．ねじの摩耗特性試験

日本の生産方式の主流である 1 個流し生産ラインにおいて多用される位置決め・クランプ動作は、高精度かつ大きなクランプ力（6 kN）の性能が求められる．

図 4 に示す負荷耐久試験機により，新方式リニア駆動ユニットをクランプユニットとして，一般的に使用するため，複数回クランプ動作を行った際の摩耗特性を確認する．本駆動ユニットをクランプユニットとして一般的に使用する際の目標使用回数を 100 万回とし負荷耐久試験を行う．図 4 に示す負荷耐久試験機は装置右側に本駆動ユニット（図 5）が取り付けられている．本駆動ユニットに空気圧レギュレータにより 6kN の負荷を加えた状態で，クランプ動作を行う．さらに，左側に取り付けられた，制御盤により，負荷の大きさ，モータ回転数を操作する．そして，負荷耐久試験機より，入力トルク，出力推力，使用回数を記録する．

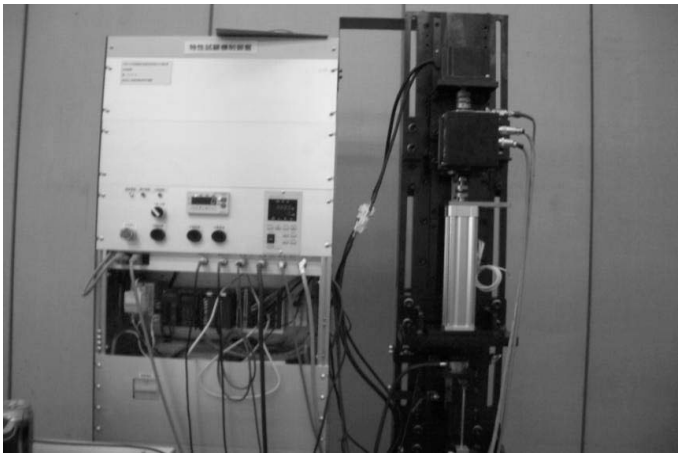


図 4　負荷試験機

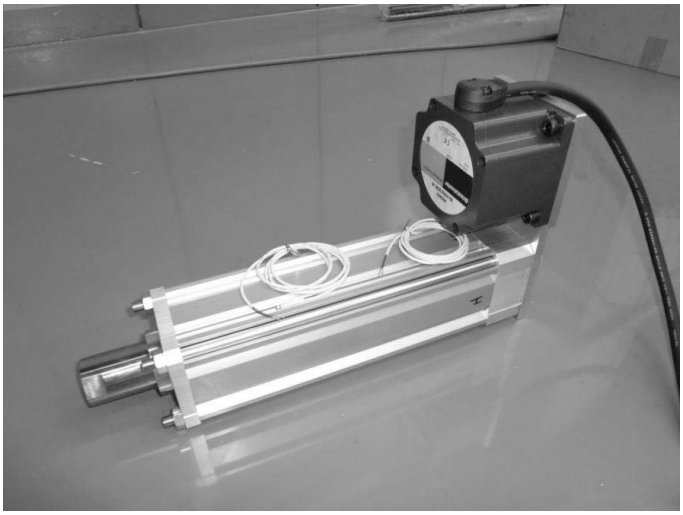


図 5　新方式リニア駆動ユニット

3.1 ねじ仕様と破壊強度

負荷耐久試験において使用する雄ねじと雌ねじの強度は，新方式リニア駆動機構が発生するクランプ力の20倍以上の破壊強度を持つことを目標とした．

炭素鋼の TR20×4 の雄ねじと TR22×4 の雌ねじを組み合わせたねじの引張試験を行った．その結果，ユニットの目標推力である6kNの30倍以上の破壊強度を持っており，目標破壊強度に十分達していることが確認できた．

3.2 負荷耐久試験

負荷耐久試験を行った結果，通常の無添加グリース(基油粘度32cSt)だけでは，負荷時に雄ねじと雌ねじの点接触面内において微小すべりが生じた．その結果，40万回の運転時に焼付き，試験がストップした．産業用、民生用の実用化を考えた際，100 万回の使用回数に耐えることが必要である．そこで，別途，この点接触面に適正な潤滑油の検討を行った．

負荷時の雄ねじと雌ねじの点接触面内の最大応力は，1361MPa であった．点接触部で時折生じる微小すべり速度Vをモータ回転数n=4300rpm，負荷時の減速1/10,ねじ中心から点接触位置までの距離8.13mmのもと見積もる．そうすると，V ＝0.37 m/s と計算された．また，点接触部の荷重比αは，最大応力(1361MPa) / ねじの表面硬度(2878MPa)であるので，α＝0.47 であった．この0.47の値は，α＝0.25：通常の設計荷重（JIS），α＞0.35：高荷重，α＝0.7：厳しい高荷重，α＝0.8：超高荷重の高荷重域に相当し，設計ではなるべく避ける領域にある．これが本ユニットの欠点であり，潤滑油の工夫で回避すべき点でもある．

そこで,文献(１)より，ふさわしい潤滑油を選択した．図 6 は，表 1 に示す各種潤滑油の V＝0.38 m/s(≒0.37m/s)，α≒0.5(≒0.47)における摩擦試験結果である．潤滑油はBase oilに，接触面と化学反応し焼付き等を防止するCl，P，S 等の極圧添加剤を添加した5種類．それに加え，接触面を物理的に分離する有機系ニ硫化モリブデンとカルシウムスルホネートという固体潤滑剤 2 種を添加したものを用いた．図7は，V=0.38m/s，α=0.3（中程度の荷重），0.5（高荷重），0.7（厳しい荷重），0.8（超高荷重）における摩耗こん径の結果である．

図6より，α≒0.5の荷重レベルでは，各添加剤における相違が現れ，あるレベルのアスペリティ接触があることを示している．このような荷重下ではいくつかの極圧添加剤よりも固体潤滑剤の方が摩擦を低下させた．これは作用中に形成された固体潤滑剤による，アスペリティ周辺EHL油膜形成を促進する効果によると思われる．

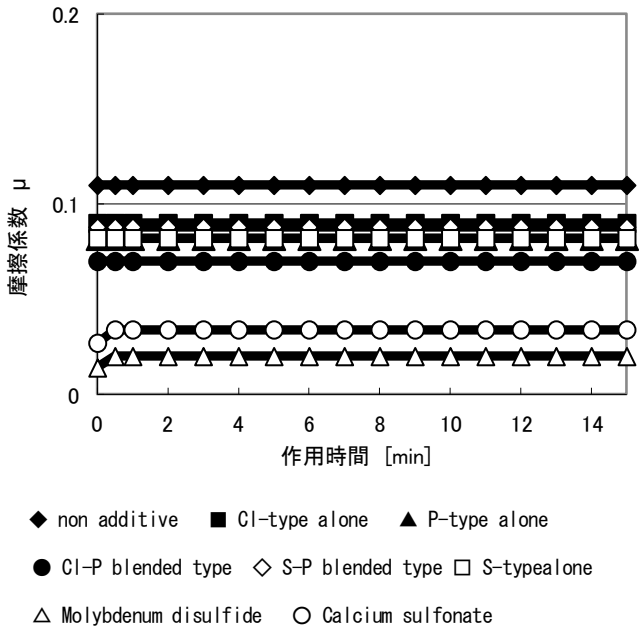


図6 作用時間に対する摩擦係数の変化(α≒0.5)

表 1 基油に添加された添加剤の種類と量[2]

潤滑剤の種類	添加剤の種類と量
Base oil (non additive)	ISO VG 32 タービン油
Cl-type alone	塩素化パラフィン ４質量%
P-type alone	アミンフォスフェート ２質量%
S-type alone	硫化ラード ５質量%
Cl-P blended type	Cl と P のブレンド
S-P blended type	S と P のブレンド
Molybdenum disulfide (MoS_2)	有機系ニ硫化モリブデン
Calcium sulfonate (SO_3CaSO_3)	カルシウムスルホネート

極圧添加剤に関しては，μ=0.08 程度の境界潤滑下の摩擦係数値を示しており，無添加基油がμ＞0.1 の金属接触値を示したのに比較して小さく，接触面とのある程度の化学反応によって，種々の極圧皮膜を形成させていることがわかる．また図 7 より，α≒0.5 の摩耗こん径も固潤潤滑剤の値が低く，塑性変形による避けられない接触面直径程度になっていることがわかる．

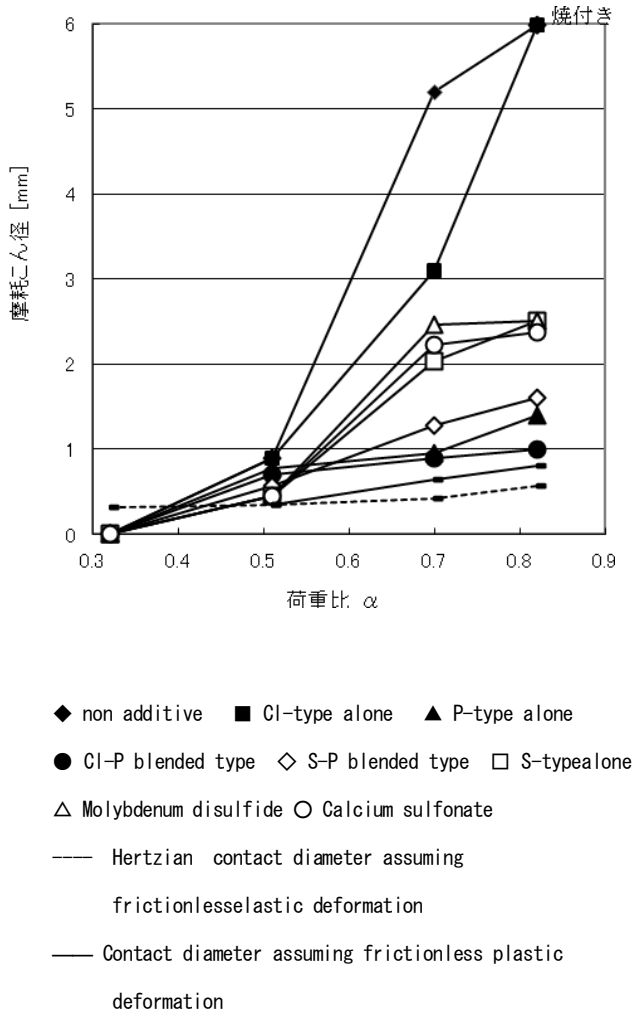


図 7　作用 15min 後の荷重比と摩耗こん径の関係

これらの結果より，優れた摩擦摩耗特性を示した二硫化モリブデン入り潤滑油（粘度 32cSt）を，本ユニット接触部に，二硫化モリブデン入りグリース（粘度 32cSt）として選択・適用した．その結果，100 万回の繰り返し使用に耐え，リニア駆動ユニットとして十分使用できることが明らかになった．

４．本駆動ユニットの省エネ性

表 2 に本駆動ユニットと同程度のクランプ力を有する空気圧シリンダを 1 年間（200 日×8 時間×60 分×2 回）クランプユニットとして使用した場合の消費電力量を示す．さらに，表 3 に表 2 と同じ期間，本駆動ユニットを使用した場合の消費電力量を示す．表 2, 3 に示すように，空気圧シリンダの年間電力使用量は 150.3kWh，それに対して，本駆動ユニットの年間電力使用量は 7.62kWh である．本駆動ユニットの年間電力使用量は空気圧シリンダの約 1/20 であり，95 %程度のエネルギを削減できることを示している．

表 2 における，1 ストローク空気量の単位に示す NL とは基準状態（0℃、1atm 大気圧）での体積を示すものである．

表 2　空気圧シリンダの消費電[3]

空気圧シリンダ関連項目	物理量	単位
代表シリンダ容積	502	cc
1 ストローク空気量	6.03	NL
電気量／空気量	0.13	Wh/NL
1 ストローク使用電力	0.784	Wh
年動作回数（200×8×60×2）	192×10^3	
ユニット当たり電力使用量年間	150.3	kWh

表 3　新方式リニア駆動ユニットの消費電力[4]

新方式リニア駆動ユニット関連項目	物理量	単位
空走時間	0.99	sec
クランプ時間	0.2	sec
1 ストローク時間	2.38	sec
1 ストローク使用電力	39.7	mWh
年動作回数（200×8×60×2）	192×10^3	
ユニット当り年間使用電力量	7.62	kWh

５．結言

本報では，新方式リニア駆動ユニットの作用機構とそのクランプ用ユニットとしての耐久性および省エネ性について検討した．その結果，以下の 3 点が判明した．

（1）作用機構については，従来のリニア駆動機構と異

なり，コンパクトな差動ねじ機構を考案し1/10減速が実現できていることを確認した．その結果クランプユニットとして必要な6kNの推力が100W程度のモータで十分実現できることがわかった．

（2）負荷時における，ねじの高荷重点接触部で時折生じる微小すべりによる摩耗や焼付きは，供給グリースに二硫化モリブデンを添加することで防止できることがわかった．その結果，期待されている100万回の寿命をクリアすることができた．

（3）また，本駆動ユニットの省エネ性は，この分野で一般的によく用いられている空気圧シリンダと比較して，95 %ものエネルギ削減ができることがわかった．

謝　辞

本研究は平成17年度兵庫県ＣＯＥプログラム，平成18年度戦略的基盤技術高度化支援事業，平成21年度科研費　基盤研究（C）(21560156)および平成21年度ＮＥＤＯの助成を受けたものである．

参考文献

(1)　中辻　武，山口永人，村尾良男：「中程度および厳しいすべり接触における極圧添加剤の評価」 日本高専学会誌，Vol.15，No.3，pp.27-32，2010.

(2) T.Nakatuji，T.Ikuma and A．Mori：「Reaction Characteristics of Cl-P Blended EP Additives in Early Stages of Severe Sliding Contact」Journal of, Tribology,vol.42,No11(1997)pp1273-1285.(Allerton Pressl，Inc.),1997.

(3)　村尾良男，新堀正博，貞広恵輔，中辻　武：「新方式リニア駆動ユニットの作用機構とクランプユニットとしての耐久性およびエネルギ消費」日本高専学会誌，Vol.16，No3，pp.11-16，2011.

(4) 中西康二：「ＦＰＳにおけるライフサイエンスアセスメント」日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol.34，No.1，pp.38-45，2003.

新方式リニア駆動ユニットの立ち上がり補助座椅子への適用

貞広恵輔*　新堀正博*　村尾良男**　中辻　武***

Application to the Assistant Chair Use for Standing up of New Type Linear Drive Unit

Keisuke SADAHIRO*　Masahiro SHINBORI*　Yoshio MURAO**　Takeshi NAKATUJI***

ABSTRACT

We developed a new type linear drive unit having two steps operation system, which filled the necessity for energy saving and the demand of an equipment miniaturization. This equipment can remarkably reduce energy consumption comparing with air cylinder as the same specification.

Taking notice of these points, we tried to apply new type linear drive unit having some useful merit to the assistant chair use for standing up. In the result, we were fully convinced of being able to use as the assistant chair use for standing up. This report mainly describes design and usefulness of the assistant chair.

Key Words : application of new type linear drive unit, assistant chair use for standing up, its design, its usefulness

1. はじめに

現代日本は高齢化が進んでおり，体の不自由な高齢者も増えている．現状，種々の介護支援機器が製作され，介護認定度の高い体の不自由な高齢者を補助している．また，比較的軽度な介護認定を受けている人にはリハビリで完治し自立を目指していただくことも重要であると考えている．

著者らが開発中の本立ち上がり補助座椅子は，自立支援を最大の目標として，ゆっくりと座面を上昇させることで立ち上がりを補助し，少しでも自力で腰を浮かせることができれば，速い速度で腰の動きに追随し，座面をおしりにフィットさせながら，立ち上がりを補助する機能を持つものである．本報では，このような立ち上がり補助座椅子の基本原理と主に設計時の重要点および使用時の有用性や改良点について報告する．有用性についての設計や改良は，モニタリングや専門家の意見を聞くなどして行った．

2. 新方式リニア駆動ユニットの基本原理

図１にリニア駆動ユニットの構造・原理を示す．新方式リニア駆動機構は，構造として雄ネジよりも径が大きい雌ネジおよび雄ネジ，バネ， ベアリング, 出力ロッド（ケース），駆動モータから構成されている．原理としては，負荷が作用していないときは，皿バネが玉軸受の外輪を軽く押し，それを受け玉と内輪・雌ネジが押され出力ロッドと固定されることになる．したがって雄ネジ（左ネジ）が右回転すると，出力ロッドは左方向に進む通常のネジ運動を行い，ネジのピッチと回転数の積で雌ネジを含む出力ロッドが高速移動する. このときの雌ネジの進み距離 L_f は，以下の式(1)のように表される．なお，式(1)から(9)は参考文献2)の導出過程を参照した．

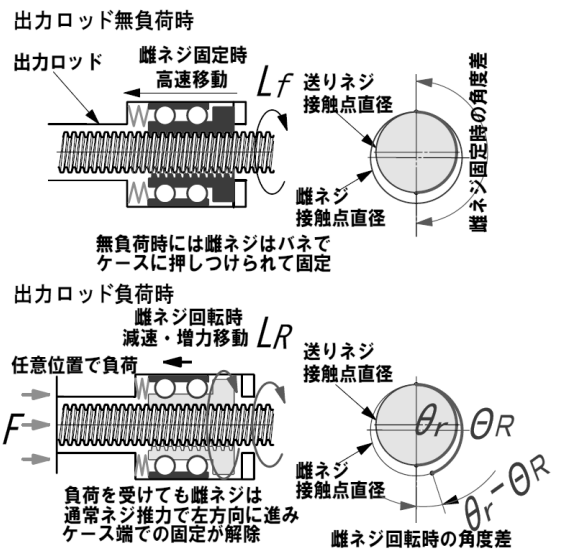


図１　新方式リニア駆動ユニットの構造・原理

*　　専攻科　機械システム工学専攻
**　　サイエンティフィックテクノロジーズ有限会社
***　機械工学科 教授

$$L_f = \frac{\theta_r}{2\pi} p \qquad \cdots (1)$$

ここで，L_fは無負荷時の雌ネジ進み距離[mm]，θ_rは雄ネジ回転角度，p はネジピッチ[mm]である．一方，出力ロッドに負荷が加わると，皿バネは外輪を強く押し，それを受け雌ネジと雄ネジがロックされ，雌ネジは出力ロッドから開放されることになり， 雌ネジおよび雄ネジは径の違いで式 (2) のように差動回転するようになる．

$$L_R = \frac{\theta_r - \Theta_R}{2\pi} p \qquad \cdots (2)$$

ここで，L_R は負荷時の雌ネジ進み距離[mm]，Θ_Rは雌ねじ回転角度である． rを雄ネジ接触点半径，R を雌ネジ接触点半径とすれば，差動回転時には接触点移動距離は等しいので

$$r \bullet \theta_r = R \bullet \Theta_R \qquad \cdots (3)$$

となり，以上から減速比γは

$$\gamma = \frac{L_f}{L_R} = \frac{R}{R-r} \qquad \cdots (4)$$

で表すことができ，差動回転時には出力ロッドが無負荷動作時の約 1/γの速度で低速移動するようになる．

モータ出力によって回転する雄ネジのネジ面を押す力 F' は次式で表される．

$$F' = \frac{F}{\cos\beta} \qquad \cdots (5)$$

ここで， F'はネジ面を押す力[N]，Fはネジ推力[N]，βはネジ山半角である．このとき，摩擦係数μをもちいて摩擦抵抗$\mu F'$は次式で表される．

$$\mu F' = \frac{\mu}{\cos\beta} F = \mu' F \qquad \cdots (6)$$

ここで， μ' は相当摩擦係数である．また相当摩擦係数$\mu' = \mu / \cos\beta$に対して， $\phi' = \tan^{-1}(\mu')$なる変数ϕ' を導入すると，締付力 f[N]は次式で表される．

$$f = F \bullet \tan(\alpha + \phi') = F \frac{\tan\alpha + \dfrac{\mu}{\cos\beta}}{1 - \tan\alpha \dfrac{\mu}{\cos\beta}} \qquad \cdots (7)$$

ここで， αはネジリード角である． そして，入力トルク T は次式で表される．

$$T = fr = Fr \frac{\tan\alpha + \dfrac{\mu}{\cos\beta}}{1 - \tan\alpha \dfrac{\mu}{\cos\beta}} \qquad \cdots (8)$$

ここで，Tは入力トルク[N-mm]，rはネジ接触点の半径[mm]である．よって，ネジ推力 Fと入力トルク Tの関係は次式となる．

$$F = T \frac{1 - \tan\alpha \dfrac{\mu}{\cos\beta}}{r\left(\dfrac{\mu}{\cos\beta} + \tan\alpha\right)} \qquad \cdots (9)$$

新方式リニア駆動機構の負荷時の推力増加の要因は，一定のモータ動力のもとにおける減速によるが，直線的負荷を主とするクランプ機構に適用した場合｛Tr20×4 雄ネジと Tr22×4 雌ネジの組合せ｝[1]，その減速は，ネジ伝達が高速のすべりから約 1/10 減速｛式(4)において数値解析の結果求めた雌ネジと雄ネジの接触点半径はそれぞれ R=9mm，r=8.13mm となることから 1/γは約 1/10 となる｝の差動転がり伝達へ移行することによる．一方，負荷時の入力トルク T と出力推力 F を特性試験機で実測し，式(9)よりネジ面摩擦係数μ｛β=15°，$\tan\alpha$=0.008 のもと｝を求めると約 0.015 であり，無負荷時のネジ面すべり摩擦係数 0.1～0.2｛雄ネジおよび雌ネジは S45C で潤滑剤は二硫化モリブデン入り VG32 グリースで境界潤滑されている｝の約 1/10 に減少していることがわかる．これはすべり摩擦から転がり摩擦に転じていることを意味している．以上のことより，本リニア駆動機構の負荷時の推力増加の要因は，雄ネジと雌ネジの接触がすべり摩擦から点接触転がり摩擦へと転じ，雌ネジの進み速度を減速することによる推力増加によってもたらされていることが分かる．

3. 立ち上がり補助座椅子の設計と製作

3. 1　立ち上がり補助座椅子の試作品

図 2 に，リニア駆動ユニットの基本原理を応用した，推力 1960N，雄ネジＴr20×4，雌ネジＴr24×4 における差動ネジ機構を用いた立ち上がり補助座椅子の試作品を示す．前述のクランプ機構と異なり，補助座椅子の場合は支柱上部と下部でネジを支え，支柱中央部でたわみが大きくなる両端支持はりとなっているので，雄ネジと雌ネジの山と谷部での干渉を避けるために，Tr20 と Tr24 の組合せとした．この場合，雌ネジと雄ネジの接触点半径は，支柱上部・下部と中央部で若干変化する．したがって，正確な接触点半径 R と r は求めることができなかった．　しかしながら，減速比 1/γは約 1/10 となっていることの確認が必要であり，これは実際の無負荷時の雌ネジ移動速度と 1960N 負荷時の雌ネジ移動速度をストップウォッチとスケールで測定することにより確認した．その結果，モータの回転数を 1600rpm とした場合，無負荷時に座椅子に連結された雌ネジは 107mm/s で移動し，負荷時にはネジ下部・中央部・上部で平均約 10mm/s{速度変化±0.5mm/s 程度}で移動していることがわかった．またこの組み合わせ駆動ユニットは，別途，100 万回以上の負荷耐久試験に耐え，寿命は保証されていることを確認している．したがって，前述の Tr20 と Tr22 の組合せの場合と差動機構はほとんど変わらないように仕上げることができたと考えられる．

この試作品で実用試験を試みたところ，立ち上がれない時ゆっくりと座面を上昇させる動きや，速い速度で腰の動きに追随し座面をおしりにフィットさせながら，立ち上がりを補助する機能は実際に使用することで確認できた．ただ，負荷時の移動速度約 10mm/s は遅く感じることや，カバーやガイド部での振動や騒音が不快に感じる程大きくなっていた．



図 2　立ち上がり補助座椅子の試作品

3. 2　立ち上がり補助座椅子の改良設計

試作品の振動や騒音を抑えるべく，次の観点で設計変更を行った．モータの回転速度と使用台形ネジは以下のように変更した．

回転体の危険速度は一般に，次式[2)]で示される．

$$Nc=(30/\pi)\cdot(g/\delta)^{1/2} \quad \cdots \quad (10)$$

ただし，Nc=危険速度[rpm]，g=重力の加速度 980cm/s^2，δ=ネジ棒とガイドの合成たわみ[cm]である．

Ｔr20×4 雄ネジとＴr24×4 雌ネジの組合せにおいて使用したモータの回転速度 1600rpm を危険速度とし，式(10)よりたわみδを逆算すると，δ= 0.035cm となる．約 0.35mm のたわみ量である．このたわみは，雄ネジのたわみと雌ネジを支えるガイドの合成たわみである．

ここで，まずモータの回転速度 1200rpm とし，危険速度 1600rpm より下げ，振動や騒音を低下させることを試みた．また同時に，たわみδを小さくし，ネジの危険速度を 1600rpm より増加させるために，ネジの直径を大きくすることを試みた．さらに，負荷時の移動速度約 10mm/s{無負荷時の 1/10 減速}は約 24mm/s{無負荷時の 1/5 減速}とより速くした．したがって，最大負荷推力は 1960N の 50%，約 980N と見積もる．この値は，体重 980N の人を持ち上げる大きさである．

ここで，ネジ部だけを考慮するので概算ではあるが，たわみδと危険速度を推算してみる．本機構では，雄ネジの両端を支持する両端支持はりと考えられるので，ネジ長等の仕様により，δは次式(11)で示される．

$$\delta=0.021WL^3/(E\ I) \quad \cdots \quad (11)$$

ただし，W=雄ネジ部に垂直にかかる荷重，L=ネジのスパン，E=ヤング率，I=ネジ部の断面 2 次モーメント（π/64)・d^4 である．

ここで，Tr20 と Tr24 のネジ組合せから Tr33 と Tr42 のネジ組合せに変更すると，式(11)よりδは 0.35mm から 0.047mm に変わり，式(10)より危険速度 Nc は，1600rpm から約 4360rpm まで上昇させられることになる．したがって，モータの回転数を 1200rpm とすると，危険速度から十分遠ざけて運転することができるようになると考えられる．

3. 3　3ＤＣＡＤによる立ち上がり補助座椅子の改良設計と製作

3.1，3.2 の開発・改良を踏まえて，3DCAD を用いてさらなる改良を実施した．実施前に，3.1 と 3.2 の結果を踏まえて，福祉の専門化である社会福祉労務士，社会福祉主事も交えて確立した設計コンセプトおよび改良設計と製作の方針の確認結果について(1)と(2)に記載する．(3)は 3DCAD によるさらなる改良について記載した．

(1) 改良方針

この改良は専門家の意見を取り入れて、次のようなコンセプトで実施した．

a) 介護支援に利用することを目的に，福祉用具として認定されている“独立宣言エコライト”なる椅子製品[3)]を採用する．そして，そのリハビリ機能を強化する．

b)「リハビリや立ち上がり補助に便利です．腰やひざへの負担を軽減します．車椅子への移乗も楽に行えます．」という“独立宣言エコライト”なる椅子製品が，福祉・介護貸与品としてすでに製品化されているが，本立ち上がり補助座椅子も同様な機能は実現できている．しかしながら，このようなレンタル製品と根本的に違う点は，体重を感知したときはゆっくりと上昇し，少しでも立ち上がりかけたら早い速度でおしりに追随して座面が上昇する点にある．したがって，腰やひざの状態に応じて座面が自動的に速い遅いを繰り返し，一連の立ち上がり動作の中であまり苦痛を伴わないでそれを補助してくれる．すなわち，電気スイッチを一端入れれば，スイッチのオンオフ動作を必要としないで，自動的に座席上昇速度をコントロールする点にある．このように本座椅子の機構上の特性から，立ち上がりのリハビリ用としての使用を最大の目標とする．

c) 独立宣言エコライトは，180W モータ使用，仕様書等に記述されていないので詳細は記載できないが，プラスチックメートルネジを使用，面の上昇・下降速度は960N 負荷時 15～20mm/s の間で一定，それに対して本補助座椅子は，180W モータ使用，無負荷時座面上昇・下降速度は 120mm/s，960N 負荷時座面上昇・下降速度は約 24mm/s となっており，すべて低速度で上昇・下降させた場合，両者の消費エネルギはほとんど同じであるが，同仕様の空気圧シリンダに比較して約 95%のエネルギ削減[1)]を実現する．

d) ボールネジを使用したリニア駆動機構と比較して，電気スイッチのオフにより安全に停止位置を確保できる構造になっているので，テーブル・化粧台・システムキッチン・洗濯機に対する座面の高さ調整すなわち食事支援，整容支援，炊事支援，洗濯支援等に利用できることを目指す．

e) 座面は床から 150mm から 600mm まで上昇するように設計し，かなり低位置から高位置まで可動させ，例えば，自力でズボンを履く等の動作に適用できることを目指す．

(2) 改良設計と製作

3.1，3.2 を踏まえ表 1 のように設計変更を行った．

表 1 立ち上がり補助座椅子の設計

	仮設計（試作品）	本設計（改善後）
モータ回転数	1600rpm	1200rpm
減速比	1/10	1/5
ネジピッチ	4	6
ネジ径	Tr20 Tr24 台形ネジ	Tr33 Tr42 台形ネジ
荷重	無負荷時 196N 負荷時 1960N	無負荷時 196N 負荷時 980N
速度	無負荷時 107mm/s 負荷時約 10mm/s	無負荷時 120mm/s 負荷時約 24mm/s

以上のように試作品と比較して，雄ネジ雌ネジ共に径を大きくすることで不快に感じない程度の騒音レベルにもっていく工夫をする．また，モータの回転数を落とすことにより振動を減らし，モータ自体の騒音も試作品より下げる工夫をする．さらに，ネジのピッチを上げることにより回転数を落としても試作品より速い速度で動くように設計する．すなわち，危険速度を上げ，実際の回転数を低下させるようにする．

(3) 立ち上がり補助座椅子の 3DCAD による設計

ネジ径や回転数等の変更点を考慮し，3DCAD によりさらなる改良を行った．試作品よりもパーツを減らすことにより簡略で組み立てやすく，コンパクトになるような設計を行った．使用ソフトは SolidWorks 2009 である．

図 3 に 3DCAD による立ち上がり補助座椅子の設計図を，図 4 に立ち上がり補助座椅子折りたたみ状態を示す．図 5 に立ち上がり補助座椅子の主要部の構造を示す．負荷がかかることにより，雄ネジと雌ネジがロックされる．荷重を感知して皿バネが圧縮され，バネの圧縮により雌ネジとブレーキ板の間に隙間が生まれる．これにより雌ネジは外枠からはずされ，雄ネジと差動回転を行うことにより減速運動をおこなう．ボールネ

ジ等を使用していないので，停電時には，雄ネジと雌ネジがロックされ，座席位置を保持でき安全である．

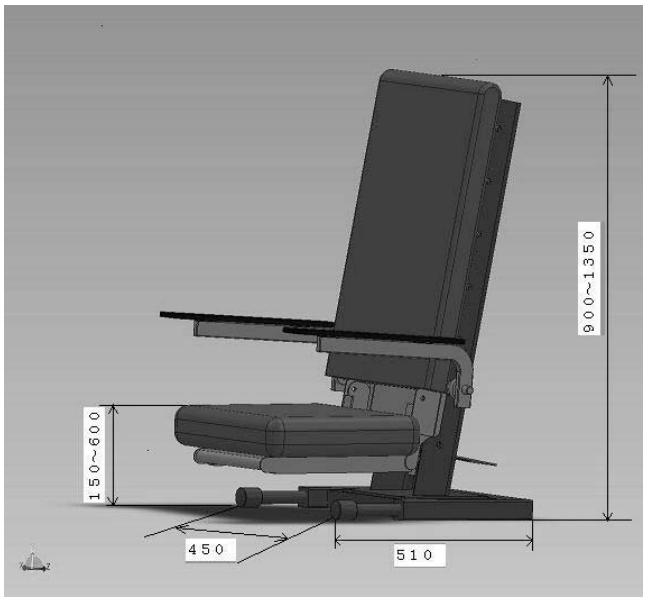


図 3　3DCAD による立ち上がり補助座椅子の設計図

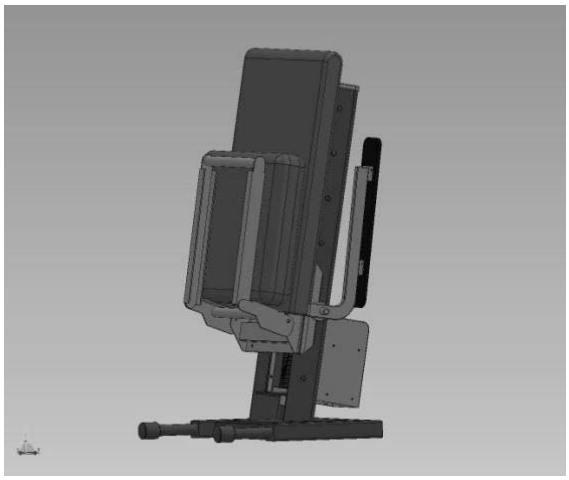


図 4　立ち上がり補助座椅子折りたたみ状態(3DCAD)

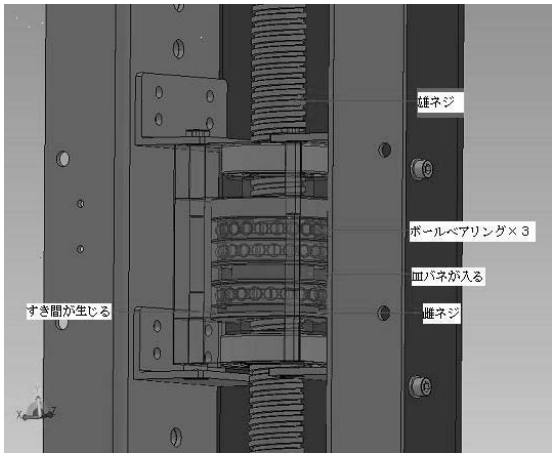


図 5　立ち上がり補助座椅子の主要部の構造（3DCAD）

(4) 立ち上がり補助座椅子の製作および評価

設計の変更後，3DCAD で設計したパーツを発注し，実際に改善品を製作した．図 6 に立ち上がり補助座椅の改善品を示す．総重量は 588N であり，座面の床からの可動範囲は，図 3 の設計図どおり 150㎜～600㎜になっていた．



図 6　立ち上がり補助座椅子の改善品（総重量 588N）

立ち上がり補助座椅子の改善品を試運転し， 動き，リハビリ機能，ADL（食事支援・更衣支援・整容支援），IADL（炊事支援・洗濯支援），騒音等を調べた．980N 負荷時に約 24㎜/s の速度が出ているかについてはストップウォッチとスケールで確認した．10 回の測定の平均は 24㎜/s であった．リハビリ機能については，本校の数人の学生以外に，体重 588N の腰の悪い男性高齢者に被験者となっていただき確認した．この場合，負荷は 980N から 588N に減少したが，雌ネジと雄ネジの接触点半径 R と r はほとんど変化していないと考えられ，座面の移動速度は約 24㎜/s であった．また，無負荷時には 120㎜/s の速度となっていた．これらの値による立ち上がりのリハビリ支援性について確認したところ「このような座椅子を早く市販化してください」との返答をいただいた．ADL と IADL については，種々の用途の高さ位置に移動・固定できることから，実現できていることを確認した．またとくに更衣に関連してズボンが履けるかどうかについても同被験者に実際にやっていただき実現できることを確認した．騒音に関しては，椅子の半径 1m 内で測定した結果，約 60dB(A)であった．この値は試作品の 90dB(A)に比較して低く，一般に不快に感じると言われている 70dB[4]を下回っていた．

4. モニタリングの結果による有用性と改良点の考察

国際フロンティア産業メッセ 2010（9 月 9 日，9 月 10 日，場所：神戸国際展示場）におけるモニタリング結果を踏まえて，本補助座椅子の使用時の有用性と改良点について考察した.

(1) 有用性

a) 椅子が非常に低い位置まで下降するので，足を内股にしたおばあちゃん座りができるところが魅力である．本指摘は我々が考えもしなかった点である.

b) 立ち上がり補助だけではなしに色々な高さで止められるところも有意点ではないか．この点は，本設計のコンセプトの一つでもある.

c) この椅子の売りは何か．通常のモータで変速すればよいのでは．「同仕様として独立宣言エコライトが市販化されているが，負荷時の座面の上昇・下降速度は 15mm/s～20mm/s と一定であり，エコライトには付いていないが，リハビリ機能を向上させようとすれば，無負荷時に速度を変える操作が必要となることである．それに対して，この椅子の特長は，負荷時により速い約 24mm/s の速度で上昇・下降するとともに少しでも立ち上がりかけたら，椅子が速い速度（120mm/s）で自動的におしりにフィットしながら追随してくれるところにある．したがって，とくにリハビリ用に使用していただきたいと考えている.」の説明で納得していただけた.

(2) 改良点

a)モータ音をさらに小さくする工夫が必要である.

b)座椅子の下に車を付けて動かせるようにすればよい.

c)アルミ材でフレームを作ればもっと軽くなるのではないか

5. おわりに

荷重をバネによって自動感知し，通常のネジ運動から転がり運動に変える差動ネジ機構を有する，リニア駆動ユニットを立ち上がり補助座椅子へと適用し，主に設計時の重要点および使用時の有用性について検討した．その結果,

(1)ネジの径やモータの回転数等，主に立ち上がりのリハビリ用という本座椅子の使用目的に近い条件を得ることができた.

(2)1 人の人間が独立して行える食事支援・更衣支援・整容支援等の ADL や炊事支援･洗濯支援等の IADL に適用できることが分かった.

(3)とくに(1)のリハビリ支援機能については，今後，社労士や社会福祉主事の協力を得て，病院や介護施設で多くのモニタリングやアンケートを実施することにより，さらなる改善を目指したい.

謝　辞

本論文を作成するにあたり，社会福祉労務士當間瑞代様と社会福祉主事・社会福祉用具専門委員・ヘルパー・住環境コーディネータ　中辻和美様より助言をいただきました．また本研究は，平成 21 年度科研費（基盤研究(C)(21560156)の助成を受けたものである．各位に厚く御礼申し上げます.

参考文献

1)M. SHINBRI, K. SADAHIRO, Y. MURAO and T. NAKATSUJI, Proceedings of CJICHMTMD-2010, p.20, Jiaozuo, CHINA, 2010.

2)吉沢武男：大学演習機械要素設計，裳華房，p.150, 1991.

3)福祉用具レンタル・販売カタログ，Vol.17（株式会社トーカイ）p.58, 2010.

4)守田　栄，松浦　尚：騒音・振動入門，オーム社，pp.2-3, 1977.

重量物の浮上移動装置に関する基礎研究

石本悠真*　塩崎由樹**　赤山優太***　鈴木隆起****　赤対秀明*****

Study on Floating-Device to Move Heavy Product

Yuma ISHIMOTO*　Yuki SHIOZAKI**　Yuta AKAYAMA**
Takaoki SUZUKI***　Hideaki SHAKUTUI****

ABSTRACT

In the present study, in order to develop a simple floating-device to move large-size furniture such as a chest of drawers, the experiments are carried out by two different devices. In the devices, there are two principles that is besed on spout of air (spout type) and difference of inner and external pressure of floating device (air-room type), respectively. In the experiment the performance such as tension, pressure, stability is investigated and compared in different devices. (i) There is little difference about the material of a bottom board and the pattern distribution of air holes on the capability for floating of spout type. (ii)The tension and power of air-room type is very small as compared with the spout type and stability is also good. (iii) In this experiment, it is possible to move the floating device at the tension T = 30～40 N at the maximum on the load (M =50 kg) at flow rate, Q = 10 m^3/h.

Key words：　room divider, floating-device, spout type, air-room type

1. 緒言

近年，一つの大きな室内空間を間仕切ることで，家族構成や生活の変化に合わせて部屋の数や構成を自由に変更し，長期にわたって住宅を利用しようという新しい生活スタイルが提案されている．平成 19 年には日本政府によって提言された「200 年住宅ビジョン」[(1)]において，住宅の構造を，耐久性を有する構造躯体（スケルトン）と居住者の生活等に対応した可変性を有する内装設備（インフィル）に分離させることが重要と指摘されている．生活環境に合わせて容易に間取りを変更できる間仕切り家具は，インフィルに対応でき，この施策を発展させるには非常に有効である．

現在，この間仕切り家具の移動には，人による直接移動，キャスター移動方式が主である．しかし一般的に，タンスなどの間仕切り家具は非常に重く，それらの家具を移動するために大きな労力を必要とする．また，キャスター移動方式は，構造が簡単で安価であるが，車輪に対して横方向の移動性が悪いことや床が凹む可能性がある等の欠点がある．そのため最近では，空気を利用した移動方式が研究されており，家具を浮上移動させることで移動に必要な力を軽減し，容易に移動できる装置も実用化されている[(2)]．しかし，その多くはコストが高く，また家具を移動する度に，家具を持ち上げて設置，取り外しする必要があるため，一般家庭には普及していない．したがって，一般家庭用に，家具と一体型の低コストな装置の開発が望まれている．

本一連の研究では，タンスを対象とした大型家具を移動させることを目的に，より簡便な重量物の浮上移動装置の開発が行われてきた．これまでの研究[(3)]では，装置への送風流量が高流量のときに，キャスター式移動方式と同程度の引張力での移動を可能にしているが，大きな振動が発生し安定した移動が困難となっている．そこで本研究では，浮上移動装置の浮上原理や形状および素材に関して検討し，浮上性能の改善を図ることを目的とする．

*　専攻科　機械システム工学専攻
**　本科　機械工学科
***　本科　機械工学科　平成 23 年卒業
****　機械工学科　講師
*****　機械工学科　教授

2. 浮上原理

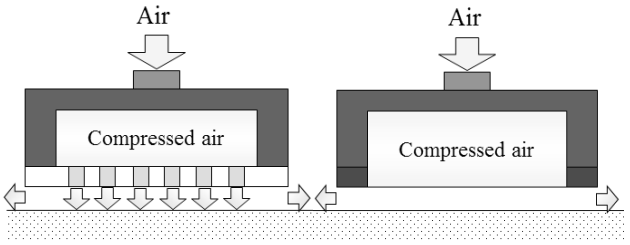
地面と物体間には物体の質量に比例して摩擦力が発生し，それは移動時に抵抗となる．本研究では，次の二種類の原理を利用して装置を浮上させ摩擦低減を試みる．

(1) 噴出型

Fig.1(a)に噴出型浮上原理の概略図を示す．装置底板に設けられた多数の細孔から空気を噴出させることで，その反力と，底板と地面の間に生じた空気層によって，装置と地面との間の摩擦力を低減する方法である．本形式においては，空気室内の圧力エネルギーに比べて，噴出による速度エネルギーが浮上性能に対して支配的となる．以後，この方式を用いた装置を噴出型浮上移動装置（Spout type）と呼ぶ．なお，これまでの研究[3]では本方法が用いられている．

(2) 空気室型

Fig.1(b)に空気室型浮上原理の概略図を示す．送風機から送られた空気が装置空気室内で圧縮されることで，空気室内の圧力が増加し，装置が浮上力を得る方法であり，ホバークラフトの原理[4),(5)]として広く知られている．このとき，空気室内外の圧力差により圧縮空気は空気室外へ排出されるため，地面との接地面に噴出型と同様に空気層が形成される．本形式においては，空気の噴出による速度エネルギーに比べ，空気室内の圧力エネルギーが浮上性能に対して支配的となる．以後，この方式を用いた装置を空気室型浮上移動装置（Air-room type）と呼ぶ．



(a) Spout type　　(b) Air-room type

Fig.1　Principle of floating-devices

3. 実験装置および実験方法

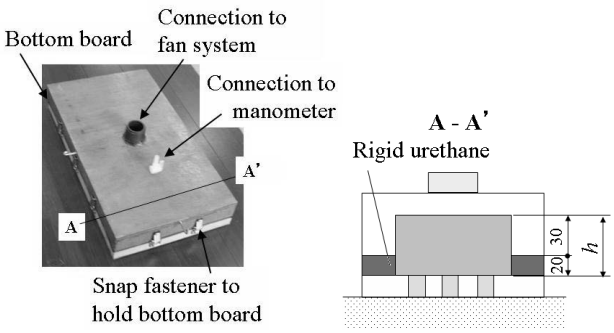
3. 1　実験装置　　本研究では，浮上移動装置の原理や底板の形状および材質による浮上性能の違いを調べるため，第 2 章で述べた原理に基づいた，二種類の浮上方法による装置を使用する．

3. 1. 1　噴出型浮上移動装置　　Fig.2(a)に製作した噴出型浮上移動装置の外観を示す．装置は長さ 440 mm，幅 250 mm，高さ 58 mm，質量 1.85 kg であり，装置の底面積は市販されている一般的なタンスの底面積の 4 分の 1 とした．底板には多数の空気排出用の細孔を設けており，空気孔配置パターンおよび材質を変えて実験を行うため，スナップ錠を取り付けて底板を取り外し可能な構造とした．また，空気漏れを防ぐため，シール材として硬質ウレタンを取り付けている．なお，本装置において，空気室の高さ h は装置上部 30 mm，下部 20 mm の計 50 mm（Fig.2(b)）で一定である．

Fig.3 に底板の空気孔配置パターンを示す．空気孔配置パターンは，装置の安定性に対して影響をもつことが考えられる．これまでの研究における底板の空気孔配置パターンである格子状（Fig.3(a)）に加え，底板の中央部に空気孔が集中している放射状（Fig.3(b)）の空気孔配置パターンも用意した．格子状において，空気孔の配置間隔は縦 22 mm，横 25 mm で ϕ3 の貫通穴を 160 個, 放射状は高流量時の底板の反り対策として中央に多く穴を配置しており，底板の中心から半径 20 mm ずつ増やした同心円上に 15° 間隔で ϕ3 の貫通穴を 160 個配置している．開口率βは，これまでの研究[3]においてβ = 1 %で最も良い浮上性能が得られていたため，本研究においても格子状，放射状ともにβ = 1 %としている．なお，開口率βは次式によって求められる．

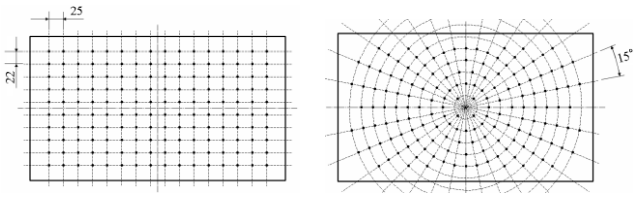
$$\beta = \frac{\text{空気孔の総面積}}{\text{底面積}} \times 100 \qquad [\%] \qquad (1)$$

底板の材質には，それぞれの空気孔配置パターンに対して，硬さの異なるポリエチレンテレフタレート：PET（曲げ強さ 78～95 MPa）とポリプロピレン : PP（曲げ強さ 43 MPa）の二種類を用いる．なお，PET および PP の板厚は 3 mm とした．



(a) Geometry of spout type　　(b) Height of air-room

Fig.2　Floating-device of spout type



(a) Orthogonal pattern　　(b) Radial pattern

Fig.3　Distribution of air hole

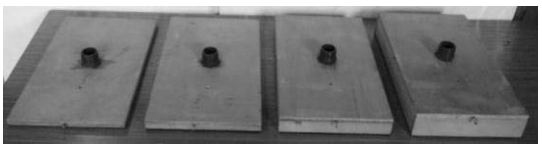
3. 1. 2　空気室型浮上移動装置　　本研究では，空気室高さ h（Fig.1(b)）が浮上性能に与える影響を調べるため，h の異なる四種類（h = 0, 10, 30, 50）の装置を製作した．Fig.4，Fig.5 に製作した空気室型浮上移動装置

の外観を示す．装置は長さ 440 mm，250 mm で空気室高さ h によらず同じであるが，各空気室高さの装置の質量は h = 0 mm は 0.92 kg，h = 10 は 0.97 kg，h = 30 は 1.22 kg，h = 50 は 1.45 kg である．装置の外形寸法は噴出型と同じである．なお，装置と地面との平滑度を向上させるため，装置底部に硬質ウレタンを接着している．



(a) Top view　　(b) Bottom view

Fig.4　Geometry of floating-device of air-room type

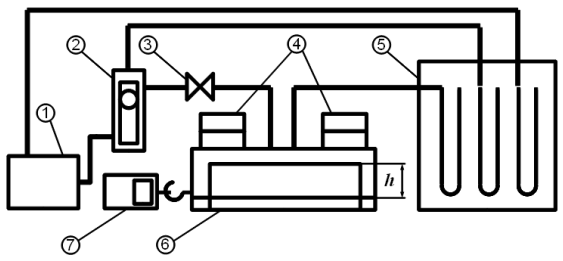


(a) h = 0　(b) h = 10　(c) h = 30　(d) h = 50

Fig.5　Height of floating-device of air-room type

3．2　実験方法　Fig.6 に実験装置の概略を示す．浮上に必要な空気は，送風機①から面積式流量計②を介してバルブ③によって調節され，浮上移動装置⑥に送られる．Fig.7 に示すように，送風機には家庭で使用されることを想定し，容器内に密閉された汎用の家庭用掃除機の排気空気を用いている．また，床面の条件を同一にするために，全ての実験は定盤（金属加工時に用いられる平面の基準となる水平な台）上で行う．

実験では各浮上移動装置において，負荷質量④に対する，(1)引張力 T ，(2)装置内圧力 P_u と送風機内圧力 P_f ，および，(3)浮上の安定性を測定する．なお，負荷質量にはレンガ（2.5kg/個）を用い，本実験では，荷重が偏らないように配置する．



①Fan system　②Flow meter　③Valve
④Load　⑤Manometer　⑥Floating-device
⑦Push-pull gage

Fig.6　Schematic of experimental equipments



Fig.7　Photograph of fan system by vacuum cleaner

3．3　実験条件　Table 1 に各浮上移動装置に対する実験条件を示す．噴出型は流量 Q = 0 ～ 100 m^3/h で 20 m^3/h 間隔であるが，空気室型は噴出型に比べ少ない流量で浮上できたため，低流量域を詳しく調べるために，流量の測定間隔を 10 m^3/h とした．また，一般的なタンスの総質量は 200 kg 程度とされていることから，本実験装置の底面積の割合より搭載する負荷質量は最大 50 kg とした．なお第 4 章で述べる比較実験および詳細実験の実験条件に関しては，各実験結果において述べる．

Table 1　Experimental conditions

Hovering type	Spout type	Air-room type
Floor	surface plate	
Flow rate [m^3/h]	0 ～ 100	0 ～ 60
Mass [kg]	0, 10, 20, 30, 40, 50	

3．4　測定項目　本実験では，浮上性能を評価するため，以下について調べる．

(1) 引張力 T

負荷質量に対する浮上移動装置の引張力 T は，装置側面に取り付けられたフックにより，デジタルプッシュプルゲージ（アイコーエンジニアリング製，RX-50）（Fig.6：⑦）を用いて直接引っ張ることで測定する．引張力は装置が動き出した瞬間の値を用いており，装置の長辺側および短辺側それぞれの方向から引っ張った値の間に大きな差は認められなかったため，両者の平均値としている．なお本研究では，キャスター移動方式と同程度の引張力 40 N を目標引張力としている．

(2) 装置内圧力 P_u ，送風機内圧力 P_f

浮上移動装置，送風機出口それぞれに静圧孔を設け，マノメータ（Fig.6：⑤）により圧力を測定する．マノメータにおける作動流体は，水と空気であり，マノメータの一端は大気開放されている．それぞれの圧力はマノメータの液面差 Δh より，次式により算出する．

$$P - P_0 = \rho_w g \Delta h \quad \text{[Pa]} \tag{2}$$

ここで，P は測定圧力，P_0 は大気圧，ρ_w は水の密度である．なお，空気の密度は水の密度に比べ十分小さいとし，無視している．

(3) 安定性

浮上させた際の浮上移動装置の振動および牽引時の

振動を目視観察および振動音を聴くことにより評価する．

4. 実験結果および考察

4. 1 噴出型および空気室型の浮上性能と比較実験

空気の噴出力による浮上原理の噴出型浮上移動装置と，ホバークラフトの浮上原理を利用した空気室型浮上移動装置の浮上性能を調べ，両者の比較を行った．実験条件は Table 1 に示した通りであるが，浮上性能を比較するため，負荷質量に関しては M = 50 kg で一定とした．また，浮上性能は引張力，装置内圧力より求める動力，安定性で評価した．なお，噴出放射状型の実験結果は，大きな振動により M = 30 kg までしか測定できなかったため，参考として M = 30 kg の結果としている．

Fig.8 に引張力 T – 流量 Q 特性を示す．流量 Q = 0 m^3/h のとき装置は浮上せず，引張力は質量および地面との床面の状態に依存する．本実験ではいずれの空気孔配置パターン・材質においても装置の仕様は同様であるため，負荷質量が同じ場合，引張力は同程度である．なお，噴出放射状型においては M = 30 kg であるため引張力は小さい．

噴出型装置において，流量の増加とともに引張力は二次関数的に減少することが確認できる．これは，流量が増加すると連続の式の関係から底板の空気孔から噴出される空気の速度 v が増加し，空気の密度をρとすると動圧$\rho v^2/2$ より摩擦低減効果が大きくなるためであると考えられる．空気孔配置パターンに対しては負荷質量が異なるため比較できないが，負荷質量を同じ（M = 30 kg）とした場合，引張力はほぼ同じであることを確認している．また，材質に対してはほとんど影響はない．なお，噴出型装置においてはこれまでの研究と同様に，Q = 100 m^3/h の時でのみ目標引張力 40 N 付近での引張が可能であったが，いずれの場合も 40 N 以下にはならなかった．

空気室型装置においては，流量が Q = 10 m^3/h になると急激に引張力は低下し，それ以降はほぼ一定（T = 30 ～40 N）になることが分かる．これは，装置内圧力がある値に達したとき装置が浮上し，それ以降は装置底部に生じている隙間から圧力が逃げるため，ほぼ一定の引張力になるものと考えられる．

Fig.9 に動力 W – 流量 Q 特性を示す．動力 W は負荷質量を浮上移動させるために必要な単位時間当たりのエネルギーであり，次式で定義した．

$$W = QP_u \quad [\mathrm{W}] \qquad P_u：装置内圧力 \qquad (3)$$

噴出型，空気室型ともに流量が増加すると，それに比例して動力が増加し，少ない流量で済む空気室型の方が省エネルギーであることがわかる．噴出型については，底板素材および空気孔配置パターンによる違いはあまり見られないが，空気室型については空気室の高さが高いほど，動力すなわち送風機内圧力が低くなることがわかる．これは，断熱圧縮を仮定すると空気室の高さが高くなると空気室の体積が大きくなり，送風機内圧力が低くなるためであると考えられる．

Table 2，Table 3 に各装置の安定性を示す．Table 2，Table 3 中の○印は「振動なし」，△印は「振動あり」を示しており，○が多いほど安定性の範囲が広い．また，目視観察では定量的に表せないため，同じ△でも振動の度合いは異なり，基本的には負荷質量・流量が大きいときほど振動は激しい傾向にある．噴出型の場合，安定して浮上可能な範囲は底板素材および空気孔配置パターンの影響はほとんどなく，Q = 20～60 m^3/h の範囲である．一方，空気室型の安定可能な範囲は Q = 10 ～20 m^3/h の間である．安定な浮上範囲は噴出型の方が広いものの，どの流量においても目標引張力には到達していない．一方，空気室型は低流量（Q = 10 m^3/h）で目標引張力に到達しており，その領域で安定的な浮上が可能であることが分かる．なお，安定性は空気室高さ h により変化することから，適切な空気室高さが存在することを示唆しており，詳細は 4．2 節にて述べる．

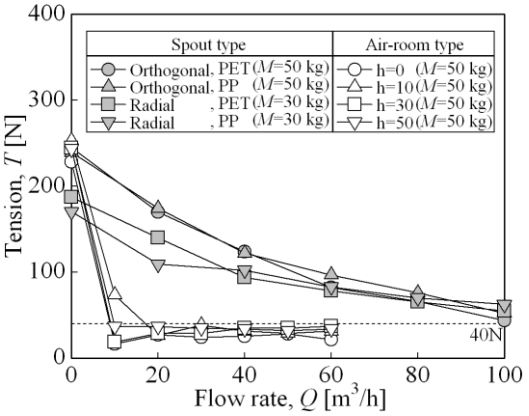


Fig.8 T – Q characteristic

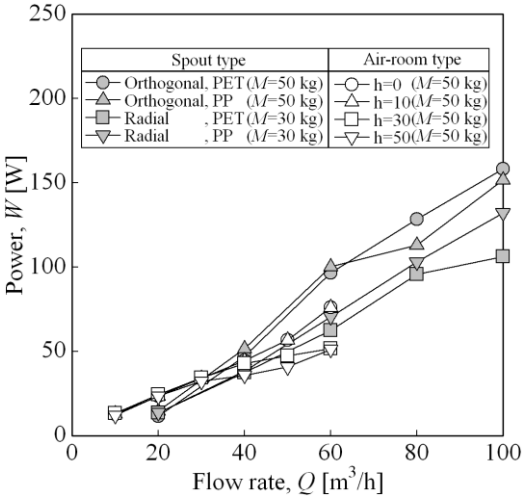


Fig.9 W – Q Characteristic

Table 2　Stability of spout type

Flow rate, Q [m^3/h]		20	40	60	80	100
M = 50 kg	Orthogonal, PET	○	○	△	△	△
	Orthogonal, PP	○	○	○	△	△
M = 30 kg	Radial, PET	○	○	△	△	△
	Radial, PP	○	○	△	△	△

Table 3　Stability of air-room type (M = 50 kg)

Flow rate, Q [m^3/h]	10	20	30	40	50	60
h = 0	△	△	△	△	△	△
h = 10	○	○	△	△	△	△
h = 30	○	△	△	△	△	△
h = 50	○	△	△	△	△	△

4．2　空気室型の詳細実験　4．1節で，引張力，動力，安定性の観点より，噴出型より空気室型の方が浮上性能が高いことを確認したため，本節では空気室型浮上移動装置の詳細な実験を行った．以下に各実験結果を示す．なお，実験条件は Table 1 と，評価項目は 3．4 節とそれぞれ同一である．

Fig.10 に引張力 T – 流量 Q 特性を示す．流量 Q = 0 m^3/h の場合，負荷質量が大きいほど摩擦力により引張力は大きくなるが，空気室高さ h に関わらず流量 Q が増えると急激に引張力が低下し，Q = 20 m^3/h 以上でほぼ一定の引張力 T = 30～40 N となる．また，負荷質量が大きいほど引張力の一定値は大きくなることも確認できる．これは，流量の増加により内部の圧力が増加することで浮上力が発生するものの，同時に隙間からの流出量が増加し，ある流量以上では装置内部の圧力が大きく増加しない，もしくは一定になるためであると考えられる．なお，装置内部の圧力に関しては本節において後述する．また，どの空気室高さにおいても流量が増加すると振動が発生したが，目標引張力である T = 40 N 前後になったことから，振動が発生しても浮上力は維持されると考えられる．

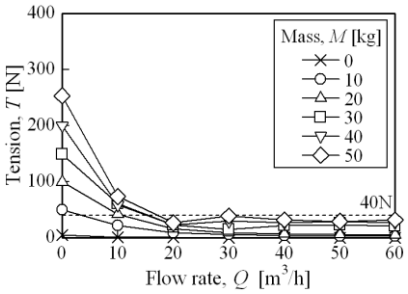
Fig.11 に空気室高さ h = 10 mm の場合の，負荷質量 M に対する送風機圧力 P_f – 流量 Q 特性を示す．なお本実験装置においては，低流量の場合，過負荷により送風機が停止したため流量 Q < 10 m^3/h における圧力測定できなかった．本結果はいわゆる送風機の性能曲線であり，流量の増加に伴い圧力は緩やかな右下がり傾向を示す．また送風機出力は負荷質量の影響を受けないことも確認でき，他の空気室高さの場合も同様であった．

Fig.12 に各空気室高さ h における負荷質量 M に対する装置内圧力 P_u － 流量 Q 特性を示す．圧力は空気室高さによらず，比較的負荷質量が小さい場合，流量に対してほぼ一定あるいは緩やかに増加することが確認できる．そのため流量を増加させた場合でも，空気室内部の圧力はほぼ一定となり，引張力はほぼ一定になると考えられる．また，負荷質量の増加により装置内圧力は増加する．これは負荷質量の増加により，装置と定盤との隙間が狭くなり，空気の圧縮率が増加したためであると考えられる．

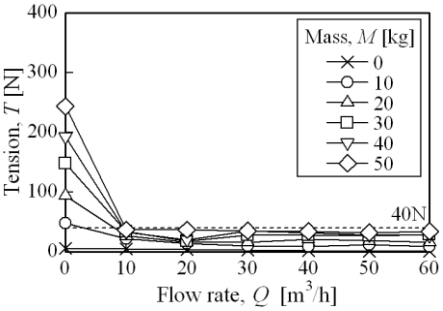
一方，負荷質量が比較的大きい場合，流量の増加によって圧力は急に減少することが確認できる．この領域においては装置が比較的大きな振動を伴うことを確認しており，流量の増加によって振動が増加することで，空気室内の空気の流出量が大幅に増加するためであると考えられる．なお，データを示していないが h = 0 mm の場合，高負荷時にはどの流量においても振動は発生したが，低流量域では振動による装置内圧力の低下は，ほとんど確認できなかった．

Table 4, Table 5 に安定性を示す．浮上の安定性は空気室高さが低いほど良いことが確認できる．これは空気室高さが高いほど重心位置が高くなり，振動による影響が大きくなるためであると考えられる．しかし h = 0 mm の時のように空気室高さが低すぎる場合にも，逆に振動は増加した．そのため，空気室高さには適切な高さが存在し，本実験範囲では h = 10 mm で最も安定性が良かった．なお，全ての空気室高さにおいて，高流量時には振動が増加することが確認できた．

以上より安定性，引張力より評価すると，本実験において h = 10 mm が最も浮上性能が良いと考えられる．



(a) h = 10 mm



(b) h = 50 mm

Fig.10　T – Q Characteristic (Air-room type)

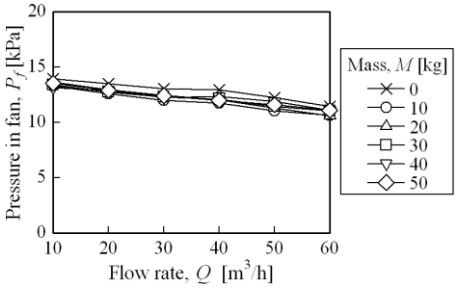
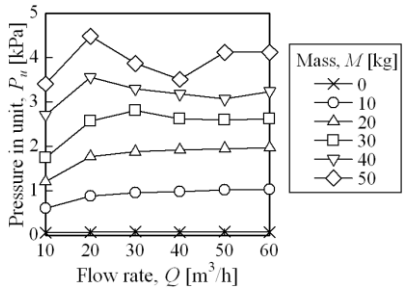
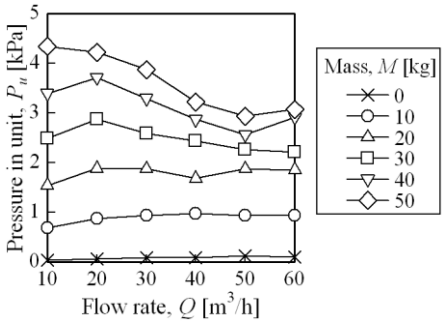


Fig.11　$P_f - Q$ Characteristic (Air-room type,　h = 10 mm)



(a) h = 10 mm



(b) h = 50 mm

Fig.12　$P_u - Q$ Characteristic (Air-room type)

Table 4　Stability of air-room type (h = 10 mm)

Mass	Flow rate, Q [m^3/h]					
M [kg]	10	20	30	40	50	60
0	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○	○
30	○	○	○	△	△	△
40	○	○	△	△	△	△
50	○	○	△	△	△	△

Table 5　Stability of air-room type (h = 50 mm)

Mass	Flow rate, Q [m^3/h]					
M [kg]	10	20	30	40	50	60
0	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	△	△	△
20	○	○	△	△	△	△
30	○	○	△	△	△	△
40	○	○	△	△	△	△
50	○	△	△	△	△	△

5. 結言

本研究ではタンスなどの大型家具の浮上移動装置開発を目的に，噴出型と空気室型の浮上移動装置で実験し比較・評価した．また浮上性能の良かった空気室型でさらに実験を行い，詳細な浮上性能を調べた．その結果以下のことがわかった．

Ⅰ．噴出型および空気室型の浮上性能の比較実験

(1) 噴出型の浮上性能には底板素材・空気孔配置パターンによる違いはほとんどない．

(2) 噴出型の引張力は流量の増加に伴って低下するが，本研究では T = 43.7 N（噴出格子状型 PET）が最小であり，目標引張力 T = 40 N を達成できなかった．

以上の結果より，空気室型は噴出型より浮上性能が良いと判定した．

Ⅱ．空気室型の詳細実験

(1) 流量が増えると急激に引張力が低下し，Q = 20 m^3/h 以上ではほぼ一定の引張力 T = 30～40 N となる．

(2) 空気室型において，装置内圧力は流量が増加してもほぼ一定あるいはわずかに増加であり，負荷質量が大きいほど圧力は高くなる．また，振動を伴う浮上において圧力は減少する傾向にある．

(3) 空気室型においては安定性に関しては，どの条件においても高流量では振動が発生する．また空気室高さには適切な空気室高さが存在し，空気室高さが低過ぎる場合を除いて，高さが低い程，安定的となる．

(4) 本実験において，安定性，引張力を重視して比較すると，空気室型の浮上性能は h = 10 mm が最も良く，Q = 10 m^3/h で安定的な浮上移動が可能である．

参考文献

(1) 国交省住宅局住宅生産課木造住宅振興室：「200 年住宅ビジョン」, pp.1 - 28, 2007.

(2) 「株式会社コーテック　エアスレッド」< http://www.cotech-inc.com/airthread.html >（2011/09/19 アクセス）

(3) 石本悠真，赤山優太，鈴木隆起，赤対秀明：「重量物の浮上移動装置に関する基礎研究」，日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会　講演論文集 No.114-1, pp.7 - 12, 2011.

(4) P. R. Crewe，et al.：「ホバークラフトの原理（高木敬太郎・訳）」,造船協会誌第 379 号, pp.165 - 171, 1959.

(5) Qing Shan，et al.：「Towards an Electric-Powered Air-Gliding Skateboard」, 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Mechatronics, pp.108 - 113, 2008.

低カロリーバイオマスガスの火炎挙動と燃焼特性に関する研究

芦田龍郎＊　　吉本隆光＊＊

Research into Flame Behavior and Combustion Characteristics of Low calorie Biomass Gas

Tatsuro ASHIDA＊　Takamitsu YOSHIMOTO＊＊

ABSTRACT

The gasification gas produced in gasification furnace and the bio-mass gas collected from sewerage processing are receiving attention as renewable energy. The bio-mass gas of which the release calorific value is about a tenth of methane calorific value is the gas that contains much inert gas (N_2, CO_2). It is important that the bio-mass gas is utilized as one of renewable fuel. In this study we research into combustion characteristic and stability limits of the bio-mass gas diffusion flame.

Keywords:　bio-mass gas, renewable energy, diffusion flame, low calorific value fuel

１．はじめに

近年，再生可能ガス等のバイオマスガス燃料が注目を集め，燃料としての実用化も報告[(1)]されている．ガス炉から発生するガス化ガス・下水処理施設また木質系廃材から回収されるバイオマスガスは不活性ガス(窒素・二酸化炭素)を多く含んでいるバイオマスガスであるが，燃料としても有用であると考えられる．

本研究ではガス化炉から発生する発熱量が純粋なメタンの 10 分の 1 である低カロリーバイオマスガスを使用する．低カロリーバイオマスガスでは，多種のガス成分が混合されているため、安定条件を検証することが困難になっている．そのため火炎を安定に保つしくみはまだ不明な点も多く研究途中の段階である[(2)(3)(4)(5)].そこで，この低カロリーバイオマスガスを元に，模擬低カロリーガスを作成する．模擬低カロリーガス成分割合は，各種可燃性ガスまた不活性ガスを混合することによって自由に決定できる．製作した模擬低カロリーガスをノズルより噴出し拡散火炎を形成する．そして低カロリーバイオマスガス中の各種ガス成分がそれぞれどういった影響を火炎挙動･火炎安定･火炎温度に与えているかを検証する．

２．実験装置及び実験方法

Fig.1 に本実験に用いた燃焼装置を示す．

ガス化炉から回収される低カロリーバイオマスガスの成分割合はメタン 2.48%，水素 12.13%，一酸化炭素 8.91%，二酸化炭素 12.92%，窒素 63.56%である．この数値を元に模擬ガスを作成する．

流量測定は流量調節弁付フロート流量計を用いる．

ノズルは内径が 0.34[mm]～1.21[mm]のものはステンレス管で，1.94～5.00[mm]のものは銅管を使用している．

温度測定には0.1[mm]のR型熱電対(Pt-PtRh13%)とピトー管移動装置を用いて火炎の高さ及び半径方向の各位置での火炎温度を測定する．

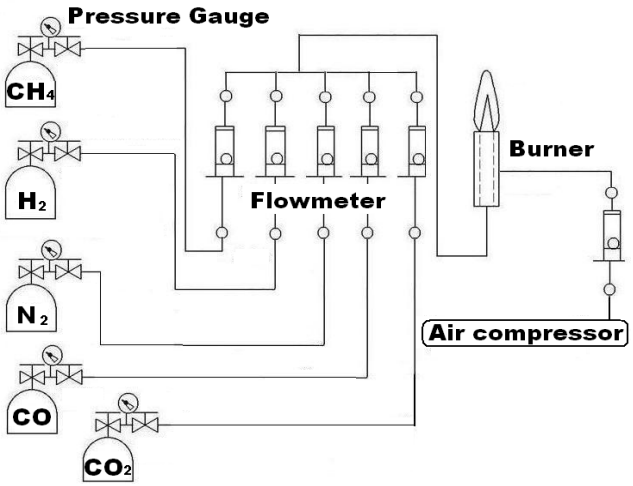


Fig.1 Flow chart

ガスサンプリングには， Fig.2 に示すサンプリングプローブとピトー管移動装置を使用する．

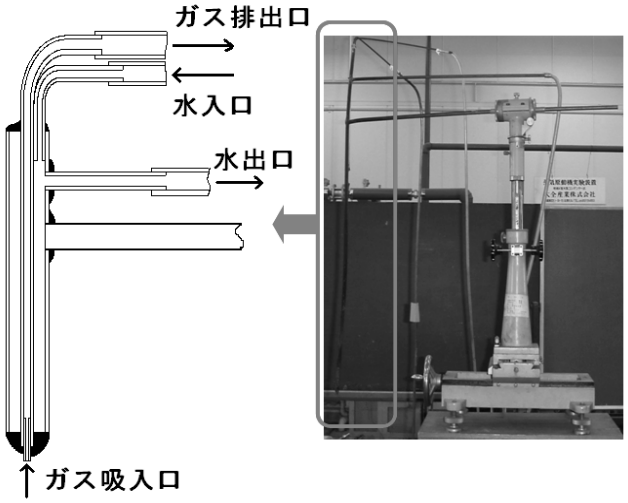


Fig.2 Flame temperature measurement equipment

＊　専攻科　機械システム工学専攻
＊＊機械工学科　教授

３．実験結果

本研究ではガス化炉から回収される低カロリーバイオマスガスを対象とする．このガスの成分を元に模擬低カロリーガスを製作し実験を行った．各実験で測定した値，また火炎の挙動を写真に撮ったものを示し，考察を述べる．

３．１　模擬低カロリーガスの火炎安定　ガス化炉から回収される低カロリーバイオマスガスは，多くの種類のガス成分を含んでいる．多くの成分を含むバイオマスガスが安定して燃える条件を特定するために，それぞれのガス成分が燃焼に及ぼす影響を調べる．可燃性ガスである水素とメタンをベースとして，不活性ガスの窒素と二酸化炭素を混合させた模擬低カロリーガスを使用し，低カロリーバイオマスガスにおいて各成分が及ぼしている影響を検証していく．

ノズルを使用する燃焼には，ノズルの内径が火炎の安定に大きく影響する．そこで各ノズル径における安定限界を調べる．燃料の噴出速度を上昇させていき火炎が吹き飛んだ速度を安定限界とした．

３．１．１　水素による模擬低カロリーガスの火炎安定変化

水素と窒素を混合した，模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.3 に成分割合別で，Fig.4 にノズル内径別で示す．

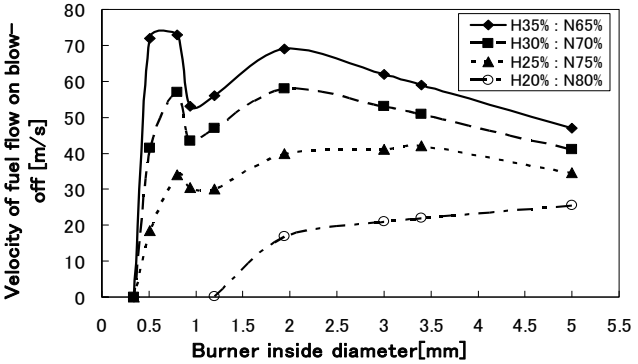


Fig.3 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Hydrogen-Nitrogen mixed)

水素割合が大きくなっていくにつれ，火炎は安定する．水素割合 25%以上では，ノズル内径 1.94[㎜]より大きくなると，安定性が下がる傾向にあることがわかる．また水素割合が 25%よりも大きくなると 0.80[㎜]付近で安定性が向上し，35%以上になると 0.51[㎜]でも向上することが確認できる．ノズル内径 1[㎜]付近で急激に数値が低下する原因としては，リム厚さ等の要因が考えられるが，今後詳しく調べていく．

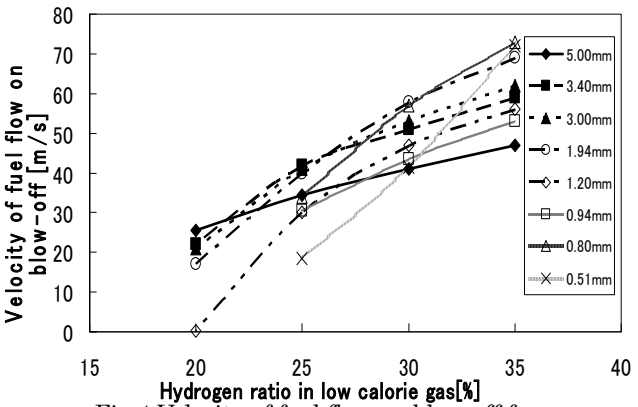


Fig.4 Velocity of fuel flow on blow-off for each Hydrogen rate in low calorie gas (Hydrogen-Nitrogen mixed)

ノズル内径 0.51[㎜]において水素割合を増やすと，他のノズルよりも急激に安定性が向上することが確認できる．

水素に二酸化炭素を混合した，模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.5 に成分割合別で示す．Table 1 に，水素に混合する不活性ガスを窒素から二酸化炭素に変えたときの，安定性(吹き飛び速度割合)の低下を示す．水素－窒素火炎の安定性を 100%とし，水素－二酸化炭素火炎の安定性が何%低下しているかを示したものである．

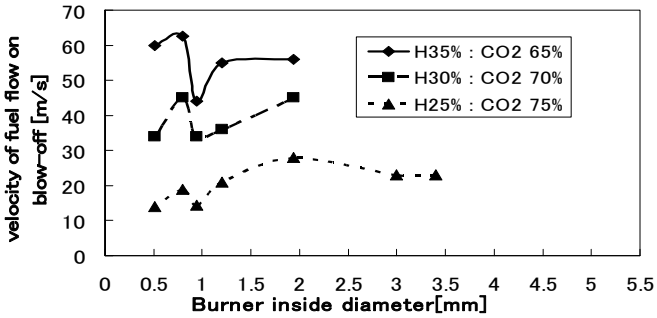


Fig.5 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Hydrogen-Carbon dioxide mixed)

Table 1 Impaired fraction of the flame stability with changing Nitrogen to Carbon dioxide in Hydrogen flame [%]

		Hydrogen rate in low calorie gas		
		35[%]	30[%]	25[%]
Burner inside diameter [[mm]]	1.94	18.8	22.4	30.0
	1.20	1.8	22.4	30.0
	0.94	17.1	21.8	52.5
	0.80	14.4	21.1	44.1
	0.51	16.7	18.1	24.3

水素-窒素の場合と変わらず，ノズル内径が 1.94[㎜]より大きくなると安定性が下がり，0.80[㎜]付近で安定性が向上している．水素に混合するガスを，窒素から二酸化炭素に変えると，全体的に火炎安定性が 20～30%程度減少しており，最大で 50%低下している点も確認できる．定性的には，模擬低カロリーガス中の不活性ガス割合が増えるにつれて，二酸化炭素混合の方が安定性が低下している．ノズル内径を小さくしていっても，二酸化炭素が火炎の安定性を低下させる割合が大きくなったり，小さくなったりすることはなかった．

３．１．２　メタンによる模擬低カロリーガスの火炎安定変化

メタンに窒素を混合した，模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.6 に成分割合別で，Fig.7 にノズル内径別で示す．

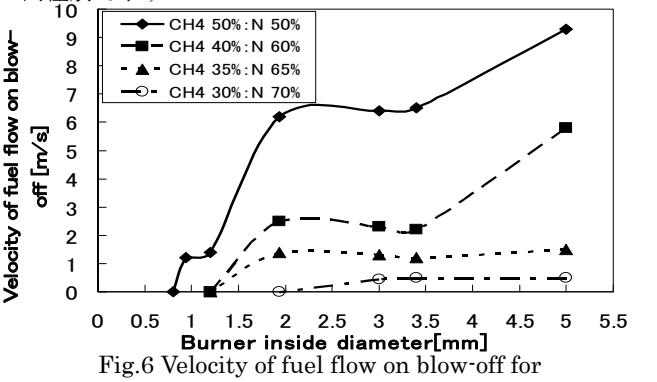


Fig.6 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Methane-Nitrogen mixed)

メタンは水素の場合とは違い，ノズル内径が大きくなるにつれ燃焼性が向上していることがわかる．これは岩本ら[6]によって調べられているが，メタンガスを大流量で噴出させ燃焼すると，ノズル上部で浮き上がり火炎を形成する現象に起因しているのだと考えられる．火炎が大きく浮き上がることにより，ノズル径による影響が小さくなり水素とは違った傾向が見られたと考えられる．メタン割合が 25%以下では着火しなかった．ノズル内径が 2.00[mm]以下になると急激に安定性が低下し消炎にいたった．

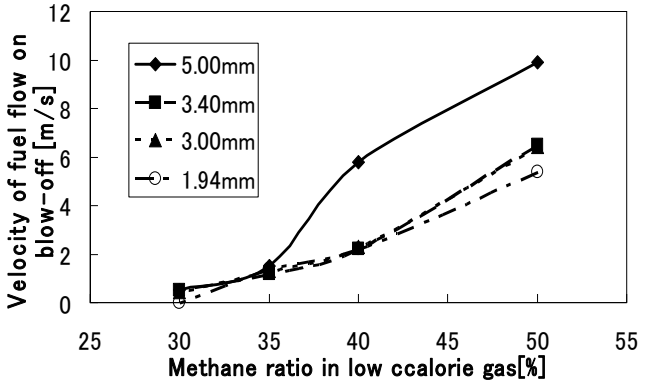


Fig.7 Velocity of fuel flow on blow-off for each Methane rate in low calorie gas (Methane-Nitrogen mixed)

ノズル内径が 5.00[mm]の時，他のノズルとは違い，メタン割合 40%以上になると，安定性が大幅に上昇していることが確認できる．

メタンに二酸化炭素を混合した，模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.8 に成分割合別で示す．Table 2 に，メタンと窒素を混合した火炎の安定性を 100%としたときの，メタンと二酸化炭素を混合した火炎の安定性を示す．

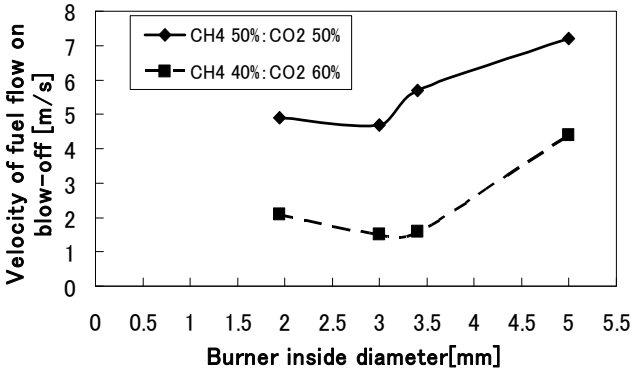


Fig.8 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Methane-Carbon dioxide mixed)

Table 2 Impaired fraction of the flame stability with changing Nitrogen to Carbon dioxide in Methane flame [%]

		Methane rate in low calorie gas	
		50[%]	40[%]
Burner inside diameter [[mm]]	5.00	22.6	24.1
	3.40	12.3	27.3
	3.00	26.6	34.8
	1.94	21.0	16.0

メタン - 窒素のときとほぼ同じ傾向を示している．メタン割合 30%以下のときは着火しなかった． メタンに混合するガスを窒素から二酸化炭素に変えることによって火炎吹き飛び時の燃料噴出速度が 20～40%程度低下していることがわかる．さらに，模擬低カロリーガス中の不活性ガス割合が増えるにつれて，二酸化炭素混合の方が 1.94[mm]以外では安定性が低下している．

３．１．２　水素とメタンの混合による模擬低カロリーガスの火炎安定変化　水素-メタン-窒素の三種を混合した模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.9 に成分割合別で示す．

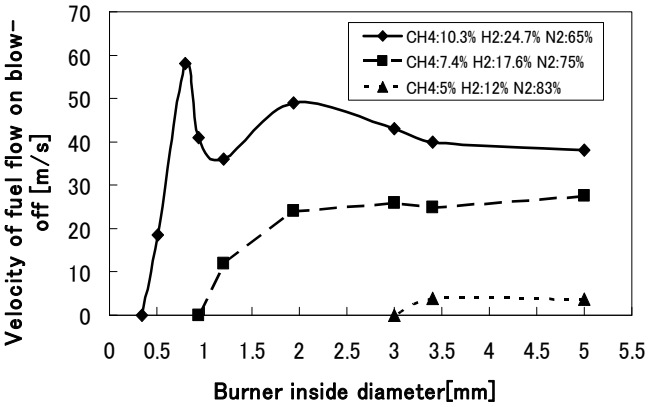
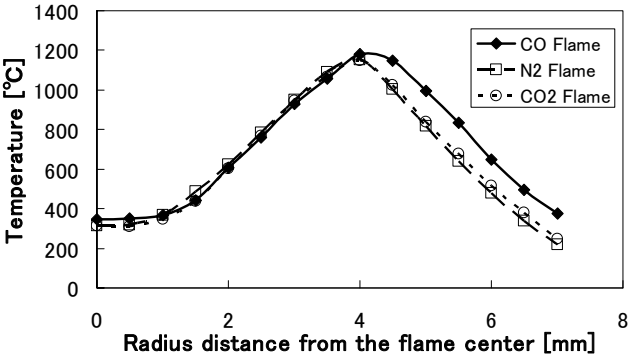


Fig.9 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Hydrogen-Methane-Nitrogen mixed)

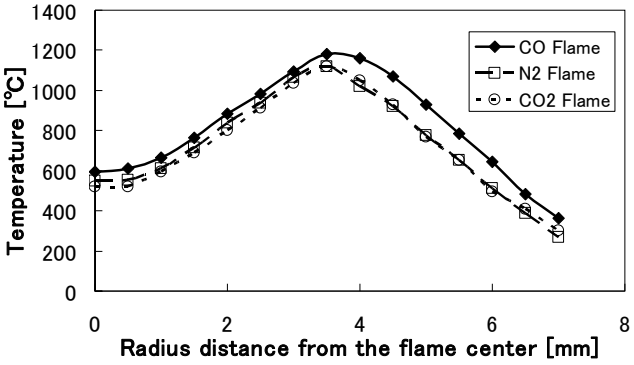
模擬低カロリーガス中の可燃性ガス割合は，17％($H_2$12%:$CH_4$5%) ・ 25 % ($H_2$17.6%:$CH_4$7.4%) ・ 35 % ($H_2$24.7%:$CH_4$10.3%)の三種を使用した．可燃性ガスが，25%の時は水素-窒素で水素割合が 20%の時とほぼ同じ傾向を示した．35%の時は水素-窒素で水素割合が 25%の時とほぼ同じ傾向を示した．可燃性ガスの割合が多くても，メタンが含まれていると水素単体に比べ大幅に安定性が低下することがわかる．

３．２　一酸化炭素の影響

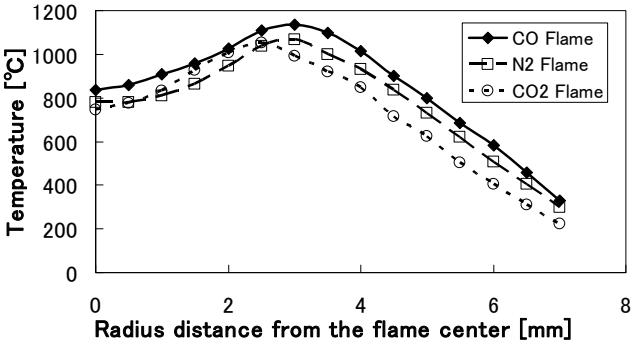
３．２．１　火炎温度測定による燃焼状態の比較　低カロリーバイオマスガスには，約 10%の一酸化炭素が含まれている．その一酸化炭素が火炎にどう作用するかを調べた．３種類のガスを用意し温度測定を行った．１種目は一酸化炭素を含む模擬ガスで，各成分割合は$CH_4$7.4% $H_2$17.6% $N_2$55.8% $CO_2$11.3% CO7.9%である，図中では CO Flame と示す．２種目は CO Flame のガスから一酸化炭素を取り除き，その割合を窒素割合に上乗せしたもので，各成分割合は$CH_4$7.4% $H_2$17.6% $N_2$63.7% $CO_2$11.3%である，図中では N2 Flame と示す．３種目は CO Flame のガスから一酸化炭素を取り除き，その割合を二酸化炭素割合に上乗せしたもので，各成分割合は$CH_4$7.4% $H_2$17.6% $N_2$55.8% $CO_2$19.2%である，図中では CO2 Flame と示す．３種とも可燃性ガスの割合は一定である．低位発熱量は，一酸化炭素を含むものが 5.55[MJ/m³]で，含まないものが 4.55[MJ/m³]である．この３つの測定結果を比較することでバイオマスガス中の一酸化炭素の影響を検証する．Fig.10(a)(b)(c)(d)(e)に，それぞれ火炎高さ 5[mm]，10[mm]，15[mm]，20[mm]，25[mm]における CO Flame，N2 Flame，CO Flame の火炎温度分布を示す．



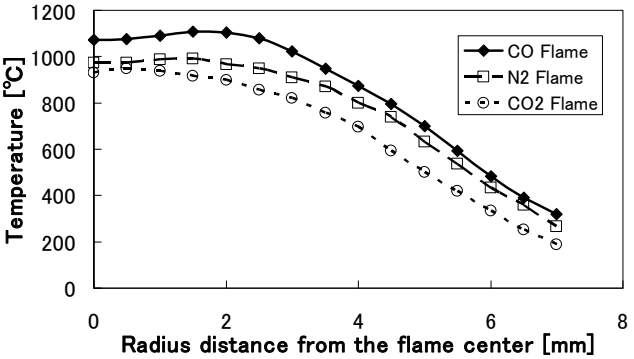
(a) 5[mm]



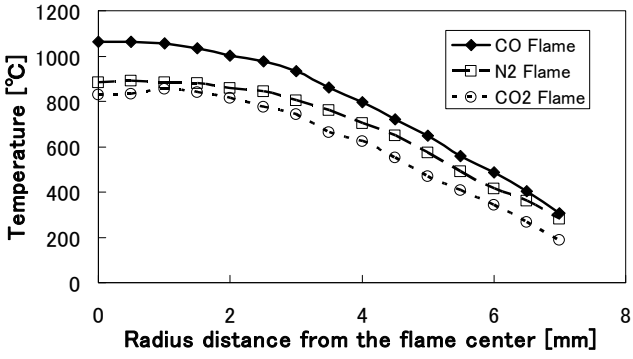
(b) 10[mm]



(c) 15[mm]



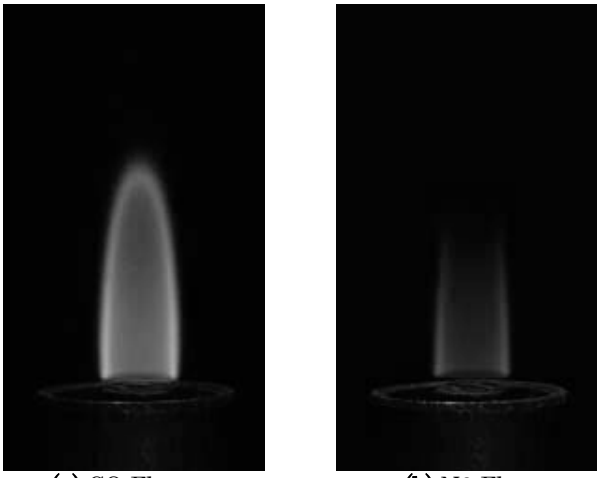
(d) 20[mm]



(e) 25[mm]

Fig.10 Temperature profiles of low calorie biomass gas flame(Exhaust velocity : 0.467[m/s] Burner inside diameter : 5.00[[mm]])

火炎高さ 5[mm]の地点では，火炎が一酸化炭素を含むことによって火炎面が 0.5[mm]程度外側に移動した．また他のガスと比べると 30℃程度であるが最高火炎温度が高くなっている．また火炎高さ 25[mm]では，温度分布の傾向は類似しているが火炎温度に差があり，CO Flame の最高火炎温度は 1064℃に対し，N2 Flame は 890℃，CO2 Flame は 856℃と一酸化炭素を含むことによって 200℃程度の差がでた．温度差が生じたのは一酸化炭素が熱量をもっているためだと考えられる．火炎写真として Fig.11(a)に CO Flame を，Fig.11 (b)に N2 Flame を示す．



(a) CO Flame　　(b) N2 Flame

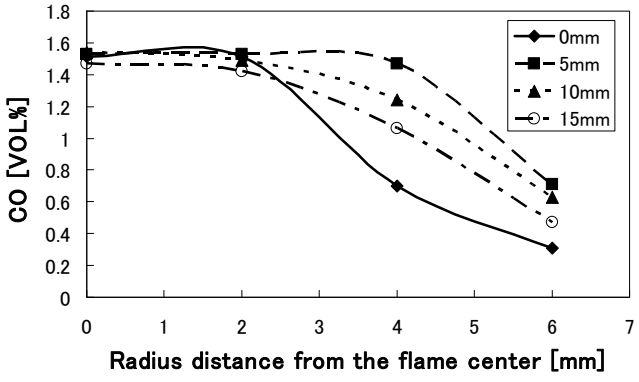
Fig.11 Pictures of each flame

２つの写真を比べると，明らかに CO Flame は火炎の輝度が高いことがわかる．さらに，N2 Flame は火炎下流部において輝度が極端に下がり，見えなくなっている．CO Flame は火炎基部と上部の温度差が 116℃であったのに対し，N2 Flame は 263℃であった．この温度差が火炎下流部における火炎輝度を下げる要因になったのではないかと考えられる．これについては今後検討していく必要がある．

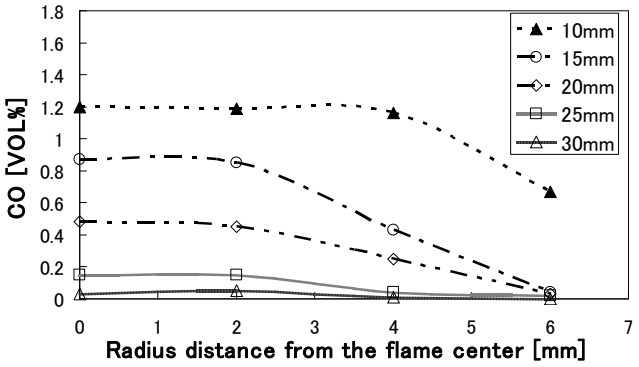
３．２．２　ガスサンプリングによる一酸化炭素の燃焼観察

バイオマスガスに含まれる一酸化炭素は，空気中に微量でも存在すると危険な物質である．そこでガスサンプリングによってバイオマスガス中の一酸化炭素が燃焼後に燃えきっているかを確認した．Fig.12(a)に燃焼前の一酸化炭素量、

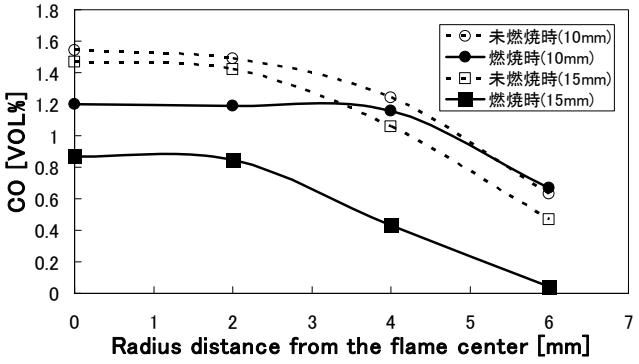
Fig.12(b)に燃焼後の一酸化炭素量、Fig.12(c)に比較したものを示す．使用したバイオマスガスの成分割合は H_2:11.0% CH_4:11.3% N_2:57.8% CO_2:11.8% CO:8.1%である．ノズルは内径 5[mm]のものを使用した．噴出速度は 0.467[m/s]である．



(a) Unburnt gas



(b) Exhaust gas

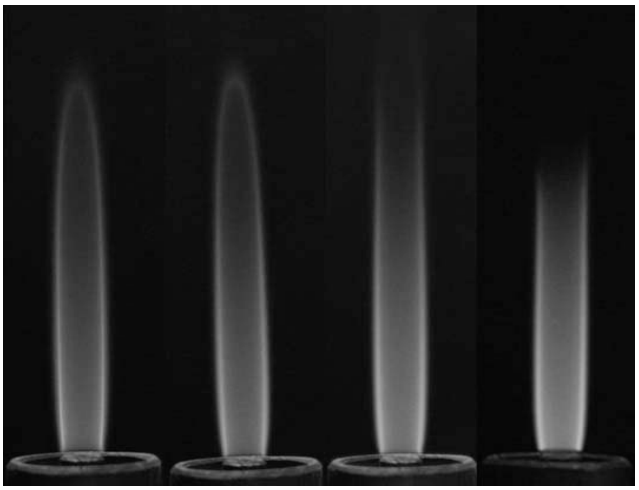


(c) Comparison

Fig.12 Carbon monoxide ratio
in low calorie biomass gas flame

未燃焼時は存在した一酸化炭素が燃焼によって減少している．さらに，火炎下流部では一酸化炭素は確認できなくなるまで減少した．この結果より一酸化炭素を含むバイオマスガスは，燃焼すれば安全性を得られる事が確認できた．

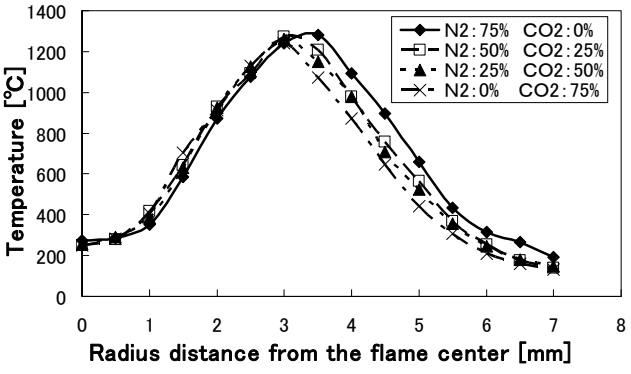
３．３．不活性ガスの影響　３．１で示したようにバイオマスガス中の不活性ガス(窒素･二酸化炭素)は可燃性ガスと同様，火炎に大きな影響を与えることがわかっている．そこで，バイオマスガス中の不活性ガスの影響を詳しく調べるために，直接写真･温度測定を用いて検証を行う．Fig.13 に模擬低カロリーガス中の窒素また二酸化炭素割合を変化させていったときの火炎挙動を示す．



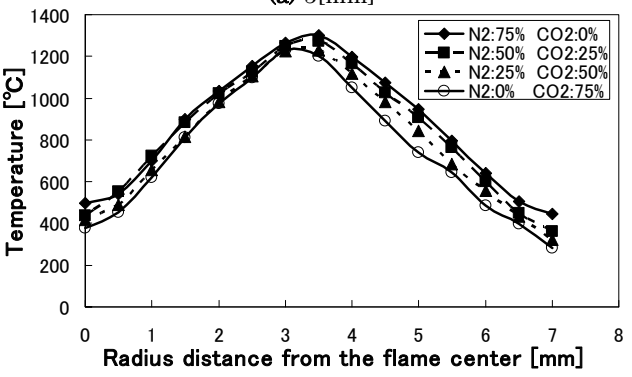
N_2	75%	50%	25%	0%
CO_2	0%	25%	50%	75%

Fig.13 Flame behavior of bio-mass gas
(H_2:15% CH_4:10% CO:0%
Burner inside diameter:3.40[mm]
Exhaust velocity:2.20[m/s]

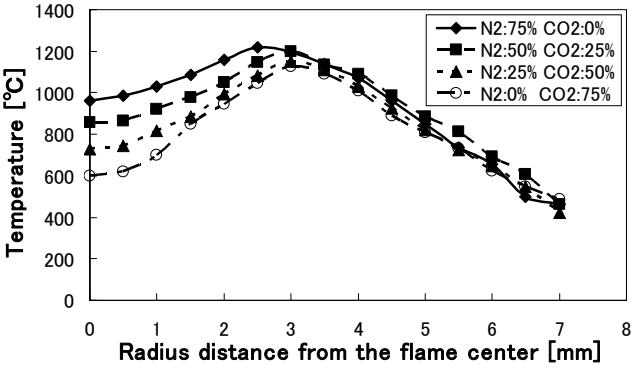
模擬低カロリーガス中の二酸化炭素割合が増えるにつれて，火炎上流部での火炎輝度が下がっていることが確認できる．次に，この４つの火炎について火炎温度測定を用いて比較する．ノズル先端から 5[mm]･20[mm]･40[mm]･50[mm]の高さの点において測定を行った結果を Fig.14(a)(b)(c)(d)に示す．ノズル内径は，3.40[mm]を使用した．噴出速度は 2.20[m/s]である．窒素･二酸化炭素以外のガスの割合は，H_2:15% CH_4:10% CO:0%で固定している．



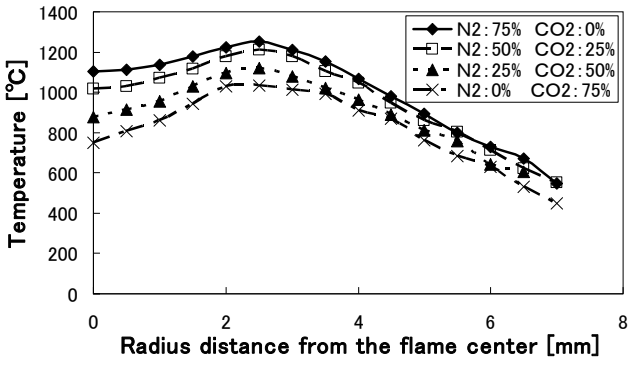
(a) 5[mm]



(b) 20[mm]



(c) 40[mm]



(d) 50[mm]

Fig.14 Profiles of flame temperature on each point

各結果において最高火炎温度を比較する．火炎高さ 5[mm]の時は，窒素 75%･二酸化炭素 0%の火炎と窒素 0%･二酸化炭素 75%の火炎の最高火炎温度が 42℃違い．火炎高さ 20[mm]の場合は，71℃の差があり．火炎高さ 40[mm]の場合は，91℃の差があり．火炎高さ 50[mm]の地点では，222℃の差が確認できた．火炎下流部にいくにつれて，温度差が大きくなっていくという結果が得られた．Fig.13 において二酸化炭素割合が大きくなるにつれて火炎下流部の輝度が下がっていったのはこのためだと考えられる．また同じ不活性ガスである窒素と二酸化炭素だが，模擬低カロリーガス中の二酸化炭素は火炎温度を減少させる効果があることがわかった．

4．まとめ

(1)模擬低カロリーガスにおいて，ガス成分割合を変えることにより火炎の安定性の変化が確認できる．

(2)水素-窒素混合ガスでは，水素割合が多くなるにつれて，ノズル内径 1.00[mm]以下のマイクロフレームで火炎の安定性が急激に向上した．また 0.51[mm]では，水素割合を増やしていくと他のノズルに比べて著しく安定性が増す．

水素-二酸化炭素混合ガスは，傾向として水素-窒素の場合とあまり違いは無い．しかし，全体的に安定性が 20～30%程度減少しており，最大で 50%低下する．不活性ガス割合が大きくなるにつれ，水素と窒素との安定性の違いは顕著に現れてくる．

(3)メタン-窒素混合ガスでは，ノズル内径を大きくするにつれ安定性が向上する．また，メタン割合 25%以下では着火しない．ノズル内径が 5.00[mm]の時，他のノズルとは違い，メタン割合 40%以上になると，安定性が大幅に上昇する．

メタン-二酸化炭素混合ガスは，メタン-窒素に比べ安定性が 20～40%程度低下していることがわかる．メタン割合が 30%以下の時は着火しない．

(4)水素-メタン-窒素混合ガスでは，可燃性ガス割合が 25%の時，水素-窒素で水素割合が 20%の時とほぼ同じ傾向を示した．35%の時は水素-窒素で水素割合が 25%の時とほぼ同じ傾向を示した．母議定カロリーガス中の可燃性ガスの割合が多くても，メタンが含まれていると水素単体に比べ大幅に安定性が低下する．

(5)バイオマスガスに含まれる一酸化炭素は，バイオマスガス火炎の火炎温度を上昇させ，燃焼性を高めていると言える．さらに燃料の化学反応領域を火炎半径方向外側に移動させる効果がある．

バイオマスガス中の一酸化炭素は燃焼によって，完全に反応する．

(6)バイオマスガス中の不活性ガスである窒素･二酸化炭素は，同じ不活性ガスであるがバイオマスガス火炎に違った影響を及ぼすことがわかった．二酸化炭素が大量に含まれるバイオマスガスは窒素を大量に含むものより，火炎温度が減少し火炎下流部での輝度が極端に下がることが確認できた．つまりバイオマスガス中の二酸化炭素には窒素に比べ火炎温度を下げ，火炎輝度を下げる効果がある．また，火炎安定性も 20～50%低下させる．

参考文献

(1) 久米：「バイオガスの最新動向と課題」工業加熱,第 45 巻 第 6 号,pp.9-16,2007

(2) 吉本,影山,中嶋,谷川,芦田：「低カロリーバイオマスガスの燃焼特性」，高温学会誌，第 36 巻，第 1 号,pp.13-17,2010.

(3) T.Yoshimoto, Y.Shoji,T.Kageyama,and T.Takagi：Stability Limits Judged by Visualized Behaviors of Hydrogen/Methane Diffusion and Premixed Flames at High Speed, The 7th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing,21C-1,2009

(4)T.Yoshimoto,H.Kitamura,H.Shiosima,Y.Yasumoto,and T．Takagi：Stability Limits and Squeezing Behaviors of Hydrogen/Methane Diffusion Flames at High Speed, 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference, No.32762,July,2007

(5) T.Ashida, K.Ideguchi, R.Tanigawa, R.Takashima, T.Yoshimoto,and R,Samejima: Flame Behavior and stability limit of low BIO-MASS GAS Diffusion Flame, The 8th Meeting on Society of Solid Waste Management Experts in Asia and Pacific Islands, pp.144-147, 2011

(6) 岩本：「噴流拡散火炎の安定限界と挙動に関する研究」，神戸高専紀要， 第 40 号，pp1-6,2009

水平噴流放射状拡散火炎の火炎挙動と安定に関する基礎的研究

出口幸治*　吉本隆光**

Flame Behavior and Stability on Radial Horizontal Jet diffusion Flame

Koji IDEGUCHI*　Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

The radial horizontal jet diffusion flame is formed by gas fuel that is spout in the radial direction. The radial horizontal jet diffusion flame exposes to surrounding air more widely than the vertical diffusion flame. Therefore the size of the combustor is smaller, because the shorter flame is formed. It is important to investigate the stability and characteristics of combustion. The temperature of the inside flame is measured for researching the structure of the flame. The lifting or below-off velocity is measured with increasing the fuel or co-flow air velocity. The configurations and behaviors at the flame base are observed in detail and investigated by the high speed video camera with the method of Schlieren Photography. Then experiments and numerical computations by using PHOENICS are conducted to clarify the flame structure which dominates the flame holding and lifting mechanism.

Keywords **:** horizontal diffusion flame, hydrogen flame, low calorie

1.　緒言

水平噴流放射状拡散火炎は鉛直方向火炎[1]よりも火炎面と周囲空気との接触面積が大きく，同燃料流量なら鉛直火炎よりも火炎長が短いといった特徴を有している．したがって，燃焼器を小型にすることが可能であると言える[2]．小型化によりコスト削減から移動用燃焼器として使用される場合もある．本研究では水平噴流放射状拡散火炎の基礎的研究として単純にノズルにスリットを施す．また水素，メタンを主燃料とし，希釈時には窒素を用いる．燃料噴出速度や周囲流速度を変化させ火炎基部や形状，温度，浮き上がり・吹き飛び現象に至る過程や水平方向拡散火炎の火炎構造特性の調査を行う．

2.　実験装置

2.1 フロー図　ボンベより圧力調整器で圧力を減圧した燃料をフロート式流量計により，流量を調整する．図1 にフロー図を示す．燃料を燃料噴出ノズルから水平方向に噴出させ，水平噴流放射状拡散火炎を形成する．また火炎挙動，形状は直接写真とシュリーレン写真により観察する．図2 は作製したノズルの設計図である．ノズルスリット幅は 1.0ｍｍ（φ3.66ｍｍに相当），0.5mm(φ2.58mm に相当)，0.35mm(φ2.16ｍｍに相当)を用意した．

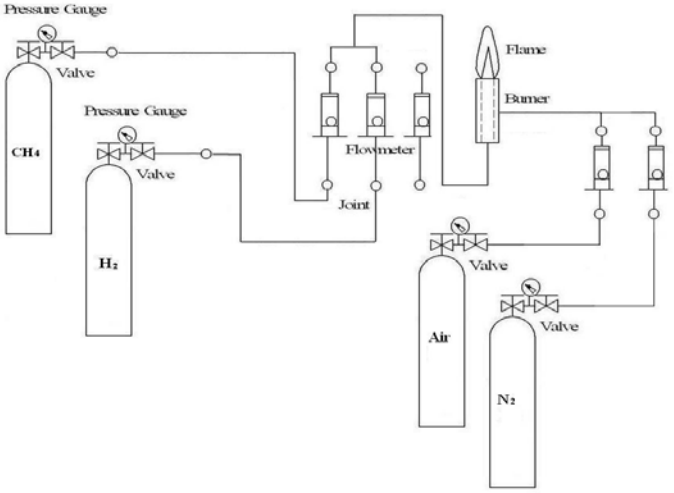


図1 フロー図

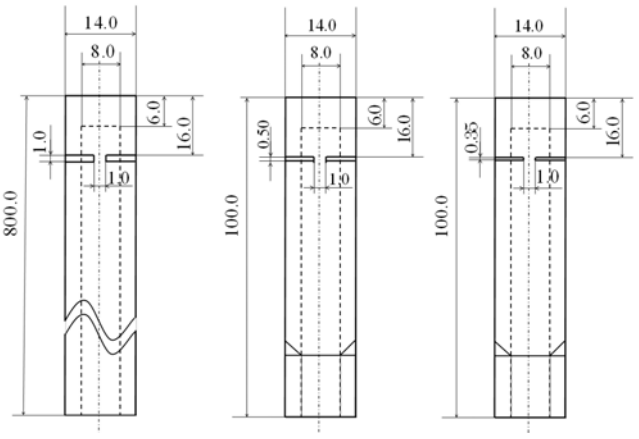


図2 製作ノズル設計図

＊　専攻科　　機械システム工学専攻
＊＊ 機械工学科　教授

2.2　火炎内温度分布測定器　火炎の温度測定には0.1mmのR型熱電対（Pt-PtRh13%）を用いる．熱電対を2本の円筒状絶縁材に通し，熱接点を直線にのばした簡易温度測定器である．なお，測定値に輻射損失等補正は行っていない．温度分布がどのようになっているかに重点をおいて測定を行う．

2.3 シュリーレン写真　シュリーレン撮影法の原理は，透明体中で温度，圧力などにより密度が変化して，屈折率の場として与えられているとき，ここを通る光が曲げられ，それにより光の明暗として観察される．本研究では，火炎が形成され始める火炎基部が安定性に重要であると考え，その部分の挙動及び形状を詳細に観察，測定している．図3にシュリーレン撮影法の原理図を示す．点光源から凹面鏡M1に光が入射すると，反射光は平行光線となる．その光が測定対象を透過した後，凹面鏡M2に入射して，その反射光は収斂する．収斂した光の焦点をナイフエッジで切断し，その光を後方の高速度ビデオカメラで撮影する．

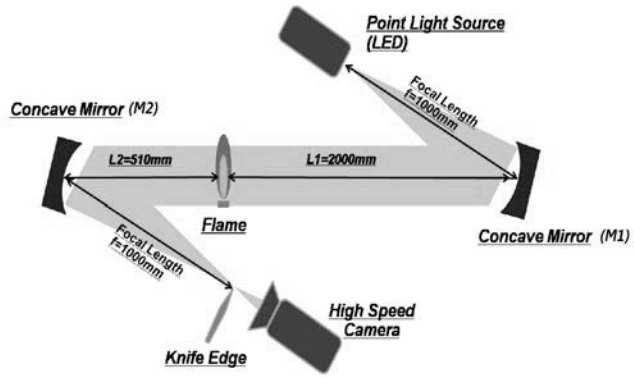


図3 シュリーレン撮影の装置概念図

ナイフエッジで収斂させられた光線の焦点を切断する原理図を図4に示す．図3でのナイフエッジ付近を真上から見た状態である．測定対象での屈折率により曲げられた光線は，ナイフエッジに近づく（A側）か，遠ざかる（B側）ことで切断される光の量が変化する．測定対象部分で屈折が起こり，ナイフエッジから遠ざかるように光線が屈折すると，ナイフエッジで遮られる部分が少なくなるので，その部分はスクリーン上で明るくなる．

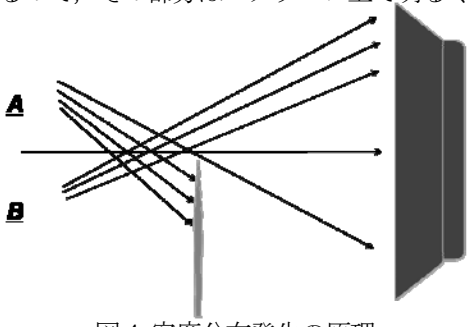


図4 密度分布発生の原理

また，ナイフエッジへ近づくように光線が屈折した場合では，ナイフエッジで遮られる部分が多くなり，その部分はスクリーン上で暗くなる．これらにより測定対象の密度分布が明暗のコントラストとして観察することができる．光源には白色LEDを用いている．

2.4　水冷式サンプリングプローグ　図5に水冷式サンプリングプローグの設計図と外観を示す．火炎内の化学測定の際に使用するが，水素などはサンプリングプローグの融点よりも火炎温度が高くなってしまう．そこで管内に水を循環させ冷却を行った．

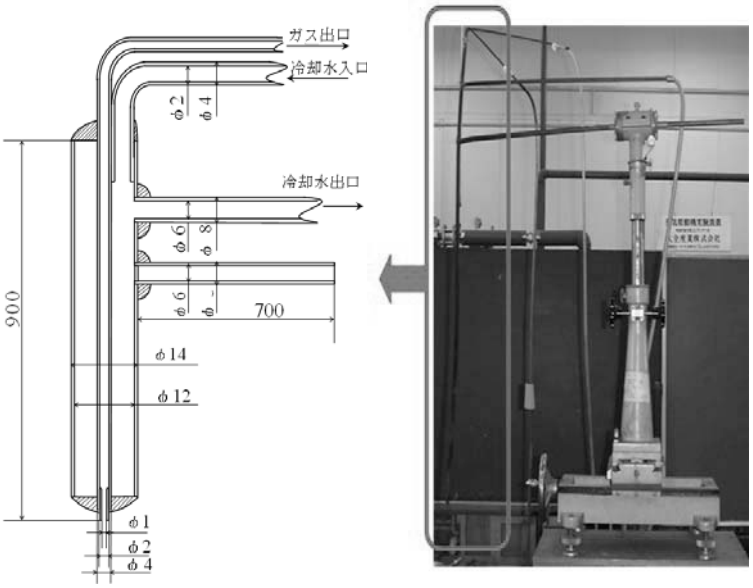


図5 サンプリングプローブ

3.　実験結果

3.1 単孔ノズルとの比較　図6は水平噴流火炎と鉛直噴流火炎において燃料噴出面積を変化させ，浮き上がりが発生する燃料噴出速度を示したものである．

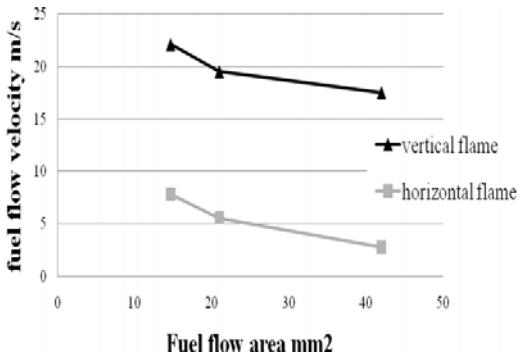
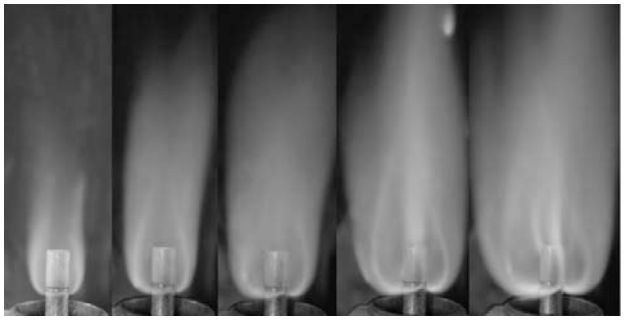


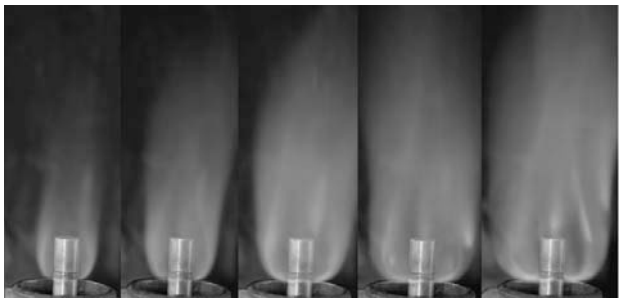
図6 浮き上がり速度と噴出面積の相関

水平方向拡散火炎は鉛直方向拡散火炎に比べ，火炎を安定に保ちにくいと言える．また燃料の噴出方向に関わらず噴出面積の増加に伴い，火炎は浮き上がりやすいことがわかる．

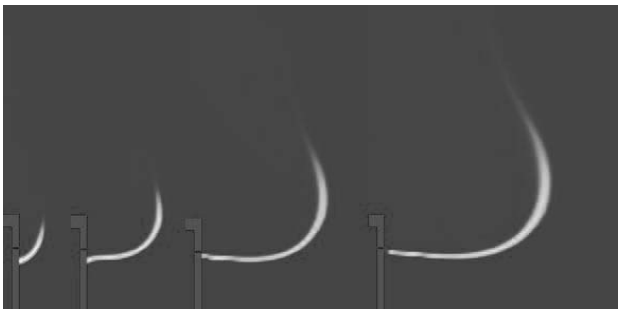
3.2　噴出速度の増加に伴う火炎形状変化　図 7 (a)は SW(Slit Width) =0.35mm，(b)は SW=0.5mm の各流量における火炎形状を直接写真で示す．使用した燃料はどちらも純水素である．この流量範囲であれば，スリットの違いによる大きな影響はないと判断できる．(c)は共同研究者によって行われた，水素の数値計算による各噴出速度の OH 分布[3]である．



Q L/min 3　6　9　12　15
Vj m/s　3. 40　6.80　10.2　13.6　17.0
(a) SW=0.35mm



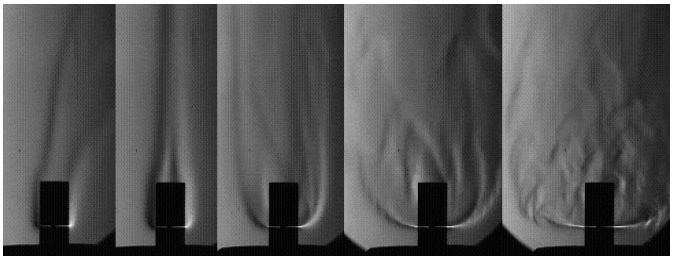
Q L/min　3　6　9　12　15
Vj m/s　2.38　4.76　7.15　9.53　11.9
(b)SW=0.5mm



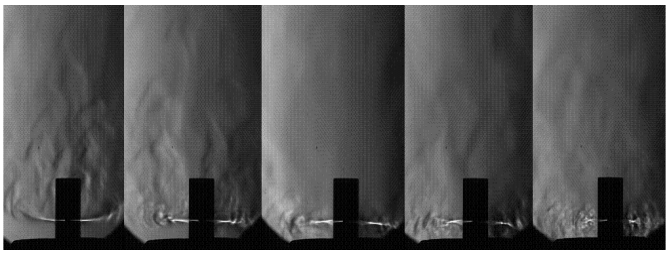
(c)OH 濃度の数値計算結果
図 7 燃料噴出速度増加に伴う火炎形状の変化

実際の火炎においても，数値解析においても燃料噴出速度の増加に伴い火炎面は半径方向への拡がりが見られ，また火炎のふくらみ部も大きくなることがわかる．

3.3 非燃焼ガス流れ　図 8 はノズルスリット幅 0.35mm を使用し，未燃焼状態を考慮するため He を使用した．噴出流量を増加させた様子をシュリーレン写真で示す．



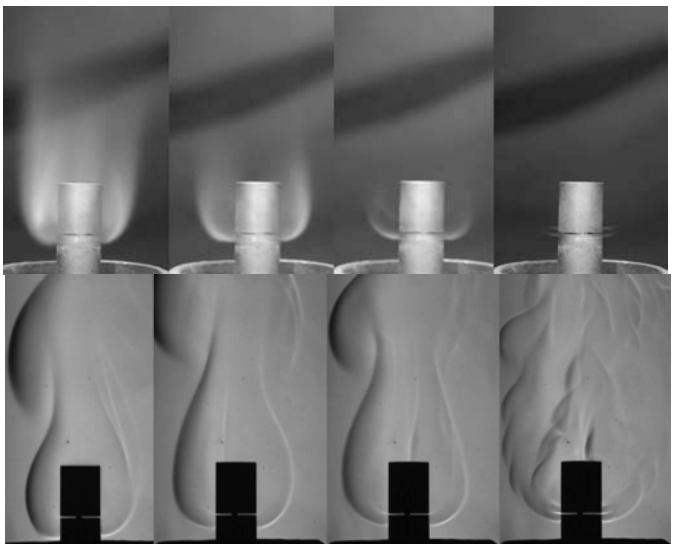
V m/s 4.24　8.48　12.7　17.0　21.2



V m/s 25.4　29.7　33.9　38.2　42.4
図 8 噴出速度増加に伴うガス流れの可視化

半径方向への火炎の拡がりには，ガスの噴出流量が影響することがわかる．また，乱流域が火炎下流部から上流へ遷移していることもわかる．

3.4　希釈割合による影響　ノズルスリット幅 0.35mm のものを使用し，燃料には水素，燃料速度 2.38m/s と一定にした時の火炎の様子を図 9 に示す．窒素割合の増加に伴う様子を上段の直接写真，下段のシュリーレン写真で示す．水素混合割合の減少の伴い火炎長は短くなり，燃え切りも早くなる．

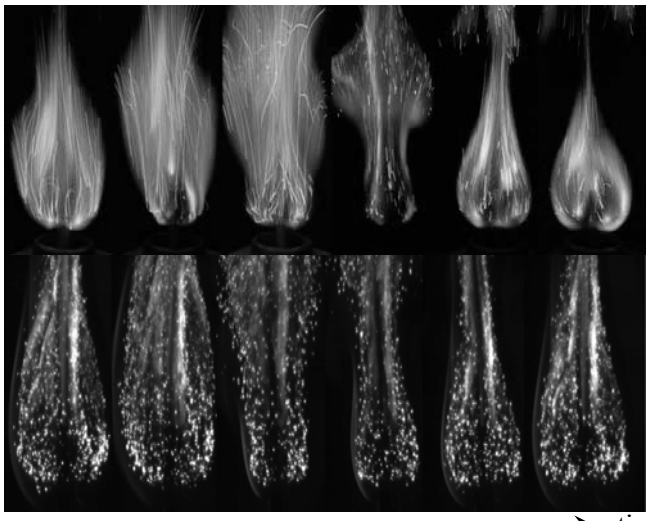


H_2:N_2　10:0　7:3　5:5　3:7
図 9 希釈割合の変化に伴う火炎形状の遷移

3.5　火炎面内の可視化　火炎内の挙動を可視化するため黒鉛の粉末（$\phi \fallingdotseq 40\mu m$）をガス燃料中に混合した．シャッター開放中での黒鉛の燃焼が流線として観測される．図 10 (a) は燃料に水素，ノズルスリット幅 0.5mm を用い，噴出速度 11.9m/s の乱流状態とし可視化を行った．

上段が直接写真，下段がシュリーレン写真である．さらに火炎基部拡大図を(b)に示す.

図 10 (a)より乱流状態下における水平噴流放射状拡散火炎の火炎形状は定常状態ではなく，時間的，周期的な変移が見られる．これは鉛直方向の拡散火炎には見られない現象であり，水平方向拡散火炎特有の現象であると言える．また図 10 (b)は(a)でのある瞬間の写真である．これより火炎基部において循環している様子が黒鉛の燃焼による軌跡からわかる．図では手前にスリット支え部があり周囲の空気はこの支え部を対称に左右で循環が見られる.



(a)周期的時間的火炎形状の変化



(b)瞬間の火炎基部の流れ

図 10　黒鉛により可視化した火炎形状

3.6　単孔ノズル流れとの比較　図 11 は単孔ノズルを鉛直方向に設置したときのシュリーレン写真である．燃料に水素を使用し，外形 D=10mm，内径 d=7.6mm のノズルを用い，燃料噴出速度を 2.72m/s とした.

直接写真では鉛直方向拡散火炎に時間的な火炎外部形状の変化は見られない．またシュリーレン写真でも中心部の黒鉛の大部分が拡散することなくそのまま上昇していることから, 図 11 に見られる火炎外郭の変化は火炎自体の変化ではない．シュリーレン写真によって周囲よりも高温である火炎近傍に存在する空気との密度差によるためであると考えられる.

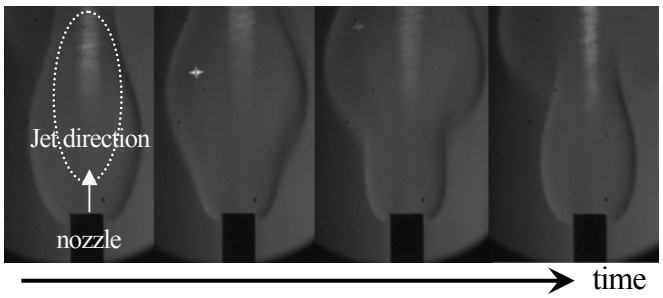


図 11 鉛直単孔ノズルでの時間的火炎形状の変化

図 12 は上記で使用した同単孔ノズルを水平方向に設置したものである．上段が直接写真，下段がシュリーレン写真である．燃料噴出速度は 8.17m/s である．水平方向に設置すると鉛直方向に設置した場合には見られなかった時間的で周期的な火炎形状(t1,t2,t3,t4)の変化が見られた．ノズルより噴出した黒鉛が火炎面に沿うように流れるが，t3 では湾曲部で一部乱れが見られる．つまり水平方向の火炎の時間的火炎形状の変化は，図中に示すように火炎面との衝突によって内部ガス流れに乱れが発生したためであると考えられる.

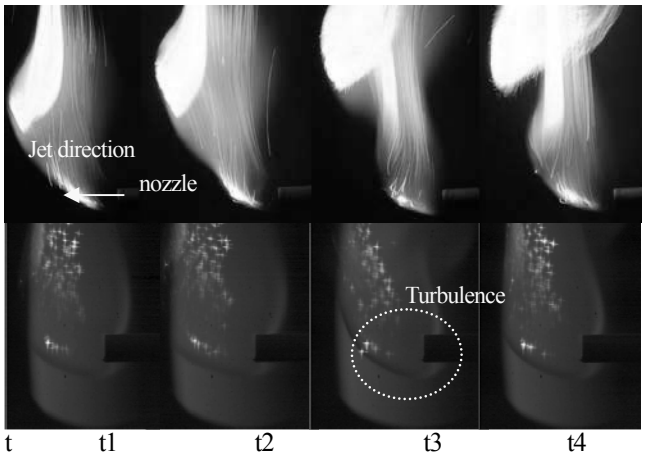


図 12 水平方向に単孔ノズルを設置した場合の
時間的火炎形状変化

3.7 新しいノズルの製作　本研究で使用するノズルには図 13 に示すように内部にスペースが存在する. 燃料ガスは圧縮性流体であるため，このスペースも火炎に与える影響を考慮すべきと考えた．そこでノズルスリット幅を変化させずに，その位置を変化させた新たなノズルを製作した．表 1 に作製したノズル寸法を示す.

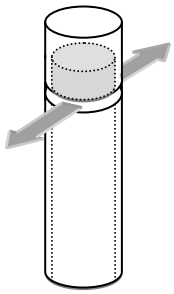


図 13 ノズル内部の概念

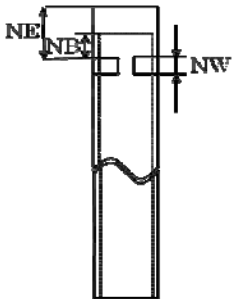


図 14 製作ノズル設計図

表 1　ノズルの寸法

	NW [mm]	NE [mm]	NB [mm]
No.1	0.5	16	6
No.2	0.5	17	15
No.3	0.5	5	0

3.8　ノズル内部の違いによる火炎の影響　ノズル内部の影響を考慮するため，前項に記載したノズルを使用する．燃料にメタンを用い，各燃料噴出速度時の周囲流(Air) による浮き上がりの発生を図 15 に示す．本実験条件では，ノズル内部の余白による火炎浮き上がりの大きな違いは見られなかった．

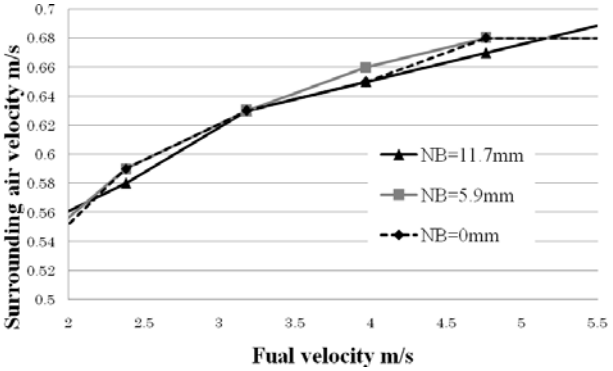
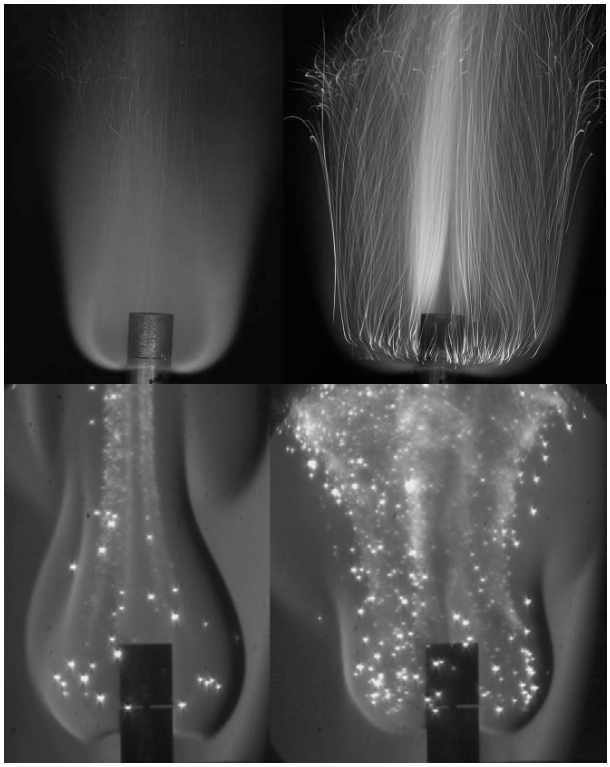
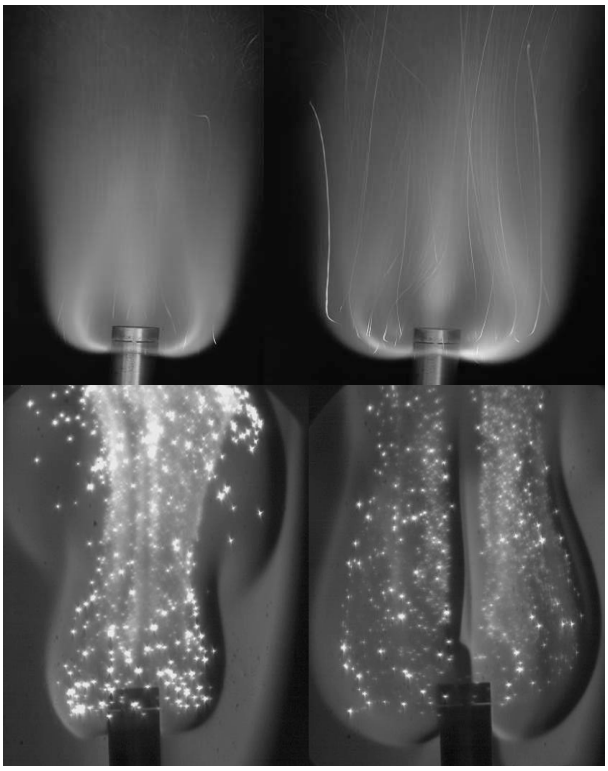


図 15　ノズル内部の違いによる浮き上がり

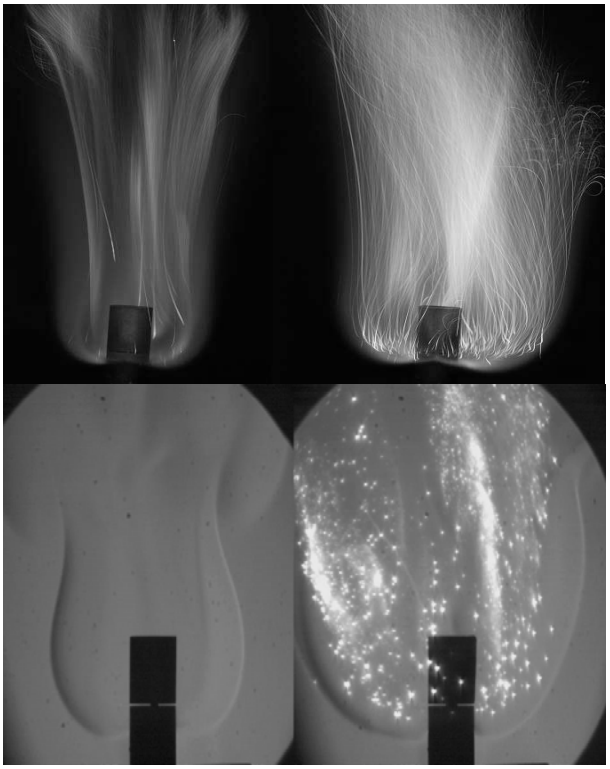
図 16 は各ノズルでの黒鉛を混合した火炎の様子を直接写真，およびシュリーレン写真で示した．燃料には水素を用い，燃料噴出速度は左図を 2.38m/s, 右図を 3.97m/s とする．



(a) NW= 0.5 mm, NE= 15 mm, NB= 17 mm



(b) NW= 0.5 mm, NE= 5 mm, NB= 0 mm



(c) NW= 0.5 mm, NE=16 mm, NB= 6 mm

図 16 ノズル内部の違いによる火炎

3.9　希釈割合による浮き上がり速度の違い　図 17 は NW=0.35mm のノズルを用い，燃料であるメタンと窒素の割合と速度を変化させたときの，周囲流(Air) により浮き上がりを表したグラフである．希釈割合の増加に伴い

火炎は不安定になる．また希釈割合に関係なく燃料噴出速度の増加に伴って不安定になることがわかる．

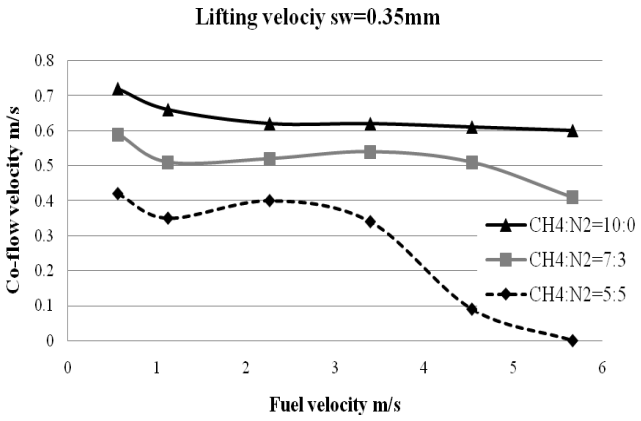
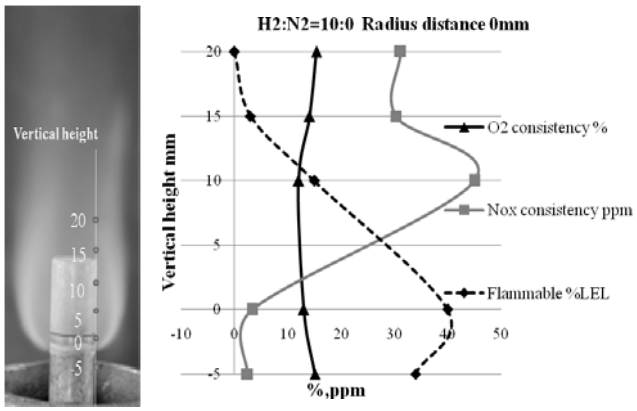


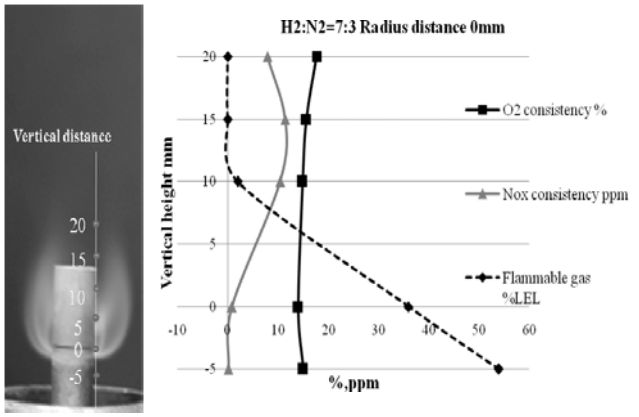
図 17　希釈割合による浮き上がり発生の違い

3.10　火炎中の化学種成分　　図 18 は NW=0.35mm のノズルを用い，燃料の水素を 3.40m/s で噴出させたときの火炎の様子を示したものである．ただし周囲流は流していない．ノズル壁面を半径方向 0mm とし，高さを変化させて各点で成分を測定した[4),(5)].

図 18 (a) は燃料割合を H_2:N_2=10:0 とし，(b) は H_2:N_2=7:3 とした場合の各化学種ガス成分である．



(a) H_2:N_2=10:0



(b) H_2:N_2=7:3

図 18 火炎中の各化学種成分濃度分布

3.11 火炎内温度分布　　図 19 に温度分布のグラフを示す．測定点は鉛直方向高さを H[mm], 噴出口からの半径方向距離を R[mm]とする．H は噴出口の下部を 0[mm], R はノズル管外周面を 0[mm]とし，ノズル中央部を -7[mm]とする．希釈水素火炎(H2:N2=50:50)における噴出速度 2.3[m/s]での各断面における半径方向火炎温度分布を示す．図からピーク点が火炎面に存在し，燃え切った火炎上部での火炎温度分布はほぼ一定であることがわかる．

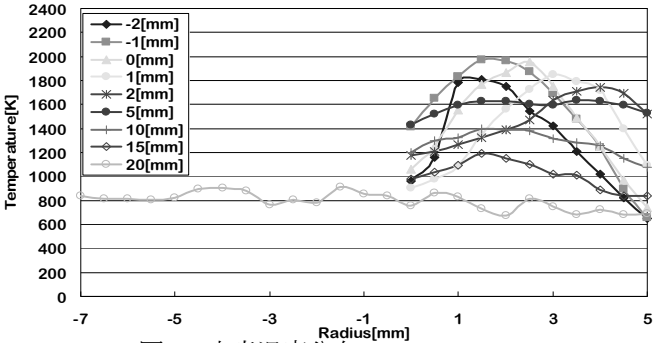


図 19 火炎温度分布(H2:N2=50:50)

4.　まとめ

(1)噴出方向に関係なく，噴出面積の増加に伴い火炎は浮き上がりやすく，不安定になりやすい．

(2)水平方向放射状拡散火炎は定常状態ではなく，その火炎形状は時間的に変化している．また火炎基部では循環が確認された．

(3)ノズル内部は浮き上がりの観点からは，火炎の安定に大きな影響を及ぼすことはない．

(4)水平放射状拡散火炎内部では酸素が一定の割合で存在している．

参考文献

(1) Takamitsu Yoshimoto,　et al.:“Stability Limits and Behaviors of the Inverse Diffusion Flame”, Proceeding of the 5th Asia-Pacific Conference on Combustion Paper No.373，2005

(2) Hitoshi Shiotani, et al.:“Construction of Low NOx and High Stability Flames Aiming at Micro Gas Turbine Combustion”, ASME Paper No. GT-2002-30463 , pp.731-737,　2002

(3) 谷川涼一　他３名：「水素逆拡散火炎挙動における安定限界と数値計算」，可視化情報学会論文集 Vo.29, pp.117-118，2009

(4) 出口幸治　他 3 名：「水平噴流放射状拡散火炎の火炎挙動と安定に関する基礎的研究」，日本機械学会関西支部第 86 期回定時総会講演会 講演論文集 No. 114-1, pp.2-29，2011

(5) Koji Ideguchi :“Flame Behavior and Stability on Radial Horizontal Jet diffusion Flame of Low Calorie Biomass Gas”, The 8th Meeting on Society of Solid Waste Management Experts in Asia and Pacific Islands (SWAPI), pp.136，2011

材料工学学習 Web アプリケーションの開発および運用

早稲田　一嘉*　　藤原　真人**　　藤本　健司***

Development and Management of Web Application for Material Engineering

Kazuyoshi WASEDA　　Masato FUJIWARA　　Kenji FUJIMOTO

ABSTRACT

In this study, we developed an e-learning system for Material Engineering run on Web browser. The system is able to run on several Web browsers on the low specification mobile digital devices such as portable video game player, because of the program codes are written in simple HyperText Markup Language(HTML) and tiny JavaScript.

The contents such as questions and answers included in each lesson of the system is written by students as classwork. One of the aims of this classwork are to increase the contents and to prompt students to interest into the system.

The e-learning system distributed widely for students at a Kobe city college of technology, and evaluate the effect of the system to the self-study.

Keywords: HyperText Markup Language(HTML), JavaScript, e-learning, self-study

1. はじめに

今日，パソコン（以下 PC）を用いた学習支援ソフトが多く開発・販売されている．しかしそれらは教養学習や資格試験対策ソフトが多く，材料工学をはじめとした工学教育のためのソフトはほとんど存在していない[(1)]．また，近年では PC だけでなく，携帯ゲーム機や音楽プレイヤーなどのモバイルデジタルデバイスで学習する m-learning[(2)]の研究・開発が行われている．PC のみで動作する場合は使用場所が限定されるが，モバイルデジタルデバイスによって動作することが可能であれば，持ち運べるだけでなく，データをメモリに保存することでオフラインでの動作も可能となる．そのため通学中の学生等が空き時間に学習でき，使用可能な場面が増えると考えられる．ただし，モバイルデジタルデバイスは演算能力が非力であり[(3)]，動作に支障をきたす場合があることやモバイル向け Web ブラウザは動作を軽くするために多くの機能に対して制限を付けているなどの従来の PC 用 e-learning ではなかった問題点が発生する可能性が高い．

ところで，工業高等専門学校（以下高専）機械工学科に入学する学生はロボットや車の開発などを将来の職業にすることを目標にしている者が多い．神戸高専機械工学科へ入学した主な志望理由を図 1 に示す．

*　機械工学科　准教授
** 専攻科　機械システム工学専攻
***電子工学科　准教授

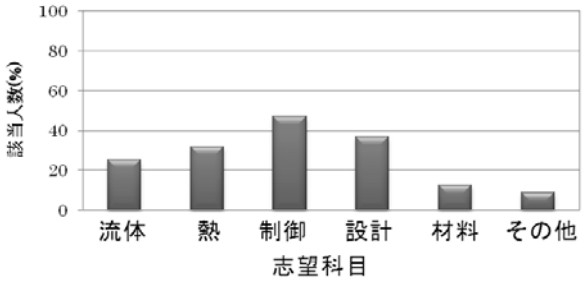


図 1　神戸高専で学びたいと思った科目

図 1 より，制御・機械設計に関心を持つ学生の割合が多く，材料工学に関心のある学生は機械工学の分野の中でも少ないことがわかる．そのため，必然的に材料工学への学習意欲はあまり高くないといえる．しかし，高専の機械工学科の学生は流体力学や熱力学などの微積分を用いた計算や複雑な理論を必要としない材料工学などを工学教育の初期段階として学習する．そこで，学習の最も基礎となる専門用語の暗記・理解についての学習を支援することは，重要であると考えられる．

本研究では，PC だけでなく演算能力が低いモバイルデジタルデバイスの Web ブラウザ上でも動作する，材料工学の主に専門用語の意味の理解・暗記等の基礎学習の学習支援を行うことができる e-learning システムを開発することを目的とし，システムを学生に配布して学生の自己学習にどのような影響を与えるかを調査した．

2. 本研究の基礎的背景

2.1 e-learning

e-learning とは electronic learning の略であり，文字通り電子機器を用いて学習することを意味する．e-learning に使用する機器は PC を始めとして携帯電話や携帯ゲーム機，音楽プレイヤーなど多岐にわたる．e-learning に関わる者は,「使用者」と「運営者」が想定されており，通常の e-learning では運営者側からの一方通行的な出題・提供が常であり，使用者は常に受動的である．また，電子機器を用いて学習することを広義に e-learning というのに対し，e-learning の中でも特にモバイルデジタルデバイスを用いて学習することを m-learning という[(2)].

2.2 HTML

HTML とは Hyper Text Markup Language の略称であり，Web ページを記述するためのマークアップ言語である．文書の論理構造や表示の仕方などを記述することができる．

2.3 JavaScript

JavaScript とは Web ページの記述に使用されるスクリプト言語である．HTML では印刷物のような静的な表現しかできなかった Web ページに対して，動的表現などを付加することを可能にする簡易のプログラム言語である．

3. 開発内容

3.1 動作確認環境

動作確認を行ったハードウェアと搭載されている Web ブラウザを表 1 に示す．

表 1 動作確認環境

ハードウェア	Web ブラウザ
PC （Windows XP,Vista,7 対応）	Internet Explorer 8 Safari 5 Mozilla Firefox 3.6.18 Opera 11.50
Play Station Portable PSP2000(Ver.6.39)	PSP®インターネットブラウザ Netfront Ver.4.1
ニンテンドーDSi	Opera 9.5
iPod Touch(iOS3.1.3)	Mobile Safari Ver.3~4

本システムでは，表 1 で動作確認を行った PC およびモバイルデジタルデバイスの Web ブラウザを動作対象としている．また，携帯電話は各機種によって対応している JavaScript の機能が異なる,メモリに保存した HTML ファイルを読み込めない場合が多い，動作確認を行うための機種が膨大であるなどの理由から，本研究では開発対象から除外した．

3.2 コンセプトの設計

1) 運用について

通学中などの空き時間を有効活用して学習できる e-learning システムを開発し，学生に提供する．空き時間を有効利用するために，1 回の使用時間が長時間になることを避け，神戸市営地下鉄の 1 駅間を通過する間にシステムを使用できることを目安に，1 つのモードにつき約 40 問×2 ステップの問題を用意した．

2) 双方向性について

通常の e-learning システムでは，運営者側からの一方的な問題の提示が常である．本研究では双方向性を待たせることで学生にシステムへ関心を持たせること，簡易な授業の復習を行うことなどを目的として，システムの使用者である学生が直接問題の作成に携わる仕組みを開発した．

4. システムの運用

本システムの運用手順を以下に示す．

1) 材料工学の講義終了時に問題作成用紙を配布し，学生が学習したばかりの単元から問題を作成させる
2) 問題作成用紙を回収し，連続スキャナーでデータ化
3) データ化した問題に画像処理を施し，出題部，回答部などの画像データを抽出し，正解のデータや問題レベルのデータの抽出と処理
4) 処理データを各単元のディレクトリに保存
5) Web サーバを通じてシステムデータを配布
6) 学生がデータをダウンロードし，Web ブラウザで使用可能な状態とする

本システムは定期試験の約 1 週間前に配布して学生が自由に使用できるようにした．またシステムの紹介用ホームページを作成して学生がシステムを使用しやすいようにした．ただし，システムの使用は学生の任意であり，教育を平等に行うために一切の強制はしていない．

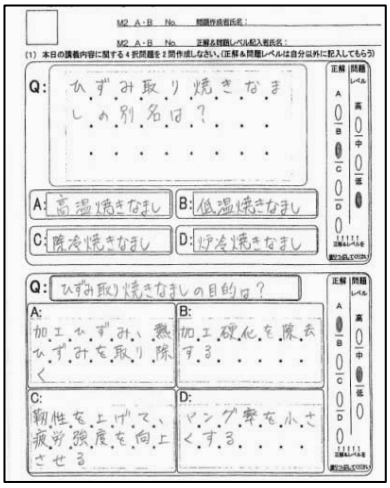
5. 開発結果

5.1 問題作成用紙

問題作成用紙は学生が問題を作成した後に正答を塗りつぶして情報を読み取れるようにしている[(4)].

学生が作成した問題は提出前に学生同士で間違いがないか確認する．また提出した問題は課題提出点として成績に反映されることで，不適切な問題が出題されることを抑制している．

図 2(a)に 4 択モード問題作成用紙，図 2(b)に文字入力モード問題作成用紙を示す．



(a)4 択モード用



(b)文字入力モード用

図 2　各モード用問題作成用紙

5.2　回答方式

回答方式は用途や使用環境に配慮して 2 種類に分かれている．その方式を以下に示す．

5.2.1　4 択モード

4 択の回答群の中から 1 つを選んで回答するモードで，専門用語の意味の理解・暗記などの基礎学習の学習支援を行うモードである．これは選択肢の中に答えが示されているのでより早く，多くの問題を解くことができ，文字入力に不向きなデバイスでのプレイにも向いている．図 3 に 4 択モードのプレイ画面を示す．

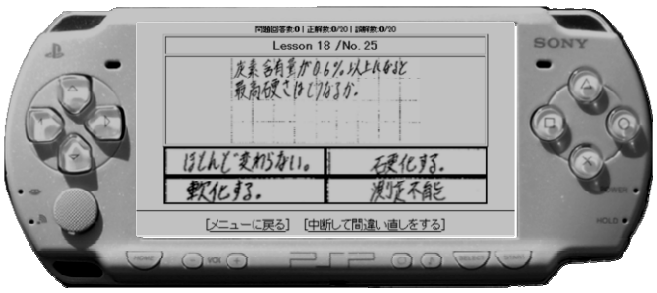


図 3　4 択モードプレイ画面

5.2.2　文字入力モード

文字入力をして問題に回答するモードで，4 択モードとは違い正解を含む選択肢が表示されないという特徴がある．そのため，4 択モードと比較して，脳の記憶における 4 つのプロセスである記銘・保持・想起・忘却のうち，想起の部分を強く必要とするといえるので，4 択モードよりも難しいといえる．また，ニンテンドーDSi では手書き入力機能を用いて回答することができる．図 4 に文字入力モードプレイ画面を示す．



図 4　文字入力モードプレイ画面

5.3　学習方式

本システムの学習方法は 3 段階のトレーニングモードに分かれている．その詳細を以下に示す．

1) トレーニングモード 1

ある単元に対しての知識が乏しい学生が使用するために開発したモードである．専門用語とその意味を記銘・保持させることを目的としている．「1 つの単元から決められた順番に問題が出題され，正解するまで次が出題されない」という特徴があり，全問題の解答を終了すると自動的にトレーニングモード 2 へ移動する．

2) トレーニングモード 2

トレーニングモード 1 で記銘・保持した情報を脳に定着させることを目的として開発したモードである．「1 つの単元からランダムに問題を出題し，モード終了時に答え合わせモードへ移行する．さらに間違えた問題のみを再学習することが可能」という特徴がある．（回答数が 40 問に達した時点で終了）

3) トレーニングモード 3

トレーニングモード 2 によって学習した内容が脳に定着しているか確認することを目的としたモードである．試験勉強の支援を可能にするために，「試験範囲である 6〜7 単元からランダムに問題を出題し，モード終了時に間違えた問題を表示する．さらに間違えた問題のみを再学習することが可能」という特徴を備えている．（回答数が 40

問に達した時点で終了）

4 択モードにおけるトレーニングモードでは出題部を大きく表示して 4 択の選択肢の表示が小さい Training 1st（図 2(a)上部の問題）から始まり，これを全問正解することで出題部の表示が小さく 4 択の選択肢の表示を大きくして図などを選択肢に描くことを可能とした Training 2nd（図 2(a) 下部の問題）に移行する．

トレーニングモード 2，3 終了時には答え合わせ画面へと移行する．これはトレーニングモードで間違えた問題のみを表示し，自分が選んだ選択肢を青色で囲み，正答を赤色で囲むことで正しい回答を使用者に教えることを可能とした機能である．また，間違えた問題のみを抽出して再び回答する「再学習モード」も使用できるようにした．

5.4　学習時間の計測

本システムの使用によって，従来の問題用紙と回答欄による自己採点による学習（以下 紙を用いた学習）と比較してどれだけ学習時間が短縮したかを検証した．まず e-learning で 4 択モードのすべての単元で各トレーニングモードを使用し，全問正解できるようになるまでの学習時間を計測し平均値を取得した．その後に同じ問題数を各トレーニングモードに対応した学習方法で全問正解できるようになるまで紙を用いて学習し，自己採点を行って学習時間を計測して平均値を取得し比較した．計測結果を図 5,6,7 に示す．

図 5,6 より，基礎問題の反復学習においては，本システムを使用した方が短時間で学習することが可能であることがわかる．さらに，20~30 分程度で試験範囲の学習を行えることがわかった．

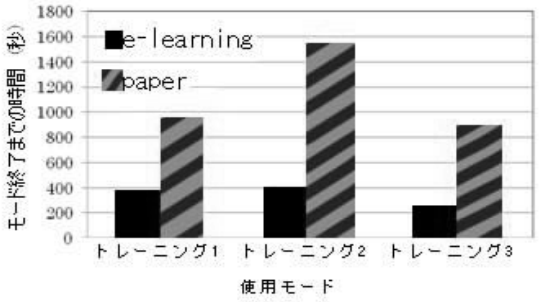


図 5 各モードの総使用時間の比較

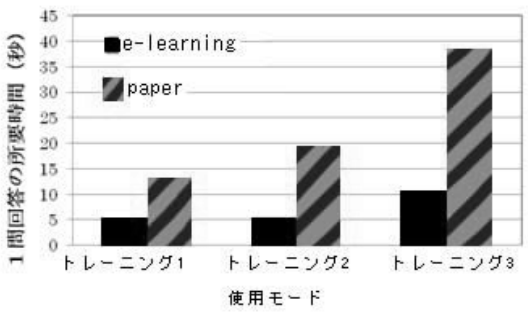


図 6　1 問ごとに要する解答時間の比較

図 7 は紙を用いた場合の学習時間を 100%とした場合と，e-learning で全単元を学習したときの平均学習時間の比較である．短縮される学習時間はモードにもよるが最小でも 65%，最大で 75%以上，平均して 70%であり，時間にして約 13 分であることがわかった．

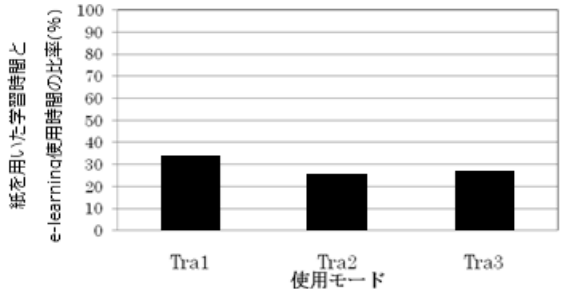


図 7 紙を用いた学習に対する e-learning 使用時の学習時間の比較

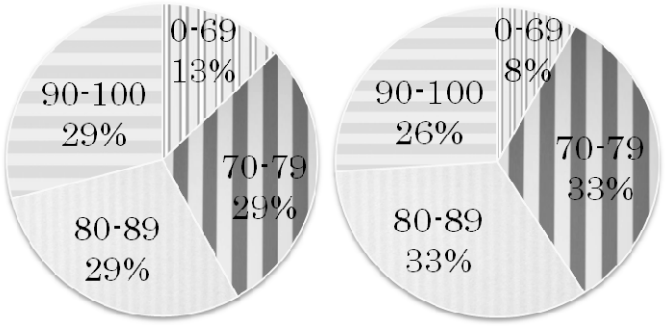
学習時間を短縮した理由として，自動で答え合わせをすること，間違えた問題の正答を表示することなど，従来の学習方法であれば教科書・参考書等を参考に正答を自ら検索する必要がある作業を瞬時に終了させることや，表示された回答群から回答を選択するだけのシンプルな操作で学習できることなどが考えられる．

6.　実証実験結果

本システムを平成 22 年度の神戸高専機械工学科 2 年次の学生を被験者とし，後期中間試験前に配布して基礎学習の支援を行えるようにした．そして後期中間試験を対象にアンケート調査を行った．その結果を以下に示す．

6.1　被験者の基礎情報

対象人数 77 人に対してシステムの使用者は 38 人，システム非使用者は 39 人とほぼ半分の使用割合となった．システム使用者と非使用者の材料工学の前期成績を図 8 に示す．



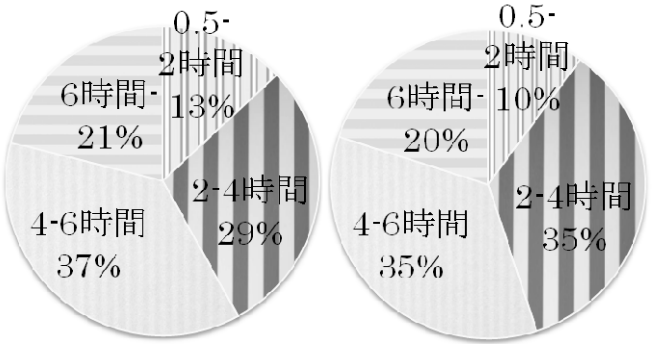
(a) システム使用者　　(b) 非システム使用者

図 8　材料工学の前期成績

図 8 より，システム使用者と非使用者の間に前期成績の違いはほとんどなく，被験者の前期での

材料工学への取り組みや理解度に大きな差はないことを確認した．

図 9 にシステム使用者と非使用者の試験対策学習時間の比較を示す．



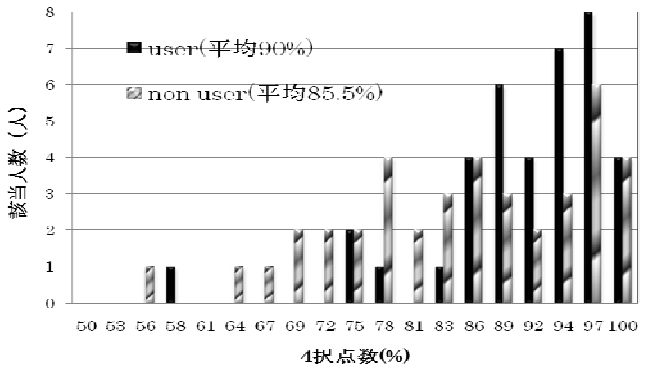
(a)　システム使用者　　(b)　非システム使用者

図 9 システム使用者と非使用者の
試験対策学習の時間の違い

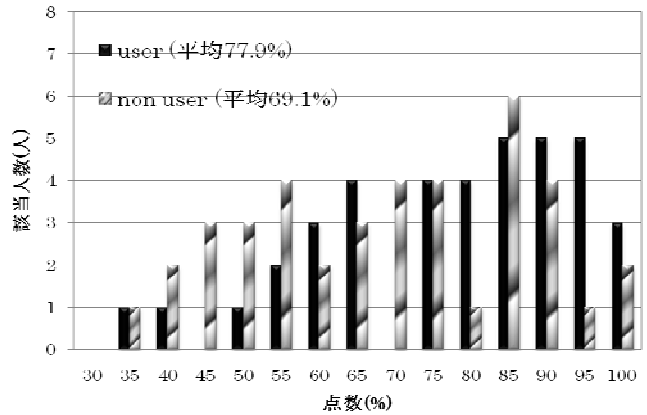
図 9 から，システムの使用者と非使用者の間で試験対策学習の平均の時間に大きな差は見られないことを確認した．

6.2　試験結果

図 10 に材料工学の後期中間試験における 4 択問題（出題割合は試験点数中の約 30%）および総試験点数（4 択問題を含む 100 点満点）の平均点および得点分布を示す．



(a) 4 択問題の試験点数の比較



(b) 総試験点数比較

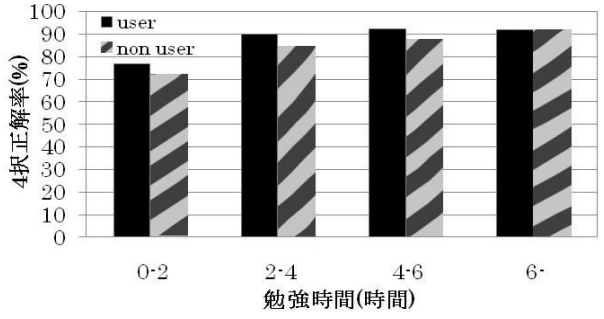
図 10 材料工学の後期中間試験結果

図 10(a) より，4 択問題の得点分布はシステム使用者はシステム非使用者と比べて高得点域側にシフトしており，またシステム非使用者はシステム使用者よりも偏りなく，若干低い点数側に分布している傾向にあることがわかる．システム使用者の 4 択問題平均点は 90%であったのに対しシステム非使用者は 85.5%であった．図 10(b)より，総試験点数の得点分布はシステム使用者は高得点域をピークをもち，かつ集中しており，システム非使用者は広く分布していることがわかる．システム使用者の総試験点数平均点は 77.9%であったのに対しシステム非使用者は 69.1%であった．これらの結果から，システム使用者はシステム非使用者よりも 4 択問題で 4.5%, 総試験点数で 8.8%正解率が高いことがわかった．ここで，4 択問題の学習を支援するシステムを提供したにもかかわらず，4 択問題の点数差は 4.5%（出題割合が約 30%のため 1.6 点）と，試験成績に大きな差は得られなかった．しかし，総試験点数は 8.8%（約 9 点）の差が出た．このことから，本システムを使用することで単純に 4 択問題の正答数のみで成績が向上したのではないということがわかった．

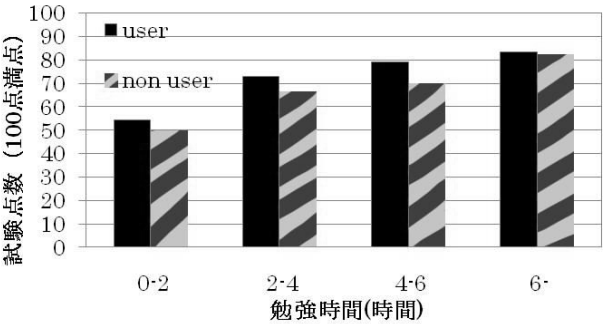
6.3　学習内容の違い

前節より，単純に 4 択問題の正答数で大きな差が出ず総試験点数で大きな差が出た結果から，被験者の学習時間について分析した．

試験対策学習の時間ごとに分けて試験点数を比較したものを図 11 に示す．



(a) 4 択問題の試験点数



(b) 材料工学の総試験点数

図 11 材料工学の試験結果と学習時間の比較

図 11 より，4 択問題，総試験点数のどちらにおいても学習時間が長いほど点数が高くなっている．また，総試験点数においては，システムを使用した学生の方が同じ学習時間であっても平均して約 10%高い点数であることがわかる．ただし，学習時間が 6 時間を超える学生においては，総試験点数に大きな差は見られなかった．このことから，6 時間を超える学習を行う場合は，システムの使用に関わらず，試験範囲を十分に学習でき，総試験点数に違いが表れなかったことが考えられる．しかし学習時間が 6 時間未満の場合はシステムを使用した学生の方が試験点数をより向上させるような学習を行えたと考えられる．

図 12 に総学習時間に対するシステムの使用時間を，図 13 に総学習時間における基礎学習（専門用語の暗記，意味の理解など）とシステム使用時間の割合を示す．図 13 は総学習時間を 100%とした場合における試験勉強の内容を「基礎学習」「応用学習（専門用語を知っていることを前提とした，図を解釈する問題や，基礎知識を複合して解答する問題など)」の 2 種類に分けた場合の，基礎学習の割合を示したものである．総学習時間を 100%としているので，グラフ上部の空白部分はすべて応用学習の割合を表すこととなる．

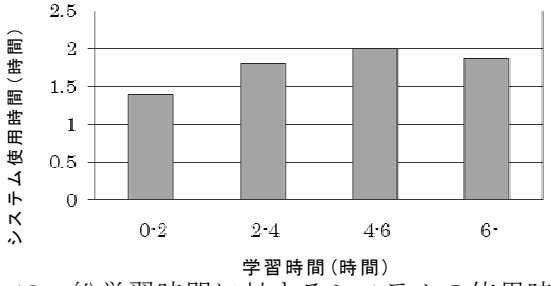


図 12　総学習時間に対するシステムの使用時間

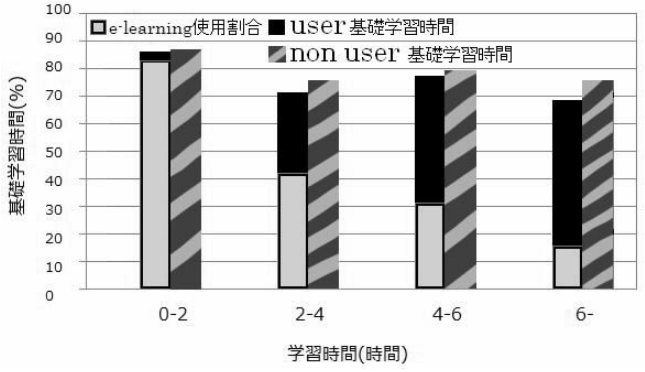


図 13 総学習時間における基礎学習とシステム使用時間の割合

図 12 より，学習時間に対してシステムの使用時間に大きな差はなく，平均して 1.5～2 時間程度であることがわかる．試験範囲である 6～7 単元を 1 度学習するのに要する時間は修学の程度やシステムへの慣れにもよるが 20～30 分程度であるので，3～5 回繰り返し学習したと推測される．

図 13 より，総学習時間が長いほど基礎学習時間の比率が少なくなること，すべての学習時間において，システム使用者の方が基礎学習時間の割合が約 10%少ないということがわかる．基礎学習の割合が 10%短縮されたので，応用学習の割合が 10%増加したといえる．さらに総学習時間が長くなるほど，システムを使用し，加えて従来の方法で基礎学習を行っている傾向にあることがわかる．前述したように，1 度の学習で 70%程度学習時間が短縮できることがわかっているが，繰り返し学習したことおよび総学習時間が長くなるほどシステム使用時間の割合が減少することなどから，基礎学習時間は約 10%の削減にとどまったと考えられる．さらに，システムを用いて繰り返し基礎学習を行なったことに加えて，基礎学習を従来の方法で学習したことにより，システム非使用者と比べて短時間で基礎知識が学生に定着したと考えられ，約 10%応用学習の学習時間の割合を増加させ，その結果システム使用者の総試験点数が高かったと考えられる．

7. おわりに

本研究により，以下の結果が得られた．

1) 材料工学の専門用語の暗記・理解などの基礎部分の学習を支援する e-learning システムを開発し，学生に配布した．
2) 本システムの使用により，1 度の専門用語の暗記・理解といった基礎学習時間を約 70%削減することが可能であることがわかった．
3) 本システムを使用した学生は試験対策の学習における基礎学習時間を約 10%短縮した上で，4 択問題で 4.5%，総試験点数で 8.8%正解率を向上させたことがわかった．

参考文献

(1)早稲田一嘉，藤本健司：「携帯型デジタルデバイスを組み込んだ双方向 e-learning システムの構築」，日本工学教育協会平成 20 年度工学・工業教育研究講演論文集，pp.570-571，2008
(2)Tsvetozar Georgiev et al. :"M-Learning a New Stage of E-Learning", International Conference on Computer Systems and Technologies –CompSusTech's2004, Vol.IV, No. 28, pp.1-5, 2004
(3)任天堂ホームページ：「ニンテンドーDS：スペック」， http://www.nintendo.co.jp/ds/spec/，2010
(4)川辺優大：「携帯デジタルデバイスを組み込んだ双方向 e-learning システムの構築」，平成 20 年度神戸市立工業高等専門学校機械工学科卒業論文，2009

汎用マーカー AR システムの開発

藤本 健司* 山口 剛平** 早稲田 一嘉***

Development of Marker AR Systems Available without Programming

Kenji FUJIMOTO* Kohei YAMAGUCHI** Kazuyoshi WASEDA***

ABSTRACT

Augmented Reality(AR) which extends the real world by adding virtual information is a interesting area in virtual reality research. However, in case of traditional marker AR, content providers must create the content and program the AR application. And users need to download the new AR application for each update. These constraints cause to difficult for disseminating of AR. Therefore, in this paper we propose a system creating AR application without knowledge of programing. Our system is consist of a AR application and a sub tool for content. This AR system uses the exterior file which creates by sub tool. As a result, content providers were able to add the content of AR without programing. And users were able to download the exterior file and the content for each update. We confirm the teaching materials using AR can create easily by this system.

Keywords: augmented reality, e-learning, virtual reality

1. はじめに

近年，携帯デバイスや，それに関する技術が急速に発達している．その中でも現在注目されている技術として，拡張現実(Augmented Reality，以下 AR)と呼ばれるものがある．AR とは現実の情報(環境)に仮想的な電子情報を付加して提示する技術であり，様々な分野への応用が期待されている．また，Nintendo 3DS やスマートフォンを初めとした携帯機器や IKEA などの販売店のカタログ等には実際に使用されはじめている(1)．

しかし，AR 技術を用いたコンテンツを提供するには，マーカーを用いた簡単な AR であってもコンテンツの作成だけではなく，ARToolKit(2)等を用いたプログラミングにより，専用のアプリケーションを作成する必要がある．そのため，コンテンツの提供者は少し異なったものを提供する際には，新しいプログラムを作成しなければならず，マーカー AR を利用した簡単なコンテンツであってもコストや手間がかかってしまうのが現状である．また，利用者はコンテンツに変更があると専用のプログラムのアップデートを行わなければならず，手間がかかってしまう．さらに，現状 AR コンテンツ毎に対応している AR アプリケーションは異なるので，利用者は利用する AR コンテンツ数だけ AR アプリケーションをインストールしなければない．これらが AR が普及しにくい原因の一つでもあると考えられる．

そこで本研究では，提供者はマーカー AR のコンテンツの作成にプログラミングを必要とせず，利用者はマーカー AR コンテンツの利用にコンテンツ毎のインストールを必要としないシステムの開発を行うことを目的とする．

こうしたシステムを開発することで，提供者にとってはコンテンツとマーカーの作成及び関連付けを行うだけで，マーカー AR を利用したコンテンツの提供を容易に行えるようになると考えられる．また，利用者にとっては専用のアプリケーションを一度インストールしてしまえば，新しいコンテンツが提供される度にアプリケーションをアップデートする必要が無くなる．また，様々なコンテンツを一つのアプリケーションで利用できるようになれば，利便性があがると考えられる．このシステムにより，今後 AR を利用したコンテンツの普及が進めば，例えば，本研究室で開発が行われているパソコンや携帯デバイスを用いた e-learning システムで実現するのが難しい学習教材の作成等，様々な分野での応用が期待できる．

* 電子工学科 准教授
** 専攻科 電気電子工学専攻
*** 機械工学科 准教授

2. AR(Augmented Reality)

2.1 AR とは　AR は，現実の世界をカメラなどで撮影した画像に情報処理技術により 3DCG などの仮想空間のデータを重ね合わせて表示するものである．AR の例を図 1 に示す.

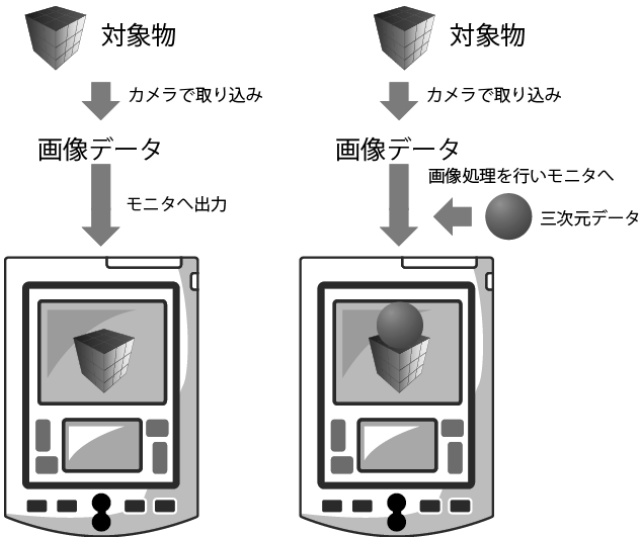


(a) AR 無しの場合　　(b) AR 有りの場合

図 1　AR の例

図 1(a)が現実世界をカメラで映し出した画面である．これに AR を用いて 3DCG を重ね合わせた画面が図 1(b)である．AR を用いることで，図 1(a)にある黒の太い四角で囲まれたマーカーと呼ばれるものに 3DCG を重ねることができ，図 1(b)のようにカメラで撮影した画像に実際にその場に無いようなものを表示して見せることができる．ここで重要なのは，静止画像ではなくリアルタイムで撮影した映像に対して行うことができるということである．しかし，単純に 3DCG を重ね合わせるだけでは意味がなく 3DCG を重ね合わせる場所，その場所に何を重ね合わせるのかを適切に設定することによって意味を持つようになる.

2.2 AR の処理の流れ　AR の基本的な処理の流れを図 2 に示す.



(a)AR 無しの場合　　(b)AR 有りの場合

図 2　AR 処理の流れ

図 2(a)が AR を用いない場合の処理である．カメラで撮影を行い, PC や携帯などの処理系に送られたデジタル画像データをそのままモニタに出力する．携帯などで単純に撮影した場合がこの例に相当する．図 2(b)が AR を利用する場合の処理である．カメラで撮影を行い, PC や携帯などの処理系に送られたデジタル画像データを元に画像処理を行い，3DCG を現実の画像データに重ね合わせたものをモニタに出力する.

2.3 仮想空間のデータの重ね合わせ　現在使用されている一般的な AR では，図 2 のように現実空間の画像データに仮想空間の画像データを重ね合わせるというものであるが，仮想空間の画像データ以外にも，例えば動画であったり，音声であったり，使用する機器が利用可能な様々なコンテンツを重ねることができる．最も簡単な方法を図 3 に示す.

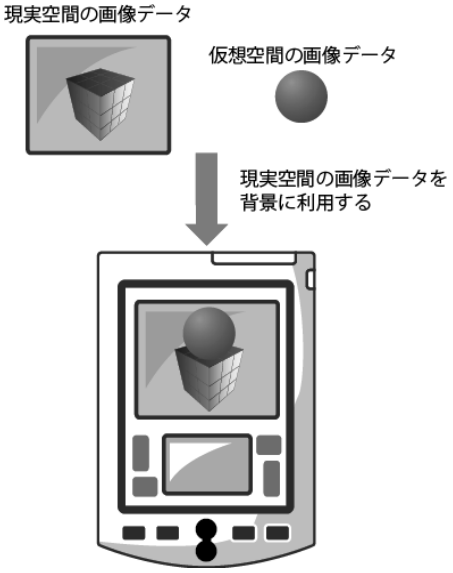


図 3　仮想空間の画像データの重ね合わせ

図 3 のように，現実空間の画像データを背景に設定し，仮想空間のデータを上乗せする．こうすることで，現実空間の画像データに仮想空間のデータを重ね合わせることができる．しかし，仮想空間のデータが画像・動画データやモデルデータであった場合，この方法では人間が見たときに，不自然な重なり方をしてしまうことが多い．例えば，重ね合わせを行った時に，宙に浮いてしまったり, 地面にめり込んで見えてしまう．これはほとんどの場合，現実空間中の平面を識別できていない場合に起こる．そういった場合は，様々な画像処理技術を使用して，平面を識別し，自然な重なり方になるように工夫することがほとんどである．識別の方法で大きく分けると，AR の種類にはマーカー AR とマーカーレス AR の二つがある．今回は，研究に使用したマーカー AR について次節で説明を行う.

2.4 マーカー AR　マーカー AR とは, 現実空間に図 4 のようなマーカーと呼ばれるものを置いて，カメラ

でそのマーカーを識別し，そのマーカー上に仮想空間のデータを重ね合わせるものである．



図 4　マーカーの例

マーカーを用いる理由としては，このマーカーが設置されている部分は平面であるということを利用して自然な重なり方になるように簡単に行うことができるからである．現在はこのマーカー AR を提供するためには，このようなマーカーの作成及び，そのマーカーを撮影したときに重ね合わせるコンテンツを作成し，ARToolkit と呼ばれるライブラリを利用してプログラムを作成することで提供することができる．この手法を用いると，マーカーレス AR と比べると容易に AR 技術を導入することが可能である．なお，応用例としては，Nintendo 3DS の AR ゲームズなどがある．本研究ではこのマーカー AR を用いて研究を行う．

3. 提案するマーカー AR システム

まず，提案するマーカー AR システムについて述べる前に，従来型のマーカー AR について説明を行う．

3.1 従来型のマーカー AR システム　まず，表 1 にコンテンツ作成者と利用者の役割を，図 5 に従来型のマーカー AR システムの構成を示す．まず表 1 に示すようにコンテンツ作成者は，マーカー及び仮想空間のデータ（以後，コンテンツと呼ぶことにする）の作成を行う．そして，プログラミングを行い，アプリケーションの配布を行う．従来の方法では，コンテンツ提供者が行う作業にプログラミングが含まれている．図 5 より，それぞれの AR アプリケーションは，対応した AR コンテンツのマーカーやコンテンツを含んだ状態でコンパイルされ配布している．そのため，新しくマーカーとコンテンツの作成や修正を行った場合には，マーカーに対してどのコンテンツを重ねるのかという関連付けを行うため，もう一度プログラミングの作業及びアプリケーションの配布という作業が必要となる．

さらに，利用者側もマーカーやコンテンツが追加・修正されるとアプリケーションが更新されるので，アプリケーション自体のアップデートを行わなければ新しいコンテンツを利用することができなくなる．通常，アップデートでは新しく配布されたアプリケーションを再度ダウンロードすることになるため更新に時間がかかることが想定される．

表 1 従来のマーカー AR システムでの役割

コンテンツ提供者（アプリケーション作成者）	利用者
・新規マーカー及びコンテンツ作成 ・プログラミング - 専用の AR アプリケーション作成 - マーカーとコンテンツの関連付け - コンパイル及び動作確認 ・アプリケーションの配布	・アプリケーションの更新確認 - アプリケーションの更新（新規ダウンロード） ・アプリケーションの利用

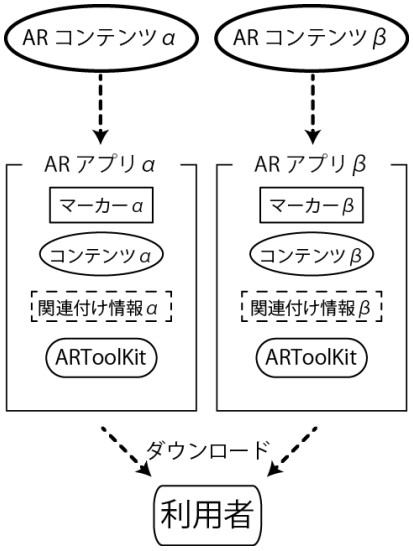


図 5 従来型のマーカー AR システム

そこで，このプログラミングの作業の中で「マーカーとコンテンツの関連付け（以降，関連付け情報）」を AR アプリの外部に出すことで，コンテンツ提供者がプログラミング作業とアプリケーションの配布の作業を行う必要が無くなるようにしたシステムを提案するシステムとして次に説明する．

3.2 提案するマーカー AR システム　表 2 に提案するマーカー AR システムにおけるそれぞれの役割を，図 6 に提案するマーカー AR システムの構成を示す．このシステムでは，AR マーカーの認識を行うアプリケーションを統一化し，従来個々のアプリケーションで取り扱っていた関連付け情報をアプリケーションの外部に出すことで，コンテンツの追加や修正時にプログラミングの作業を必要とせずに，コンテンツ提供者はマーカー及びコンテンツを提供することが可能となる．

また利用者側は，関連付け情報のアップデートを行うだけでよくなり，更新の時間が軽減されると考えられる．

つまり，従来の方法では，コンテンツ提供者と AR

アプリケーション作成者が必ず同一人物である必要があったが，図 6 に示す今回のシステムではコンテンツ

表 2 提案するマーカー AR システム

アプリ作成者	コンテンツ提供者	利用者
・AR アプリの作成 ・AR アプリの配布	・新規マーカー及びコンテンツ作成 ・マーカーとコンテンツの関連付け ・関連付け情報のアップロード	・アプリのダウンロード（初回のみ） ・関連付け情報の更新確認 - 関連付け情報の更新 ・アプリケーションの利用

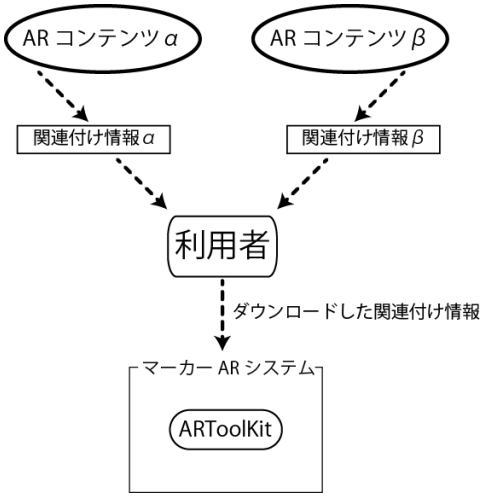


図 6　提案するマーカー AR システム

提供とアプリケーション作成の作業を分離することで，コンテンツ提供者が必ずしもプログラミングを行う必要がなくなる．表 2 のようなシステムを提供するためには，図 6 で示すように，従来プログラミングで行っていた関連付けを行うためのツール及び，関連付け情報から読み込みを行い，動作する AR アプリケーションで構成する必要がある．

3.3 提案するシステムの仕様　提案するシステムは，先述したように関連付けを処理するための補助ツールとマーカー AR システム部分の 2 つから成り立っている．次からそれぞれの仕様について説明を行う．

3.3.1 関連付けを行う補助ツールの仕様　関連付けを行う補助ツールには，以下のような機能を有している．

(1) マーカーとコンテンツの関連付け機能
(2) 関連付け情報の書き出し機能
(3) サーバへのアップロード機能
(4) 新規マーカーの作成機能
(5)ツール用プロジェクトの保存読み込み機能

3.3.2 マーカー AR アプリケーションの仕様　提案するマーカー AR アプリケーションは以下のような機能を有している．なお，マーカーの認識方法は ARToolkit を利用している．

(1) 必要データのダウンロード機能
(2) 関連付け情報の読み込み機能
(3) マーカーの認識とコンテンツの再生

4. 開発環境

4.1 関連付けを行うツールの開発環境　関連付けを行う補助ツールの開発を行った環境を表 3 に示す．

表 3　関連付けを行うツールの開発環境

項目名	環境
OS	Windows7
開発言語	ActionScript3
総合開発環境	FlashDevelop
SDK	Flex SDK4.1 AIR SDK 2.0.2

今回は AIR SDK を用いてデスクトップでオフラインでの作業専用としたが，将来的にはデータベースとの連携により，関連付けの修正をどこからでもブラウザ上で行えるという形をとりたいため，ActionScript を用いている．

4.2 AR アプリケーションの開発環境　AR アプリケーションの開発を行った環境を表 4 に示す．

表 4　AR アプリケーションの開発環境

項目名	環境
OS	Windows7
開発言語	Java
総合開発環境	Eclipse
SDK	Android SDK
ライブラリ	NyARToolkit for Android

今回は, Android 向けの AR アプリケーションを作成するため，Android SDK 及び NyARToolkit for Android を用いた．

5. 開発結果

5.1 関連付け補助ツールの開発結果　今回作成した，関連付け補助ツールの起動時の画面を図 7 に示す．図のように，窓内の中央上に枠が一つ，下に二つの枠がある．上の枠がメインの枠になっており，マーカー AR アプリケーションで動作するように登録するマーカーの一覧が表示される．左下の枠にはメインの枠から選択したマーカーが画像として表示される．また，右下の枠にはメインの枠から選択したマーカーに関連付けられているコンテンツの一覧が表示されるようになっている．メイン枠の左上には新規，保存，読込，の三つのボタンがあり，メイン枠の左下には，実行，assets フォルダ作成，アップロードの三つのボタンがある．

そして，メイン枠の右下には追加，削除，編集の三つのボタンがある．これらの合計九つのボタンの機能について次に説明を行う．

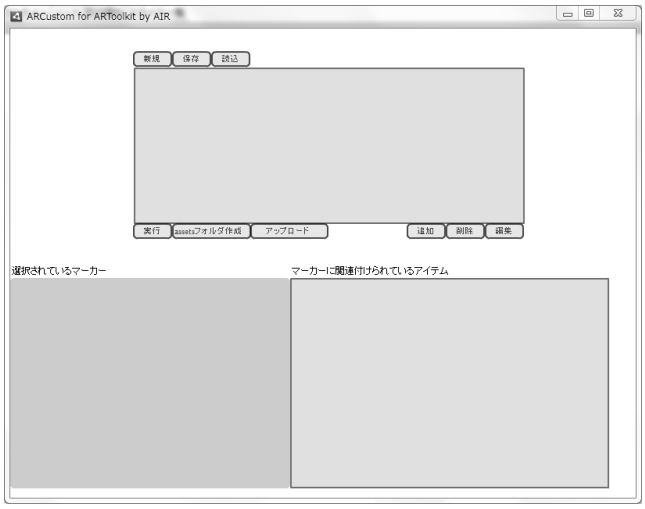


図 7　関連付け補助ツールの起動画面

5.1.1 新規ボタン　　関連付けツールの新規プロジェクトを作成するボタンである．現在作業中のプロジェクトを破棄して新規に作成を行う．

5.1.2 保存ボタン　　現在作業中の関連付けのプロジェクトを保存するボタンである．プロジェクトを保存する場所，ファイル名を選択するダイアログが開き保存場所を決定する．

5.1.3 読込ボタン　　保存ボタンで保存した関連付けのプロジェクトファイルを読み込むボタンである.読み込むファイルを選択するダイアログが開く．

5.1.4 実行ボタン　　マーカー AR アプリケーションで読み込む設定ファイルを書き出すボタンである．通常はこのボタンを使用することはないと思われるが，コンテンツ提供者がサーバーにアップロードする前に確認したい場合に使用することができる．

5.1.5 assets フォルダ作成ボタン　　サーバーにアップロードする設定ファイル及びマーカーファイル，コンテンツを選択したディレクトリに assets フォルダを作成し，その中に全て書き出すボタンである．実行ボタンと同様にコンテンツ提供者がサーバーにアップロードする前に確認したい場合に使用することができる．

5.1.6 アップロードボタン　　サーバーに関連付け情報の設定ファイル及び，マーカーファイル，コンテンツをアップロードするボタンである.ボタンを押すと，アップロードする FTP サーバの URL, ログインするためのユーザ名，パスワードを入力させるウィンドウが表示される．あらかじめ FTP サーバーのドメイン名を設定ファイルに記述しておけば，URL 一覧に表示され，クリックして選択することもできる．

5.1.7 追加ボタン　　マーカー AR アプリケーションで認識するマーカーと関連付けるコンテンツを追加するボタンである．追加したい認識するマーカーのマーカーファイルをパターンファイルの参照先に指定する．このとき選択ボタンを押せば，GUI でマーカーファイルを選択することもできる．また，マーカーファイルをビットマップファイルから作成したい場合にはパターンファイル作成ボタンを押し，開いてきたダイアログの中にあるファイルを選択すれば，「.patt」という拡張子を持ったマーカーファイルが作成される．その他にも，追加ボタンを押したときに開くウィンドウ下部にある追加，削除，編集ボタンで，それぞれマーカーに関連付けるコンテンツの追加，削除，編集ができる．

5.1.8 削除ボタン　　メイン枠で選択した認識するマーカーを削除するボタンである．

5.1.9 編集ボタン　　メイン枠で選択した認識するマーカーを編集するボタンである．マーカーファイルの参照先と関連付けるコンテンツが既に選ばれた状態で，ダイアログが開くようになっている．

5.2 関連付けを行った結果　　ツールを用いてマーカーに対してそれぞれ関連付けを行った．その結果を図 8 に示す．図の左側がマーカー，右側がコンテンツである．

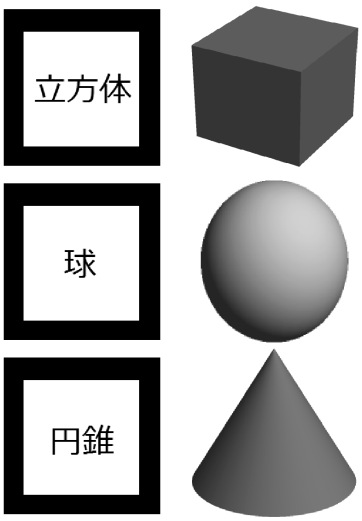
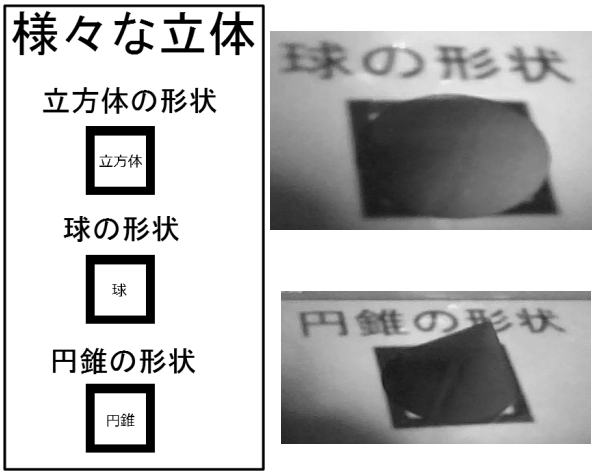


図 8　関連付けするマーカーとコンテンツ

5.3 マーカー AR アプリケーション開発結果　　作成したマーカー AR アプリケーションを図 8 の関連付けしたマーカーに対して動作させた結果の一例(球や円錐の場合)を図 9 に示す．

図 9(a)は，関連付けツールで関連付けた内容の確認のため作成した試験用マーカーである.その結果が図 9(b)となっている．この結果より，関連付け補助ツールで関連付けたマーカーとコンテンツが正常に動作しているのが分かる．



(a)試験用マーカー　　(b)実行結果

図 9　マーカー AR アプリケーションの実行結果

5.4 開発したシステムを用いた応用例　　今回作成したシステムを用いた応用例として，AR を用いた簡単な学習教材の作成を行った．その学習教材の一部を図 10 に示す．

様々な図形の説明

１. 円錐

円錐(cone)とは、円を底面として持つ錐状にとがった立体のことである。

円錐は錐体の一種である。高さをh、母線の長さをc、底面の半径をr、底面積をB(=πr2)、底面の周をb(=2πr)、とすると、円錐の側面積A、底面積S、体積Vはそれぞれ次の式で与えられる。

$$A = \pi rc = \pi c\sqrt{c^2 - h^2} = \frac{1}{2}bc$$

$$S = A + B = \pi r(r + c) = \frac{1}{2}b(r + c)$$

$$V = \frac{1}{3}\pi r^2 h = \frac{1}{3}\pi(c^2 - h^2)h = \frac{1}{3}Bh$$





図１円錐　　**参考用マーカー**

円錐を図に描くと上の図1のようになる

図 10　関連付け補助ツールを用いて作成した学習教材

次に AR アプリケーションを起動し，実際に携帯機器などのカメラを使用して学習教材内のマーカーを撮影した時の画像を図 11 に示す．

マーカーのある部分にコンテンツが紐付されているため，カメラ画像にはコンテンツである立方体の 3DCG が張り付けられていることが分かる．このような教材を提供するためには、従来の方法では新しいアプリケーションを作成する必要があったが，提案方法では 3 次元モデリングソフトを用いて立体のモデリングとマーカを作成し，補助ツールを用いて関連付けを行うだけで提供が可能となった．

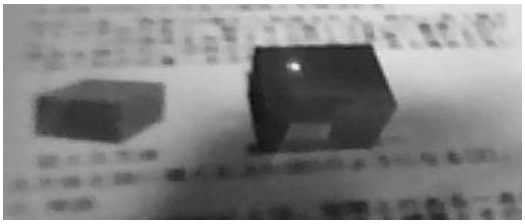


図 11　学習教材を AR ツールを使用して撮影した結果

6. まとめ

今回，簡単な関連付け及び，サーバーへの関連付け情報のアップロードを行う補助ツールの作成とサーバーから関連付け情報を取得し，動作するマーカー AR アプリケーションの開発を行った．これら二つのツールとアプリケーションを用いて関連付け及びマーカー AR アプリケーションの動作確認を行うことができた．これらのことから，目的としていたプログラミングを必要とせずにマーカー AR の提供ができ，利用者にとってマーカー AR コンテンツを利用しやすいシステムの基本部分の開発が行えたといえる．

また，構築したシステムを用いてマーカー AR を用いた簡単な学習教材の作成が行え，アプリケーションの更新を行うことなく学習教材の AR コンテンツを利用することができた．このことから，システムを用いたマーカー AR の応用例を示すことができ，様々な応用例への可能性を示すことができた．

今後は，データベースとの連携を行うことで，多数の人が同時に関連付けの追加及び修正が行えるシステムを構築する予定である．

参考文献

(1) Ronald T. Azuma:“A Survey of Augmented Reality”, Presence，Vol.6，No.4，pp.355-385，Aug.1997

(2) 加藤博一:“拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発”，電子情報通信学会技術研究報告. PRMU，　パターン認識・メディア理解 101(652)，pp.79-86，2002

ニューラルネットワークによる背景想起を利用した物体抽出システムの開発

藤本 健司*　　神田 嵩臣**

Development of Object Extraction Using Recalling Background by Neural Network

Kenji FUJIMOTO*　Takaomi KANDA**

ABSTRACT

This paper describes how to develop the object extraction system based on human skill. In the existing studies, researchers have proposed that the object extraction should be approached by background subtraction method or optical flow method. However, these method suffers from a number of disadvantages. In this study, we proposed a new object extraction system using recalling background images by Neural Network. The experimental results showed that the system we proposed were very effective for moving images. We concluded that our system are effective for moving images.

Keywords: neural network, background subtraction method, object extraction

1. はじめに

近年，デジタルカメラやデジタルビデオカメラなどの電子光学機器の発達により，様々な分野で物体認識や移動物体認識技術への需要が高まっている．しかし，画像認識の研究が始まった 1960 年代から約 50 年たった現在においても，物体認識においては，未だに人間の顔の正面画像を除いては，実用的な精度で認識が可能な対象はほとんどなく，動画像から，移動物体を抽出・認識するという人間には非常に容易な作業に関しては，未だ実用精度で使用できるものがほとんどないという状況である．

しかし，ここ近年，コンピュータの演算速度や並列処理能力の向上，記憶媒体の記憶容量の増大化などにより，複雑な画像処理が容易に行えるようになってきており，新たな画像認識技術への期待が急速に高まってきている．このような流れの中で，今まで有効的な認識が行えなかった 3 次元空間(実空間)上を移動する物体を動画像中から抽出・認識する技術について様々な手法が提案され研究されている．

その中でも，主に次の 2 つの手法が動画像からの移動物体抽出に利用されている．

(1) 背景差分などの差分処理を用いる方法[1],[2]
(2) 物体の移動方向を示すオプティカルフローを用いる方法[3]

しかし, (1)の背景差分法では,照明の変動や背景物体の変動といった背景の変化への対応が難しく，様々な雑音が前景として抽出されてしまう．また,ほとんどの場合でカメラは静止していなければならず，使用には様々な制約が伴う．また，(2)のオプティカルフローを利用する場合には膨大な計算が必要なためリアルタイム処理には向いていないという問題点がある．

そこで，本研究では上記の 2 つの方法のうち，背景差分の持つ問題を克服した新しい物体抽出・認識手法の開発を目的とする．現在，提案する手法では，まず，差分を行う背景をニューラルネットワーク(Neural Network:以下 NN)[4]が有する画像の記憶・想起ができる性質を利用し，物体を含んだ画像が入力されたときに学習した背景画像を想起させ作成する．この想起した背景画像を使用することにより，雑音や物体が入った時に起こる背景の変動について柔軟な対応ができると考えられる．

* 電子工学科 准教授
** 専攻科 電気電子工学専攻

2. 提案するシステム

2.1 システム概要　今回用いる移動物体抽出用システムは図 1 のように NN を用いた想起背景用パートと移動物体抽出を行う画像処理パートの 2 つのパートから構成されている．

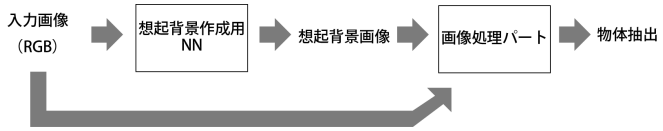
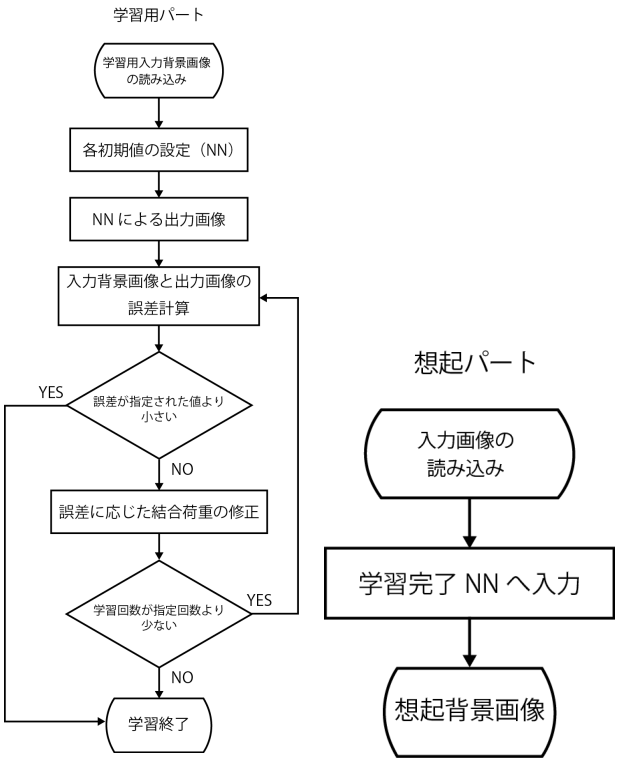


図 1　提案する移動物体抽出システム

2.1.1 背景作成用 NN　ここでは，想起背景作成用 NN の処理の流れと画像処理パートの処理の流れの説明を行う．



(a) 学習用パート　　(b) 想起用パート

図 2　想起背景作成用 NN の処理の流れ

図 2 に示すのが想起背景作成用 NN の処理の流れである．ここで使用する NN は，図 2(a)と図 2(b)のような 2 つの流れから成り立っている．まず，学習用パートでは，学習用の背景画像を複数用意し，NN に学習を行わせる．今回使用している NN では学習用アルゴリズムとして一般的によく使用されている誤差逆伝搬法を用いている．

図 2(a)のフローチャートにもあるように，学習終了条件が 2 つ設定してあり，そのどちらかを満たすと学習が完了する．この学習用パートでは，ケースによっては膨大な計算量を必要とするため処理に時間がかかってしまうが，一度学習が完了すれば，完了時の全結合荷重を保存しておくことで，いつでも瞬時にその状態を再現することができるため想起背景画像を作成する際には学習による計算時間は問題にならない．

図 2(b)の想起パートでは，学習完了後の NN に任意の入力画像を入れることで学習時に記憶した背景を想起させる作業を行っている．もちろん，ここで使用する入力画像については学習用の背景画像とは別の画像である．

2.1.2 画像処理パート　次に画像処理パートについて説明する．図 3 に画像処理パートの流れを示す．また，図中には，想起背景画像作成用 NN からの流れが分かりやすいように，点線部分で囲まれた部分に想起パートの部分からの処理の流れを入れている．

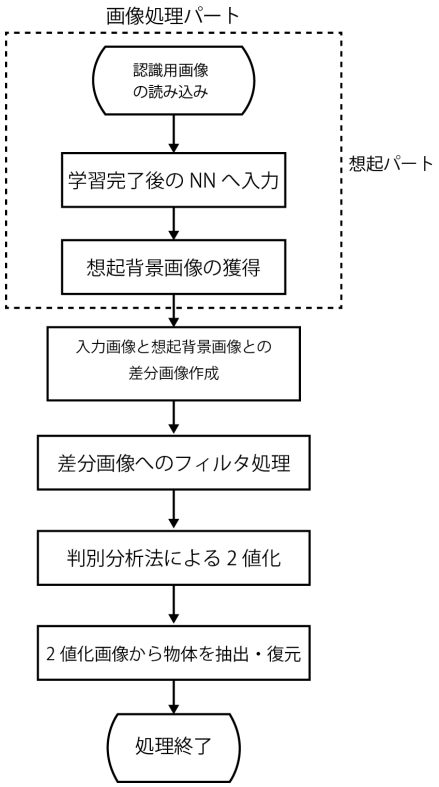


図 3　画像処理パートの処理の流れ

まず，学習の完了した NN にカメラなどから取り込んだ画像を入力することで想起背景画像を得る．次に，その背景画像とカメラから取り込んだ画像の差分画像を取る．その次に，得られた差分画像にフィルタ処理を行うが，ここで用いるフィルタ処理には，我々が考案した各色メディアン法とグレーメディアン法を用いた．これらの手法については次節以降で説明を行う．最後に判別分析法により 2 値化を行い，物体の抽出・復元を行う流れとなっている．

2.1.3 各色メディアン法　ここでは各色メディアン（Each Color Median :以下 ECM）法について説明する．

ECM 法の概略を図 4 に示す.

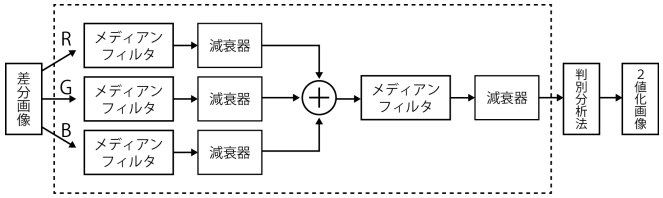


図 4　ECM 法(図中点線部分)

まず，差分画像を RGB のそれぞれ単色の画像に分ける．そして，各画像に対して 3×3 ピクセルのメディアンフィルタを適用する．その後，減衰器により，画像全体の輝度値の平均値を各画素から引く作業を行う．最後に，それぞれの減衰器から出てきた出力を足し合わせ，再び，メディアンフィルタと減衰器を通すことでグレースケール化を行う．

2.1.4 グレーメディアン法　ここでは，グレーメディアン（Gray Scale Median：以下 GSM）法について説明する．GSM 法の概略を図 5 に示す.

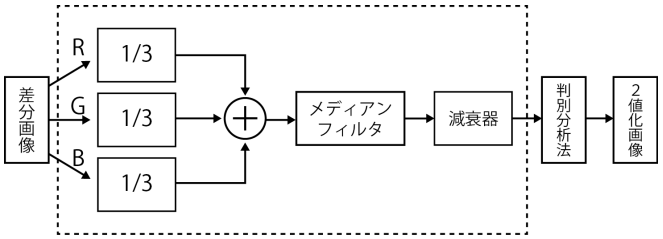


図 5　GSM 法（図中点線部分）

GSM 法では，RGB 毎の各画像について作業を行うことは同じであるが，メディアンフィルタをかけて平均化するのではなく，単純に各画像の輝度を 1/3 して足し合わせることで平均化を行っている．その後，メディアンフィルタと減衰器を通すことでグレースケール化を行っている.

2.2 背景差分法と提案する手法との違い　最初に，背景差分法について簡単に説明する．図 6 はあらかじめ設定しておいた基準画像と入力画像の画像間差分をとる最も単純な背景差分法の例である.

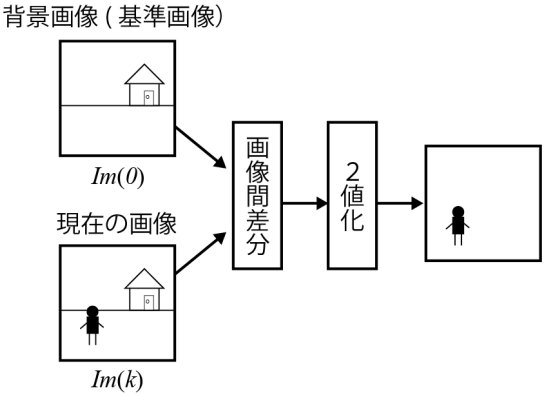


図 6　背景画像との画像間差分による変化検出

ここでは，まず変化のない（移動物体などがない）背景画像を基準画像 $Im(0)$とし, 現時点での入力画像を $Im(k)$としている．そうすると，基準画像と入力画像の画像間差分は，以下の式で与えられる.

$$基準画像との画像間差分 = TH(|Im(k) - Im(0)|) \qquad (1)$$

この式より，動きの変化のあった部分の画素が黒として検出される．ここで，$|Im|$は画像の各画素値の絶対値計算，$TH(Im)$は濃淡画像の 2 値化を意味する．このような単純な方法は，照明変動などの外乱が小さい場合については有効である.

しかし，照明変動などを考慮する場合には，図 7 に示すような連続画像の画像間差分による方法などを使用しなくてはならない.

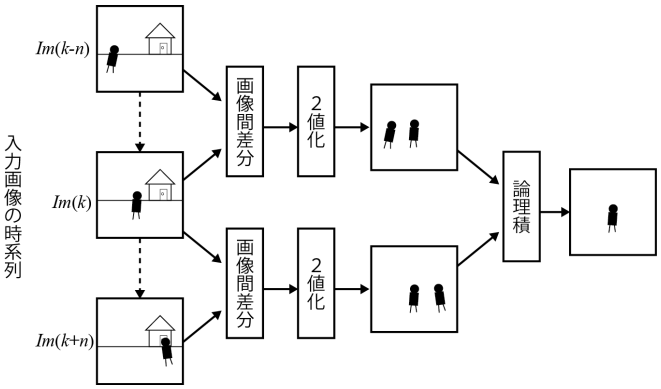


図 7　連続画像の画像間差分による変化検出

一方，提案する手法では，基準画像を用意しなくても，今まで説明してきた通り．NN により入力された画像から基準画像にあたる想起背景画像が提供される．また，この想起背景画像は，NN の低雑音におけるロバスト性を引き継いでいると考えられるため，多少の外乱が入った場合においても，その入力画像に適した背景画像を想起できると期待できる．そのため，図 7 で表したような連続画像の場合においても特別な作業を行う必要がない.

ただし，物体などが画像に入ってきた場合，大きな外乱となるため，想起背景画像に雑音が乗る可能性がある．この部分の問題点を処理する方法として 2.1.3 や 2.1.4 で説明した ECM 法や GSM 法を用いている.

以上が従来の背景差分法と提案する手法との違いとなっている.

3. 実験方法

今回は，通常の背景差分法で行われている連続画像間の物体検出と背景差分法が苦手とされている 3 つのケースについて実験を行った．以下にそれぞれのケースを記載する．なお，NN に使用した学習用画像は，

ケース毎に 60[s]～120[s]間撮影した動画から取得した 300 枚の画像を用いた．但し，最後のケースについては 3000 枚の画像を学習画像に用いた．

3.1 連続した画像に関する物体検出　2.2 の図 7 で説明したような連続した画像から，移動する物体の検出を行った．この際，カメラは固定とし，ECM 法や GSM 法を使用しない場合と使用した場合についての実験を行った．図 8 に学習画像の一例を示す．



(a)1 フレーム目　(b)100 フレーム目　(c)200 フレーム目 (d)300 フレーム目

図 8　連続した画像に関する学習画像例

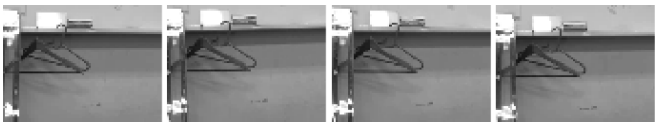
3.2 照度が変化した場合の物体検出　背景差分法が苦手とする照度を変化させた場合の物体検出を行った．カーテンの開閉により照度を変化させ 3.1 と同様に ECM 法や GSM 法を使用しない場合と使用した場合についての実験を行った．図 9 に学習画像の一例を示す．



(a)1 フレーム目　(b)100 フレーム目　(c)200 フレーム目 (d)300 フレーム目

図 9　照度が変化した場合の学習画像例

3.3 手振れするカメラを用いた場合の物体検出　背景差分法では，通常カメラを固定して使用するが，その際カメラが何らかの影響によりぶれたりすると画像間の差分画像が大きく変わってしまう．このケースでは，あえて手振れを起こして検出しにくい状況を作成し，物体検出の実験を行った．図 10 に学習画像の一例を示す．



(a)1 フレーム目　(b)90 フレーム目　(c)180 フレーム目 (d)270 フレーム目

図 10　手振れしたカメラを用いた場合の学習画像例

3.4 カメラをスイングさせた場合の物体検出　3.3 でも述べたとおり，背景差分法のほとんどはカメラを固定して使用する．そこで，カメラをスイング移動させながら，物体検出の実験を行った．図 11 に学習画像の一例を示す．



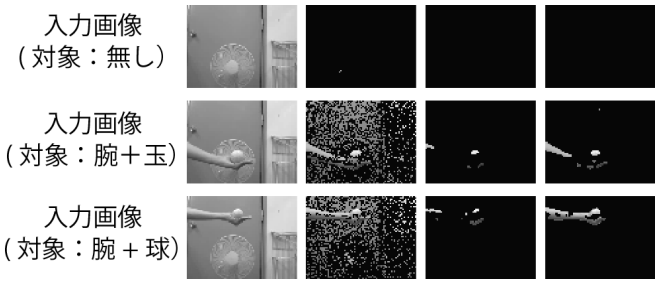
(a)1 フレーム目　(b)200 フレーム目　(c)400 フレーム目 (d)600 フレーム目

図 11　カメラをスイングさせた場合の学習画像例

4. 実験結果

4.1 連続した画像に関する物体検出　連続した画像に関する物体検出の結果を図 12 に示す. 単純に想起背景画像と差分を取った後，グレースケール化したものと GSM 法，ECM 法を使用した場合の結果を並べてある．一番左から，入力画像，処理なしの結果，GSM 法の結果，ECM 法の結果に並んでいる．図 12 を見る限り，単純にグレースケール化した場合には，完全に物体の抽出はできておらず，たくさんの雑音領域が乗っていることが分かる．それに対して ECM 法を用いた場合には，物体の抽出部分の一部が少し欠けているケースもあるが物体のほとんどの部分を抽出できている．

また，本ケースにおいては，GSM 法で抽出できた領域は少なく, GSM 法には向いていないということが分かった．



(a)入力画像　(b)処理無し　(c)GSM 法　(d)ECM 法

図 12　連続画像を入力した場合の物体抽出結果

4.2 照度が変化した場合の物体検出　照度が変化した場合の物体検出の結果を図 13 に示す. 結果の順番は 4.1 と同様である．なお，入力画像 1 と 2 については，学習画像と照度を変えていない．入力画像 3 と 4 については，学習画像と照度が変わっており，入力画像 3 は照度が低く，入力画像 4 は照度が高くなっている．

処理を行わない場合には, 照度が変化しない場合は, 問題なく物体を検出できているが，照度が変化した場合には，物体以外の雑音を多く含んだ結果となった．ECM 法を使用した場合には，照度が変化しない場合，照度が低くなる場合ともに物体の大部分を検出できているが，入力画像 4 の場合には，画像中の照度の高い部分が差分画像に現れている．しかし，GSM 法を使用した場合には，入力画像 4 のケースでは若干雑音のようなものが残っているが他の手法に比べて良い物体抽

出を行えている．

このことから，GSM 法は，何も処理しない場合や．ECM 法に比べて急激な変化や外乱に強いと考えられる．

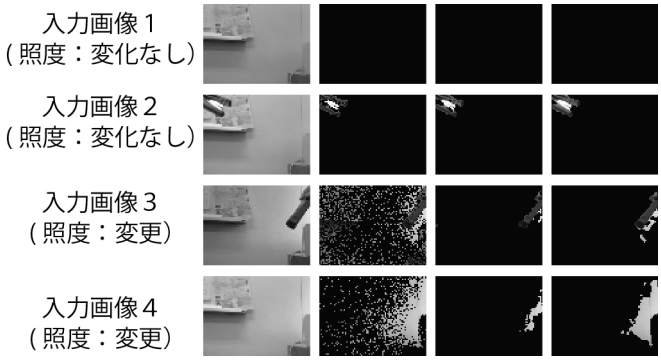


図 13 連続画像を入力した場合の物体抽出結果

4.3 手振れするカメラを用いた場合の物体検出　カメラを手振れさせた場合の物体検出の結果を図 14 に示す．入力画像 1 は対象物体は何も入っていない．入力画像 2〜4 には対象物体として，実験者の手の一部とホッチキスが入っている．

処理無しの場合には，広範囲に雑音のようなものが乗っており，移動物体以外の背景の一部についても検出している．また，一部に白い塊のようなものが出ているが，これは，背景のホワイトボードが照明を反射している部分に反応していると考えられる．

GSM 法と ECM 法を使用した場合には，やはり処理無しの場合の結果と同じような場所に雑音のような白い塊が見られた．ただ，処理無しの場合に比べると広範囲の雑音は抑えられており，GSM 法，ECM 法共に移動物体の検出が行えていることが分かる．

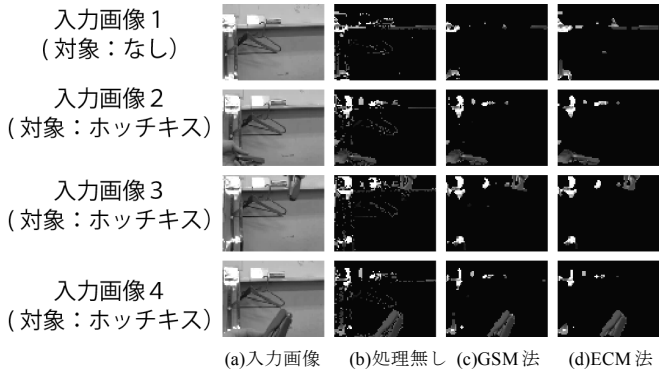


図 14 手振れしたカメラを用いた場合の物体抽出結果

4.4 カメラをスイングさせた場合の物体検出　カメラをスイングさせた場合の物体検出結果を図 15 に示す．

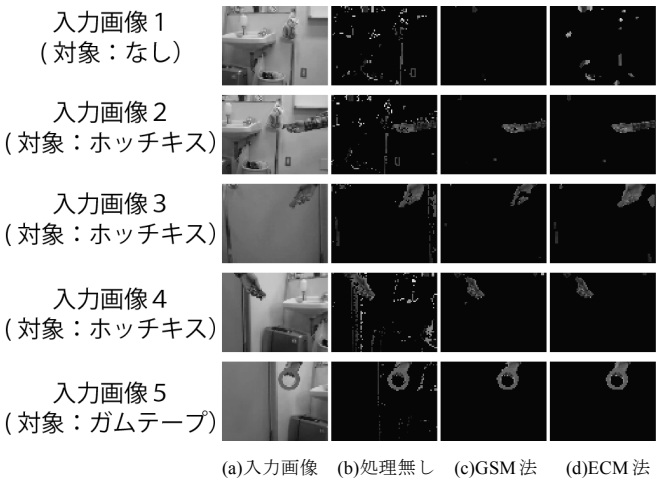


図 15 カメラをスイングさせた場合の物体抽出結果

入力画像 1 には，対象物体が入っていないものを使用し，入力画像 2〜4 に関しては対象物体として実験者の手の一部とホッチキスを使用した．入力画像 5 では，対象物体として，実験者の手の一部とガムテープを用いた．

処理無しの場合は，どの入力画像に対しても物体の検出は行えているが，やはり広範囲にわたって必要のない部分が検出されてしまう結果となった．

GSM 法を用いた場合には，全ての入力画像に対して，処理無しの場合に見られた雑音のほとんどが消えており，物体の抽出を行うことができている．しかし，物体の一部が欠けるなど，全ての部分が抽出されている訳ではない．入力画像 3 を入れたときの結果はその傾向が顕著に表れている．

ECM 法を用いた場合には，やはり処理無しの場合に比べて雑音は抑えられているが，一部照度の変化の大きい部分については，誤検出されてしまっている(入力画像 1，入力画像 3)．しかし，GSM 法のように抽出した物体が大きく欠けたりすることはなく，物体の形状を良く検出できていることが分かった．

5. まとめ

今回 4 つのケースについて提案するシステムを用いて実験を行った．その結果を表 1 にまとめる．表 1 を見ても分かるように，想起背景画像を用いて得られた差分画像をそのまま利用する方法だと，どのケースにおいても対象物体は抽出できているが，物体以外にも抽出している部分が多く，そのままでは物体抽出として使用するには問題がある．GSM 法を使用する場合では，カメラを固定した連続画像では，良い結果を得られなかったものの，その他のケースでは処理無しのときに多く見られた誤抽出の部分のほとんどを消去した抽出画像を得ることができた．ECM 法を用いた場合においても，照度などの外乱が大きくなりすぎると一部誤抽出が生じてしまうが，外乱がさほど大きくないケ

ースにおいてはかなり正確に物体の抽出を行うことができた.

表 1　各種手法を用いたときの検出結果

手法 / ケース	想起背景をそのまま利用	GSM 法を使用	ECM 法を使用
連続画像（カメラ固定）	抽出可能（雑音が非常に多い）	ほとんど抽出できず	抽出可能（一部画像に欠け）
照度の変動	抽出可能（雑音が非常に多い）	抽出可能（一部雑音あり）	抽出可能（一部雑音あり）
手振れ	抽出可能（雑音が非常に多い）	抽出可能（一部雑音あり）	抽出可能（一部雑音あり）
スイング	抽出可能（雑音が非常に多い）	抽出可能（一部画像に欠け）	抽出可能（一部雑音あり）

以上のことから，今回の実験結果より，背景差分法で苦手とするようなケースにおいて,提案する手法は,それぞれのケースにおいて特別な処理を必要とせず,有効な結果を得ることができたと言える．今回の実験結果では定量的に評価できなかったため，今後は定量的に評価する手法などを取り入れ，より本システムの有効性を確認していく予定である.

参考文献

(1)篠原利章 他："背景差分法における移動物体の検出精度の向上とカメラの揺れによる誤検出の低減手法の検討"，第２回画像センシングシンポジウム講演論文集,pp.249-254,1996
(2)佐久間喜郎，伊東潔，増田功："フレーム間差分を用いた侵入物体検出法"，テレビジョン学会技術報告,IPCV '90-27, AIPS '90-50, pp.1-6, 1990.9
(3)岡田隆三，白井良明，三浦純，久野義徳："オプティカルフローと距離情報に基づく動物体追跡", 信学論 D-Ⅱ Vol.J80-D-Ⅱ No.6, pp.1530-1538,1997.6
(4)吉冨康成，“ニューラルネットワーク”，朝倉書店,2002

２台のカメラを用いた手話動作の３次元取得とその表示に関する研究

大嶋崇之[*1], 戸崎哲也[*2]

Three Dimensional Data Acquisition of Sign Language using Two Digital Video Cameras and Visualization

Takayuki OHSHIMA[*1], Tetsuya TOZAKI[*2]

ABSTRACT

In this study, we propose the three dimensional data acquisition method for the sign language using two digital video cameras. And we visualize its data based on the CG animation. Our 3D data acquisition method consists of four steps. In the first step, we get the movie data sets of the sign language using two video cameras settled on different two directions. In the second, we chase the control points pasted on the human joints by estimating the optical flow. In the third, we calculate the three dimensional coordinate of the control points based on the DLT method, and the last is the visualization of these data on the computer display in order to enable to learn the sign language. We reconstructed 12 words of sign language, and we certified that it is possible to make the sentence of sign language and animate its by assembling these reconstructed words.

Keywords: sign language, tree-dimensional data acquisition, DLT, animation

1. はじめに

最近のコンピュータ技術の進展に伴い，人物や物体の動きをディジタルデータとして記録する技術が開発されてきた．この技術はモーションキャプチャと呼ばれ，スポーツ分野，医療・リハビリテーション分野，映画・ゲームなどのエンターテイメント分野等で広く利用されている．このような技術を手話学習に応用することで，キャプチャされた手話動作をコンピュータグラフィクスを用いて可視化をすることができ，直感的に分かりやすい動作解析が可能となる．そのため，感覚的な学習が可能となるため，学習効率の向上に期待が持てる．

現在よく利用されている手話の教材や辞書においては，手話動作の絵や写真を掲載し，その解説文を併記する表現方法が一般的である．複雑な動作の場合は，複数の角度から見た絵を同時に載せてある [(1)]．また，WEB 上で手話の動作を動画で紹介しているサイトも存在するが，定型的な文章の手話動作を紹介しているのがほとんどで，必ずしも学習者の要望に答えられているとは言いがたい面もある．また，単語と単語の区切りが分かりにくい場合がある．

そこで本研究では，3 次元モーションキャプチャ技術とコンピュータグラフィクスを用いて手話の辞書作成および手話学習システムの開発を目的とする．これは，手話文章を構成する単語の動作を計算機で 3 次元化して辞書データとして保存する．学習時には学習者が必要な単語を辞書データから選択し，それらを連結して表示することで学習効率の向上を図るものである．辞書データを作成するための手話動作の 3 次元復元は次の手法に基づいて行う．まず，手話の動作を 2 台のカメラで撮影し，次にその動画からオプティカルフロー推定に基づいて自動的に特徴点の追跡を行う．さらに，得られた特徴点の 2 次元座標から DLT(Direct Linear Translation) 法を用いて 3 次元座標を算出する．最後に，得られた結果を 3D をディスプレイ上でアニメーション表示して学習者に提示する．アニメーションには任意の角度からの観察や拡大・縮小機能を設け，学習者の意向に沿った表示を実現することを目指す．

本報告の構成は次のとおりである．2 章では我々が提案する手話動作の 3 次元化手法を，3 章では手話動作の 3 次元取得とその表示例を示し，4 章で本報告のまとめを行う．

2. 手法

2.1 手話動作の撮影　手話動作は，上半身の大まかな動きと手指の動きの 2 つに分けて行う．上半身の動きは，頭，首，胸部，腹部，両肩，両肘，両手首，両手

[*1]電気電子工学専攻 2 年
[*2]電子工学科　准教授



(a) 左カメラ　　(b) 右カメラ

図 1: 撮影環境

の親指の付け根と小指の付け根の合計 14 点に蛍光テープを貼付けて特徴点とし，2 台のデジタルビデオカメラを用いて撮影する．使用したデジタルビデオカメラは，SANYO 社製 Xacti DMX-CG110 である．手話動作者は椅子に座り，上半身の動作が写るようにカメラを設置する．撮影時の様子を図 1 に示す．(a) が左のカメラから撮影した画像であり，(b) が右のカメラから撮影した画像である．

手指の動きに関しては，定型の動作をあらかじめ撮影してデータ化しておき，手話単語に応じて選択することとする．この手指の定型データのためには，手の各関節と手首の合計 20 点を特徴点として 3 次元化する．

2.2 **特徴点の追跡**　撮影で得られた左右それぞれの動画から各フレーム上の特徴点の追跡を行い，それぞれのカメラ画像上での 2 次元座標を取得する．特徴点の追跡はオプティカルフローを推定することによって行う．オプティカルフローとは時間的に連続する画像中での物体の動きをベクトルで表したものである．ここではこのオプティカルフローを推定する手法として局所勾配法 [(2)] を用いる．局所勾配法とは，物体上の点の明るさは移動後も変化しないという仮定から時空間微分とオプティカルフローとの関係式を導出し，それを利用して対象の動きを推定するものである．

画像上の時刻 t におけるある点 (x, y) の輝度を $I(x, y, t)$ とし，微小時間 δt 後の移動点を $(x+\delta x, y+\delta y)$ とする．物体上の輝度は不変であると仮定すると以下の式が成り立つ．

$$I(x, y, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \tag{1}$$

式 (1) の右辺をテイラー展開すると，

$$I(x, y, t) = I(x, y, t) + \delta x \frac{\partial I}{\partial x} + \delta y \frac{\partial I}{\partial y} + \delta t \frac{\partial I}{\partial t} + e \tag{2}$$

ここで e は $\delta x, \delta y, \delta t$ に関する 2 次以上の高次項であり微小であるとして無視する．両辺を δt で割ると，

$$\frac{\delta x}{\delta t}\frac{\partial I}{\partial x} + \frac{\delta y}{\delta t}\frac{\partial I}{\partial y} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \tag{3}$$

δt の極限として $\delta t \to 0$ とすると，

$$\frac{\partial I}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial y}\frac{dy}{dt} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \tag{4}$$

ここでオプティカルフローの速度成分 (u, v)，空間的な輝度勾配 I_x, I_y，時間的な輝度勾配 I_t を

$$u = \frac{dx}{dt}, v = \frac{dy}{dt}, I_x = \frac{\partial I}{\partial x}, I_y = \frac{\partial I}{\partial y}, I_t = \frac{\partial I}{\partial t}$$

とおくと次のように表せる

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \tag{5}$$

この式はオプティカルフローの拘束方程式と呼ばれる．

しかし，式 (5) だけではオプティカルフローを一意に決定することができない．そこで，局所勾配法では同一物体の濃度パターン上の局所領域においては，オプティカルフローは一定であるとする．すなわち，

$$\frac{\partial(u, v)}{\partial x} = \frac{\partial(u, v)}{\partial y} = 0 \tag{6}$$

と仮定する．式 (5) と式 (6) の 2 つの拘束式から誤差 E は次式で表せる．

$$E = \sum_x \sum_y (I_x(x, y, t)u + I_y(x, y, t)v + I_t(x, y, t))^2 \tag{7}$$

上式の評価関数が最大となるようにオプティカルフローの速度成分 u, v を決定する．このオプティカルフローを特徴点の移動ベクトルとする．

2.3 **3 次元座標の推定**　特徴点の追跡によって得られた 2 方向からのカメラ画像上の座標を用いて，各特徴点の実空間上の 3 次元座標をそれぞれ推定する．ここでは，DLT 法 (Direct Linear Transformation Method) を用いる．これは，複数のカメラから得られた画像の制御点と呼ばれる既知の 3 次元座標からカメラキャリブレーションを行い，3 次元座標を算出する手法である

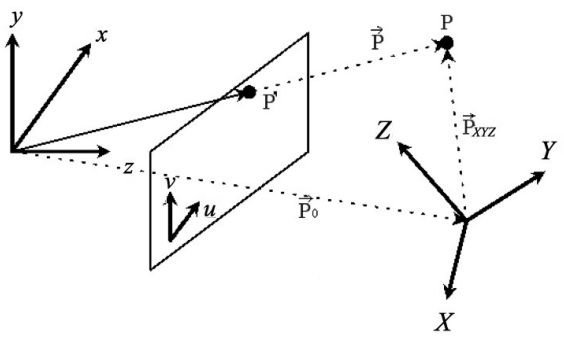


図 2: DLT 法における座標系の関係

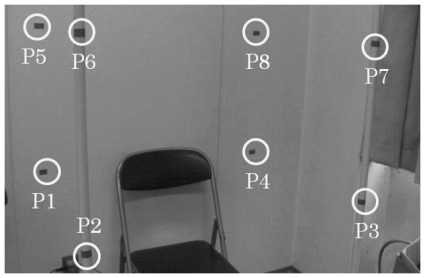


図 3: 設定した制御点

表 1: 設定した制御点の座標 [cm]

点	x	y	z
P_1	0	70	0
P_2	0	70	70
P_3	100	70	70
P_4	100	70	0
P_5	0	120	0
P_6	0	120	70
P_7	100	120	70
P_8	100	120	0

[3],[4]．この手法はカメラの設置に関する制約が少なく正確な計測が可能であるという利点がある．DLT 法における座標系の関係を図 2 に示す．実空間座標系 XYZ と，カメラのレンズ中心に原点を持つカメラ座標系 xyz がある．また，カメラのフィルム面に固定された座標系 uv はカメラ座標系 xyz を平行移動した座標系で，xy 座標軸と uv 座標軸は平行である．特徴点の座標はこの実空間座標系 XYZ で表される．また，実空間座標の点 P(X,Y,Z) がカメラのフィルム面の点 P'(u,v) に投影されている．DLT 法の基本式は

$$u = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \tag{8}$$

$$v = \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \tag{9}$$

である．ここで A_1 から C_3 はカメラ定数と呼ばれる定数である．そして式 (8)，式 (9) を展開すると，

$$u = A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 - uC_1X - uC_2Y - uC_3Z \tag{10}$$

$$v = B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4 - vC_1X - vC_2Y - vC_3Z \tag{11}$$

となる．この式 (10) と式 (11) に制御点の 3 次元座標と画像座標の組を代入することで，A_1〜C_3 のカメラ定数を求めることができる．本研究では，手話動作者を囲む空間上に 8 点の制御点（P_1〜P_8）を設定した．その制御点の様子を図 3 に示す．また，それらの実空間上の座標を表 1 に示す．

カメラ定数が全て求まると，式 (10) と式 (11) は変数が X,Y,Z,u,v の方程式となり，ある点の 2 方向からの 2 次元座標を与えることで，その点の 3 次元座標が求まる．今，左右のカメラ定数をそれぞれ A_{L1}〜C_{L3}，A_{R1}〜C_{R3} とすると，フィルム面上の座標と実空間上の座標は，式 (12) のように行列表現できる．

$$\begin{bmatrix} A_{L1}-C_{L1}u_L & A_{L2}-C_{L2}u_L & A_{L3}-C_{L3}u_L \\ B_{L1}-C_{L1}v_L & B_{L2}-C_{L2}v_L & B_{L3}-C_{L3}v_L \\ A_{R1}-C_{R1}u_R & A_{R2}-C_{R2}u_R & A_{R3}-C_{R3}u_R \\ B_{R1}-C_{R1}v_R & B_{R2}-C_{R2}v_R & B_{R3}-C_{R3}v_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_L - A_{L4} \\ v_L - B_{L4} \\ u_R - A_{R4} \\ v_R - B_{R4} \end{bmatrix} \tag{12}$$

また，方程式を $Ax = b$ であるとすると，

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix},$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$$

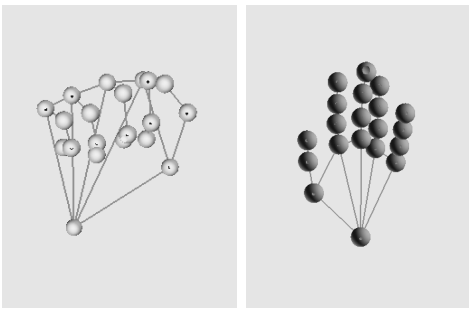
と表現できる．これを擬似逆行列を用いることで，

$$A^TAx = A^Tb$$

$$x = (A^TA)^{-1}A^Tb \tag{13}$$

となり，x を求めることができる．

2.5 **手指の表現**　手指は，非常に繊細な動きをするため，体の大まかな動きを捉える前述の手法は適応できない．そこで，手話に用いられる手の型は限定的であると仮定し，その定型パターンをあらかじめ作成しておき，手話の単語に応じてそのパターンを選択して上体の動作と合成させることで表現することとする．定型パターンの作成においては，対象とする手の型を 2 方向から静止画撮影し，指や手首の間接 20 点を対話的に選択し



(a) 右手のモデル　(b) 左手のモデル

図 4: 手指モデル

て DLT 法に基づいて 3 次元化を行う．上体動作との合成は，次のステップから成る．

Step1) 上半身のデータからその特徴点の 1 つである手首，親指の付け根，小指の付け根の 3 点を選択し，手首を起点として親指の付け根，小指の付け根へ向かう 2 つのベクトルを導く．そして，これらのベクトルの外積より，手首を始点として両ベクトルに垂直なベクトルを導き，$\vec{n}_1$ とする．

Step2) Step1) と同様の手法で手指のデータの同じ特徴点から得られる 2 つのベクトルより手首を始点としそれらに垂直なベクトル $\vec{n}_2$ を求める．

Step3) $\vec{n}_2$ の始点が $\vec{n}_1$ と一致するように平行移動し，その後，この始点を中心に $\vec{n}_1$ と向きが一致するように回転させる．

Step4) $\vec{n}_2$ を軸とする回転を加え，それぞれの手首と親指を結ぶベクトルの向きを一致させる．

尚，特徴点の座標はどちらも DLT 法を用いて実空間上のものに置き換えられているので，ベクトルの大きさは考慮していない．

また，ある単語から別の単語へ移行中の手指の動きは，移行前と移行後の各点の 3 次元位置を移動フレーム数に応じて内分させることで表現する．図 4 に，手指のモデルの 1 例を示す．これは，単語「成功」に使用する定型パターンであり，(a) が右手の型である軽く握った様子を，(b) が左手の型である手を広げている状態を表現している．

2.6 **表示**　算出された各間接の 3 次元座標に基づいて，隣り合う間接同士を連結して表示する．表示には，3 次元 CG を用い，連続する単語を動的に表現することで，学習者が直感的に理解しやすいことを念頭に表示システムを整える．ディスプレイ上での手話動作はヒューマノイド型ロボットをモデル化したものが行い，さらに任意に角度を変更出来る機能や，拡大・縮小機能をインタフェースとして盛り込んでいる．これらインタフェースの作成には，標準的な 3D グラフィクスの API である OpenGL と glui を使用した．つまり，オープンプラットフォームで使用可能である．また，複数の単語を選択した順にスムースにアニメーションすることで，文章を表現する機能も有している．これは，単語数に制約されるものの，学習者が任意の文章を作成して理解することが可能であり，学習の幅が広がるものと期待される．

3. 結果と評価

現時点で，12 個の単語 (5) の動作をデータ化した．その内訳は，名詞として「目」,「成功」,「テーマ」,「本当」,「あなた」,「みんな」，疑問詞として「〜ですか?」,「どっち？」，動詞として「わかる」,「見る」，形容詞として「美味しい」，感謝の意として「ありがとう」である．また，手指のパターンは ” 握る ”, ” 開く ”, ” 人差し指を立てる ”, ” 人差し指と中指を立てる ” の 4 パターンを定型化した．

表 2: 制御点のカメラ座標

制御点	左カメラ	右カメラ
P_1	(50,401)	(293,362)
P_2	(139,574)	(70,478)
P_3	(777,461)	(699,568)
P_4	(519,359)	(751,380)
P_5	(42, 58)	(270, 90)
P_6	(125, 35)	(26,108)
P_7	(802, 84)	(686, 15)
P_8	(519,359)	(735, 42)

表 3: カメラ定数

カメラ定数	左カメラ	右カメラ
A_1	5.666606	2.851161
A_2	-0.255159	-0.583853
A_3	0.543546	-3.355665
A_4	65.016773	321.963899
B_1	0.468383	-0.570596
B_2	-6.505611	-5.173400
B_3	-0.459555	-0.278561
B_4	830.568753	706.388155
C_1	0.002420	-0.002038
C_2	-0.000849	-0.000549
C_3	-0.004877	-0.004069

今回撮影した環境下でカメラ定数を求めるために使用した左右両画像からの既知の点の座標を表 2 に示す．表 2 中の制御点は図 3 に示すそれである．これらの値を用いて式 (10)，(11) より導かれたカメラ定数を表 3 に示す．本章で示す結果は，すべてこのカメラ定数より得られた 3 次元座標を用いた．

3.1 **特徴点の追跡**　実際の動作の動きおよび特徴点追跡の様子を図 5 に示す．緑の点が特徴点を追跡している様子である．被写体に付けた特徴点となるマーカを追従していることから，局所勾配法による特徴点追跡が行えていることが確認できる．しかし，特徴点同士が重なったり，特徴点がカメラの死角になる等の理由から特徴点を誤って追跡してしまうケースが生じる．このような場合，そのまま．3 次元化すると不自然な動きになってしまう．それを防ぐために，まず 1 フレーム目の 3 次元座標から隣り合う特徴点間の距離をあらかじめ算出する．次に，2 フレーム目以降のこれらの距離と 1 フレーム目の距離を比較し，誤差が 20 %以上になる場合を誤追跡とする．そして，誤追跡となったフレームは前後のフレームの 3 次元座標値から線形補間を行って補正することで，誤追跡の影響を軽減させた．



図 5: 特徴点追跡の様子

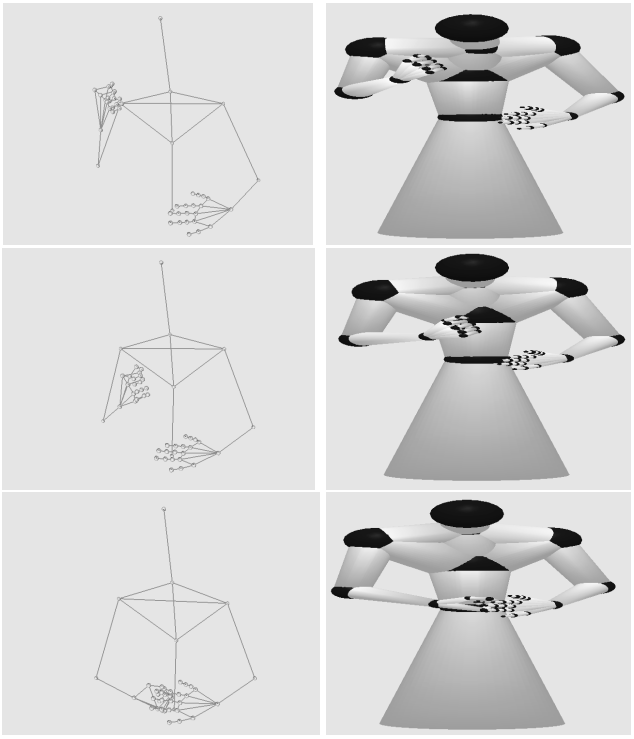


図 6: アニメーション

3.2 **手話動作の 3 次元復元**　２方向からの特徴点の２次元座標を DLT 法によって３次元座標に復元した．その一例を図６に示す．表現している単語は「成功」であり，実際の動きは図５のものである．また，手指のモデルとして図４に示すものを合成している．図左が隣り合う特徴点間を線で表現したワイヤーフレームモデル，右がその立体表現である．上から順に時系列的に表現している．これらの図より，手話動作者の特徴点を追跡して３次元化出来ていることが分かる．また，上半身を立体的に表現するすることで直感的に動作が理解しやすくなることが分かる．

図７には，今回作成した手話単語から数語を選択して一連の文章にしてアニメーション化した結果を示す．選択した単語は，「私」，「あなた」，「目」，「見る」，「本当」，「どうか」，「分かる」であり，これらを連結することでディスプレイ上では，「私は，あなたの目を見れば本当かどうか分かる.」という文章が表現できる．ここで，各単語間の連結は単語の最終フレームと次の単語の１フレーム目のそれぞれの特徴点を線形補間をすることで実現し，動きをスムースに表現した．また，3D アニメーションで表示するユーザインタフェースは簡単な操作で拡大・縮小，任意角度からの表示を可能にしており，背後からの観察等も可能である．

3.3 **他手法との比較**　Google で”手話学習”をキーワードにして検索し，ヒット件数上位の２手法を学習効率の高いものであると仮定して本手法と比較を行った．比較対象とした手話学習システムは，文献 [6],[7] であり，比較項目として”単語数”，”表示方法”，”見やすさ”，”文章作成の可否”，”任意角度表示の可否”を設定して，主観的な評価を行った．その結果を表４に示す．文献 [6] と文献 [7] の両方のシステムに共通しているのは，実際に人が手話をしている様子をそのまま紹介していることである．文献 [6] は動画をそのままで表示していたが，動画ではデータが大きいためスムーズな再生ができていない場合があった．また，文章を作成する機能はない．文献 [7] は，１つの動作を数枚の静止画に分割し，それを連続で表示することで手話動作を表示していた．こちらのシステムでは複数の単語を選択することで，連続して手話動作を表示することが可能であるが，１つの動作に対する静止画の数が少ないため，動作の流れが分かりづらい．それに対して，本システムは１つの動作のデータ量が 100〜300kB と動画に比べて非常に少なく，複数の単語を選択して文章作成を可能にし，さらにスムーズな再生が可能である．しかし，現在までのところ単語数が少ないため文章の作成に制約がある．

表示は CG アニメーションを用いているため，同一の人物が撮影する必要がなく，撮影環境が異なってもアニメーションで表示する際には影響しないという利点もある．実際に人が動作をしている様子を動画で紹介している文献 [6] に比べると，本システムの 3D アニメー

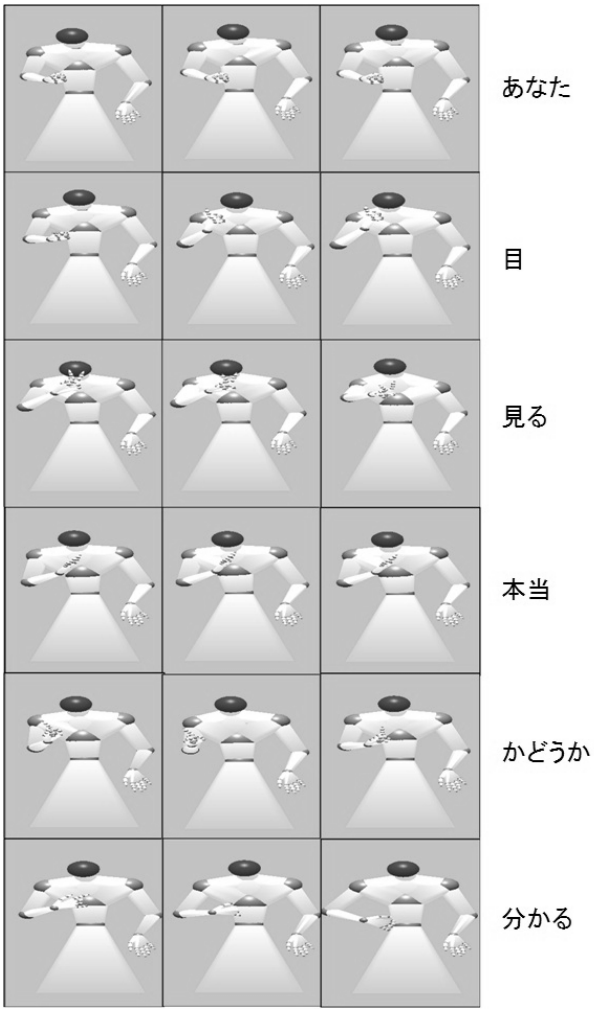


図 7: 文章の表現例

ションではややぎこちない部分が目立ち，直感的な分かりやすさと言う点では劣る点があった．しかしながら，本システムは文献 [6],[7] には無い任意の角度での表示や拡大・縮小などの任意性を有しているため，手話の学習に有効であると考えられる。今後は，単語数を増やすことにより，任意の文章作成を可能にする必要がある．また，操作性についても単語の選び方や，動作とともに文章も表示する機能を追加する等の検討が必要である．

4. まとめ

本研究では手話の動作を 3 次元に復元して，手話の学習システムを開発することを目的とした．12 種類の手話単語に対して 3 次元復元を行った．特徴点追跡は局所勾配法を用いたオプティカルフローを推定することで可能であることが確認できた．また，DLT 法を用いて 2 方向からの 2 次元座標から 3 次元座標を推定できることが確認できた．さらに，動作の 1 フレーム目の各特徴点間の距離を利用して補正をすることでその誤追跡の影響を軽減することができた．得られた 3 次元データを 3D アニメーション化することで，直感的な手話学習が可能になり，任意角度での表示等を機能として追加することで，学習の幅が広がるがことが確認出来た．これらより，本システムは新しい手話学習支援システムとして利用することに期待出来るものと考えられる．

表 4: 手話学習システムの比較

	本システム	文献 [6]	文献 [7]
単語数	少ない	少ない	多い
表示方法	アニメーション	動画	静止画
見やすさ	○	○	×
文章作成	△	×	○
任意角度表示	○	×	×

今後の課題としては，特徴点追跡の際，カメラの死角となり特徴点を追跡できなくなるケースを軽減させる必要がある．これには，3 台目のカメラを導入して死角となる特徴点を軽減させることを検討している．さらには，より多くの手話単語を 3 次元データ化し信頼性の高い手話学習支援システムへと発展させることを目指す予定である．

参考文献

(1) 例えば,「Weblio 手話辞書」， http://shuwa. weblio.jp.

(2) 三池秀敏，古賀和利：「パソコンによる動画像処理」，森北出版株式会社，pp.133-143，1993.

(3) 前田一真，戸崎哲也：「市販のビデオカメラを用いたスポーツ動作の 3 次元解析」, 平成 20 年電気学会全国大会講演論文集，p.75，2008.

(4) Liang Chen, Charles W. Armstrong and Demetrios D. Raftopoulos, ：”AN INVESTIGATOIN ON THE ACCURACY OF THREE-DIMENSIONAL SPACE RECONSTRUCTION USING THE DIRECT LINEAR TRANSFORMATION TECHNIQUE”, Journal of Biomechanics, Vol. 27, Issue 4, pp.493-500, 1994.

(5) 丸山浩路：「百万人の手話」，ダイナミックセラーズ出版，1980.

(6)「ブラウザ手話学習システム」， http://portal.kumamoto-net.ne.jp/portal-ud/syuwa/m1/.

(7)「手話学習システム」， http://siva.cc.hirosaki-u.ac.jp/usr/koyama/semi/syuwa/syuwa.htm.

専門教科で英文教科書を用いた若年からの国際技術者教育 ～ 電気工学科 2 年生でのデジタル回路における試み ～

佐藤 徹哉

A Study on Early Engineering Education for Prospective International Engineers Using an English Textbook for a Basic Engineering Subject

～ A Trial on the 2nd Year Class in Dept. of Electrical Engineering ～

Tetsuya SATO

ABSTRACT

A practical experiment as a trial to use an English textbook for an engineering subject was carried out on a class in the Dept. of Electrical Engineering at Kobe City College of Technology in order to maximize the educational synergy to develop engineering capabilities by learning both of the engineering knowledge and English expressions at the same time. The practical experiment was conducted on the basic digital circuit subject for the 2nd year class, as that knowledge will be used pervasively on the course of further engineering subjects learning and laboratory works. The author carefully designed some materials to help students to learn the subject knowledge, and monitored the students' feedback. Findings include the fact that the motivation was affected by external stipulation as well as their own senses of accomplishments. Some materials were considered useful to be used with an English textbook for engineering subject.

Keywords: English textbook, digital circuit, early engineering education, educational synergy

1. はじめに

近年，改めて国内を基軸としたものづくり立社を方針として掲げる企業が増えているが，研究開発面での海外企業や大学との共同研究だけでなく，直接の商品に係る設計製造面，知財ライセンス，新たなユーザエクスペリエンスに繋がるソリューション開発や規格化においても海外企業との協働が不可欠になっている．特に国内での設計製造であっても要素技術やモジュールを海外企業との共同開発で調達したり，製造は国内のマザー工場で立ち上げた後に海外工場へ移管する等のハイブリッド化が進んでおり，次代を担う技術者にも国際共同開発をリードし得る資質が望まれている．高専の役割は，若年からの技術者教育により次代を担う技術者を養成することにあるが，従来から注力されてきた専門知識（座学）と実験・実習を通じた実技のシナジーを活かした教育に加え，若年から専門知識を国際共同開発の現場で通用する英語で学ぶことにより，専門学習と英語学習のシナジーを活かすことで効果的な国際技術者教育を目指した取り組みが活発に行われている．[(1)] 専門技術を英語で学習するためには，教科書を英語で書かれた世界的に幅広く用いられているものとすることと，さらに外国人専門科目教員により授業も英語で行う取り組みが行われているが，英語力自体が学習途上にある若年から専門学習と英語学習のシナジーを活かした教育を目指すには，英語の教科書を用いた日本語による授業が適すると考え，実践実験を行った結果について報告する．

電気工学科　准教授

2. 実践実験内容

2.1. 対象学年・対象教科

若年から取り組むことによるシナジー効果の観点では実験・実習と同様に低学年からの取り組みが望ましいが，専門教科の英文教科書を読み進むためには最低限の専門基礎を身につけていることと，基礎的な英文のリーディングに抵抗感無く取り組めるレベルであることが望ましい．本校電気工学科においては，最低限の専門基礎に相当する内容を１年生の基礎電気工学で身につけているため対象学年は２年生とし，さらに出来るだけ前提となる知識が少なく，その教科の学習内容だけで理解が確立しやすいこと，身近な外来語として既に身につけている概念とのシナジー効果も期待してデジタル回路の基礎を学ぶ論理回路工学を対象教科とした．この教科で学ぶデジタル回路は基本ゲート素子である AND･OR･NOT 等も含めカタカナのまま理解されている部分が多く，また応用分野も電卓やデジタルカメラ等の身近なデジタル製品であるため親しみやすい点も英文教科書を読み進む上でプラスと考えて選択した．また身につけた専門知識は２年生後期の実

Week	Theme	Objectives	Text book assignment	Problem assignment（◩⇒☒⇒■のようにマーク）
1	2進数の加減乗算と相互変換I Addition, Subtraction, and Multiplication among Binary numbers, and Conversion(part1)	「2 進数の考え方」を学習し，2 進数の加減乗算を学習する. 1) understand the basics of binary numbers 2) apply arithmetic operations to binary numbers	1) p1（最後 5 行除く）、p2 の Fig.1-1,Fig1-2 2) p170(最後 3 行と Fig.8-2 除く), p175(8-3 の第 1 段落 9 行と Fig.8-9, 8-10 のみ)	□1.1, □1.2, □1.3, □1.4, □1.5 □8.1, □8.2, □8.15 p14, □1.31, □1.32, □1.34, □1.35, □1.36, □1.37 p198, □8.59, □8.67

図１　授業計画表の例（第 1 週の例）

験でトランジスタの英文データシートを読んだり，３年生の計算機工学でマイコンの英文インストラクションを読むのにも役立てることが出来る.

2.2. 英文教科書の選定

英文教科書は，(1)米国をはじめ世界で幅広く読まれていること，(2)出来るだけ予備知識を前提とせずに基礎から詳しく解説されていること，(3)重要なポイントは図や表を効果的に用いた直感的な把握が可能であること，(4)解答付きで自習可能な演習問題が豊富であること，(5)価格が手頃であることの 5 条件を満たすものとして，米国 McGraw-Hill 社 Schaum's Outline シリーズの“Digital Principles, 3rd edition”（US$18.95）を選定した．特に条件(3)としたポイントの図解は，後に述べる要点プリントでも活かすために重視した．また，自習可能な演習問題が豊富であることの重要性は教科によらないことであるが，特に英語での学習となる本教科においては，長文の読解に苦手意識を持つ学生であっても取り組みやすい演習問題の豊富さも重視した．選定した教科書はほとんどのページで半分近く図や表を用いた説明がなされており，また演習問題も 350 ページの教科書に 700 問以上が掲載されており本実践研究の目的に適するものと判断した.

2.3. 授業準備

本実践実験（授業）の開始にあたり，下記のマテリアルを日本語で準備し学生に配布することとしたので，その狙いと内容について説明する.

[1] 授業計画表

学生が予め毎週の授業で学ぶべきトピックと，それらが説明されている教科書のページを確認して予習が出来ること，さらに対応する演習問題を明確化することで復習が出来ることを狙いとして，シラバスの授業計画を発展させた内容とした．図 1 に示すように，シラバスに定めた学習テーマ(Theme)を英語で提供するだけでなく，学習目標(Objectives)は可能な限り細分化したトピックとして記載し，各トピックには第 1 週(Week1)で学ぶ 1),2)から第 30 週(Week30)で学ぶ 41),42)までの連番を付与し，それらに対応した教科書のページ (Text book assignment) と演習問題 (Problem assignment)を明示した.

[2] 新出英単語一覧表

英語学習のみを目的とした読解では辞書を引く手間を惜しんではならないが，本授業では技術内容を説明し理解するためのツールとして英語を用いることによる英語学習とのシナジー効果は狙いとするものの，第一目的は専門知識の取得であり，少しでも少ない負担で英文を読み進められるように各週毎の新出英単語を一覧表として提供した．図２に示すように，各週毎にページ，セッション別に新出英単語の和訳および必要に応じて技術的なコメントを記載した．英単語は全ての専門用語を網羅しただけでなく，digital⇒デジタル，bit⇒ビットのように外来語として日常広く使われている単語や，mean⇒意味する，add⇒加える，足す，のような中学レベルの英単語も可能な限り記載し，英文を独力で読み進む負担を減らすことを狙いとした.

Week number	page	session	words	translation
week1	p1	1-1	digital	デジタル
			principles	原理、原則、本質
			decimal	10進の
			characteristic	特性、特質、特徴
			consider	考える、考慮する
			mean	意味する
			add	加える、足す
			base	基、ベース
			refer	参照する
			radix	基、=base(ベース)
			term	用語
			binary	2進の
			extensively	広く
			hexadecimal	16進の
			mention	言う、言及する
			octal	8進の
			represent	表す、意味する
			digit	桁
			count	数える
		1-2	commonly	一般に、通常
			bit	ビット
			illustrate	図示する
			equivalent	等価なもの

図２　新出英単語一覧表の例（第 1 週の例）

[3] 要点プリント

英文教科書で図や表を用いて説明された要点ポイントを日本語で解説したプリントを作成し，毎週の授業後に配布した．このプリントの狙いの一つは英語が苦

手で予習も不足し，授業中の説明だけでは十分な理解が得られなかった学生が復習しやすいようにと言うものであるが，国際技術者として専門技術を英語で身につけるという専門技術習得面の目的だけでなく，英語学習とのシナジー効果を強化するためには，専門技術内容を英語と日本語の両方で理解することによる互いのフック効果も重要と考えて準備したものである．

2.4. 授業の形式

授業は上記の[1]授業計画表と[2]新出英単語一覧表を期初に配布し，毎週の予習を促した上で実施した．具体的には毎週の授業では教員が教科書の英文を一文一文，構文と主要な英単語の意味を解説しながら読み進み，黒板に図や表や式を記載しながら日本語で専門技術内容を解説した．主要な演習問題は問題文の英文を本文同様に構文と主要な英単語の意味を解説した後に各自で取り組み，解答の解説も行った．[3]要点プリントは，出来るだけ日本語に頼らず教科書の英文を読み進む姿勢を養うため，原則として毎週の授業を終えたトピックのものを配布した．

2.5. 外部刺激の活用

本授業を通じて全ての学生が国際技術者に必要とされるデジタル回路の基礎を英語で身につけられるように前記のマテリアルも含め授業準備には万全を期したが，如何に専門学習と英語学習のシナジーを活かした学習が効果的であることを述べても学生にとっては負担増であり，モチベーションを向上させるためには実際の企業社会での海外技術者との協働の中でデジタル回路技術がどのように英語で語られるかを授業の中で紹介することを心がけた他，より直接的な英語での協働体験を外部刺激として提供することを目的に，2011 年 7 月 8 日の第 12 週の授業を外務省 JENESYS (Japan-East Asia Network of Exchange for Students and Youths)プログラム[(2)]で来校したインドネシア理系高校生との協働授業とした[(3)]．本校学生には第 12 週授業時のみ予め要点プリント配布し，日本語でも予習を行った上で，当日の授業は全て英語で行い，演習問題もインドネシア理系高校生と本校電気工学科２年生がペアを組んで協働で取り組み，解答も黒板を使ってペアで英語で説明した．昼食もペアでディスカッションを続けながら取ることで海外協働体験を外部刺激としたモチベーション向上に役立てることを狙いとした．

3. 実践実験結果

3.1. 授業要素の有用性・有効性評価

教科書や前記の授業準備として作成したマテリアルも含め本教科に係る各授業要素の有用性・有効性を評価する目的で，前期定期試験後の 2011 年 10 月に電気工学科２年生全員を対象にアンケート調査を行った．各要素に対して 5 段階のリッカートスケール（大変に役に立ったを 5，普通を 3，無価値を 1）で回答を得た平均スコアを図３に示す．

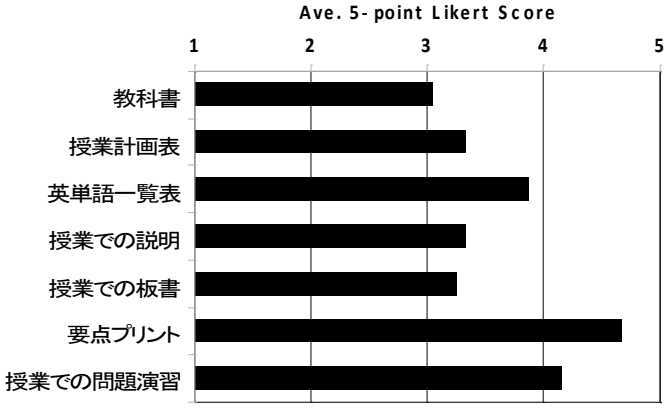


図３　各授業要素の有用性・有効性アンケート結果

教科書そのものの価値（有用性・有効性）はほぼ普通との評価である一方，各自の予習に役立つ授業計画表，さらに教科書を読み進むのに役立つ英単語一覧表は価値が高いと受け止められており，実際に予習や復習に役立てている様子が伺われた．授業での板書や説明は理解を深めてもらうために毎回しっかりと行っているが，評価としてはやや価値がある程度に留まっており，英文教科書の説明としては必ずしも十分と受け止められていない様子が伺われた．他方，毎回の授業後に配布した日本語で重要トピックを解説した要点プリントは大変に価値が高いとの評価であり，授業中は英文教科書を読み進むものの，復習は日本語の解説で確認したいと考える学生がほとんどである実態が表れている．また授業での問題演習は，問題文も解答解説も英語であるが有用であるとの評価であった．

3.2. 授業進行・外部刺激に伴うモチベーション変化

本授業開始前の 2011 年 3 月から，4 月の授業開始後の授業進行に伴う本教科の学習に対するモチベーションと英語学習に対するモチベーション変化を評価する目的で，電気工学科２年生全員を対象にアンケート調査を行った．5 段階のリッカートスケール（大変モチベーションが高いを 5，どちらとも言えないを 3，大変モチベーションが低いを 1）で回答を得た平均スコアを図４に示す．

本教科の学習に対するモチベーションは，授業開始前は平均スコアで 3 を下回っており否定的回答の方が多かったことを表している．これが授業開始後に向上しているのは，前述のように実際の企業社会での海外技術者との協働の中でデジタル回路技術がどのように英語で語られるかを授業の中で紹介したことと，加えて専門技術を英語で学ぶメリットや英語学習と併せたトータルのシナジー効果を強調したためと考えられる．さらに中間試験後に若干向上しているが，これは英文教科書であっても問題演習を通じて十分に問題解答力

がついていることを中間試験で実感できたことも寄与しているものと考えられる．

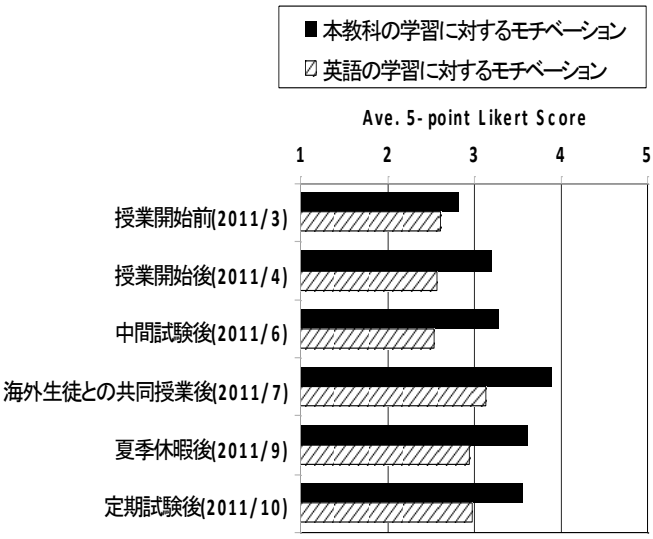


図４　本授業開始後のモチベーションの変化

特筆すべきは外部刺激として 2011 年 7 月 8 日の第 12 週の授業を海外理系高校生との協働授業とした後であり，顕著なモチベーションの向上が平均スコアの上昇として認められた．夏季休暇後，前期定期試験後は顕著な向上の反動で若干の低下が認められるが，前期定期試験後も中間試験後以上の高いモチベーションが維持できており，トータルとして本授業の進行により学生のモチベーションを高められていることが確認できた．

併せて，英語そのものの学習に対するモチベーションも同様にアンケートで評価した．英語そのものの学習については本授業開始後も開始前と大きな変化は見られず，中間試験後までは 2.5～2.6 程度とモチベーションが低いことがわかる．これは全国の高専で高専学生の英語力が普通高校生や大学生と比較して劣ることが報告されている[(4)]ことと整合するが，特筆すべきは英語そのものの学習に対するモチベーションも海外理系高校生との協働授業後に向上が認められ，前期定期試験後もほぼニュートラルを維持できており，海外理系高校生との協働授業も含めトータルとして本授業の進行により学生の英語学習に対するモチベーションも高められていることが確認できた．

3.3. 本教科学習モチベーションと成績の関係

本教科の学習に対するモチベーションと成績との関係を調べるため，前期定期試験後の本教科の学習に対するモチベーションとして前記リッカートスコアで３，４，５と回答した学生の本教科および英語成績の平均点を図５に示す．リッカートスコアで２，１とした学生は 3 名，2 名と少なかったため除外した．

本教科の学習に対するモチベーションが高い学生ほど本教科成績が高い相関性が認められ，モチベーションが高いが故に良い成績が得られるのか，良い成績を得た達成感がモチベーションに繋がっているのかは定かではないが，前記の学部刺激による顕著なモチベーション向上と併せて，成績という自己達成感もモチベーション向上と密接に係わっているものと考えられる．

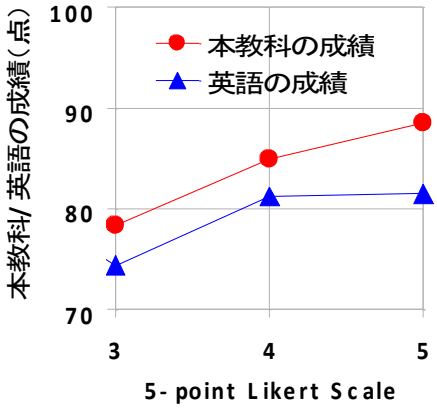


図５　本教科学習モチベーションと成績の関係

一方，英語の成績に関しては，リッカートスケールで４とした学生と５とした学生でほとんど差が無く，必ずしも英語成績の良いものが本教科学習のモチベーションが高くなる相関は顕著では無いものと考えられる．

4. まとめ

若年からの専門教育と実験・実習のシナジーにより効果的な技術者教育を実現している高専において，英語による専門技術教育においても若年から取り組むことによる専門学習と英語学習のシナジーを活かして，次代を担う国際技術者教育を実現することを目的に，専門教科に英文教科書を導入する実践実験を行った．

学年は出来るだけ低学年から導入することによるシナジー効果の最大化と，専門知識･英語力両面での最低限の準備面を鑑み 2 年生での導入とし，教科は身近に興味を持ちやすく他の専門教科や実験･実習でも応用機会が多いデジタル回路の基礎を学ぶ論理回路工学とした．

英語に苦手意識を持つ学生であっても予習･復習が行いやすく，問題演習を通じて問題解答力を身につけられるように図解や解答付き演習問題の豊富な英文教科書を選定しただけでなく，独自の学習支援教材として，[1]授業計画表，[2]新出英単語一覧表，[3]要点プリントを作成した．アンケート結果からは授業計画表，新出英単語一覧表を利用して予習復習が行われている様子が伺われ，特に要点プリントを用いて日本語の解説で復習を行うことの有用性が明確化された．また授業の進行とともに本教科の学習に対するモチベーションが向上し，特に海外理系高校生との協働授業後に顕

著な向上が認められた．学習モチベーションの向上には良い成績を得ることによる自己達成感も重要な役割を果たしていることが伺われたが，海外理系高校生との協働等の外部刺激も顕著な役割を担うことが確認できた．

本実践実験で取り組んだ 2011 年度前期の本教科の成績を昨年度（2010 年度）日本語の教科書[(5)]を用いた授業での前期成績と比べると，シラバス内容も試験問題のレベルも全く同じ条件であるにもかかわらず，昨年度がクラス全体の全教科平均 72.1 点に対して本教科の平均 75.1 点（欠点 5 名），本年度が全教科平均 75.9 点に対して本教科の平均 83.6 点（欠点 2 名）であり大幅な向上が認められた．対象クラスが異なり全教科平均も 4 点近く高くなっているため，平均点の比較のみで本年度の取り組みが優れていると断定出来るものではないが，英文教科書を用いているにもかかわらず欠点学生数が減っていることは，海外学生との協働を通じた外部刺激によるモチベーション向上と，要点プリント等により英語に苦手意識を持つ学生にも配慮した今回の授業準備が有効であることを示唆する結果と考えられる．

また，11 月に実施された 2011 年度秋期工業英検 4 級試験においては，本授業実施クラスから受験した 7 名全員が合格し，英語学習に対するモチベーション向上にも効果があらわれているものと考えられる．

参考文献

(1) 天日三知夫,アナスタシア･ライニアソン，向井守，山田弘文:「外国人専門科目教員による専門科目授業の取り組み」，平成 23 年度全国高専教育フォーラム教育研究活動発表概要集, pp.33-34, 2011

(2) 外務省「21 世紀東アジア青少年大交流計画（英文名: JENESYS Program）」web 情報， http://www.mofa.go.jp/mofaj/area/china/jc_koryu21/sdk_keikaku.html

(3) 神戸高専国際交流委員会 web 情報, http://www.kobe-kosen.ac.jp/kokusai/archive/2011jenesys/index.html#110708digital

(4) 高橋愛，天知和人，国重徹: 「徳山高専における英語教育改革－英語力向上タスクフォース II の取り組みと効果」，平成 23 年度全国高専教育フォーラム教育研究活動発表概要集, pp.207-208, 2011

(5) 堀桂太郎:「デジタル電子回路の基礎」，東京電機大学出版局, ISBN4-501-32300-0, 2003

簡単に始められる大気圧低温プラズマジェットの実験

赤松浩*　金田知大**　市川和典***

An Atmospheric Pressure, Low Temperature Plasma Jet for Laboratory Work

Hiroshi AKAMATSU*　Tomohiro KANEDA**　Kazunori ICHIKAWA***

ABSTRACT

An atmospheric pressure plasma jet device has developed experimentally. The device was consisted of a jet nozzle, high voltage power supply, and helium gas supply system. The high voltage power supply was a cool cathode fluorescent lamp inverter driven by dry cells. A plasma jet generated by the device had hydroxyl radical OH, which was dissociated from H_2O molecules. Irradiation of the plasma on an acrylic acid, aluminum, and highly crystalline graphite has resulted in an enhancement of wettability. In addition the plasma has carried out a decomposition of methylene blue in a solution. The density of methylene blue was reduced from 3 mg/ℓ to 0.15 mg/ℓ with the irradiation of the plasma of 30 min.

Keywords : atmospheric pressure plasma jet, cool cathode fluorescent lamp inverter, helium, wettability

1. はじめに

身近なプラズマと聞くと，蛍光灯やプラズマディスプレイパネルが連想される．これらのプラズマは，低気圧プラズマ，低温プラズマ，あるいは弱電離プラズマに分類される．低気圧プラズマの実験を行うには，真空容器，真空ポンプ，および真空計測器具などの設備が必要となる．これらの機器は一般的に高価であるため，実験をスタートするにはまとまった予算が必要になる．

いっぽう，大気圧で生成できるプラズマは，高気圧プラズマあるいは熱プラズマと呼ばれる．大気圧下では粒子密度が非常に高いことから，電子，イオン，および中性粒子間の相互衝突が盛んになり，プラズマの温度が高温になることが知られている．高気圧プラズマの実験には，真空関連機器が不要であるためコストや機器の設置面積を削減できる．

さて近年では，“大気圧”で生成できる“低温プラズマ”という一見矛盾するようなプラズマ応用の研究が盛んである．この種のプラズマは，大気圧下にてパルス放電を行うことで電子のみが高温となり，イオンおよび中性粒子は低温のままであることが特徴である．電子温度が高いため化学反応性が高く，材料表面の有機汚れ除去や医療器具の滅菌への応用が研究されている．たいていはヘリウムやアルゴンなどの希ガスに誘電体バリア放電を施すことにより，大気圧低温プラズマを発生することが多い．

2005 年にドイツの M.Teschke は，石英管を誘電体に使用しヘリウムガスを導入した大気圧バリア放電により，低温プラズマジェットが生成できることを報告した[(1)]．この報告の後，国内外を問わず大気圧低温プラズマジェットの応用研究が活発化した[(2)-(5)]．大気圧低温プラズマジェットの特徴は，大気圧で生成できるため高価な真空設備が不要であることに加え，プラズマ流が低温であるため照射対象物に熱負荷を与えないことが挙げられる．これにより，液中滅菌や人体の消毒への利用も可能となる．

筆者らは，低温プラズマの実験を可能な限り簡単に開始することを目的として大気圧低温プラズマジェットデバイスの作製を行った．真空設備が不要であることでコストを大幅に削減できているが，プラズマを点けるための高電圧電源は必須である．我々は，乾電池を利用した高電圧電源を使用して大気圧低温プラズマジェットを発生することに成功し，電源の準備に要する費用も削減することができた．

本報告では，筆者らが作製した大気圧低温プラズマジェットデバイスの作例と，このデバイスを用いて行った実験をいくつか紹介する．

2. プラズマジェットデバイスの準備

大気圧プラズマジェットデバイスを作製するにあたり，準備するものはおよそ(1)プラズマジェットノズル，(2)高電圧電源，および(3)原料ガス(配管も含む)である．筆者らが使用したものを以下に説明する．

2.1 **プラズマジェットノズル**　筆者らは，国内外で広く研究されている誘電体バリア放電方式の大気圧プラズマジェットノズルを作製した[(6),(7)]．図 1 に，大気圧プラズマジェットノズルの概略を示す．石英管は内径および肉厚が小さいものを選定し，投入電力を小さくした．本研究では，株式会社藤原製作所(http://www.fujiwara-sc.co.jp/index.html)の石英管#1 を使用した．内径および肉厚はそれぞれ 1.5 mm および 0.6 mm である．

*　電気工学科 准教授
**　専攻科 電気電子工学専攻
***　電気工学科 講師

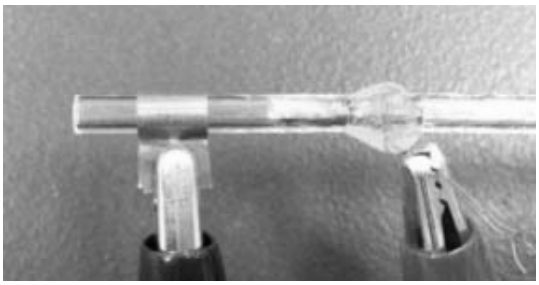


図 1　大気圧プラズマジェットのノズル構造

原料ガスにエネルギーを付与する電極は，石英管内部に導入した．これは，電源からのエネルギーを原料ガスに直接供給するためである．接地電極は，銅製シートを石英管の外側に円筒状に巻きつけた．接地電極の幅は 5 mm である．石英管は，両電極の短絡を防ぐ誘電体バリアとして作用する．なお，高電圧電源の出力電圧に余裕がある場合は，国内外の他の研究に見られるように高電圧電極および接地電極の双方を石英管の外側に巻きつけてもプラズマを生成することができる．

2.2　**高電圧電源**　大気圧プラズマの実験を始めるに当たり，準備にもっとも苦心するものが高電圧電源であろう．国内外の研究では，大気圧プラズマジェットの発生に電圧 10 kV および周波数 10 kHz の低周波高電圧電源を使用している．しかしながら，これらの電源は高価であり簡単に準備するには敷居が高い．また，大気圧プラズマジェットデバイスを災害現場などで使用することを想定すると，固定電源ではなく持ち運び可能な電源であることが望ましい．そこで筆者らは，簡単な素子で構成できる乾電池方式の高電圧モジュレータを選択した．

図 2 に，本研究で使用した高電圧モジュレータを示す．これは冷陰極管を点灯させるための小型インバータである．共振トランスとコンデンサの共振現象を利用し，乾電池からの直流 12 V を交流高電圧に変換するものである．部品点数が少ないので自作が可能であるが，筆者らは秋月電子通商(http://akizukidenshi.com/catalog/default.aspx)にて完成品を購入した．価格は 700 円であった．しかしながら，2011 年 10 月現在，販売リストにあがっているものは若干仕様が変更になっている．また，検索エンジンで“冷陰極管インバータ”と検索すれば，他の候補がいくつかヒットする．

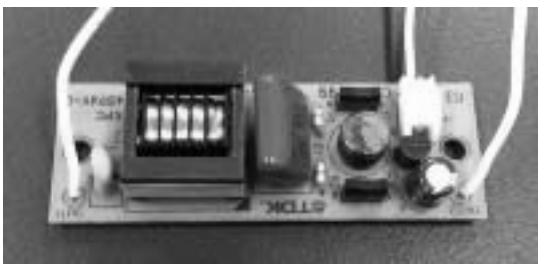


図 2　冷陰極管インバーター基板

2.3　**原料ガスおよび配管**　低電力で大気圧グロー放電を安定に発生するには，希ガスを使用するほか手立てはない．代表的なプラズマ原料ガスとして，ヘリウムおよびアルゴンが挙げられる．本実験装置では，乾電池電源であるためプラズマへの大きな電力の投入は期待できない．したがって，多少高価であっても安定にプラズマを生成できるガスを選ぶ必要がある．

ヘリウムは，電離電圧が 24.5 eV および直下の準安定電圧が 20.6 eV である[8]．いっぽう，アルゴンは電離電圧 15.8 eV および準安定電圧 11.5 eV である．電離電圧のみを比較すればアルゴンの方が低い値であるが，電離電圧と準安定電圧の差はアルゴンが 4.3 eV であるのに対しヘリウムは 3.9 eV である．つまり，いったんプラズマが点火しさえすれば，ヘリウムの方が小さいエネルギーの付与で電離状態を維持することが可能である．そこで本実験装置では，ヘリウムガスを使用することにした．

ガスボンベからプラズマジェットノズルまでの配管には，ビニールチューブを使用した．

3.　大気圧低温プラズマジェットデバイスの評価方法

本実験で作製した大気圧低温プラズマジェットの性能を評価した．以下に評価方法を示す．

3.1　**電気的特性の評価**　電極への印加電圧および電流は，図 3 に示す回路で計測した．電極への印加電圧 V_1 は，抵抗 R_1=100 MΩおよび R_2=100 kΩにより 1 /1000 に抵抗分圧してオシロスコープ(DS-5104，IWATSU)で記録した．また，電流は抵抗 R_3=100 Ωにおける電圧降下 V_2 から得た．

プラズマへの投入電力は，*V-Q* リサジュー図形から概算した．*V-Q* リサジュー図を得る場合，図 3 の R_3 をキャパシターC_L に置き換えた．C_L は主放電ギャップと直列に接続されている．そのため，C_L の電荷が主放電ギャップ間の移動電荷に一致する．なお，C_L は主放電ギャップの等価静電容量よりも十分大きい値のものを使用することが条件である．

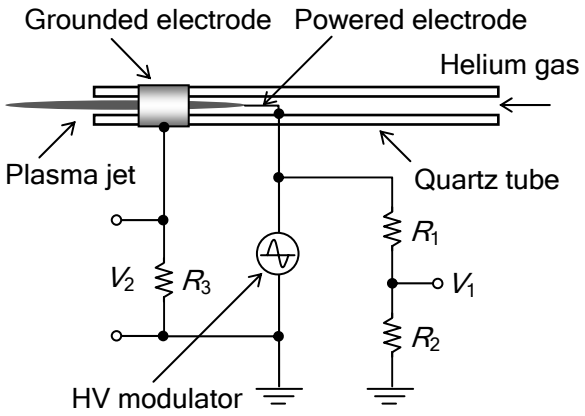


図 3　大気圧プラズマジェットデバイスの電気回路

3.2 **光学的特性の評価**　プラズマの発光からは，プラズマ中の活性種の情報を得ることができる．本実験では，USB で PC と接続できる小型のファイバマルチチャンネル分光計(USB2000，Ocean Optics)を使用した．なお，検出用の光ファイバーは，図 4 のようにいくつかの位置に設置し，各部における活性種の量を評価した．

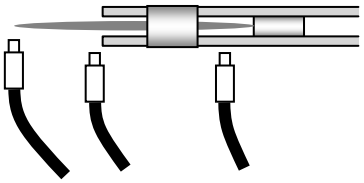


図 4 発光プロファイルの計測の概略

3.3 **固体表面への照射効果**　大気圧プラズマの固体への照射効果では，固体表面上の有機物の分解および親水基の生成が考えられる．本実験では固体材料としてアルミニウム，アクリル，および高結晶性グラファイト(サーモグラフィティクス)へプラズマを照射した．各試料へのプラズマ照射は，図 5 に示すように試料を 1 mm/s でスライドさせて全面が均一に処理されるようにした．

アルミニウムおよびアクリルについては，水滴の接触角度を計測することで親水化の有無を評価した．また，高結晶性グラファイトは X 線光電子分光法(X-Ray Photoelectron Spectroscopy: XPS)による分析により，表面の官能基の評価を行った．

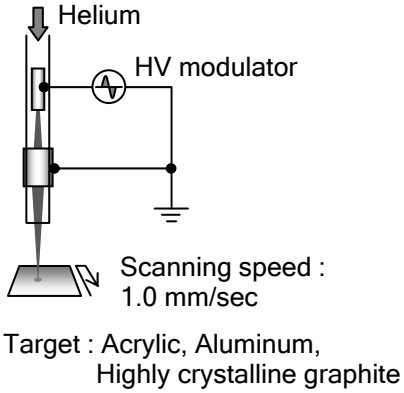


図 5　固体表面へのプラズマ照射実験の概略

3.4 **液体への照射効果**　大気圧低温プラズマは，指で触れられるほど低温であることが特徴である．この特徴を利用すれば，液体への直接照射も可能である．本実験装置では，水溶性有機物であるメチレンブルーの水溶液にプラズマを照射し，青色を呈するメチレンブルーが透明に変化するか否かを評価した．

図 6 に，メチレンブルー分解実験の概略を示す．10 mm×10 mm×50 mm の標準ガラスセルにメチレンブルー水溶液試料を 40 mm まで貯めた．メチレンブルー水溶液の初期濃度は 3 mg/ℓとした．プラズマジェットノズルは，ガラスセルのトップから 5 mm の位置に設置した．水溶液試料の脱色の評価は吸光光度法で行った．同図に示すように，ガラスセルに強度 I_0 の可視光を入射させると，メチレンブルーによって光の吸収が行われ，強度 I の光が通過する．ランベルトーベールの法則から，水溶液の吸光度 A は次式で表わされる[9]．

$$A = \log_{10}\frac{I_0}{I} = \varepsilon c L \quad (1)$$

ここで，εはモル吸光係数，c は水溶液の濃度，および L は光路長 10 mm である．式(1)から，水溶液濃度と吸光度は比例関係が成立している．したがって，吸光度を計測することで水溶液試料の濃度を評価することが可能である．

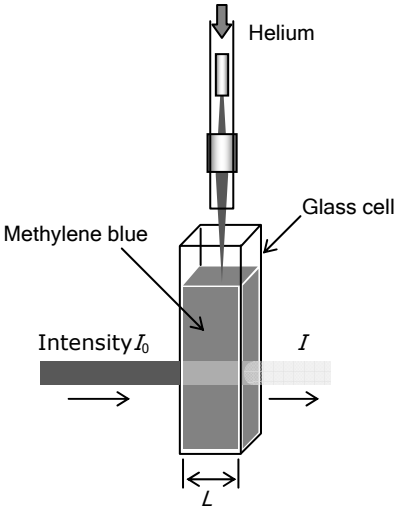


図 6　液体へのプラズマ照射実験の概略

吸光光度法に使用される可視光源は，マルチカラー LED を用いた電子工作で簡単に作製した．メチレンブルーは，赤色の光を吸収する特性があるため，波長 600 nm から 650 nm 付近の吸光度の変化に注目すればよい．

4. 実験結果

本実験で作製したプラズマジェットの電気的および光学的特性を評価し，固体および液体への照射実験を行った結果を以下に示す．

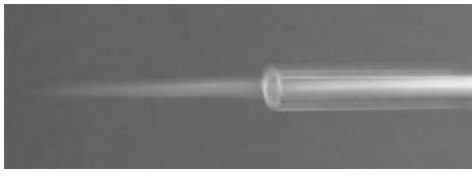


図 7　大気圧プラズマジェットの様子

4.1 **プラズマジェットの発生**　本デバイスで発生させたプラズマジェットの様子を図 7 に示す．同図のように，12 V の入力電圧を用いたものであるにもかかわらず，ノズルから大気中にプラズマ流が噴き出していることがわかる．なお，この写真では定常的にプラズマが生成されているように見えるが，実際はプラズマの塊が

弾丸のように連続的に射出される形でプラズマが生成されているようである[1].

4.2 放電時の電圧･電流波形　図 8 に，プラズマ生成時の電極電圧および電流の代表的な波形を示す．直流 12 V の入力電圧に対して，振幅 600 V および周波数 29 kHz の低周波交流電圧が電極に印加されていることがわかる．電流波形は，電圧の極性によって値が異なっていることがわかる. 正極性時の電流は 5 mA であり，負極性の電流は 1 mA である．

この違いは，石英管内での放電形態がコロナ放電であることに起因する．正針コロナは，コロナ開始電圧が高いもののコロナが進展しやすいために電流値は大きい．いっぽう，負針コロナは，コロナ開始電圧は低いがコロナが進展しにくいため電流値は小さくなる．

また，プラズマは電流が流れている期間に生成されていると考えられるため, 4.1 で説明したとおりプラズマは弾丸のように射出されていることになる．

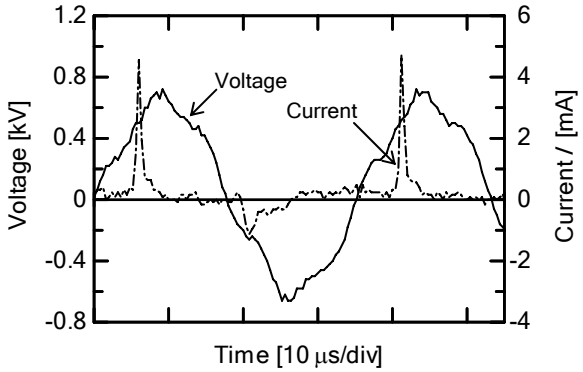


図 8　電圧および電流の時間変化

4.3 プラズマへの投入エネルギー　プラズマへ投入されているエネルギーおよび電力を *V-Q* リサジュー図形から概算した．図 9 に，本デバイスにおける代表的な *V-Q* リサジュー図形を示す．なお，内部高電圧電極には円筒電極を使用している．一般的な誘電体バリア放電の *V-Q* リサジュー図形は平行四辺形を示すことが知られているが[10]，本実験でのものは電圧の両端でひずみが見られる．

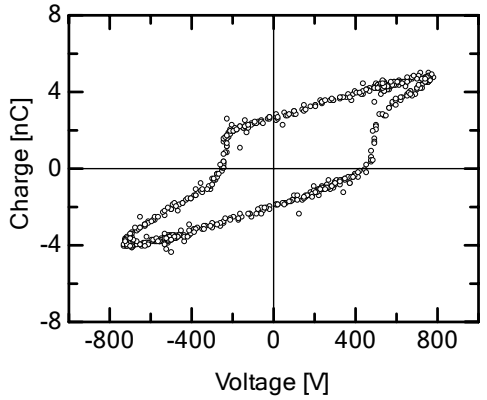


図 9　*V-Q* リサジュー図

V-Q リサジュー図形が囲む図形の面積は，電圧 1 サイクルあたりにプラズマへ投入されたエネルギーに相当する．同図からエネルギーを概算すると，4 μJ となった．これに電圧の周波数を掛け算すると，プラズマへの投入電力は 0.12 W となった．

さらに，*V-Q* リサジュー図形からは，放電電極間の等価静電容量を概算することができる．*V-Q* リサジュー図形を平行四辺形と見立てたとき，二種類の辺のうち傾きが大きい勾配 $dQ/dV=C_d$ は誘電体部分の等価容量を示す．図 9 から見積もると，C_d=27 pF となった．また，他方の勾配 $dQ/dV=C$ は誘電部および放電ギャップを含めた直流合成容量を表す．同図から C=0.9 pF と概算されたので，放電ギャップの等価静電容量は C_g=0.93 pF と見積もられた．

4.4 プラズマ中の化学的活性種　プラズマの発光スペクトルを計測することで，プラズマ内に含まれる化学的活性種を同定した．内部高電圧電極は円筒電極を使用した．図 10 に，それぞれ(a)電極間，(b)ノズル先端，および(c)ジェット先端において計測した OES スペクトルを示す．同図(a)から，放電電極間では，原料ガスであるヘリウムの励起種 He*による発光に加え, λ=308 nm 付近に水酸基ラジカル OH による強い発光が見られる．

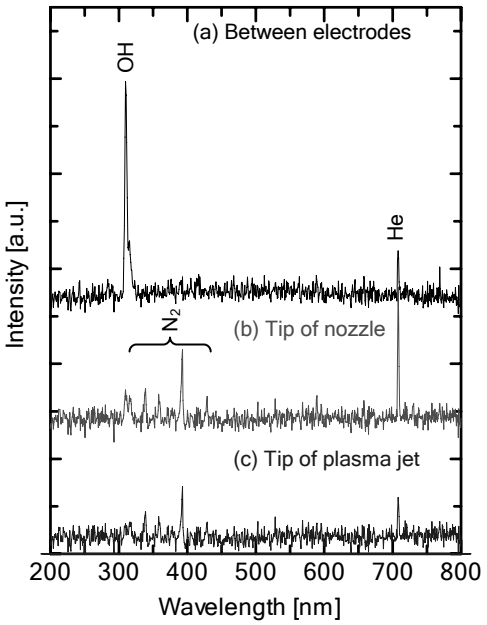


図 10　プラズマジェットの発光プロファイル

電極間で生成されている OH ラジカルは，ガスチューブ内に吸着した水分が高エネルギー電子によって分解されたものと考えられる．水分子 H_2O が OH と H に分解されるには，5.1 eV のエネルギーが必要である．一般に，大気圧プラズマジェット中の電子は 10 eV 前後のエネルギーをもっていることが知られている．このエネルギーは，水分子を OH ラジカルに分解するには十分の値である．

同図(b)および(c)では，OH ラジカルおよび He*のほかに窒素分子 N_2 および窒素分子イオン N_2^+の発光も確

認できる．窒素分子はガスチューブおよび石英管内にはほとんど存在していないと考えられるため，この窒素はノズル外の空気中の窒素分子が起源である．大気中において OH ラジカルが検出されているため，本プラズマジェットデバイスを用いた固体および液体への照射実験が行える．

4.5 **固体表面の親水化処理**　固体表面改質の実験結果として，図 11 にプラズマを(a)未照射および(b)照射したアクリル表面上の水滴の様子を示す．同図から，プラズマ未照射での水滴の接触角度は 49° であるのに対し，プラズマを照射した表面の接触角度は 20° と概算できた．

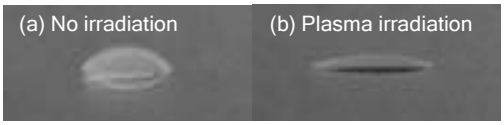


図 11　アクリル板の水滴の観察

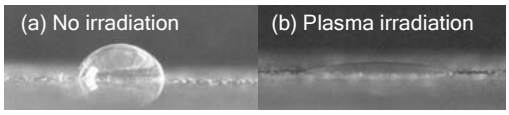


図 12　アルミニウム板の水滴の観察

同様に, 図 12 にはアルミニウム板へのプラズマ照射による水滴の様子を示す．同図(a)から，プラズマ未照射の水滴の接触角度は 75° である．また同図(b)において, プラズマ処理した水滴の接触角度は 16° であった．アクリルおよびアルミニウム表面の親水化は，表面の有機汚れがプラズマ中の OH ラジカルによって分解されたことが原因であると考えられる．

プラズマ照射による材料表面の親水化の原因を詳細に調べるため，高結晶グラファイト試料については XPS による分析を行った．図 13 に，高結晶性グラファイトの XPS プロファイルを示す．同図から，プラズマの照射によって O_{1s} ピークが著しく増大し，C_{1s} ピークが若干減少していることがわかる．詳細な分析の結果，284.6 eV の C_{1s} ピークは, C-C, C-O, C=O および O=C-O による結合で構成されている．

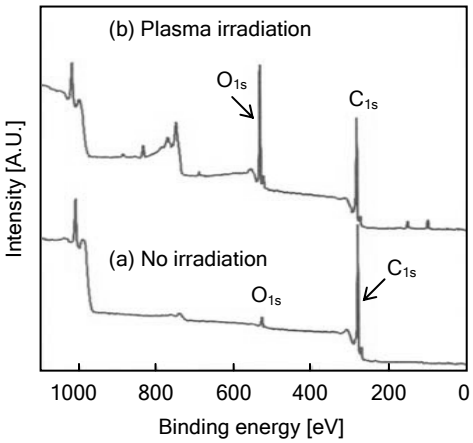


図 13　アルミニウム板の水滴の観察

表 1 に，プラズマ未照射および照射試料における各結合の割合を示す．この結果から，プラズマ照射によって炭素間の結合が減少していることから有機汚れが減少したことがわかる．また，酸素由来の官能基が増加していることもわかる．これらは親水性を示す官能基であるため，照射試料の親水性が増大したことを裏付けている．

表 1 高結晶性グラファイトの官能基の比率

Specimen	C_{1s} [%]			
	C-C	C-O	C=O	O=C-O
No irradiation	74.8	13.9	8.3	3.1
Plasma irradiation	69.4	15.8	11.2	3.6

4.6 **液中有機物の分解効果**　プラズマジェットを用いた液体中の有機物メチレンブルーの分解を試みた．図 14 に, プラズマ照射した試料水溶液中の濃度の変化を示す．なお，濃度は吸光プロファイルから式(1)を用いて概算した．同図から，メチレンブルー濃度は時間とともに減少し，10 分後には初期濃度の半分となっていることがわかる．30 分のプラズマ照射によって，濃度は 0.15 mg/l となり，メチレンブルーを初期濃度の 1/20 まで分解できたことがわかる．

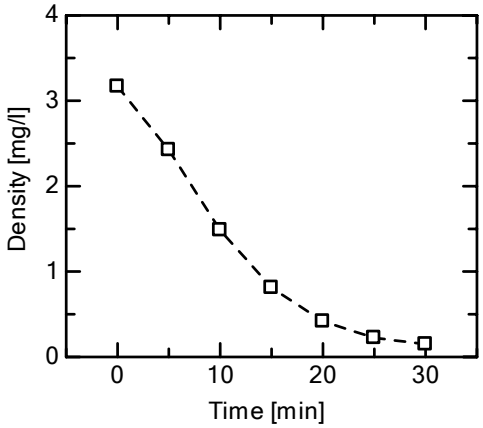


図 14　メチレンブルーの濃度の変化

5.　まとめ

本報告では簡単に始められるプラズマの実験を目指して，大気圧低温プラズマジェット装置の作例，性能評価, および実験を示した. 以下に, 結論をまとめる.

(1) 原料ガスとしてヘリウムを使用し, 乾電池 12 V を入力した冷陰極管インバータを用いて大気圧低温プラズマジェットを発生させることができた.
(2) プラズマは石英管を誘電体とした誘電体バリア放電で生成されているが，放電の起点は内部電極からのコロナ放電より生成されている.
(3) 放電中に電極間に投入されている電力は, *V*-*Q* リサジュー図形からの概算の結果 0.12 W である.
(4) 大気に噴き出しているプラズマの発光を分光器で計測すると，励起状態のヘリウム，水酸基ラジカ

ル，および励起された窒素分子が含まれていることがわかった．

(5) プラズマをアクリル板およびアルミニウム板に照射すると，水滴の接触角度が減少することから表面の親水性が向上したことがわかった．

(6) 高結晶性グラファイトにプラズマを照射した結果，表面には親水性を示す官能基が形成されていることがわかった．

(7) プラズマをメチレンブルー水溶液に 30 分間照射すると，メチレンブルーの濃度が 3 mg/ℓから 0.15 mg/ℓに減少した．

参考文献

(1) M. Teschke, J. Kedzierski, E. G. Finatu-Dinu, D. Korzec, and J. Engemann: “High-Speed Photographs of a Dielectric Barrier Atmospheric Pressure Plasma Jet”, IEEE Trans. Plasma Sci., **33**, pp. 310-311, 2005

(2) J. L. Walsh, J. J. Shi, and M. G. Kong: “Contrasting characteristics of pulsed and sinusoidal cold atmospheric plasma jets”, Appl. Phys. Lett., **88**, 171401, 2006

(3) XinPei Lu, ZhongHe Jiang, Qing Xiong, ZhiYuan Tang, XiWei Hu, and Yuan Pan: “An 11 cm long atmospheric pressure cold plasma plume for applications of plasma medicine”, Appl. Phys. Lett., **92**, 081502, 2008

(4) 桑畑周司，大山龍一郎：「大気圧プラズマジェットによる石英ガラス表面の超親水化」, 表面科学, **30-3**, pp. 174-179, 2009

(5) S. Ikawa, K. Kitano, and S. Hamaguchi: “Effect of pH on Bacterial Inactivation in Aqueous Solutions due to Low-Temperature Atmospheric Pressure Plasma Application”, Plasma Process. Polym., **7**, pp. 33-42, 2010

(6) H. Akamatsu and R. Kiriyama: “Development of Atmospheric Pressure Plasma Jet with Inexpensive and Compact High Voltage Modulator”, Frontier of Applied Plasma Technology, **2**, pp. 7-10, 2009

(7) 赤松浩：「コンパクト大気圧プラズマジェットの放電および分光評価」，プラズマ応用科学，**17-2**，pp. 91-96, 2009

(8) 林泉：電気・電子・情報・通信基礎コース高電圧プラズマ工学 (丸善 1994)

(9) 安岡康一，前原常弘，佐藤正之：「水中プラズマによる化学(有機)プロセス」，プラズマ・核融合学会誌， **84-10**, pp. 679-68, 2008

(10) 民田太一郎，岩田明彦，田中正明：「V-Q Lissajous 図形を用いた acPDP の放電計測」，電気学会論文誌 A, **118-4**, pp. 353-358, 1998

潜熱蓄熱器を有する熱電発電器の最適制御に関する研究

津吉　彰*　藤原 隆太郎**

Optimal control of the thermoelectric generator attached with PCM(phase changing material) accumulator

Akira TSUYOSHI　　Ryutaro FUJIWARA

ABSTRACT

The energy recovery system of unused thermal energy by using the thermoelectric generator was developed and experimentally evaluated. A thermoelectric generator can be applied for waste heat of an incinerator without a damage of thermal stress. Thermoelectric generating system has not been put to practical use yet because their cost, especially generating modules cost, is still high. In this paper a heat accumulator installed thermoelectric generating system for the batch operated incinerator was proposed and experimentally investigated.　Heat accumulator has the potential to reduce cost of thermoelectric generating system by reduction of a capacity of employed thermoelectric generating modules. However optimal control of the thermoelectric generator attached with an accumulator has not been developed yet. The MPPT (Maximum Power Point Tracking) control accelerates the drop in the heat medium temperature by Peltier effect so that it cannot supply maximum electricity from heat stored in the accumulator. We proposed alternative optimal control which electricity could be obtained from an accumulator more effectively than MPPT method.

Keywords：themoelectric generator, cost, incinerator, unused energy, accumulator

1. はじめに

かねてより、焼却炉などの 200[℃]前後の中温度域の未利用熱について熱電発電を適用することが提案されてきた(1)。中小規模の焼却炉などは焼却の目的が主に減量であり、バッチ処理による焼却処理を行っており、熱サイクル疲労の問題から小規模のスチームタービンを適用することは困難である。熱電発電装置はこのような施設にも適用可能である。しかし、熱電発電を構成する半導体熱電モジュールが今の所高価であり、焼却施設への導入の障害となっている。その解決策として筆者らは蓄熱器を導入することにより、発電器への熱入力を平滑化することにより、熱電発電装置に必要な熱電モジュール数を抑え、コスト低減することを提案した(2)。蓄熱器を利用した熱電発電の運転の場合、これまで太陽光発電などと同様一般的に使用される最大出力制御（Maximum Power Point Tracking, 以下 MPPT）法ではペルチェ効果による蓄熱エネルギーの損失増加により無制御に比べても総発電量が少なくなる場合があることが指摘されている(3)。そこで本研究ではペルチェ効果による損失を低減した最大効率制御とも呼べる制御法を提案し、その有効性を確認した。

2.　蓄熱器を有する熱電発電システムの意義

2.1 熱電発電器による廃熱利用発電　日本のゴミ処理施設では、一日の処理量が数百トン以上の大規模施設では既にスチームタービン発電を利用して廃熱回収が行われているが、中小規模の施設ではゴミ処理の効率化を図るため、大半が一日毎に運転停止を繰り返すバッチ処理と呼ばれる事業形態をとっており、スチームタービン発電が適応せず、廃棄物発電はほとんど実現されていない。そのような施設においても、熱源の温度変動に対して柔軟な適応性をもつ熱電発電器を適用した場合、熱電発電によるサーマル・リサイクルの実現が可能である。

そこで、本研究での対象熱源は、中小ごみ処理場で発生する焼却熱（廃熱源）とした。中小ごみ処理場では焼却作業時のみ、つまり一定時間に限って間欠的に廃熱は発生する。発生熱量すべてを熱電発電器で賄おうとすると、図 1 のように廃熱のピークに見合った熱電発電器の容量を確保する必要があり、イニシャルコストが大きくなる。

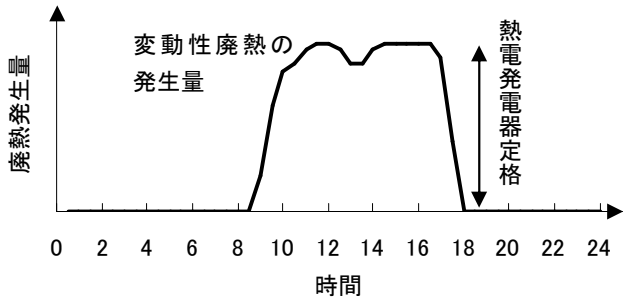


図 1　バッチ処理焼却炉の廃熱発生量の一日の変化と適用する熱電発電システムの定格熱入力

＊　電気工学科　教授
＊＊　専攻科　電気電子工学専攻

そこで、蓄熱器を利用することによって図 2 のように熱電発電器の定格の低減を図る。蓄熱器コストが熱電発電器コスト削減分より安価であればイニシャルコストの低減が可能となる。また、設備全体の稼働率の向上にもつながる。

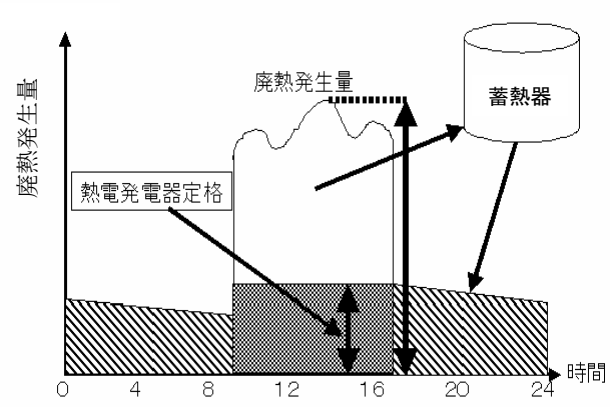


図 2　蓄熱器を併用した場合の廃熱発生量の一日の変化と適用する熱電発電システムの定格熱入力

2.2 顕熱蓄熱と潜熱蓄熱　物質に熱が流入すると物質の温度が上昇し、物質から熱を取り出すと物質の温度が低下する。このように物質の温度変化を伴って蓄熱を行うものが顕熱蓄熱である。温度が上昇する過程が蓄熱、低下する過程が放熱である。潜熱蓄熱というのは物質の相変化・相転移に伴う潜熱を利用して蓄熱を行うものである。蓄熱密度が大きい、一定温度付近での蓄・放熱が可能という特長をもっている。顕熱蓄熱と潜熱蓄熱を比較すると、図 3 に示すように、顕熱蓄熱の場合、熱を引き出すと時間とともに温度が低下する。熱電発電器の出力は熱源の温度差に比例するので、顕熱蓄熱では急激な出力低下が予想される。一方、潜熱蓄熱では相変化が行われている間、一定温度で蓄・放熱を行う。したがって、顕熱に比べ熱源の温度差の低下が小さく、熱電発電器と併用するのには潜熱蓄熱器の方が有利であると考えられる。本研究で提案するシステムには潜熱蓄熱器を利用することとした。

表 1　中温度域の潜熱蓄熱材の物性値 (4) (5)

材料	組成	融点（℃）	融解熱（kJ/kg）
Polyethylene	-	135	209
KOH-NaOH	50-50	170	231
Pentaerythritol	-	188	322
LiOH-NaOH	30-70	210	362
KOH-LiOH	71-29	227	273
$NaNO_2$-NaOH	27-73	239	279
$LiNO_3$	-	250	370
$NaNO_3$-NaOH	19-81	258	296
LiCl-LiOH	37-63	262	453
Na_2CO_3NaOH	7.2-92.8	283	324

蓄熱材選択に当たっては、表 1 の文献データの中から、相変化・相転移温度として、通常の試験が容易な 200[℃]以下のもので、単位体積当たりの潜熱量を考慮した。また経済性を追求するため、試薬ではなく、安価な工業原料が入手しやすい材料を検討した。これらの検討から、融点が 170[℃]の水酸化カリウム－水酸化ナトリウム共融塩を選定した。

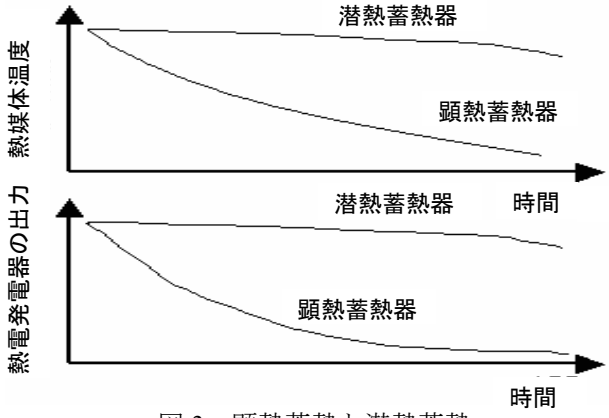


図 3　顕熱蓄熱と潜熱蓄熱

3. 熱電発電器の特性の実験的検証

水酸化カリウム－水酸化ナトリウム共融塩を潜熱蓄熱材として製作した蓄熱器を熱電発電器と接続した実験装置の構成を図 4 に示す。熱媒体加熱装置は電気ヒーターで廃熱を模擬しており、蓄熱材に蓄熱後、ヒーターの電源を切ることにより、蓄熱器に蓄えられた熱エネルギーによる発電という放熱モードで運転が可能となる。ここではまず、放熱モードの実験を行う前に熱電発電器の特性を確認するための実験を行った。図 5 に結果の一例として、高温側温度 250[℃]、低温側入口温度 25[℃]の場合を示す。熱電発電器は内部抵抗を有した電源として動作するため、理論的には V-I 特性は右下がりの直線、P-I 特性は、上に凸の放物線になるはずであるが、実験で確認した所、V-I 特性は途中から傾きがやや緩くなり、P-I 特性は若干ピークがブロードなカーブとなった。この原因は熱電発電器が微妙に特性や発電状態の異なる素子が多数直並列されているため、マッチング抵抗が 1 つの値に収束しないためであると推察される。

通常最大出力制御は、太陽電池の出力制御などでも一般的な山登り法により実現される。しかし、本研究で対象とするようなピークが明確でない P-I 特性を有する発電器の最大出力点を探索した場合、瞬時にピークを見つけることができず、広い範囲を探索する傾向が見られた。探索範囲を確認のため各温度条件における、最大出力点探索の範囲を、最大出力制御時に記録した。結果を図 6 に示す。本実験では、探索のパラメータとして、通常用いられる電流、電圧ではなく、抵抗値をパラメータとしている。ここで、抵抗値をパラメータとするのは、電圧、電流は基本的に温度差に比例して増加するため、制御幅となる電圧、電流を一定にすると制御幅の比率が温度低下と共に大きくなり、制御が不安定になる恐れがある。そこで、本実験では適正な制御幅が温度により変化しにくい抵抗値を採用している。下記に示すように放熱運転では、最大出力運転のための抵抗値は熱媒体油の温度低下と共に、減少していく事になるものの、電流値、電圧値の変化より緩やかな変化となっており、制御の安定性は高く、制御パラメータとして適している。

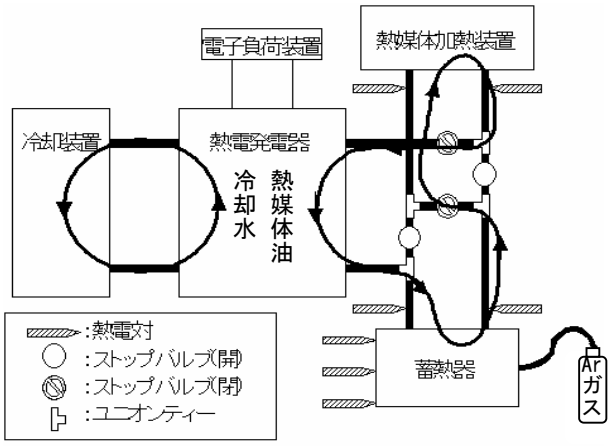


図 4　実験設備の接続図

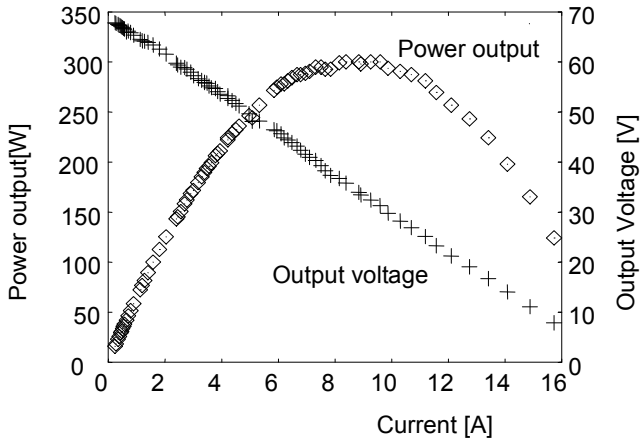


図 5　熱電発電器の V-I, P-I 特性

本発電器で使用しているビスマステルル系の熱電半導体の抵抗は、半導体でありながら金属的振る舞いを示し、温度上昇に伴い、抵抗率が増加する。したがって、熱源となる熱媒体油温度の上昇とともに最大出力点探索の抵抗値の中央値も 3.25[Ω]から 4.0[Ω]と増加していることが図 6 より確認された。

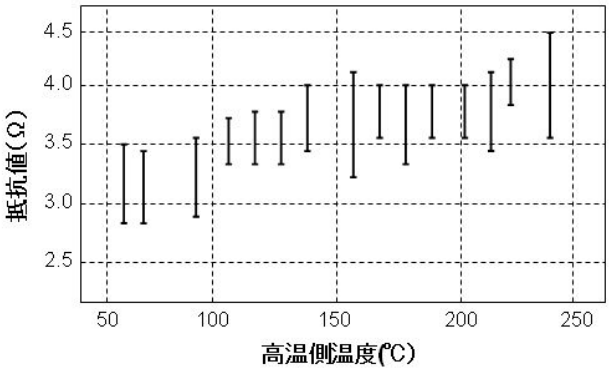


図 6　最大出力制御（MPPT）時の最大出力点探索範囲

4．蓄熱器を有した熱電発電器の最適制御

4.1 最適制御の提案　前章で示したとおり、熱電発電器の定常時の最大出力点を特定するため制御量（ここでは負荷抵抗値）の摂動幅は 20%程度であり、放熱運転モードなど定常時より最大出力点の追跡が困難な場面ではさらに、その範囲は広がると思われる。特に抵抗値が小さくなる方向へ運転点を移行した場合ペルチェ熱の影響により、伝熱量が大きくなるため、限られた蓄熱量からより急速に失われる恐れがあり、最大出力追従制御（MPPT）法では最大の電力を取り出すことは出来ないことがわかっている [(3)] 。

そこで、最大出力制御を改良して、蓄熱器に蓄えられた有限のエネルギーから最も多くの電力を回収することを目標とした最大効率制御を提案する。しかし、最大効率を実現するにも最大効率を示す直接の手法は無いことから、最大効率制御は最大出力制御をベースとして、最大出力点より若干抵抗の高い点で運転を推移させる事で実現した。現時点では抵抗値の加算率は約 10%としているがこの加算率は今後最適化する必要がある。

4.2 実験による検討　ここでは比較のため、最大効率制御、最大出力制御の各制御方法について、放熱運転開始時から負荷抵抗値 R、発電電力値 W、熱電発電器の高温部温度 T_h、低温部温度 T_c の測定を行った。蓄熱設定温度は 220[℃]とし、定常状態に至るまで十分に加熱した後、放熱運転を行った。温度差が 170[℃]となった点を開始点（n =0）として、式(4.1)を用いて 1 時間の発電電力量 Wh[Wh]を算出した。測定時間刻みを Δt[h]、ある測定点における経過時間を $Time_n$[h]、発電電力値を W_n[W]とした。N は温度差が約 170[℃]の測

定点より 1 時間後の測定点とする。

$$Wh = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{Time_n}^{Time_{n+1}} \frac{W_n + W_{n+1}}{2} \cdot \Delta t dt \quad (4.1)$$

実験は本来同じ条件で実施すべきではあるが、実験装置では冷却水を空冷しており、外気温により冷却水の温度が変動するため、実験条件を統一できていない。熱電発電器に使用する熱電モジュールの発電特性のため、冷却水が低温であるほど発電性能が高い。そのため発電電力の積分値である電力量も当然平均低温部温度 T_{Avec} の影響を受ける。そこでその影響を含めて特性を示すため、平均低温部温度 T_{Avec} と発電電力量 W の関係をもとめ、図 7 に示した。

現段階で収集したデータでは測定時の温度差条件が異なるため最大効率制御の優位性を全ての温度範囲では明確に示すことはできなかった。しかし、図中で「温度条件共通」と示した低温部温度が近い条件での発電電力量に着目すると、最大効率制御が最大出力制御に比べて高い発電電力量を示す傾向が見られ、最大効率制御の優位性が概ね確認された。

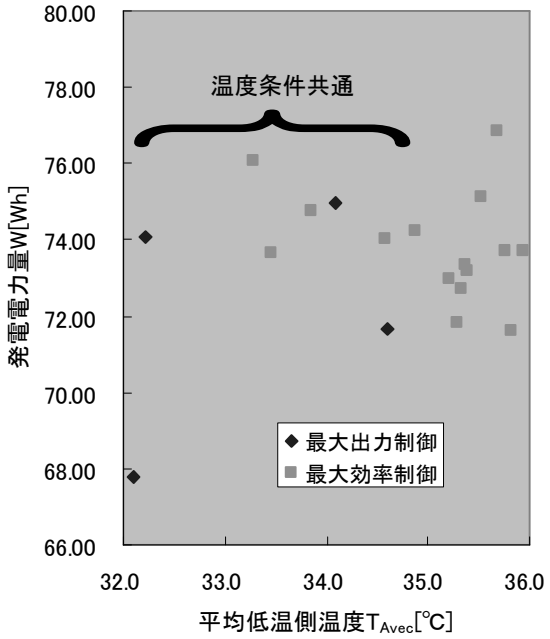


図 7　平均低温部温度 $T_{Ave.c}$ ─発電電力量 W

5.　終わりに

エネルギーの有効利用を図るため、未利用となっている廃熱を熱電発電によって電力として回収することを目的として、潜熱蓄熱器を有する熱電発電システムを提案し、システムの評価・考察を行った。

最適な制御方法の検討を目的として、最大効率制御、最大出力制御の各制御方法について、実験により検討した。測定結果より温度差が約 170[℃]となった点を開始点として、開始時の温度差条件を揃えて発電電力量を算出して比較を行った場合、低温部温度が近い条件での発電電力量に着目すると、最大効率制御が最大出力制御に比べて高い発電電力量を示す傾向が見られ、最大効率制御の有効性が概ね確認された。実験の再現性に不十分な点もあるので引続き、より広い条件での確認は必要である。

蓄熱器を有した熱電発電器はバッチ処理を行う焼却処理施設などへの適用が期待されている。昼間のごみ焼却を行う通常運転時は廃熱の有効利用が目的であるので、最大出力制御を用い、発電すると共に蓄熱器への蓄熱を行う。夜間のゴミ焼却の行われていない時間帯の蓄熱器の放熱運転時には今回提案した最大効率制御を適用することにより回収電力量の増大が期待される。

このような効率の改善によって、熱電発電器の課題となるコストがより一層低減されることにより、潜熱蓄熱器を利用した熱電発電システムの導入が期待される。

参考文献

(1)T. Kajikawa, et al. ”Conceptual design of thermoelectric power generation system using the waste heat of combustible solid waste”,491-496pp、Proc. of 12th ITC(1993)
(2)津吉　彰,松浦　虔士:「熱電発電への蓄熱器の導入効果」, 電気学 B 部門誌 pp.1699-1705i、 2007.
(3)津吉　彰,道平雅一,加藤真嗣 :「熱電発電による熱エネルギー回収装置」, 平成 19 年電気学会産業応用部門大会(JIASC07）, 1-O7-1,137-140.pp. 2007.
(4)小沢、神本、その他 :「潜熱蓄熱材料の予備的検討 1」、電子技術総合研究所彙報、44（11,12）、707-724pp、1980
(5)田中、金成、その他 :「潜熱蓄熱材料の予備的検討 3」、電子技術総合研究所彙報、51(7)、469-483pp、1987

２リンクロボットアームの単純適応制御 (SAC)

浜田 健太 *　　笠井 正三郎 †

Simple Adaptive Control of Two Link Robot Arm

Kenta HAMADA *　　Shozaburo KASAI †

ABSTRACT

In recent years, improvement in the control performance of robot arms, such as an industrial robot, is desired. These are described by time varying models, and adaptive control is known as the effective control technique for the models. However, it becomes complicated to constitute adaptive control. Therefore, Simple adaptive control(SAC) have recently been receiving attention with easy composition in this field. In this paper, we designed the controller of a two link robot arm using SAC. The validity of SAC for the time varying model is shown by simulations and experiments of the two link robot arm.

Keywords : robot arm, adaptive control, time varying model, SAC

1. 序論

近年，製造ラインで用いられている産業用ロボットなどのロボットアームは，作業の効率化を図るために，制御性能の向上が望まれている．しかし，このモデルは時間の経過と共に位置・姿勢が変化するモデルとなる．つまり，時間と共に制御モデルの状態が変化する制御対象 (時変モデル) である．そして，このようなモデルに PID 制御などの定数フィードバック制御を用いた場合，急な状態の変化に対応できないため，制御性能を向上させるのが困難となる．したがって，このモデルにおいては，変化する制御対象の状態推定を行いながらコントローラの構築を行う適応制御が，有効な制御手法として知られている．しかし，適応制御は，モデルの変化を推定・更新するのにかかる時間が制御性能を大きく左右する．また，現実には，高速な観測器を構築するのが非常に困難である．そのため，適応制御は，実際のシステムに適用することが難しい．しかし近年，適応制御の中でも比較的構成が容易とされる単純適応制御 (Simple Adaptive Control:SAC) に注目が集まっている．

システムの特性の 1 つに概強正実 (Almost Strictly Positive Real:ASPR) 性があり，システムが ASPR 性を満たす場合，十分大きな出力フィードバックにより，安定性が保証されるという性質が知られている[(1)]．SAC は，この性質を利用した適応制御手法である．つまり，SAC はセンサで実測できる出力のみを用いて構成される．そのため，通常の適応制御系と比べて，設定するパラメータが少ない．よって，SAC は比較的構成が容易な適応制御系となっている．また，適応的にパラメータを調整するので時変モデルに対しても有効であると考えられる．

本研究は，制御対象に工場などで用いられるロボットアームを想定し，時変モデルの中でも最小なモデルとして考えられる 2 リンクロボットアームを考えた．この対象は制御研究の分野で広く用いられている．本研究では，このような時変モデルの 2 リンクロボットアームに対して，SAC を用いたコントローラの設計を図った．そして，シミュレーションおよび実機実験において，その制御手法の有効性について検証を行った．

*電気電子工学専攻 2 年
†電子工学科　教授

2. ロボットアームのモデル

2.1　制御対象　本研究の制御対象である 2 リンクロボットアームのモデルを図 1 に示す．ここで，θ_i をモータ $i(i=1,2)$ の角度，l_i をリンク i の長さ，r_i をリンク i の重心までの長さ，m_i をリンク i の質量，および G_i をリンク i の重心とする．また，エンドエフェクタ部は何も取り付けていないものとした．

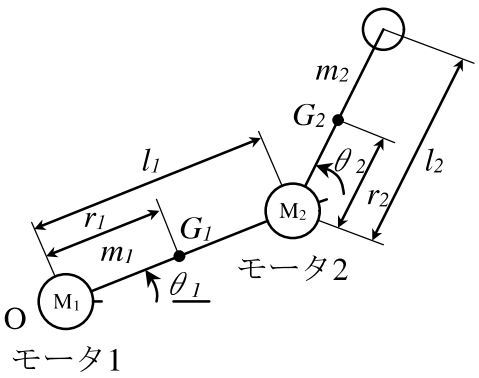


図 1　2 リンクロボットアーム - モデル

2.2　物理モデル　2 リンクロボットアームの運動方程式を導出する．運動エネルギー T の導出に用いるリンク i の重心位置 $\boldsymbol{p_{gi}}$，および角速度 $\boldsymbol{\omega_i}$ は，式 (1)，(2)，(3)，(4) となる．

$$\boldsymbol{p_{g1}} = \begin{bmatrix} r_1\cos\theta_1 \\ r_1\sin\theta_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{p_{g2}} = \begin{bmatrix} l_1\cos\theta_1 + r_2\cos(\theta_1+\theta_2) \\ l_1\sin\theta_1 + r_2\sin(\theta_1+\theta_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\omega_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta_1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\omega_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta_1}+\dot{\theta_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

よって，運動エネルギー T は式 (5) のように表せる．ただし，J_{gi} はリンク i の重心に関する慣性モーメントとした．なお，”˙ ”の記号は時間微分を表している．

$$T = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\left(m_i\dot{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{gi}}{}^T\dot{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{gi}} + J_{g_i}\boldsymbol{\omega_i}{}^T\boldsymbol{\omega_i}\right) \quad (5)$$

また，ポテンシャルエネルギー U は重力の影響を受けないものと考え，$U=0$ とし，式 (6) に示すラグランジュ法を用いることで，運動方程式は式 (7) のように導出できる[2]．ただし，τ_i はモータ i の駆動トルクとし，J_i，M_{12}，$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})$，および $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}})$ は以下のように置いた．なお，本論文では，”≜ ”の記号を定義の意味として用いている．

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial(T-U)}{\partial\dot{\theta_i}}\right) - \frac{\partial(T-U)}{\partial\theta_i} = \tau_i \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})\begin{bmatrix} \ddot{\theta_1} \\ \ddot{\theta_2} \end{bmatrix} + \boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}})\begin{bmatrix} \dot{\theta_1} \\ \dot{\theta_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$J_i \triangleq J_{g_i} + m_i r_i^2$$

$$M_{12} \triangleq J_2 + m_2 l_1 r_2\cos\theta_2$$

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta}) \triangleq \begin{bmatrix} J_1+J_2+m_2l_1^2+2m_2l_1r_2\cos\theta_2 & M_{12} \\ M_{12} & J_2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}}) \triangleq \begin{bmatrix} -2m_2l_1r_2\dot{\theta_2}\sin\theta_2 & -m_2l_1r_2\dot{\theta_2}\sin\theta_2 \\ m_2l_1r_2\dot{\theta_1}\sin\theta_2 & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 制御モデル 次に，制御手法の検討を行うため，このモデルを一般的なシステムの形として表現することとした．2 リンクロボットアームの場合，状態方程式・出力方程式は式 (8) のように表現できる．ただし，$\alpha_{ij},\beta_{ij}(i,j=1,2)$ は式 (9) のように定義した．これは 4 次 2 入出力のシステムとなっている．

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}}(t) &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) \\ \boldsymbol{y}(t) &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{x} \triangleq \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta_1} \\ \dot{\theta_2} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{y} \triangleq \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{u} \triangleq \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ 0 & 0 & \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C} \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \triangleq -\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})^{-1}\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}})$$

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix} \triangleq \boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})^{-1} \quad (9)$$

このモデルの $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta}),\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}})$ は，状態変数である $\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}}$ の関数となっている．また，ロボットアームが駆動することで $\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}}$ が変化する．そのため，このモデルはシステム行列である $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ が時間と共に変動するモデルとなっている．このような制御対象を時変モデルと呼ぶ．

3. 単純適応制御 (SAC)

SAC は，システムに ASPR 性という制約を含ませることで，構成を出力フィードバック系と比較的容易にした適応制御系である．一般の適応制御系は，状態フィードバックにより構成される．よって，n 次 m 入出力系のシステムを扱う場合，一般の適応制御系は n 個のゲインを適応的に算出する必要がある．一般に，実際のシステムは $n \geq m$ となることがほとんどである．そのため，出力フィードバックにより構成される SAC は m 個のゲインのみを求めれば良い．したがって，一般の適応制御系と比べて，SAC は設定するパラメータが少なく，構成が容易とされる．

3.1 SAC の安定性 SAC は出力フィードバックにより安定性を保証している．ここで，式 (10) に示す n 次 1 入出力系のシステムを考える．このシステムを用いて，SAC の安定性について検討する．ただし，$a_i(i=0,1,\cdots n),b_j(j=0,1,\cdots m)$ は実数とする．

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1}s^{m-1} + \cdots b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots a_1 s + a_0} \quad (10)$$

また，このシステムが ASPR 性をもつ場合，以下に示す関係が成り立つ．これは，1 入出力系のシステムが ASPR 性を満足するための条件である[3]．

[1] システムがもつゼロ点はすべて安定，つまりゼロ点の実部は負の値をもつ
[2] 伝達関数 $G(s)$ の分母と分子の次数差である相対次数 $n-m$ は 0 または 1 である
[3] 伝達関数 $G(s)$ の分子の最高位係数 b_m は正の値をもつ

ここで，ゼロ点とは，伝達関数 $G(s)$ の分子が 0 となる s についての解である．つまり，分子が式 (11) のように表現される場合，ゼロ点は $s=-\sigma_i(i=1,2,\cdots m)$ となり，σ_iは 実数または複素数の場合はその共役複素数もゼロ点となる．

$$b_m(s+\sigma_1)(s+\sigma_2)\cdots(s+\sigma_m) = 0 \quad (11)$$

また，条件 [1]，[3] より，$\mathrm{Re}[\sigma_i]>0$，および $b_m>0$ であることから，$b_i(i=0,1,\cdots m-1)$ が必ず正の値を取ることが導ける．

ここで，式 (12) に示す出力フィードバックによる閉ループ系 $G_a(s)$ を考える．ただし，k はフィードバック係数とする．

また，この系の特性方程式を式 (13) に示す．なお，相対次数は $n-m=1$ とした．

$$G_a(s) = \frac{G_s}{1+kG_s} \tag{12}$$

$$1+kG_s = s^n + \sum_{i=0}^{n-1}(a_i+kb_i)s^i = 0 \tag{13}$$

ここで，ASPR 性の条件により，$b_i > 0 (i = 0, 1, \cdots m)$ である．つまり，k の値が十分大きければ，a_i の値に関わらず $a_i + kb_i > 0$ の関係が得られる．加えて，k の値により各係数が変化するため，この閉ループ系が安定とできる k が存在する．よって，制御システムが ASPR 性をもつ場合，十分大きな出力フィードバック入力により安定性が保証されることが分かる．なお，相対次数が 0 のシステムでも同様に安定性が保証される．

3.2　多入出力系の ASPR 条件　上に 1 入出力系の ASPR 条件を示した．しかし，本研究で取り扱うモデルは，2 入出力の多入出力系である．そのため，多入出力系の ASPR 条件を示す．

多入出力系の ASPR 条件は 1 入出力系のものとは少し異なる．だが，多入出力系の場合でも ASPR 性を満たすことで，十分大きな出力フィードバック入力により安定となることが知られている．n 次 m 入出力系のシステムの ASPR 条件を以下に示す[4]．

[1] n 個の極と $n-m$ 個の安定なゼロ点をもつ
[2] $\det(\boldsymbol{CB}) \neq 0$ である

3.3　SAC の追従性　SAC は，目標値として，式 (14) に示す規範モデルを与えている．つまり，SAC の制御目的は，制御モデルの出力 $\boldsymbol{y}(t)$ を規範モデルの出力 $\boldsymbol{y_m}(t)$ に一致させることである．

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t) = \boldsymbol{A_m x_m}(t) + \boldsymbol{B_m u_m}(t) \\ \boldsymbol{y_m}(t) = \boldsymbol{C_m x_m}(t) \end{cases} \tag{14}$$

システムが ASPR 性を満たすならば，追従誤差 $\boldsymbol{e}(t) = \boldsymbol{y}(t) - \boldsymbol{y_m}(t)$ のフィードバックにより，追従が行われる．しかし，この制御のみでは誤差が生じなければ入力は発生しないため，規範モデルへの完全追従は達成されない．そこで SAC は，安定性を保証する追従誤差フィードバック入力に加えて，規範モデルへの追従性を高めるフィードフォワード入力を与えている．ここで，SAC の構成を図 2 に示す．なお，$\boldsymbol{k}(t) = [\boldsymbol{k_e}(t), \boldsymbol{k_{xm}}(t), \boldsymbol{k_{um}}(t)]$ は，制御入力 $\boldsymbol{u}(t)$ を算出する適応ゲインとなっている．つまり，SAC は，安定性・追従性を満足するゲイン $\boldsymbol{k}(t)$ を適応的に算出する制御手法となっている．

SAC の制御入力は，式 (15) のように表される．$\boldsymbol{e}(t) = \boldsymbol{0}$ となるように，適応ゲイン $\boldsymbol{k}(t)$ が決定され，制御入力が算出される．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u}(t) &= \boldsymbol{k}(t)\boldsymbol{z}(t) \\ \boldsymbol{z}(t) &\triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}(t)^T & \boldsymbol{x_m}(t)^T & \boldsymbol{u_m}(t)^T \end{bmatrix}^T \\ \boldsymbol{k}(t) &\triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{k_e}(t) & \boldsymbol{k_{xm}}(t) & \boldsymbol{k_{um}}(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{15}$$

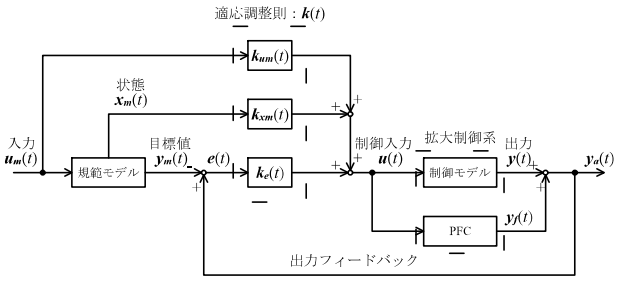


図 2　SAC の構成

適応ゲインは，適応調整則に基づいて算出される．適応調整則は適応速度などの特性を決定し，SAC においてもいくつかの調整則が用いられている．式 (16) に，比較的良く用いられる積分+比例型適応調整則を示す．ただし，$\boldsymbol{\Gamma_I}, \boldsymbol{\Gamma_P}$ $\left(\boldsymbol{\Gamma_I} = \boldsymbol{\Gamma_I}^T > 0, \boldsymbol{\Gamma_P} = \boldsymbol{\Gamma_P}^T > 0\right)$ は重み係数である．

$$\boldsymbol{k}(t) = -\int_0^t \boldsymbol{e}(\tau)\boldsymbol{z}(\tau)^T\boldsymbol{\Gamma_I}d\tau - \boldsymbol{e}(t)\boldsymbol{z}(t)^T\boldsymbol{\Gamma_P} \tag{16}$$

第一項を用いた調整則を基本調整則である積分型適応調整則と呼び，制御系の安定性はこの基本調整則で保証される．しかし，この基本調整則では変動するモデルに対しての適応速度が十分ではないため，比例項である第二項を加えて適応性能を向上させている．

4.　SAC を用いたコントローラの設計

4.1　PFC の設計　実際のシステムにおいて ASPR 性を満足するシステムは少ない．そのため，SAC を適用することは，現実には困難となる．そこで，図 3 に示すような，制御システムに対して並列フィードフォワード補償 (Parallel Feedforward Compensator:PFC) を与えた拡大制御系を構築することが考案された[5]．実際のシステムでは ASPR 性を満足できなくても，PFC を構成することで拡大制御系に対して ASPR 性の再評価が行える．

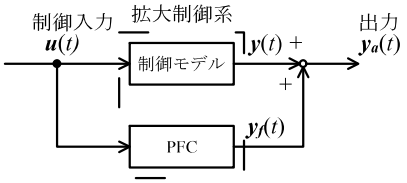


図 3　PFC

式 (17) に PFC を付加した拡大制御系の状態方程式・出力方程式を示す．ただし，$\boldsymbol{A_f}$，$\boldsymbol{B_f}$，$\boldsymbol{C_f}$ はそれぞれ PFC のシステム行列である．

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{a}}(t) &= \boldsymbol{A_a x_a}(t) + \boldsymbol{B_a u}(t) \\ \boldsymbol{y_a}(t) &= \boldsymbol{C_a x_a}(t) \end{aligned} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{x_a} \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{x_f} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{y_a} \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{y} + \boldsymbol{y_f} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A_a} \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A_f} \end{bmatrix}, \boldsymbol{B_a} \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B_f} \end{bmatrix}, \boldsymbol{C_a} \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & \boldsymbol{C_f} \end{bmatrix}$$

対象が多入出力系の場合，まず $\det(\boldsymbol{C_a B_a}) \neq 0$ となるように PFC のパラメータを選定する．次に，極，およびゼロ点の条

件を満足させる．多入出力系の場合，極は $\det(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A_a})=0$ の根，ゼロ点は $\det(\boldsymbol{P_a}(s))=0$ の根となる．ただし，$\boldsymbol{P_a}(s)$ は式 (18) に示すような値を取る．

$$\boldsymbol{P_a}(s) \quad = \quad \begin{bmatrix} s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A_a} & \boldsymbol{B_a} \\ -\boldsymbol{C_a} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{18}$$

この関係から，$n+n_f$ 個の極，および $n+n_f-m$ 個の安定なゼロ点をもつことを確かめる．これらの過程を踏むことで，ASPR 性を満足する拡大制御系の設計が行える．

拡大制御系が ASPR 性を満足することで，出力フィードバックにより安定性は保証される．しかし，出力においては PFC の影響は無視できず，目標値に対して定常偏差が生じる恐れがある．そこで，図 4 に示すような，PFC の出力を実システムの出力に与えないような SAC の構成を行う．この制御系の場合，出力フィードバックにより拡大系誤差 $e_a(t)$ は 0 に収束していき，同時に PFC の入力も消失していく．このことは制御系の出力誤差 $e(t)$ が 0 に収束していくことを意味し，安定性，および追従性が同時に満足される．なお，本研究ではこの構成の PFC および適応調整則を設計した．

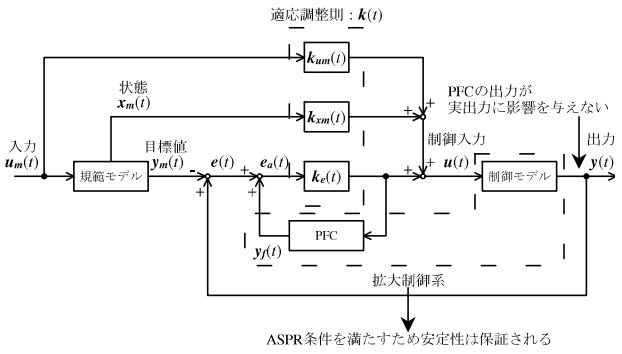


図 4　PFC による定常偏差を除去する SAC の構成

4.2　2 リンクロボットアームに対する PFC の設計　式 (8) に示したモデルは，$\det(\boldsymbol{CB})=0$ となり，ASPR 性を満たしていない．そこで，制御モデルに PFC を付加した式 (19) に示すような拡大制御系を考えた．なお，ここではシステム行列のみを示している．

$$\boldsymbol{A_a} \triangleq \left[\begin{array}{c|cc} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{0} & \\ \hline \boldsymbol{0} & -\kappa_1 & 0 \\ & 0 & -\kappa_2 \end{array}\right] \quad , \quad \boldsymbol{B_a} \triangleq \left[\begin{array}{c} \boldsymbol{B} \\ \hline \delta_1 \quad 0 \\ 0 \quad \delta_2 \end{array}\right] \tag{19}$$

$$\boldsymbol{C_a} \triangleq \left[\begin{array}{c|cc} \boldsymbol{C} & 1 & 0 \\ & 0 & 1 \end{array}\right]$$

この拡大制御系の場合，式 (20) の関係が成り立つ．そして，PFC のパラメータ δ_1,δ_2 を選定することで，拡大制御系が ASPR 条件の 1 つを満足することが分かる．

$$\det(\boldsymbol{C_aB_a}) \quad = \quad \begin{vmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{vmatrix} \quad = \quad \delta_1\delta_2 \quad (\neq \quad 0) \tag{20}$$

次に構築した拡大制御系が，$n=6$ 個の極と $n-m=6-2=4$ 個の安定なゼロ点をもつことを確かめる必要がある．このシステムの極・ゼロ点は，式 (21) の s についての解となる．ただし，$a_i, b_i (i=0,1,\cdots 4)$ は，PFC のパラメータ $\kappa_i, \delta_i (i=1,2)$，および制御対象のシステム行列のパラメータ $\alpha_{ij}, \beta_{ij} (i,j=1,2)$ の関数となっている．

$$\begin{cases} \det(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A_a}) \quad = \quad s^2\displaystyle\sum_{i=0}^{4} a_i s^i \quad = \quad 0 \\ \det(\boldsymbol{P_a}(s)) \quad = \quad \displaystyle\sum_{i=0}^{4} b_i s^i \quad = \quad 0 \end{cases} \tag{21}$$

よって，$\det(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A_a})$ の式の次数が 6 であることから，極は $n=6$ 個存在することが確認できる．しかし，2 リンクロボットアームが取る位置・姿勢により制御モデルのパラメータ α_{11} などが変化する．そのため，ゼロ点の値は一意に決定することができない．したがって，ゼロ点の値を確かめるには，パラメータ α_{11} などを設定する必要がある．そこで，ある目標軌道を制御モデルに与え，必要なパラメータを設定し，拡大制御系のゼロ点の軌跡を調べることとした．

5.　シミュレーション

5.1　シミュレーション条件　シミュレーション条件として，本研究のモデルと同様の 2 自由度の水平多関節形アームである SICE-DD アーム (東芝製 SR-402DD) のパラメータを採用した[6]．SICE-DD アームの写真を図 5 に示す．2 個のダイレクトドライブモータと共にロータリーエンコーダが備わっており，モータの角度が計測可能となっている．なお，この写真では，リンク 2 部分に本来ある剛体リンクが備わっていないものとなっている．また，シミュレーションに用いるロボットアームのパラメータは，表 1 に示すように設定した．なお，シミュレーションソフトは Octave，CPU は Intel Core2 Quad CPU Q9400 2.66GHz を用いた．

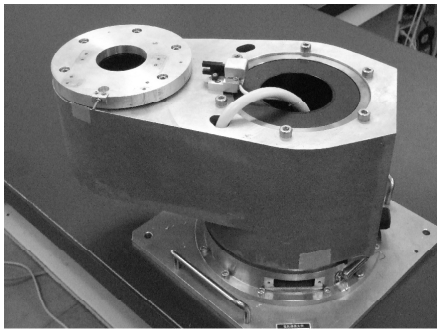


図 5　SICE-DD アーム

表 1　ロボットアーム - パラメータ

			値	
	単位	変数	リンク 1	リンク 2
質量	[kg]	m	12.27	2.083
長さ	[m]	l	0.2	0.2
重心までの距離	[m]	r	0.063	0.08
慣性モーメント	[kgm^2]	J	0.16360	0.027731

5.2　ASPR 性の検証　目標軌道となる規範モデルの状態方程式を式 (22)，入力 $\boldsymbol{u_m}(t)$ を式 (23)，および出力 $\boldsymbol{y_m}(t)$ を図 6 に示す．なお，目標軌道にはステップ応答を与えた．

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{m}} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{m}} \\ \boldsymbol{y}_{\boldsymbol{m}} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{m}} \end{cases} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{u}_m = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \tag{23}$$

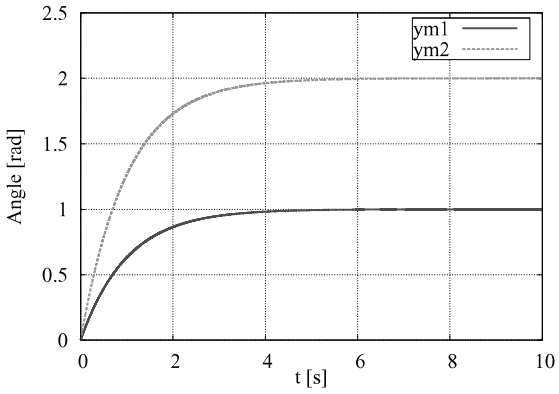


図 6　規範モデル - 出力

また，PFC のパラメータは $\kappa_i = 10, \delta_i = 0.5 (i = 1, 2)$ とした．以上のようにパラメータを設定した場合の拡大制御系のゼロ点の軌跡を図 7 に示す．ゼロ点の軌跡から $n - m = 4$ 個の実部が負，つまり安定なゼロ点がどちらも観測できた．したがって，構築した拡大制御系は，これらの目標軌道に対して ASPR 性を満足していることが分かる．

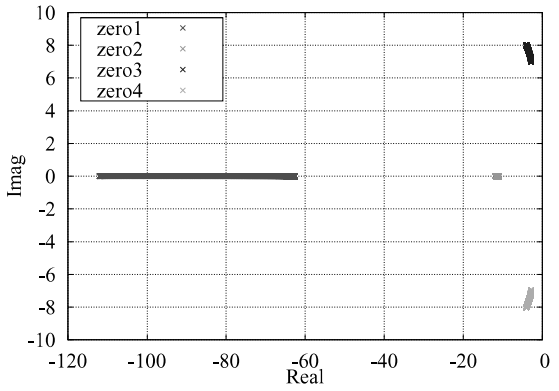


図 7　拡大制御系 - ゼロ点

5.3　SAC・PID 制御の性能比較　時変モデルである 2 リンクロボットアームに対する SAC の有効性の検討を図った．そのため，従来良く用いられている PID 制御との性能比較を行った．PID 制御の制御入力算出式を式 (24)，および PID 制御の構成を図 8 に示す．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u}(t) &= \boldsymbol{k_p} \left(\boldsymbol{y_m}(t) - \boldsymbol{y}(t) \right) + \boldsymbol{k_i} \int_0^t \left(\boldsymbol{y_m}(\tau) - \boldsymbol{y}(\tau) \right) d\tau \\ &+ \boldsymbol{k_d} \frac{d}{dt} \left(\boldsymbol{y_m}(t) - \boldsymbol{y}(t) \right) \end{aligned} \tag{24}$$

観測時間は 10s に設定し，サンプリング時間は 1ms，および PFC のパラメータなどは上で示したものと同じものとした．また，PID ゲインと SAC に用いる適応調整則の重み係数を表

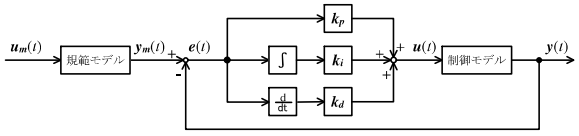


図 8　PID 制御 - 構成

表 2　重み係数

変数	値
$\boldsymbol{k_p}$	$\mathrm{diag}\,(50, 30)$
$\boldsymbol{k_i}$	$\mathrm{diag}\,(1, 0.1)$
$\boldsymbol{k_d}$	$\mathrm{diag}\,(20, 10)$
$\boldsymbol{\Gamma_I}$	$\mathrm{diag}\left(10^{10}, 10^{10}, 10^4, 10^4, 10^4, 10^4\right)$
$\boldsymbol{\Gamma_P}$	$\mathrm{diag}\left(10^{10}, 10^{10}, 10^4, 10^4, 10^4, 10^4\right)$

2 に示す．これらのゲインはシミュレーション結果を観測しながら適宜調整を行った．

ステップ応答に対する追従制御シミュレーションを PID 制御と SAC でそれぞれ行った．その制御結果である追従誤差 $\boldsymbol{e}(t) = \boldsymbol{y}(t) - \boldsymbol{y_m}(t)$ をそれぞれ図 9，10 に示す．SAC は，PID 制御と比べてオーバーシュートがなく，追従誤差も比較的少ない様子が観測できる．

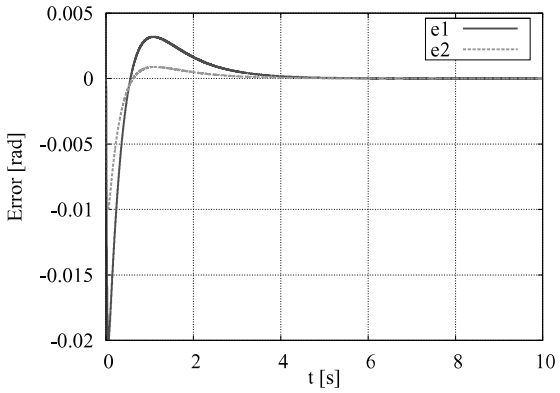


図 9　追従誤差 - PID 制御

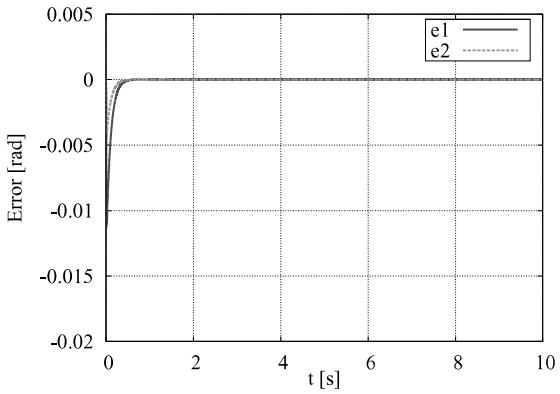


図 10　追従誤差 - SAC

6.　実機実験

6.1　実験環境　構築した制御環境を図 11 に示す．DA 変換ボードより駆動トルク指令電圧を入力として与え，サーボ ON/OFF などの入出力をデジタル入出力ボードにより制御，およびエンコーダの角度をパルスカウンタボードにより検出した．なお，組み込み式制御ボードを動作させるドライバモジュールはハードリアルタイム性に優れるリアルタイム OS で

ある RT-Linux により開発を行った.

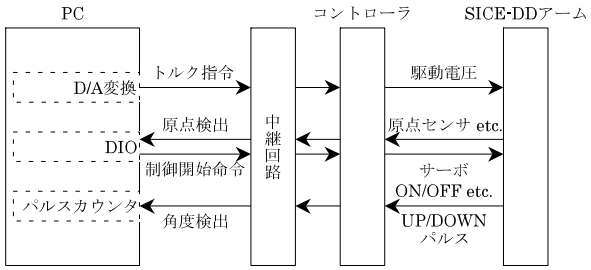


図 11 実験環境

6.2 実験結果 PID 制御の実機応答を図 12, および SAC の実機応答を図 13 に示す. なお, PFC などのパラメータはシミュレーションと同様とした. また, 本来存在する 2 リンク部分の剛体アームが備わっていないため, 重み係数などは, 表 3 のように再設定した.

本研究で構成したコントロールシステムでは, 角度情報しか得られないため, PID 制御の微分項で用いる角速度は数値差分で求めている. そのため, オブザーバを用いて角速度を推定するシステムなどと比較すると精度が悪くなると推測できる.

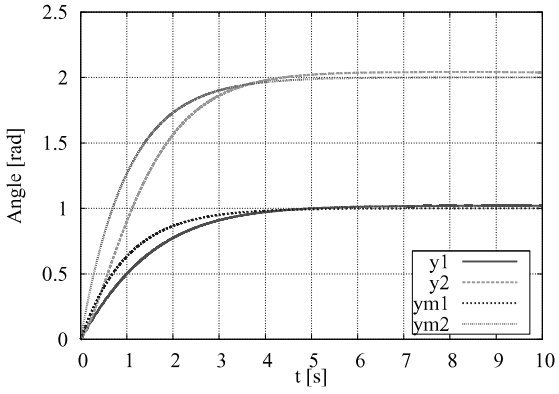


図 12 PID 制御 - 実機応答

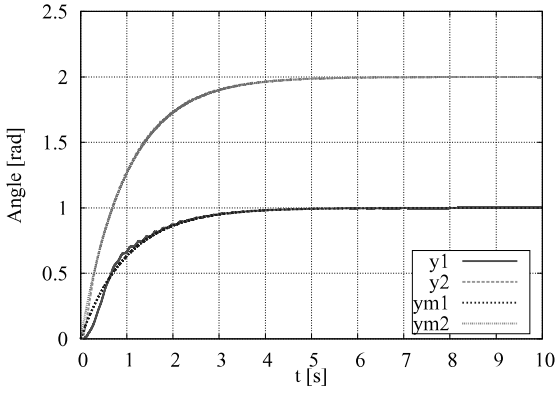


図 13 SAC - 実機応答

表 3 重み係数

変数	値
$\boldsymbol{k_p}$	$\mathrm{diag}\,(8.0, 1.5)$
$\boldsymbol{k_i}$	$\mathrm{diag}\,(0.5, 0.1)$
$\boldsymbol{k_d}$	$\mathrm{diag}\,(5.0, 0.2)$
$\boldsymbol{\Gamma_I}$	$\mathrm{diag}\left(5*10^2, 5*10^2, 2*10^1, 2*10^1, 10^1, 10^1\right)$
$\boldsymbol{\Gamma_P}$	$\mathrm{diag}\left(10^2, 10^2, 10^1, 10^1, 1, 1\right)$

SAC は, 出力フィードバックによる安定化を図るため, 推定オブザーバなどを用いずとも直接得られた出力をフィードバックするだけで安定した性能を得ることができる. そのため, 若干駆動時に誤差が観測できるものの, すぐに適応して追従している様子が観測できる. よって, SAC が時変モデルに対して有効な制御則であることが実証できた.

7. 結論

本研究の目的は, 時変モデルである 2 リンクロボットアームに対して, 単純適応制御 (SAC) の有効性を検討することであった. よって, まず本研究では 2 リンクロボットアームのモデル化を行い, 時変モデルであることを確認した. 次に, このモデルに対して SAC を適用するために, 補償要素の設計を行った. そして, SAC の有効性を検証するため, PID 制御と SAC の制御シミュレーション, および実機実験を行い, 性能を比較した. その結果, SAC はモデルの変動に適応的に対応して, 時変モデルである 2 リンクロボットアームに対して有効な制御手法であることが検証できた.

参考文献

(1) 岩井善太, 水本郁朗, 大塚弘文 : 「単純適応制御 SAC」, 森北出版, pp.1-6, 2008.

(2) 小林尚登ほか : 「ロボット制御の実際」, 計測自動制御学会, pp.1-44, 166, 1997.

(3) 岩井善太, 水本郁朗, 大塚弘文 : 「単純適応制御 SAC」, 森北出版, pp.14-18, 2008.

(4) 岩井善太, 水本郁朗, 大塚弘文 : 「単純適応制御 SAC」, 森北出版, pp.22-26, 2008.

(5) 岩井善太, 水本郁朗, 大塚弘文 : 「単純適応制御 SAC」, 森北出版, pp.27-29, 53-69, 2008.

(6) 小林尚登ほか : 「ロボット制御の実際」, 計測自動制御学会, pp.171-180, 244, 1997.

レーンキーピングアシストシステムの実装開発

沼野 剛志　　笠井 正三郎†

Development of Lane Keeping Assistance System Implementation

Tsuyoshi NUMANO　　Shozaburo KASAI†

ABSTRACT

If we drive a car for a long time on the road such as expressways, the driver might mistake an acknowledgement and a judgment in the operating. As a result, we might cause a traffic accident. According to National Highway Traffic Safety Administration, 37% of road fatalities in the motorway in the United States is assumed to be the one by the road deviating. Then, we are paying attention to the lane keeping assistance system. The system recognizes traffic lane by the camera attached on the front of the car. If the car shifts from the vicinity of the center of the running lane, it assists maintenance of the traffic lane with addition the steering force to the steering wheel. We develop the lane keeping assistance system. In the previous research, the lane keeping assistance system is developed on the computer with image processing software. In this research, we try to make this system with hardware. We design the hardware that is run by FPGA. This system is set up CMOS camera and FPGA that is high integration, high speed, and low cost. We aim to develop the lane keeping assistance system.

Keywords : lane keeping assistance system, image processing, FPGA

1. 序論

近年, 交通事故の発生率は減少傾向にあるが, 依然として高い水準に変わりはない. 警視庁の統計 (平成 22 年)[(1)] によると, 交通事故の発生原因は, 前方不注意や安全不確認の要素のみで全体の約 80 %以上を占めている. つまり, 交通事故のほとんどは, 運転者の認知や判断ミスによって引き起こされていると考えられる. そこで近年, 自動車の運転の支援を行うレーンキーピングアシストシステムが注目されている. これは, 車の前方部に取り付けたカメラで車線を検出することによって, 自動車が車線から逸脱するのを自動的に防ぐもので, 運転者を支援するシステムの 1 つである. 長時間運転するドライバーに対して, 運転操作における疲労を緩和すると共に, 車線逸脱の注意喚起を行うことを目的としている.

先の研究[(2)]では, カメラから取り込んだ画像を処理し, 車の走行経路を予測するプログラムを開発するところまで進んでいた. しかし, メモリや算術演算を多用するアルゴリズムでは, リアルタイム処理に不向きなことと, ハードウェア上に直接実装することが困難であるという課題が残った. そこで, 本研究ではハードウェアに実装するための新たなアルゴリズムを開発し, それらをハードウェアに組み込むことでリアルタイム処理を実現させた. また, 小型車輪型ロボットにそれらを搭載し, レーンキーピングアシストシステムの実証を行った. そして, ほとんどの高速道路で使用可能なレーンキーピングアシストシステムを開発し, 所期の目標を達成することが出来たので報告する.

*電気電子工学専攻 2 年
†電子工学科　教授

2. 画像処理と走行線予測

本研究では, カメラから得られる画像を使用して道路上の車線を認識することでレーンキーピングアシストシステムを実現する. まず最初に, 車線認識を行うために必要な画像処理と認識された車線からの走行線予測について簡単に説明する.

2.1　2 値化　道路には様々な色が存在するが, 抽出する車線は白やオレンジである. 取得した画像を 2 値化し, 道路を「黒」, 車線を「白」とすることで, データの量を減らし, 処理を行いやすくする. カメラから得られる入力画像を図 1 に, それを 2 値化した画像を図 2 に示す.



図 1　取り込み画像



図 2　2 値化画像

2.2　車線検出　2 値化した画像で車線は白の幅のある直線となることに着目し, 車線を検出する. 画像の中心から左右にスキャンして行き, 横方向に幅を持った白画素を車線と認識する. 車線付近の拡大画像を図 3 に示す. 図 3 では車線の内側からグレーで示している部分のように, 3 画素の幅を持つものを車線と認識している. この操作を車線の存在する領域で繰り返し行い, 車線を検出する. 車線が破線になっている部分に関しては, 破線のうち空白部分の車線間の幅が, 他の車線間の幅と大きく異なることに着目して, 無視することにした.



図 3 拡大画像

2.3 走行線予測 上記の方法で検出された車線より, 道路の中心座標を求め, 走行線を予測する. 走行線の予測には最小二乗法を用いた. 最小二乗法とは, 測定値とモデル関数から得られる理論値の差の二乗和が最小となるようなモデルのパラメータを決定する手法のことである. 中心点の座標が $(x, y) = (x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_n, y_n)$ というデータが与えられたとき, 求めたい一次方程式の式を $y = ax + b$ とすると各パラメータ a, b は次式 (1), (2) で求められる[(2)]. ここでの n は, 抽出した点の数である.

$$a = \frac{n\sum_{k=1}^{n} x_k y_k \quad \sum_{k=1}^{n} x_k \sum_{k=1}^{n} y_k}{n\sum_{k=1}^{n} {x_k}^2 \quad \left(\sum_{k=1}^{n} x_k\right)^2} \tag{1}$$

$$b = \frac{\sum_{k=1}^{n} {x_k}^2 \sum_{k=1}^{n} y_k \quad \sum_{k=1}^{n} x_k y_k \sum_{k=1}^{n} x_k}{n\sum_{k=1}^{n} {x_k}^2 \quad \left(\sum_{k=1}^{n} x_k\right)^2} \tag{2}$$

走行線を表示した画像を図 4 に示す. 画像サイズは 320 × 240 で行った. 検出された道路の中心座標の個数より $n = 14$ とし, 予測される走行線は式 (3) のように求まった.

$$y = \quad 6.32x + 8.62 \times 10^2 \tag{3}$$

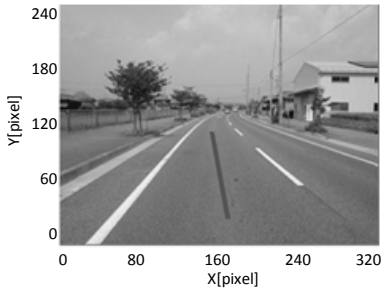


図 4 走行線を示した画像

3. ハードウェアによる画像処理

3.1 実装に必要なこと 画像処理を行うハードウェアに FPGA を使用することで, 高速処理・低コスト化・低消費電力化を実現する事が出来る. しかしその一方で, 小数点を含む乗除算や, メモリを多用した演算が困難になると言うデメリットも存在する. そのため, ソフトウェア上でシミュレーションを行ったアルゴリズムをハードウェアにそのまま組み込む事が出来ない. そこで, ハードウェアに適したアルゴリズムを開発した. また, 今回用いたハードウェアではメモリの制約があるため, 画像のサイズは 320 × 240 として設計した.

3.2 道路画像の分割 カメラから得られた道路画像は, 奥に行くほど車線の間隔が狭く, また, 白線の幅も狭くなっている. その特徴を用いて, 道路画像を図 5 のように, 4 つのラインで評価することにした. 4 つのラインで, それぞれそのラインに適した幅を持つものを車線と認識する. 4 つのラインだけで道路画像を評価できれば, ハードウェアのメモリを節約することだけでなく, 後の演算回数を減らすことができるので, 処理速度の向上が期待できる.

ラインと車線幅の決定は, 高速道路で撮影した画像を 20 枚程度比較し, その平均値を用いて行った. 撮影方法は, 車のダッシュボード (地面から垂直に 1.7m の距離) に取り付けたカメラを地面に対して水平に対して 5 °下向きに傾けたカメラより撮影を行った.

表 1 に, 今回用いたライン位置と車線幅を示す. それぞれのラインで, そのラインに適した幅を持つものを車線と認識する.

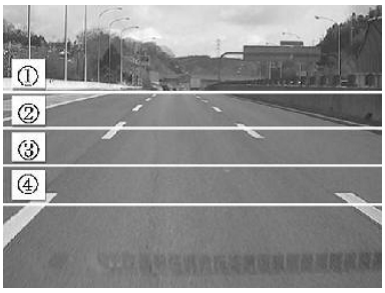


図 5 道路画像の分割

表 1 ライン位置と車線, 白線幅

ライン	ライン位置	車線間幅	白線幅
①	70	40〜60	6
②	120	70〜120	8
③	160	150〜190	10
④	200	270〜320	12

3.3 FPGA による車線検出 FPGA による車線の検出は, 4 つのラインを評価することで行う. 4 つのラインをそれぞれカメラからデータが得られる順にリアルタイムで走査して行き, そのラインに適した幅を持つものを車線と認識する. この手法では, ラスタスキャンしながらリアルタイムに車線を検出することができる. 図 6 に 4 つのラインで車線を検出し, 中心点を求めた画像を示す. 処理結果が確認しやすいように, 走査したラインを青, 中心点を赤でディスプレイに表示するように設計した. 車線の破線部分などのように, 車線が存在しない場合, もしくは表 1 に示している条件と一致しない場合, 車線が急激に変化しないと仮定して, 前回取得に成功した値を中心点としている.



図 6 中心点を求めた画像

また, 図 7 のように, 中心付近の狭い個所にノイズが集中している場合でも, 道路の中心点が急激に変化しないと仮定しているため, 前回取得に成功した値を中心点とすることで, 検出精度の向上を図った. しかし図 8 のように, 中心付近に分散したノイズが乗ると, 表 1 に示している条件と一致してしまい, ノイズを誤って車線として検出してしまう.

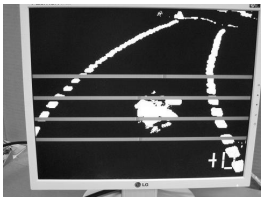


図 7 ノイズが集中している

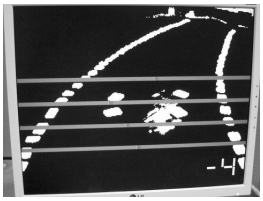


図 8 ノイズが横方向に分散

3.4 FPGA による走行線予測 道路を 4 つのラインで評価することによって, 4 つの車線の位置が検出される. 車線の位置情報により, 車線間の中心座標をそれぞれ得ることができる. 走行線の傾きを決定するため, その中でも, ライン 2 とライン 3 の 2 点間の差分を取ることとした. まず, 画像データの縦の軸を y 軸, 横の軸を x 軸とする. 2 点間で評価する場合, 予測される走行線の傾き a は次式 (4) で表される.

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{4}$$

ここで, Δy は, ライン 2 とライン 3 の y 軸に対する画素の差であり, この値は表 1 より既知である. また, Δx は x 軸におけるライン 2 とライン 3 の車線の中心の画素の差とする. ここで, Δx が求まれば, 走行線の傾き a が求まる. しかし, 先にも述べたように, FPGA 上で小数点を含む乗除算を行うことはできるだけ避けたい. そこで, あらかじめ走行線の傾きを求めておき, 最低限の処理でデータを評価することを考える.

1 から画像の最大幅である 320 まで変化させたときの Δx と既知の Δy より a を求めておく. ライン 2 とライン 3 の x 軸におけるその差 Δx を求め, その結果より求まる a に一番近い値を出力とする. 今回の設計では, 出力に 4 ビット使用できるので, 1 ビット目を符号ビットとし, 残りの 3 ビットを用いて, 走行線の傾きを 8 段階で評価した. 8 段階で評価した結果を表 2 に示す. また, 表 2 に対応した 8 段階の傾きを 図 9 に示す. 1 ビット目の符号ビットは, 右に傾いていれば ”1” , 左に傾いていれば ”0” を出力する. 例を挙げると, ライン 2 とライン 3 の差 Δx が ”-18” だった場合, 表 2 より, 番号は③, 傾き a は ”-2” で, 出力される 4 ビットは ”0011” となる. また, 求まった走行線の予測データは FPGA から約 16.7ms 毎にパラレルに 4 ビット出力され, 走行制御用の SH-2 マイコンでそれらを取り込むように設計した.

実際にこの手法で道路画像を撮影し, 出力した結果を図 10 に, また, 図 11 にこのとき予測されている走行線の傾きを示す. 図 10 の右下に黄色で表示されている数字が, 表 2 の番号を表しており, 数字の前についている符号がプラスかマイナスで, どちらに傾いているかを示している. つまり, この場合 ”+1” と表示されているので, 傾き a は ”+6” であり, 出力される 4 ビットは”1001”となる. 入力画像の車線の傾きに対して, 近い値の走行線の傾きが予測されていることが分かる.

この手法を用いると, 乗除算を用いず, カメラからのデータをリアルタイムに処理し, 走行線の傾きを決定することができる.

表 2 2 点間の差と傾きの対応

番号	傾き a	2 点間の差 Δx	3 ビット出力
⓪	12〜	$0 \leqq \Delta x < 4$	000
①	6	$4 \leqq \Delta x < 7$	001
②	3	$7 \leqq \Delta x < 13$	010
③	2	$13 \leqq \Delta x < 20$	011
④	1.5	$20 \leqq \Delta x < 27$	100
⑤	1	$27 \leqq \Delta x < 40$	101
⑥	0.75	$40 \leqq \Delta x < 53$	110
⑦	0〜0.75	$53 \leqq \Delta x < 320$	111

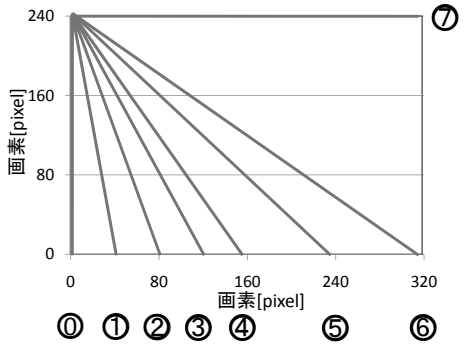


図 9 8 段階の傾き

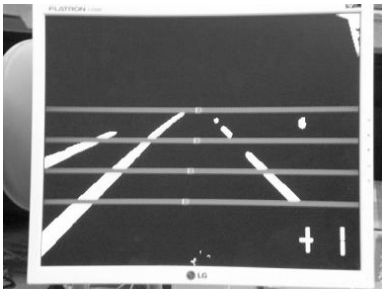


図 10 道路画像のディスプレイ出力

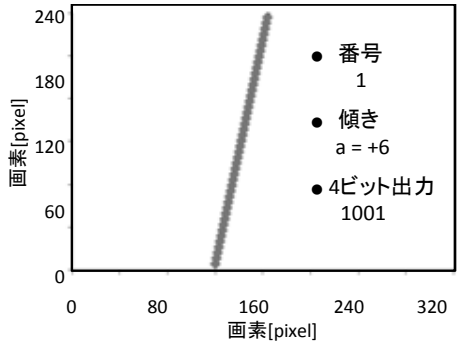


図 11 予測される走行線

4. システム

実際にハードウェアにそれらを組み込むためのシステムを構築する．システム全体の構成を図 12 に示す．カメラから取得した画像データを FPGA で処理し, 3.4 のアルゴリズムで走行線を予測する．予測された走行線のデータ (傾き量 3bit, 傾きの符号 1bit) を FPGA からマイコンに送信し, マイコンが走行線に応じた出力をモーターに送ることで走行制御を行う．画像処理と走行制御の処理を分けることで, 効率化を図った．開発したシステムの流れを以下に示す．

1. カメラで道路を撮影し, 道路画像データを FPGA へ転送.
2. FPGA による 2 値化, 車線検出, 走行線の予測処理.
3. 走行線のデータを SH-2 マイコンへ 4 ビットで出力.
4. SH-2 マイコンでデータを受信し, モータで走行制御.

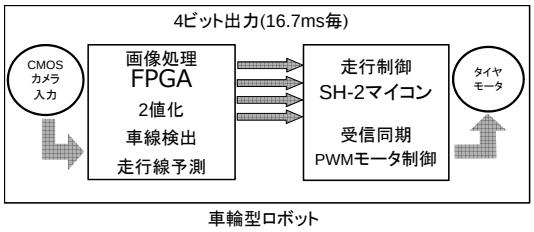


図 12 システムの構成

4.1 車輪ロボットの概要 車輪ロボット型ライントレーサ CQ-BBLTR-M (株式会社イーエスピー企画), 画像処理ボード CQ-SP3EDW2 (株式会社イーエスピー企画) と CMOS カメラ OV7640 (米国 OmniVision Technologies 社) を組み合わせて, カメラ搭載車輪型ロボットを製作した．実際に製作したマシンを図 13 に示す．車体のフロント部分に CMOS カメラを取り付け, 道路の情報を画像データとして読み取れるようにした．CMOS カメラから得られた画像データより車線を検出し, 車が車線から逸脱しないように制御する．FPGA と SH-2 マイコンの接続は, それぞれの I/O ピンを直接ケーブルで繋ぎ, 4 ビットの通信が行えるように設計した．

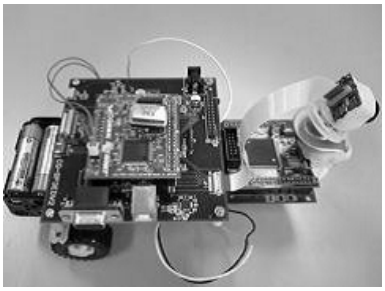


図 13 車輪型ロボット

4.2 FPGA から SH-2 マイコンへのデータ転送 今回の設計では, カメラ・モジュールから得られた画像を, VGA 出力でディスプレイに表示している．VGA 出力では, 1 枚の画像を 1 秒間に 60 回出力することができる．そこで, FPGA から SH-2 マイコンへのデータ転送は, 画像データが 1 回更新されるごとに, 4 ビットの信号が 1 回出力されるように設計した．つまり, FPGA で行った画像処理によって予測された走行線予測情報を, SH-2 マイコンへ 1 秒間に 60 回のペースで送信することが可能である．データ転送のタイミングについて詳しく説明するため, まず, 今回設計した VGA 画像信号タイミングの設計について述べる．

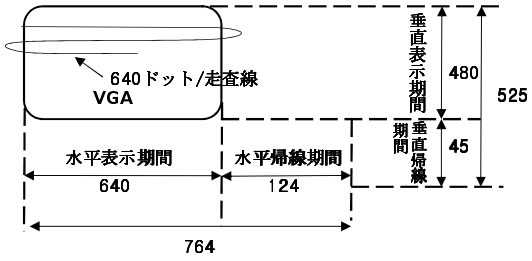


図 14 VGA 画面のタイミング設計

図 14 に VGA 画面のタイミング図を示す．CRT ディスプレイは陰極線によって作られる光のポイントを左右に走査（水平走査）することにより水平 1 ライン分の画像を表示する．光の点が左端から右端まで走査し, 再び左端まで帰ってくる期間を「全水平走査期間」と呼ぶ．そのうち画面表示期間は「水平表示期間」, 左端に帰る期間は「水平帰線期間」と呼ぶ．ピクセルクロックは液晶表示モジュールおよび CMOS カメラの標準値に合わせて 24MHz, FPGA の基本クロックはその 2 倍の 48MHz とする．今回の設計では CMOS カメラの仕様に合わせて

- ピクセルクロック数／ Hsync：764　(水平表示期間 640 ＋水平帰線期間 124)
- 水平走査線数／ 1 フレーム：525　(垂直表示期間 480+垂直帰線期間 45)

とした．これにより繰り返し周波数は

$$\frac{\frac{24.0\times10^6}{764}}{525} = 59.8$$

となる．つまり, 1 秒間の間に, 画像データが約 60 回更新される．先ほど述べたように FPGA から SH-2 マイコンへのデータ転送も, このタイミングで行う．そのため, 以下の時間間隔で走行線予測信号が FPGA から出力される．

$$\frac{1}{24.0\times10^6}\times764\times525 = 16.7\text{ms}$$

この出力タイミングが具体的にどのような数値か考える．高速道路を自動車が 80.0km/h の速さで走っているとする．16.7ms というタイミングで出力を行うとすると

$$\frac{80.0\text{km/h}}{36.0\times10^2\text{s}} = 22.2\text{m/s}$$
$$22.2\text{m/s}\times16.7\times10^{-3}\text{s} = 37.1\times10^{-2}\text{m}$$

つまり, 自動車が約 37cm 進む毎に走行線予測信号が出力される．SH-2 マイコン側では, 上記のタイミングで出力されている信号を, 10ms 毎にサンプリングし, データを取得している．

5. 実機実験

実際にアルゴリズムを FPGA に組み込み, 実機実験を行った. 道路のモデルを CMOS カメラで撮影し, ディスプレイに出力した様子を図 15 に示す. 奥にあるディスプレイにはカメラから得られた画像データが出力されている.

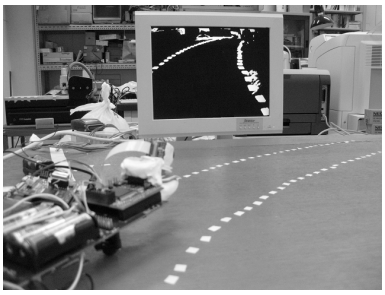


図 15 動作の確認

5.1 実験環境 本研究で用いている実験環境について述べる. 表 3 で高速道路における実スケールと実験環境を比較する. 車線横幅や, 道路横幅については車輪型ロボットの大きさに比例したスケールとした. 車線縦幅と車線間隔は, 高速道路を 80km/h で走行している場合を想定して設計している. なぜなら, 今回使用したアルゴリズムでは, 4 つのラインごとに車線を検出するため, 車線における破線部分の空白が発生するタイミングを考慮しなければならない. そのため, ロボットの進行速度と実際の車の速度を比較し, 破線が起こるタイミングを優先させて, 車線縦幅と, 破線部分の車線間隔を決定した.

高速道路を 80km/h で走行すると, 車線幅である 8m を通り過ぎるのにかかる秒数は 0.36s である. ロボットの進行速度は現在, 20mm/s なので

$$0.36\text{s} \times 0.02\text{m/s} = 7.20 \times 10^{-3}\text{m}$$

となる. そのため, 車線縦幅は 7.2mm とした. 同じように車線間隔も計算して 10.8mm としている. 表 3 に今回用いた実験環境と, 実際の高速道路のスケールを示す.

表 3 高速道路におけるスケールと実験環境

	実スケール [m]	実験環境 [mm]	比率
車線横幅	0.2	6	3/100
道路横幅	3.5	105	3/100
車横幅	2.5	75	3/100
車線縦幅	8	7.2	9/1000
車線間隔	12	10.8	9/1000
(速度)	(80km/h)	(20mm/s)	9/1000

また, 高速道路におけるカーブに対応するため, 仮想道路内のカーブの曲率半径は 4.5m とした, これを実スケールに直すと, 約 150m の曲率半径になる. 日本に存在する高速道路での最小の曲率半径は, 名阪国道の天理東 IC から福住 IC にかけての 150m である. すなわち, この環境で正しく制御できれば, 国内のどの高速道路でも実用可能であると考えられる.

5.2 実機の動作 図 16 に, 出力される走行線に対して, 車輪型ロボットを仮想道路内で制御した様子を示す. 図 16 では, カメラから得られた道路画像と, その画像より予測された走行線データがリアルタイムにディスプレイに表示される. また, 走行線のデータは SH-2 マイコンに送信され, そのデータを元に車輪型ロボットが制御される. 今回, 制御方法には, 比例制御 (P 制御) と PID 制御を用いた.

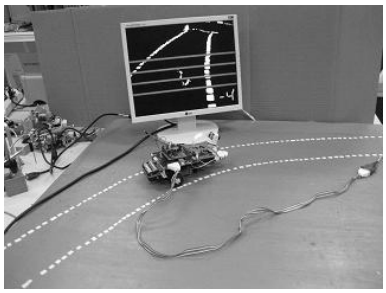


図 16 仮想道路上での動作

5.2.1 比例制御による動作 比例制御では, 走行線の傾きが小さければ小さいほど, つまり, 車線からのずれが大きいほど, 左右のモーターの回転数の差が大きくなるように設計した. 制御の目標値は表 2 で示した番号⓪に収束するように設定している. 動作を撮影した動画より, ディスプレイに表示される走行線の値を 0.5s ごとにサンプリングし, 実際の道路上での走行位置に置き換えたものを図 17 に示す. また, カーブ終端付近の拡大図を図 18 に示す. 比例制御を用いた手法では, 走行位置がかなり車線に近づいてしまっていることが分かる. 目標値からのズレより計算した誤差率は 58.7%であった. しかし, 走行線はディスプレイに表示されているように, リアルタイムで予測できている. つまり画像処理に関して言えば, 4 つのラインでも, 十分に適応が可能である.

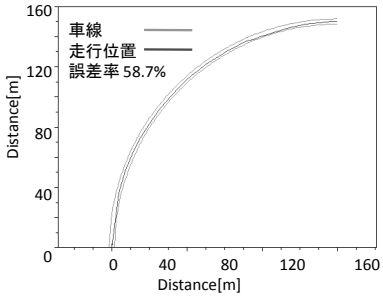


図 17 比例制御による動作の軌跡

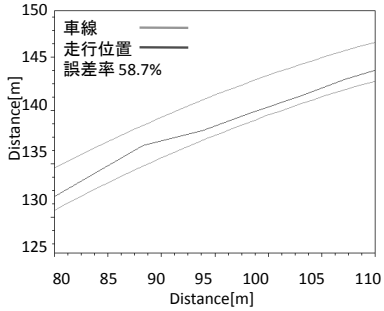


図 18 比例制御による動作の軌跡 (拡大図)

5.2.2　PID 制御による動作　図 19 に今回設計した PID 制御のブロック図を示す. ここで, Kp は比例要素, Ki は積分要素, Kd は微分要素である. それぞれのパラメータの値は実験を行いながら適宜調節を行った. 今回の実験で用いたパラメータは以下の通りである.

$$Kp = 0.8 \quad Ki = 0.01 \quad Kd = 0.3$$

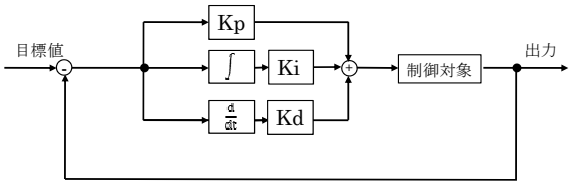


図 19　PID 制御のブロック図

PID 制御では比例要素に加え, 定常偏差を抑えるための積分要素, 応答速度を向上させるための微分要素を加えている. PID 制御を行った結果を図 20 に示す. また, カーブ終端付近の拡大図を図 21 に示す. 細かい範囲でジグザグに進んでいるが, 比例制御ほど大きな変化が無いことがわかる. また, PID 制御での誤差率は 47.1%であった.

両者の誤差を比較した図を図 22 に示す. 縦軸は道路の中心からのずれを表している. PID 制御は比例制御（P 制御）と比較して, 誤差率が 11.6%改善された. 性能の評価としては, 一部の点で設計範囲を超える出力が見られるが, 比例制御より高い精度で制御できていることが分かる.

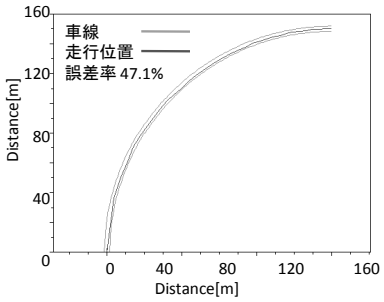


図 20　PID 制御による動作の軌跡

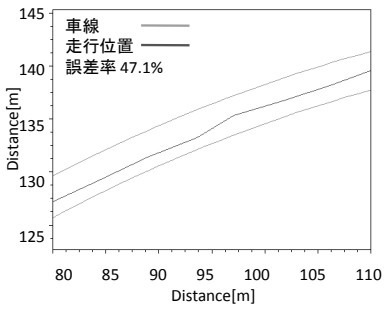


図 21　PID 制御による動作の軌跡 (拡大図)

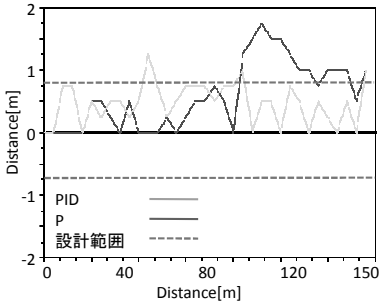


図 22　誤差による比較

動作開始時点で比例制御側の精度が高くなっているが, これは制御設計の問題ではなく, 画像処理部において車線を誤認識していると考えられる. この問題は, 2 値化を行う部分で発生しているため, 今後は 2 値化のしきい値決定手法に微分ヒストグラム法などを用いることで改善することが必要である. また, 今回は車の横幅を 2.5m, 道路の横幅を 3.5m として設計したので, 許容できる範囲を実際の道路で考えると, どちらの制御法に関しても車体の一部が車線からはみ出してしまっていることになる. この原因としては, 予測された走行線の分解能が 3 ビットしか無いため, 画像処理の部分で細かい判定が行えていないことが大きな要因として挙げられる. 今後, 制約の少ないハードウェアで実現できれば, この部分の誤差を低減することが出来ると考えられる.

6.　結論

本研究では次の 4 項目を実施した.

1. システムの構築と実機の製作
2. アルゴリズムのハードウェア化
3. FPGA での車線検出, 走行線予測
4. マイコンでの簡単な車輪型ロボット制御

画像処理を行う部分と, 走行制御を行う部分とを, 二つに分けてシステムを構築した. FPGA で走行線を予測することに関しては, ソフトウェア上でシミュレーションを行ったように求めることができない代わりに, 新たなアルゴリズムを開発した. そのアルゴリズムを実際に組み込み, 車線を検出し, 走行線を予測することができた. また, 予測された走行線より, 2 つの制御手法で車輪型ロボットを動作させるところに至る. 今後の課題として, FPGA での画像処理に関しては, 車線の抽出精度が信頼できるレベルではないのでさらなる検討が必要である. 他にも, FPGA での走行線予測に関しては, ハードウェアの都合上, ライン 1 とライン 4 を用いることができていない. そのため, 今回設計したハードウェアだけにこだわらず, 順序処理を行える別のハードウェアでシステムを開発していくことも検討していく.

参考文献

(1) 警視庁: 警視庁ホームページ警視庁の統計平成 22 年 http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/toukei/bunsyo/toukei22/k_tokei22.htm, 2011

(2) 益田祐次: 「レーンキーピングアシストシステムの開発」, 神戸高専研究紀要第 48 号 pp.69-74, 2010

ミヤコグサ ALMT1 遺伝子の性状解析

下村　憲司朗*,　米田　裕基**

Characterization of *Lotus japonicus* ALMT1 gene

Kenshiro SHIMOMURA*, Yuki YONEDA**

ABSTRACT

Aluminum activated malate transporter (ALMT1) was identified from some plant kinds as the protein which participates in secretion of malate in Al-tolerance mechanism. But character of ALMT1 in a leguminous plant is not understood well. Here, we further characterize *LjALMT1*, an *Lotus japonicus* aluminum-activated malate transporter gene, to clarify its specific role in Al stress responses. To investigate Al-inducible changes in gene expression and location, an LjALMT1 promoter::GUS reporter construct was generated and used to transform wild-type *L. japonicus*. With Al treatment, *LjALMT1* was expressed more strongly and widely within root apices and in the central core in mature portions of the root. Although *LjALMT1* showed similarity to *AtALMT1* in gene expression conditions, the clear difference was shown in comparison of an amino acid sequence. The ALMT1 in a leguminous plant may play roles also not only to Al-tolerance mechanism but to symbiosis with rhizobium.

Keywords: acid soil, Al stress, Al tolerant mechanism, legume, symbiosis

1. 緒言

酸性土壌は熱帯･温帯の農耕地の 30～40%を占め，その面積は 3.95 億ヘクタールといわれている(1)．酸性土壌中の植物の生育阻害となる最も大きな要因は，酸性化に伴って溶解する Al イオンである．土壌を構成する金属元素の中で Al が最も多く存在し，約 7%を占めている．Al は土壌が酸性になるに従い，毒性の強いイオンとして溶出し，pH が 4.5 以下の土壌では最も毒性が強い Al^{3+} として存在する．一般に Al イオンは根の根端に集積することで縦方向への伸長を阻害し，横方向へと肥大化させてしまう(2)．結果として，根の正常な形態形成が阻害され，作物の生育に影響が及ぶ．そのため，マメ科植物等の根圏で根粒菌と共生窒素固定を行う作物は特に影響を受けると予想される．

植物は動物と異なり，土壌からのストレスを移動によって回避することができないため，自らストレスを抑制する方法を持つ．植物の Al イオン耐性機構には大別して，Al イオン排除機構と細胞内抵抗性機構の二つの方法があるが，有機酸分泌による Al イオン排除機構が主要なものと考えられている．植物は一般的に，Al イオンに対し根圏でリンゴ酸やクエン酸等の有機酸を分泌する事で無毒化する事が知られている．シロイヌナズナやコムギの場合，Al ストレスシグナルを感知すると，ALMT1（アルミニウム誘導性リンゴ酸トランスポーター）が誘導され，根からリンゴ酸を分泌し，Al イオンとキレート結合を形成させることで根内への Al イオンの取り込みを抑制する事が報告されている(3)．また，*ALMT1* 遺伝子の発現にはプロトン感受性転写因子，STOP1 が関与する(4)．一方，オオムギは AACT（アルミニウム活性型クエン酸トランスポーター）が関与し，クエン酸を分泌することが報告されている(5)．

主要作物の一つであるマメ科植物についてもエンドウ，ダイズを中心に Al イオン耐性機構の解析が行われてきたが，遺伝子資源や形質転換法の整備が不十分であることから，解明に至っていない．一方，マメ科のモデル植物であるミヤコグサは Al イオン耐性機構の分子レベルの解析を可能にする遺伝子資源が整っている．我々はシロイヌナズナ *AtALMT1*（EU181365）と *AtSTOP1*（AB300237）の塩基配列を用いたミヤコグサ EST およびゲノムデータベース検索により，塩基配列上類似した遺伝子を発見し，ミヤコグサ *ALMT1* 遺伝子と *STOP1* 遺伝子（以下 *LjALMT1*，*LjSTOP1*）が根で発現している事を報告している(6)．

本研究では，LjALMT1 のアミノ酸配列，発現部位，Al イオン誘導性について AtALMT1 との比較を行った．

*神戸高専応用化学科　准教授
**神戸高専　応用化学専攻

2. 材料および方法

2.1 大腸菌とアグロバクテリウムの培養　コンストラクト作成のための大腸菌は *E.coli* DH5α，ミヤコグサ形質転換のためのアグロバクテリウムは *Agrobacterium tumefaciens* LBA4404 を用いた. 大腸菌の培養には LB 培地，アグロバクテリウムの培養には YEM 培地を使用した.

2.2 LjALMT1 プロモーターのクローニング

LjALMT1 遺伝子領域を含むゲノムクローン（CM000361）を鋳型とし，転写開始点の上流約 3 kbp を PCR により増幅した. 反応には Promega 社の Gene taq NT，Forward primer (5’-CTTCTGTAGAATCTCGGAC TAAACC-3’)，Reverse primer (5’-GATTTGATATAGAG GAGAAAAAACC-3’) を用い, 反応条件は 94℃を 15 sec、55℃を 15 sec、72℃を 2 min、30 サイクルとした.

PCR 産物を電気泳動で確認後，Promega 社の pGEM easy vector system で TA クローニングした.

2.3 ミヤコグサ形質転換体作出　クローニングした *LjALMT1* プロモーター領域を pCAMBIA1301 ベクターの GUS の上流に導入し，*A. tumefaciens* LBA4404 に形質転換した.

作成したアグロバクテリウムを使用し，アグロバクテリウム法によりミヤコグサの形質転換体を作出した. 遺伝子組換え個体の作出は以前に使用した手法を用いた[7]. 形質転換個体の選抜は再生個体から抽出したゲノム DNA を鋳型とし，GUS 遺伝子に対するプライマー（GUS Forward primer 5’-TATCACCGTGGTGAC GCATGT-3’，GUS Reverse primer 5’-TTACATTGAC GCAGGTGATCG-3’）を用いた PCR により実施した.

2.4 GUS 染色　各ミヤコグサ形質転換体を Al イオン (200 μM)存在下・非存在下で 1 週間栽培した. この各ミヤコグサ形質転換体から切り取った根を GUS 染色液（X-glucuronide 1.9 mM, フェリシアン酸カリウム 0.5 mM，フェロシアン酸カリウム 0.5 mM，TritonX-100 0.3%，メタノール 20%，リン酸ナトリウム 100 mM, pH 7.0）に浸し，真空下で 2～3 分静置した後，37℃の暗所で 1 時間インキュベートした. 染色後，試料を 100%エタノールに一晩浸し，漂白を行った.

3. 結果

3.1 LjALMT1 アミノ酸配列比較　ミヤコグサゲノムクローン（CM000361）より見出された *LjALMT1* 遺伝子配列より予測したアミノ酸配列とシロイヌナズナ，ダイズより報告されている ALMT1 アミノ酸配列を用い，Multiple aliment 解析（NCBI COBALT program）を行った（Fig. 1）. Multiple aliment 解析の結果, LjALMT1 と GmALMT1 のアミノ酸配列の相同性は 75.4%，LjALMT1 と AtALMT1 のアミノ酸配列の相同性は 41.7%であり，高い相同性を示した.

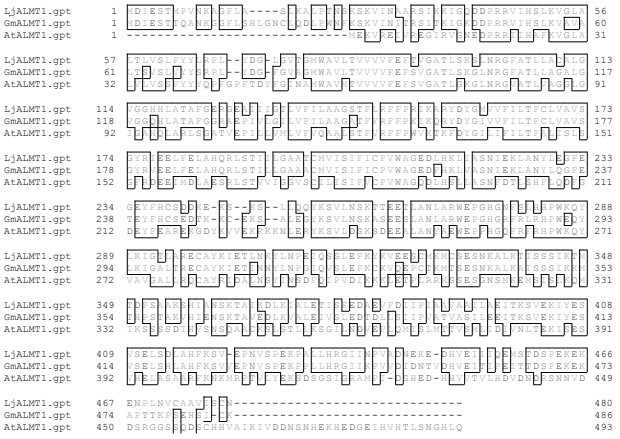


Fig. 1 ミヤコグサ（Lj），ダイズ（Gm），シロイヌナズナ（At）ALMT1 アミノ酸配列の Multiple aliment 解析. 四角はミヤコグサ ALMT1 と一致したアミノ酸を示す.

また，ミヤコグサゲノムから予測されるアミノ酸配列と既に報告されている ALMT1 アミノ酸配列から作成した系統樹では，双子葉植物の ALMT1 と単子葉植物の ALMT1 は別のグループを形成し，さらにマメ科植物の ALMT1 は独自のグループを形成することが明らかとなった（Fig. 2）.

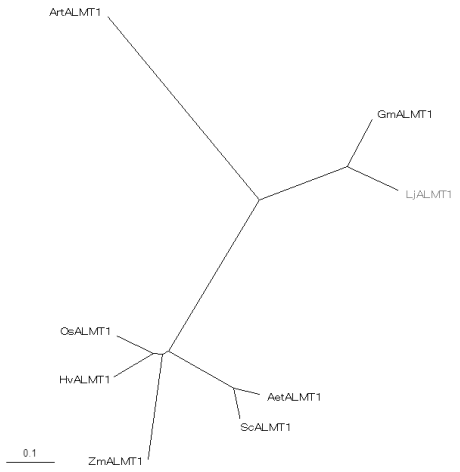


Fig. 2 ALMT1 系統樹. *Lotus japonicus*（Lj），*Glycine max*（Gm），*Arabidopsis thaliana*（Art），*Oryza sativa*（Os），*Hordeum vulgare*（Hv），*Aegilops tauschii*（Aet），*Secale cereale*（Sc），*Zea mays*（Zm）の ALMT1 アミノ酸配列に対し，ClustalW 解析を行い，TreeView32 プログラムにより系統樹を作成した.

コムギの ALMT1 は細胞の原形質膜に局在していることが報告されていることから，TMHMM プログラムによる，膜貫通ドメイン予測を行った（Fig. 3）[8]. TMHMM 解析の結果, AtALMT1 の膜貫通ドメインは 5

個，同じマメ科植物の GmALMT1 と LjALMT1 の膜貫通ドメインは 6 個であることが予想された．

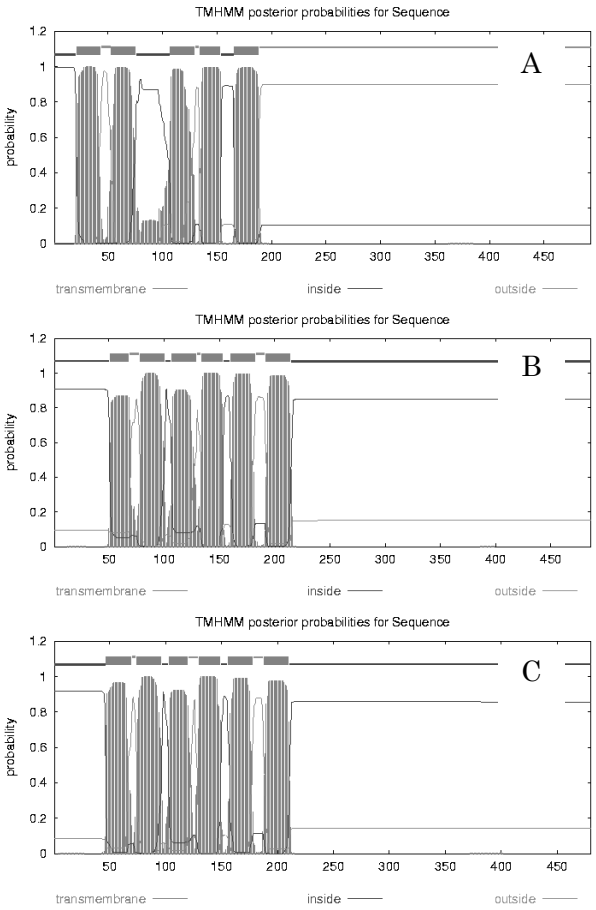


Fig. 3 TMHMM Server v. 2.0 プログラムを用いた ALMT1 膜貫通ドメインの予測．A は AtALMT1，B は GmALMT1，C は LjALMT1 を示す．

3.2 形質転換個体の導入遺伝子の確認　*LjALMT1* は根で発現することが定量的PCR解析で確認されている[6]．*LjALMT1* の詳細な発現解析をプロモーターGUS 法によって実施するために，*LjALMT1* のプロモーター領域に GUS 遺伝子を連結したコンストラクト（LjALMT1 pro::GUS）をアグロバクテリウム法でミヤコグサに導入した（Fig. 4）．

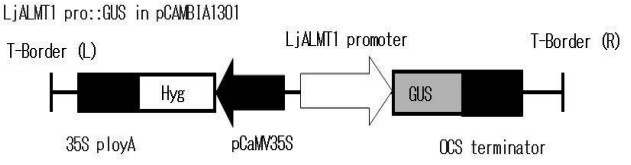


Fig. 4 LjALMT1 pro::GUS コンストラクト．

各形質転換体（APG-1-17）の葉から抽出したゲノム DNA を鋳型とし，GUS 遺伝子断片（約 500 bp）が増幅するように設計されたプライマーを用いて PCR 反応を行った．反応後に電気泳動により，GUS 断片の増幅の確認を行った（Fig. 5）．独立した形質転換体として得られた APG-1-17 の全てで，GUS 遺伝子断片が増幅されたことより，全ての形質転換個体中に *LjALMT1* promoter::GUS コンストラクトが導入されていることを確認した．

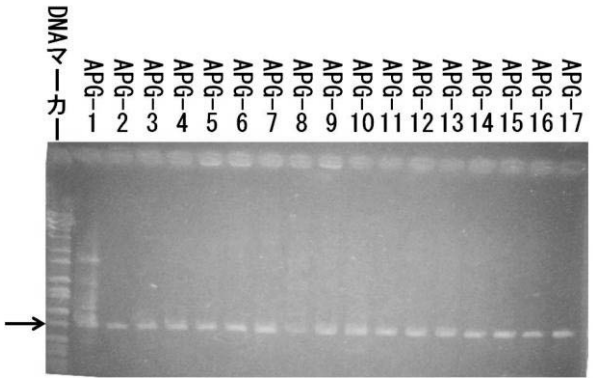


Fig. 5 形質転換中の導入遺伝子の確認．APG-1-17 から抽出したゲノム DNA を鋳型とし，500 bp のサイズで増幅するように設計された GUS プライマーを用いた PCR 反応液の電気泳動結果．矢印は 500 bp の位置を示す．

3.3 GUS 染色　LjALMT1 promoter::GUS コンストラクトの導入が確認された形質転換体を挿し木で増やし，200 μM $AlCl_3$ 添加と非添加で栽培後に GUS 染色を行った．代表的な染色結果（APG-15）を Fig. 6 に示した．Al イオンを添加した水耕液で栽培された APG-15 では根の先端が染色された．一方，Al イオン非添加時には染色は確認されなかった．APG5, 10, 11 は APG-15 と同様の染色パターンを示した（Table 1）．

Table 1 APG 形質転換体の GUS 染色結果．

APG	2	4	5	6	7	8	10	11	14	15
Alイオン存在下	○	○	○	×	○	×	○	○	×	○
Alイオン非存在下	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×

○は GUS 染色ポジティブ，×は GUS 染色ネガティブを表す．



Fig. 6 形質転換体（APG-15）の根の GUS 染色結果．A は $AlCl_3$ 添加条件で栽培した根端．B は $AlCl_3$ 非添加条件で栽培した根端．青線は 1 mm を表す．

4. 考察

これまで, 植物の Al イオン耐性機構はシロイヌナズナやコムギを中心に解析され，リンゴ酸分泌型の耐性機構に関わる ALMT1 や STOP1 が報告されている．一方, 主要作物の一つであるマメ科植物の Al イオン耐性機構は未知の部分が多い．

本研究では，*LjALMT1* 遺伝子の詳細な発現解析を実施し, *LjALMT1* 遺伝子はリンゴ酸分泌型の Al イオン耐性機構を有するシロイヌナズナの *AtALMT1* と同様に，Al イオン存在下，および根の先端で発現することを明らかにした．この結果から LjALMT1 が Al イオン誘導性のリンゴ酸トランスポーターであり，Al イオン耐性機構に関与することが示唆された．

LjALMT1 遺伝子の発現パターンは *AtALMT1* 遺伝子と高い類似性を示したが，アミノ酸配列比較においては AtALMT1 よりもダイズの GmALMT1 と高い相同性（75.4%）を示した．また，系統樹解析では LjALMT1 は GmALMT1 と独自のグループを形成していることに加え，膜貫通ドメイン予測結果でも AtALMT1 とは異なり，6 個の膜貫通ドメインを有する点で一致していた. GmALMT1 がリンゴ酸分泌型の Al イオン耐性機構に関わることは証明されていないが，高い類似性を示す *LjALMT1* が Al イオン誘導性であったことから，ダイズもリンゴ酸分泌型の Al イオン耐性機構を有することが予想される．

ダイズやミヤコグサに代表されるマメ科植物にとって，リンゴ酸は共生窒素固定のパートナーである根粒菌に供給する炭素源でもある．また，根粒形成時にミヤコグサ ALMT1 の発現が誘導されることが報告されている[9]．そのため，ALMT1 は Al イオン耐性機構だけでなく，共生窒素固定においても重要な役割を有するのかもしれない．

謝辞

本研究で使用したミヤコグサゲノムクローンはナショナルバイオリソースプロジェクトより提供を受けた．ここに記して謝意を表す．

参考文献

(1) Baligar C., Ahlrichs L. : “Nature and distribution of acid soils in the world. ”, In Schaffert RE. ed., Proceeding of the Workshop to Develop a Strategy for Collaborative Research and Dissemination of Technology in Sustainable Crop Production in Acid Savannas and other Problem Soils of the World. Purdue University 1-11, 1998.

(2) Sasaki M., Yamamoto Y. et al. : “Lignin deposition induced by aluminum in wheat (*Triticum aestivum*) roots”, Physiol. Plant. 96: 193-198, 1996.

(3) Sasaki M., Yamamoto Y. et al. : “A wheat gene encoding an aluminum-activated malate transporter”, The Plant Journal. 37: 645-653, 2004.

(4) Iuchi S., Koyama H et al. : “ Zinc finger protein STOP1 is critical for proton tolerance in Arabidopsis and coregulates a key gene in aluminum tolerance”, Proceedings of National Academy of Science, 104(23): 9900-9901, 2007

(5) Furukawa J., Yamaji N. et al. : “ An aluminum-activated citrate transporter in Barley”, Plant Cell Physiol. 48(8):1081-1091, 2007.

(6) Shimomura K., Katada N., et al. : “Aluminum Ion Response Comparison between Domestic Lotus japonicus Lines”, 神戸高専紀要, 48: 101-104, 2010.

(7) Shimomura K. Nomura M. *et al*., : “Novel RING Finger Protein, is Required for Symbiotic Interactions Between *Mesorhizobium loti* and *Lotus japonicus*”, Plant Cell Physiol. 47, 1572-1581, 2006.

(8) Yamaguchi M., Sasaki T. *et al*., : “Evidence for the Plasma Membrane Localization of Al-activated Malate Transporter (ALMT1) ”, Plant Cell Physiol. 46, 812-816, 2006.

(9) Kan T., Takanashi K. . *et al*., : “Expression and functional analysis of ALMT in Lotus japonicas”, 1st Asian Conference on Plant-Microbe Symbiosis and Nitrogen Fixation

明石川河口における地形・水環境の時空間変動

新井　淳平*　宇野　宏司**

Temporal and Spatial Variability of Topography and the Water Environment in Akashi River Mouth

Junpei ARAI*　Kohji UNO**

ABSTRACT

An urban river runs trough the area which is concentrated population and assets. In this study, we propose a saving, economic and safe measurement on the topography change and temporal and spatial distribution of water environment at the urban river mouth. Study site is Akashi river mouth in Hyogo prefecture, JAPAN. First, we observe the shape of the river-mouth bar and sediment property using a hand-held camera and portable GPS equipment. Second, we tried to understand the topography change and the temporal and spatial distribution on water environment such as water temperature and salinity, the measurement by the radio control boat was carried out. Finally, the continuity monitoring at the fixed point was conducted. It was clarified the bar has grown and grown until the flooding. After the flooding, the sediment on the bar became coarse. We also confirmed the relationship between the shape of river mouth and topographic feature and water environment.

Keywords: river mouth, fish finder, a radio-controlled boat, portable GPS

1.　はじめに

都市中小河川の地形及びその水環境は近年多発する局所的な豪雨などによる短時間での変動が大きく，その地形変化はダイナミックである．河口に形成される砂州は，自然の防波堤として河道内への波浪の浸入を防ぐ一方で塩水の遡上を阻み，アユ等の仔稚魚の生育に不可欠な静穏な汽水区間の形成を妨げることもある．また，洪水疎通能の低下要因ともなる(1)．このように都市河川は人口・資産が集中するといった点で自然河川とは大きく異なり，治水・水環境保全の両面でメリット，デメリット双方をもつ事から適切な管理が必要と考える(2)．しかしその基本となる河口地形動態を把握するための簡易で経済的な計測手法は確立されていない．

本研究は兵庫県を流れる二級河川・明石川（流路延長 26km, 流域面積 126.7km^2）の河口域（図-1 参照）を対象とする．本河口域は 2010 年の夏季から冬季にかけて河口砂州が発達し，2011 年 1 月には河口閉塞状態にあったが，2011 年 6 月に台風接近に伴う増水で砂州がフラッシュされた．このように短期間で変動する河口域において，ラジコンボート等を用いた省力的な現地観測手法(3) 等によって，地形・水環境の時空間変動を把握することを本研究の目的とする．

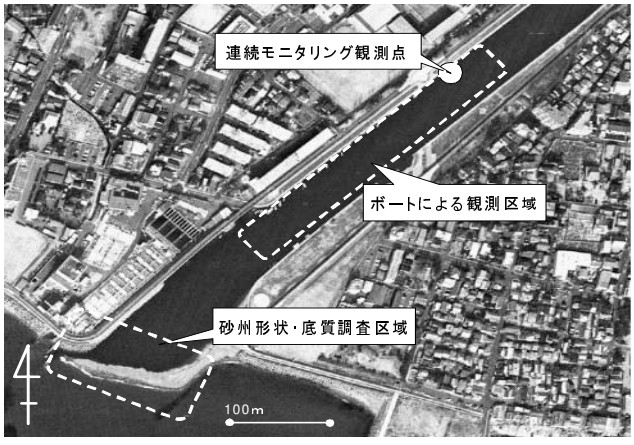


図-1 調査地点

*　専攻科　都市工学専攻
**　都市工学科　准教授



図-2　観測装置（ラジコンボート調査）

2.　調査概要

図-1 に現地調査地点となる明石川河口を示す. この地点において 2010 年 2 月より, 月1回の地形把握に関する集中調査, 塩分挙動の連続モニタリングを実施した.

2.1　河口砂州の動態把握調査

明石川河口先端の左岸堤防上より河口付近に形成される砂州の形状をデジタルカメラ（COOLPIXP6000, NIKON 社）で撮影し, その地形変化を把握した. また, 河口に形成される砂州の汀線位置を携帯型GPS(GPSmap 60CSX, GARMIN 社）で記録するとともに砂州前面・背面において表層砂を採取し, 粒度分析試験(JIS Z 8801)を実施した.

2.2　ラジコンボートを用いた河川地形・水質測定

一般的に河川地形や水質の把握には, 調査船による観測が実施されるが, 明石川のような水路幅や水深が十分でない河川では困難をともなう. そこで本研究では図-2 に示す観測機器を搭載した浮き輪をラジコンボート（かもめ, コデン社）で曳航することによって安全かつ省力的に河川地形と水質を把握することを試みた（図-3 参照).

河床地形(水深）の把握に関しては GPS 魚群探知機（Fish Elite 500c, Eagle 社), を用いて, 時刻・緯経度・水深を測定間隔 1 秒で記録し, 各観測値を比較するために潮位補正を行った.

一方, 水質（水温・塩分）の把握に関しては, 自記録式塩分計（COMPACT-EM, JFE アドバンティック社）を用いた. しかし, 本研究で使用する自記録式塩分計では測定時の位置情報を記録できないため, 携帯型 GPS（GPSmap60CSX, GARMIN 社)を搭載し, 水質測定時の時刻・緯経度を測定間隔 1 秒で記録し, 自記録式水温塩分計に記録された時間情報と携帯型 GPS の時間情報を対応させることで水質測定時の位置情報を割り出した.

また, 観測日によっては風波によって観測機器を搭載した浮き輪が上下に振動する場合があり, これを補正するため, 浮き輪底面に自記録式水位計 (HOBO U-20, onset 社）を取り付けることで, 浮き輪の振動を記録し水深補正の際に用いた. 搭載したラジコンボートを用いて河口～上流 300ｍ区間内の地形・水温・塩分の空間分布を調べた.



図-3　調査時の様子（ラジコンボート調査）

2011 年 4 月



2011 年 5 月



2011 年 6 月



図-4　河口砂州の変化（定点撮影）

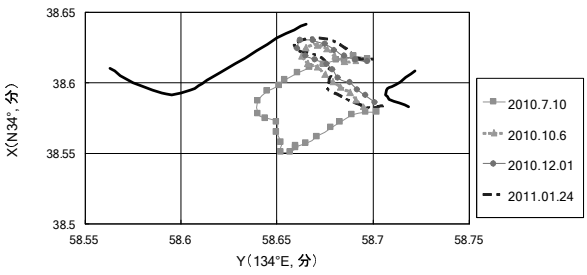


図-5(1)　河口砂州の変化，フラッシュ前（GPS 踏査）

2.3　水位・水温・塩分の連続モニタリング調査

明石川における水位と水質変化の応答性を把握するため, 明石川河口より約 800m 上流の右岸護岸下に自記録式水位計（HOBO U-20, onset 社), 水温塩分計(COMPACT-EM, JFE アドバンティック社)を設置し, 水深, 塩分, 水温を 2 分間隔で計測した.

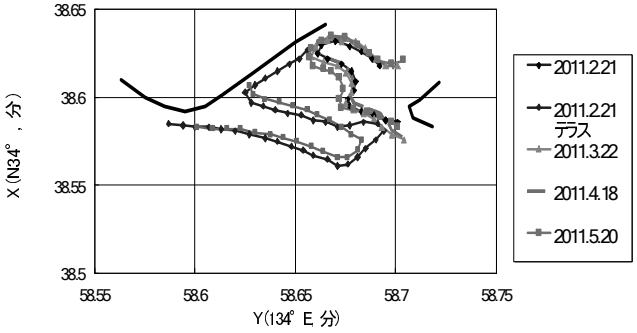


図-5(2)　河口砂州の変化，フラッシュ前（GPS 踏査）

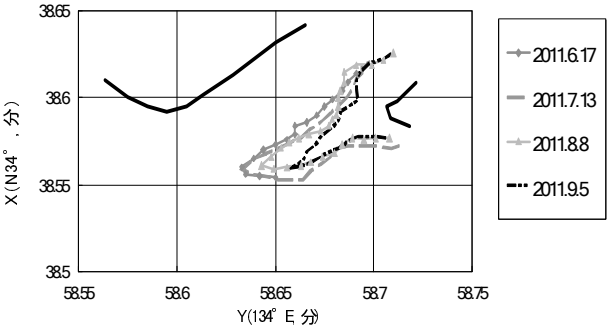


図-5(3)　河口砂州の変化，フラッシュ後（GPS 踏査）

表-1　砂州底質採取地点

地点名	地点内容
a	砂州背面付け根部
b	a-c中間点
c	砂州先端部
d	c-e中間点
e	砂州前面付け根部

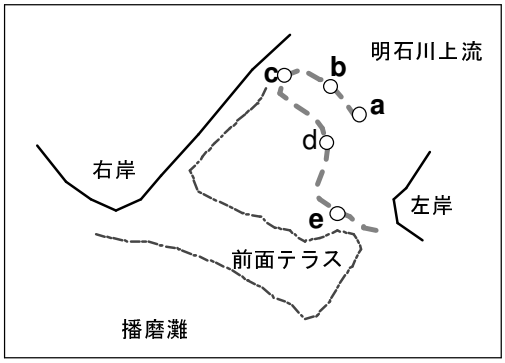


図-6　砂州底質採取地点

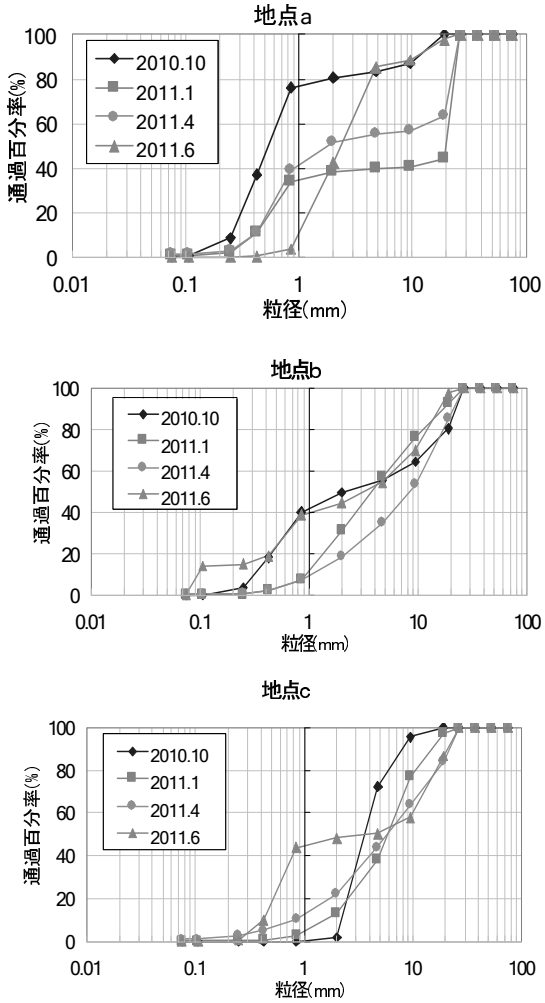


図-7(1)　砂州底質の粒径加積曲線

3.　調査結果

3.1　河口砂州の動態把握調査

図-4 に明石川河口左岸定点上で撮影された河口砂州の様子を示す．図-5(1)～(3)にフラッシュ前とフラッシュ後の砂州形状推移を示す．本河口では 2010 年 9 月頃から 2011 年 5 月にかけて，砂州が左岸から右岸にかけて伸長していたが，冬季に発達する波浪の影響で前面にテラスを形成し，閉塞度を強めていた．しかし，2011 年 5 月 29 日から 6 月 1 日にかけて接近した台風 1102 号の接近に伴う豪雨による出水で砂州が完全にフラッシュされた．またフラッシュ後もさらに左岸汀線から岸沖方向に設置される石積み部に沿って残っていた砂州も次第に消長していくことが確認された．

図-7(1)，(2)に砂州表層砂の粒径加積曲線を示す．表-1 と図-6 にその表層砂の各種採取地点を示す．なお，ここで示す砂州の河川側・海側といった位置については，砂州の変形に応じて移動するため，定点での比較にはならないことを断っておく．

地点 a は砂州背面付け根部であり，他の地点と比べて平均粒径が小さいが，2010 年秋季から冬季にかけて

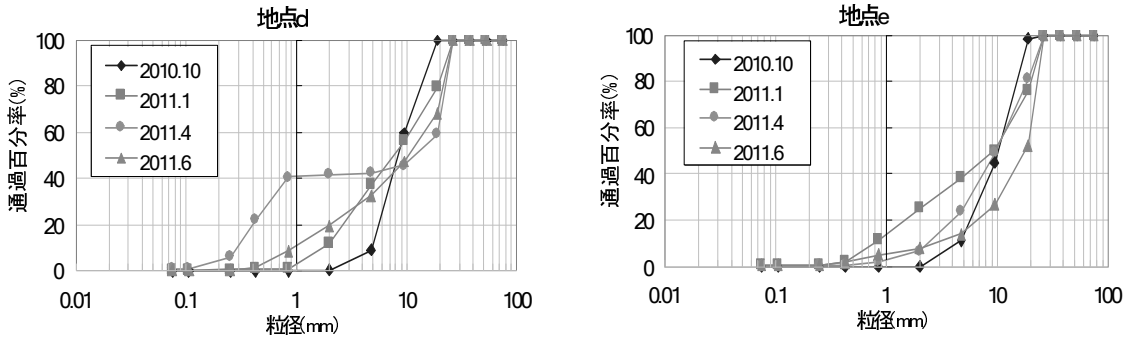


図-7(2) 砂州底質の粒径加積曲線

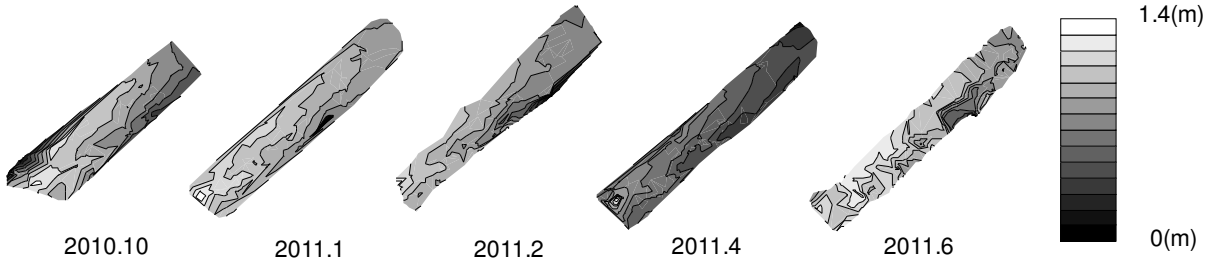


図-8　ラジコンボート調査結果（水深分布図）

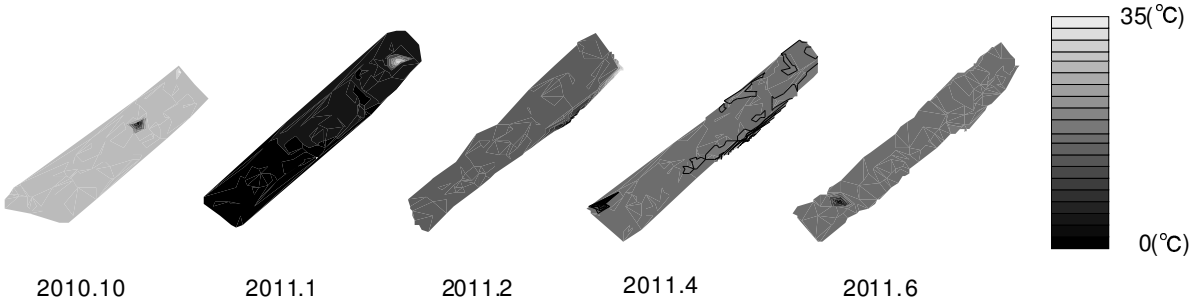


図-9　ラジコンボート調査結果（水温分布図）

粗粒化していく傾向が伺える．この地点は振幅や波による流れを受ける力が小さいが，水位低下時に細粒分が風波によって運び去られることで粗粒化が進んだと予想できる．2011 年 4 月とフラッシュ後の 6 月にかけて粗粒化している様子が見受けられるが，この理由としては砂州がフラッシュした際の洪水による高掃流力が要因となり，粗い粒径の底質が堆積したものと考えられる．その後，洪水末期になり掃流力が低下することで細かい底質が堆積したものと考えられる．

地点 b は静穏な砂州背面であるが，付け根部と比べ流れによる一定の外力を受けると考えられるので，各月の粒度に分布の粒径変化に大きな変動がないものと推察される．

地点 c は砂州の先端であり，次第に伸長していく様子が見られた地点である．ここでは直接波浪の影響は受けにくいものの，流れの速い狭水路に面するため砂州背面に比べて平均粒径が大きくなる傾向がみられた．

地点 d，**地点 e** は砂州前面地点であり，常に波浪の影響を受けるため，観測当初から礫分が多く含まれていた．しかし，2010 年 12 月頃に前面テラスが形成されたことで，波浪による影響が弱まり，2010 年 10 月から 2011 年 4 月にかけて細粒化の傾向がみられた．なお，フラッシュ後の 2011 年 6 月はフラッシュ前と比べ幾分粒径は大きくなっていた．

以上のことから，本河口域に発達する河口砂州を構成する底質は，様々な外力（波浪，潮汐，河川流）の履歴を示しているものと推察される．

3.2　ラジコンボートを用いた河川地形・水質測定

図-8 にラジコンボート調査で得られた水深の空間分布を示す．観測日時によって潮位が異なるため，各観測結果を比較できるように，平均水面基準の水深値に換算したほか，波による振動分を除去した．各図からは上流から河口かけて水深が深くなる傾向が伺える．また，明石川河口域では右岸沿いにみお筋が発達しているが，2010 年 1 月頃から 2011 年 4 月にかけてはこのみお筋を中心に堆積傾向にあることが確認できる．さらに，2011 年 4 月から 6 月にかけての水深の変化が顕著であるが，これは 2011 年 5 月末の台風接近に伴う

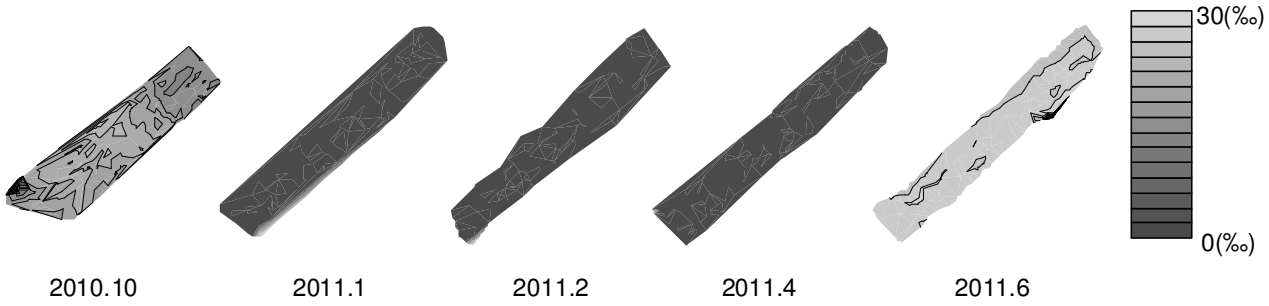


図-10　ラジコンボート調査結果（塩分分布図）

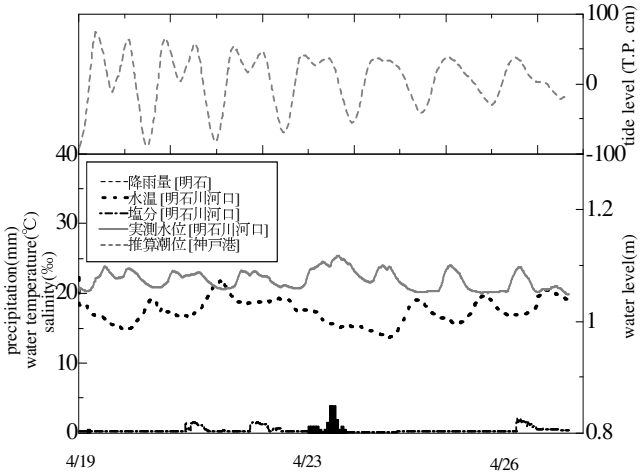


図-11　連続モニタリング調査結果（4/19～4/26）

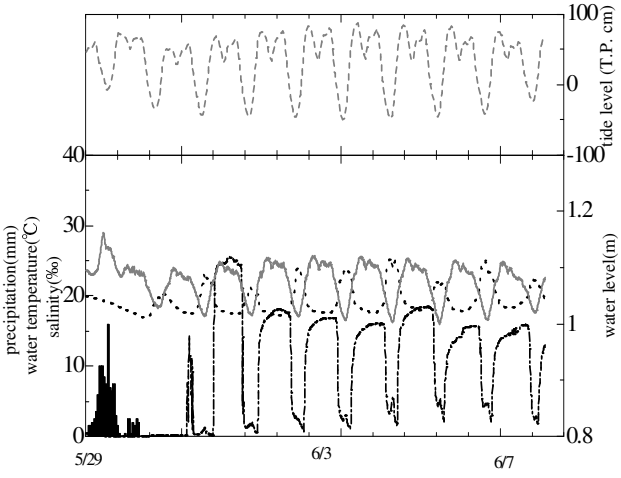


図-12　連続モニタリング調査結果（5/29～6/7）

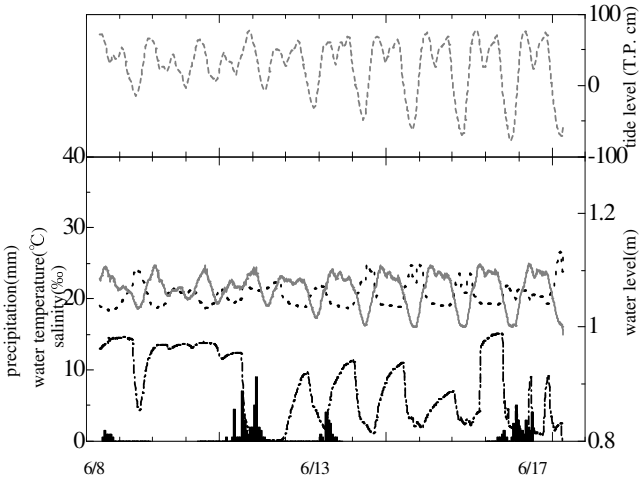


図-13　連続モニタリング調査結果（6/8～6/17）

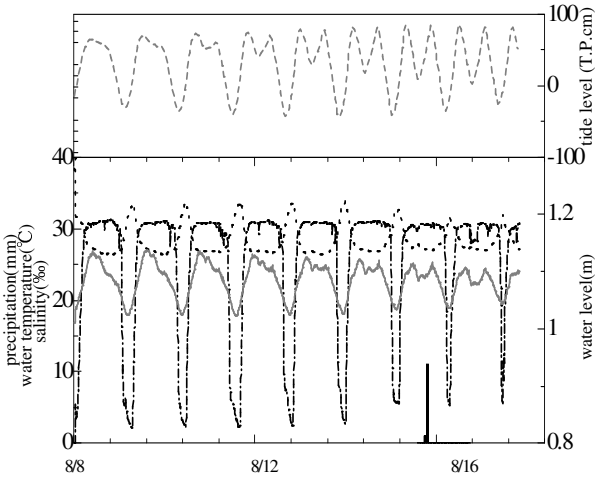


図-14　連続モニタリング調査結果（8/8～8/16）

洪水出水により，河床全般が侵食されたためであると考えられる．

図-9 にラジコンボート調査で得られた水温の空間分布を示す．各図から河道内では一様な水温分布が確認できる．秋季から冬季にかけては水温が低下し，冬季から春季にかけては水温が上昇するといった季節変化の様子が伺える．

図-10 にラジコンボート調査で得られた塩分の空間分布を示す．河口閉塞状態であった冬季は，下流からの塩分供給が絶たれ河道内の塩分が一様に低下し，淡水化している傾向が伺える．また，フラッシュ前後の塩分の変化も顕著であり，2011 年 6 月には河口閉塞の解消により，塩分の供給が急激に回復した様子が確認できた．

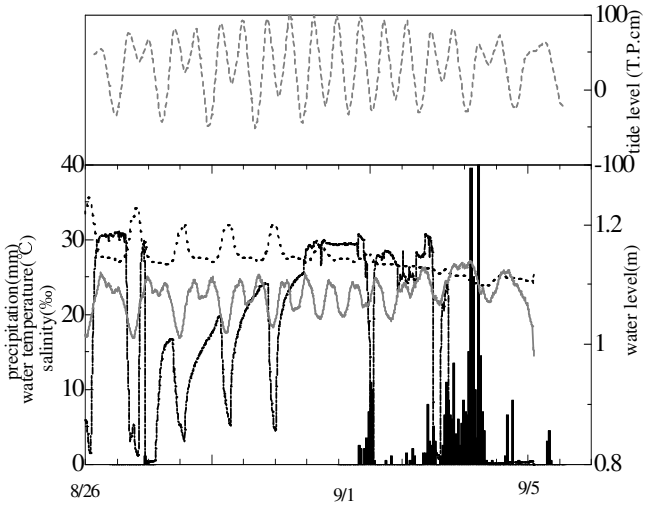


図-15　連続モニタリング調査結果（8/26～9/5）

3.3　水位・水温・塩分の連続モニタリング調査

自記録式水温塩分計及び水位計で得られたデータに加えて，気象庁データベースより実測潮位(神戸港)[4]と降雨量(明石地域)[5]の時系列変化を整理した.

図-11 に 2011 年春季の連続モニタリング結果を示す. 当時は砂州がフラッシュされる前で河口が閉塞状態であったため，大潮のような潮位振幅が大きな日でも塩水の遡上は確認されていない.

図-12 に 2011 年 5 月末の連続モニタリング結果を示す．5 月末にまとまった降雨が記録され，洪水時の砂州の堰き止めによる水位上昇や塩分低下が確認できた. その後水位上昇に伴い，塩分供給の様子がみられた. すなわち，この時点で砂州がフラッシュされたと考えられる.

図-13，**図-14** に 2011 年 6 月及び，8 月の連続モニタリング結果を示す．6 月に降雨が記録された日には塩分が低下し，河川からの出水が確認された．また，小潮時でも塩分の供給が確認されるようになった.

図-15 に 2011 年 9 月の連続モニタリングの観測結果を示す．9 月 4 日にも台風 1102 号による接近し豪雨が観測されており，出水による塩分低下が顕著であった. しかし，**図-11** の 5 月 29 日よりはるかに上回る降雨量が記録されたにもかかわらず，9 月 4 日の水位上昇は低くなっていた．このことから 2011 年 5 月期は，砂州の発達によって河川上流からの出水が妨げられていたと考える.

4.　まとめ

明石川の河口域の現地調査の結果により，以下のことがわかった.

(1)明石川左岸に形成される河口砂州は 2010 年 4 月までは大きな出水もなかったこともあり発達を続けていたが，2011 年 5 月末の台風接近による豪雨でフラッシュされた.

(2)明石川河口の河道地形は砂州に比べ，大きな変化はなかったものの，河口が閉塞状態にあれば堆積する傾向が確認できた．砂州がフラッシュされると河床も侵食され，アユ等の仔稚魚等の生育環境にも大きな影響を及ぼすことが予想される.

(3)明石川河口の水温・塩分空間分布についても，閉塞が進む冬季には淡水化していた．砂州がフラッシュされると水環境の激的な変化がもたらされるため，生物環境にも影響があるものと考えられる.

現地調査の結果,明石川の河口地形･水質は年間を通して大きく変化していることが明らかとなった.これらの調査はいずれも数名の人員で実行可能であり今後の都市河川河口域の省力的な現地モニタリング手法としての活用が期待できる.

参考文献

(1)佐川卓也，大谷靖郎，市川真吾，武内慶了，山下武宣：河口砂州フラッシュの再現計算と要因分析，水工学論文集，第 51 巻，2007.

(2)室田明：河川工学，技報堂出版，318p，1986.

(3)新井淳平，宇野宏司，辻本剛三，柿木哲哉：都市河川河口の地形変化と塩分挙動の応答性，土木学会関西支部年次学術講演会概要集 CD-ROM，第 II 部門 II-32，2010.

(4)気象庁 潮位観測情報
http://www.jma.go.jp/jma/menu/seamenu.html

(5)気象庁 過去の気象データ
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php

植生による飛砂の捕捉効果

中西　宏彰*　宇野　宏司**

Effect on Trapping the Blown Sand by Vegetation

Hiroaki NAKANISHI*　Kohji UNO**

ABSTRACT

Some of the natural beaches in the Seto Inland Sea are expected to have a key role as shore protection facility. However, temporal - spatial variation of topography change and sediment property on the beach surface and trapping effect of blown sand by vegetation are still not well understood. In this study, laboratory the experiments and field observations in the Narugashima Island in the vicinity of AWAJI Island in Japan were carried out. In the laboratory experiments, it is clarified that the greater density of vegetation has a beneficial effect on trapping the blown sand. On the other hand, in the field observation, we confirmed the vegetation growing in the vicinity of back beach affects on the sediment transport and local topography change. This is a similar trend observed in laboratory experiment's results.

Keywords: vegetation, trapping effect, sediment transport, field observation, seasonal variation

1.　はじめに

兵庫県・淡路島沿岸において「淡路沿岸海岸保全基本計画」が 2002(平成 14)年 8 月に策定され，「人と自然が創り出す 21 世紀のくにうみ神話」「生命を守り・育む　花と緑あふれる海辺の創造」をテーマに海岸整備が進められている(1)．

本研究で対象とする成ヶ島は，淡路島南東部に位置する砂嘴状の島で，その形状から「淡路橋立」と言われ，瀬戸内海国立公園の一部に指定されている．本島はハマゴウ(*Vitex rotundifolia* L. fil.)，ハマウツボ(*Orobanche coerulescens* Steph.)，アイアシ(*Phacelurus latifolius* (Steud.) Ohwi)，オカヒジキ(*Salsola komarovii* Iljin)などの貴重な海浜植生の生育場となっているほか，アカウミガメの産卵地にもなっている．人工的な海岸線が多く存在している淡路島において，本島東岸は貴重な自然砂浜であり海岸保全施設としての役割が期待されている．しかしその時空間的な動態については十分に把握されていない．

このような背景を踏まえ，本研究では海浜植生群落が底質移動や局所的な地形変化に及ぼす影響を現地調査及び室内実験により定量的に把握することを試みた．

* 専攻科　都市工学専攻
** 都市工学科　准教授

2.　調査方法

2.1　底質粒径の算出方法　砂浜における平均粒径や粒度分布等の底質特性の把握については，通常現地で採取したものを実験室に持ち帰り，ふるい試験を実施するという手順がとられる．しかしこうした従来の調査方法では多大な労力と時間を要するため，調査域を縮小したり，サンプリング間隔を粗にしたりする必要があり，海岸底質の詳細な時空間変動を把握することは困難であった．

しかし近年，光学技術の目覚しい進歩により，市販のデジタルカメラでも高画質の写真画像が得られるようになり，これを利用した底質粒径の計測が提案されている(2)．

本研究では，Rubin(3)らが提案する，画像の空間的統計特性を考慮して平均粒径を算出する手法を用いて平均粒径を算出した．

本手法はまず，あらかじめ粒径のわかっている単一粒径からなる検定曲線用の底質サンプルを複数用意する．本研究では，底質（粒径 0.075～53mm）を 18 階級にふるいわけ，底質サンプルとした．次に各サンプルを**表-1** に示す条件で，デジタルカメラ(COOLPIX P6000, Nikon 社)を用いて撮影し，得られた各画像をもとに，基準となる矩形領域の輝度値と，その矩形領

表-1　撮影条件

項目	設定条件
撮影距離(本体～底質表層)	33cm
画像サイズ	3264x2448pixels
撮影モード	フラッシュ撮影

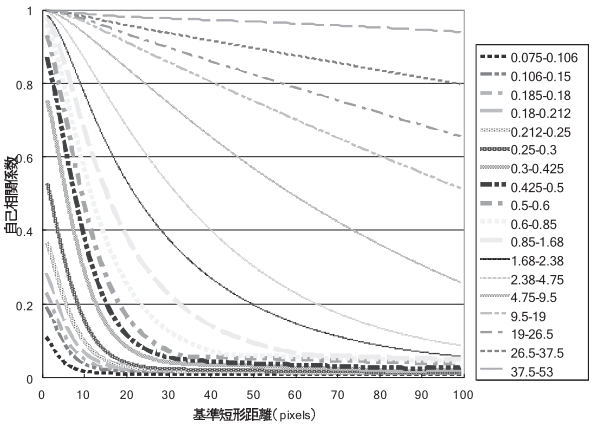


図-1　粒径別検定曲線

域から距離 k だけ離れた同サイズの矩形領域の輝度値との空間的自己相関係数を式(1)で算出した後，粒径別の検定曲線を作成した．

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

ここに，x_i, y_i ; 矩形領域内の画素 i での輝度値，$\bar{x}$，$\bar{y}$: 矩形領域内の平均輝度値である．

図-1 に得られた検定曲線を示す．これらの検定曲線は，サイズの異なる単一粒径から得られたものであるため，検定曲線どうしが交差することはない．

しかし現地で撮影した表層写真は混合粒径であるため，複数の検定曲線と交差することがある．このような混合粒径に対しては，複数の粒径が線形的に輝度分布に影響しているものとし，式(2)で示される線型方程式を解くことにより，平均粒径を算出した．

$$\begin{aligned} &a_{(1,1)}x_1 + a_{(1,2)}x_2 + \ldots\ldots + a_{(1,m)}x_m = b_1 \\ &a_{(2,1)}x_1 + a_{(2,2)}x_2 + \ldots\ldots + a_{(2,m)}x_m = b_2 \\ &\qquad\qquad \vdots \\ &a_{(n,1)}x_1 + a_{(n,2)}x_{_} \quad\; .. + a_{(n,m)}x_m = b_n \end{aligned} \quad (2)$$

ここに，a(k, j) : 画素間距離 k, j 番目の粒径の空間的自己相関係数（検定曲線），x_j : j 番目の粒径が含まれる割合，b_k : 画素間距離 k における自己相関係数（サンプル画像）である．なお，式（2）では，x_jのみが未知数となり，非負条件を有する最小二乗法[4]により決定することができる．

表 2　実験ケース

実験CASE	擬似植生設置位置	擬似植生格子間隔
CASE1	上流側100cm	12mm
CASE2	下流側100cm	12mm
CASE3	上流側100cm	4mm
CASE4	下流側100cm	4mm

格子間隔 12mm　　格子間隔 4mm

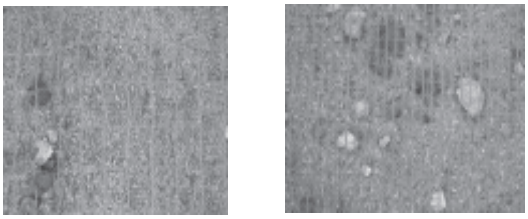


図-2　使用した擬似植生(園芸用ネット)

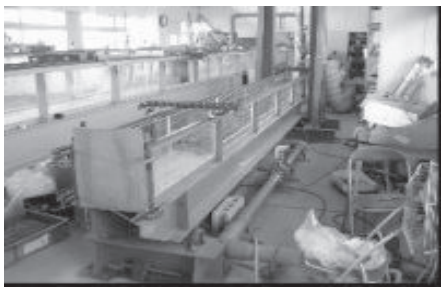


図-3　風洞実験装置



図-4　レーザー距離計(DTSTOA6, ライカ)

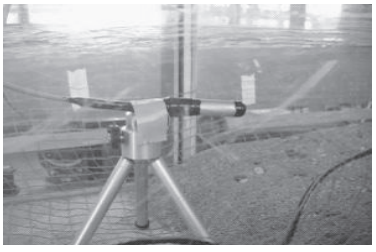


図-5　飛砂量測定機器(UD101, (有)中央工測)

2.2　室内実験　　飛砂による海浜地形変化とそれに対する植生の影響を検討するために，擬似植生(園芸用ネット)(**図-2**)を用いた室内実験を行った．風洞(縦

60cm, 横 60cm)(**図-3**)内の上流端に送風機を設置し，区間 200cm の移動床を設け 30 分間の通風試験を行った．通風前後で，風洞天端からの距離をレーザー距離計(DTSTOA6,ライＰ)(**図-4**)で測定し，地形計測を実施した．各実験では下流端に飛砂量測定機器(UD101，中央工測)(**図-5**)を設置し，植生の密度の違いによる飛砂量の変化を調べた．**表-2** に実験ケースを示す．

2.3　現地調査　　2010 年 3 月～2011 年 8 月にかけて，淡路島・成ヶ島東岸砂浜に拡がる砂浜(岸沖方向 30m，沿岸方向 750m)において以下の現地調査を実施した．

【沿岸方向 Line 調査】 沿岸方向に4本の Line(Line-1：汀線直上～Line-4：海浜植生生育境界付近)を設置し，各 Line 上 10m間隔で表層底質の写真撮影を行った．**図-6** に調査 Line(沿岸方向)を示す．取得した画像に対し，**2.1** に記述した方法によって各画像の平均粒径を算出した．各撮影点には歩測により移動し，携帯型 GPS(GPSmap60CSx,GARMIN 社)を用いて位置情報を記録した．

【岸沖方向 Line 調査】岸沖方向に3本の Line を設置した．**図-7** に調査 Line(岸沖方向)を示す．各 Line 上では 2m間隔で地盤高の測定と平均粒径算出のための表層底質の写真撮影を行った．これらの写真画像を用い，**2.1** に記述した方法によって各画像の平均粒径を算出した．また測定した地盤高により，毎月の地盤高の変化をとらえた．なお，各月に得られた観測値を比較するため，観測点を用いて領域を三角形要素分割[5]し，空間的な重み付けにより定点での値を算出した．

3.　調査結果

3.1　室内実験　　**図-8** に格子間隔 12mm の擬似植生を用いた室内実験の地盤高の空間分布図を示す．**図-9** に格子間隔 4mm の擬似植生を用いた室内実験の地盤高の空間分布図を示す．移動床 200cm のうち，上流側 100cm に擬似植生を設置した CASE1 と CASE3 を比較すると，格子間隔の小さい擬似植生を用いた CASE3 の方が侵食範囲が小さく，下流側に堆積する傾向が強く見られた．また移動床 200cm のうち，下流側 100cm に擬似植生を設置した CASE2 と CASE4 を比べると擬似植生を設置した範囲全体で堆積傾向が強いことがわかった．

図-10 に飛砂量測定機器で得た各 CASE の飛砂量の時間変化を示す．飛砂量を比較すると，格子間隔の小さい擬似植生を用いた CASE の方が飛砂量は低減されており，植生による飛砂の捕捉効果が大きいことがわかった．



図-6　調査 Line(沿岸方向 Line)



図-7　調査 Line(岸沖方向 Line)

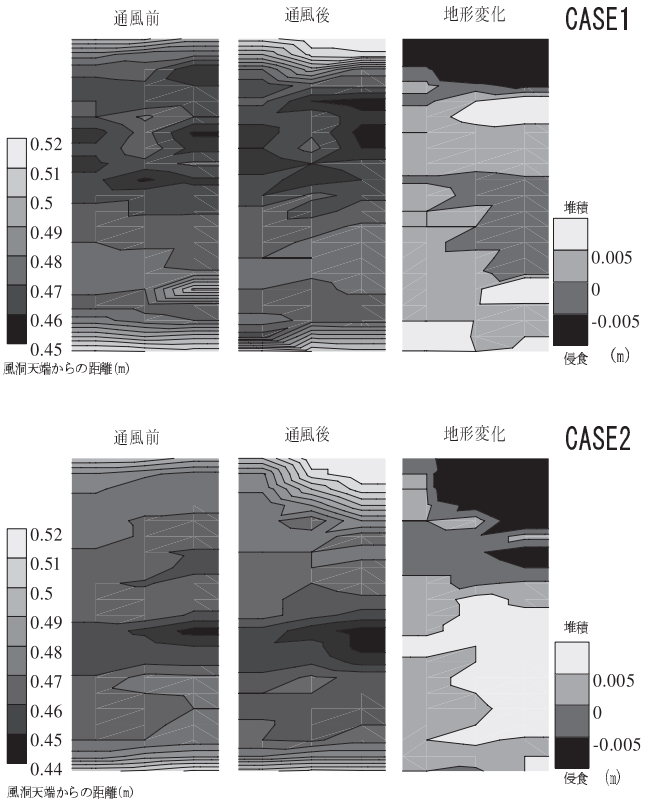


図-8　地盤高の空間分布図(擬似植生 12mm)

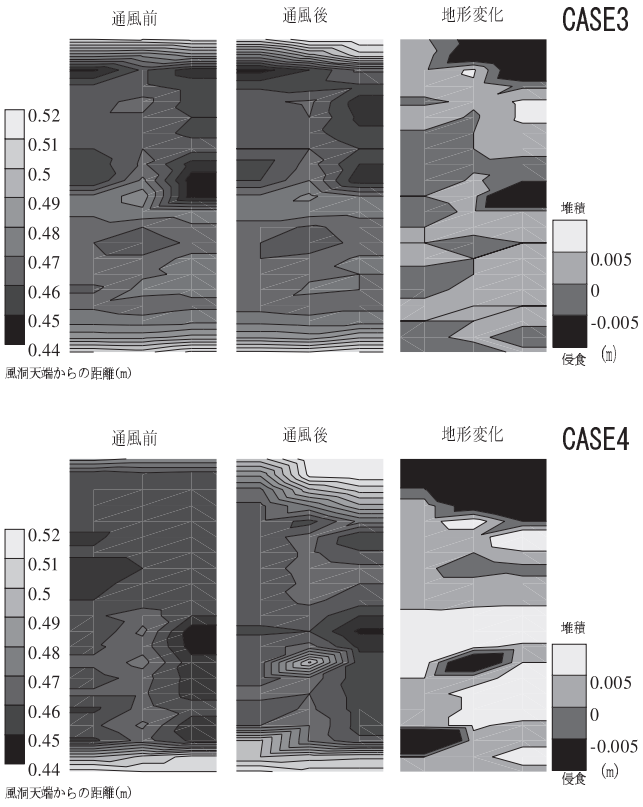


図-9　地盤高の空間分布図(擬似植生 4mm)

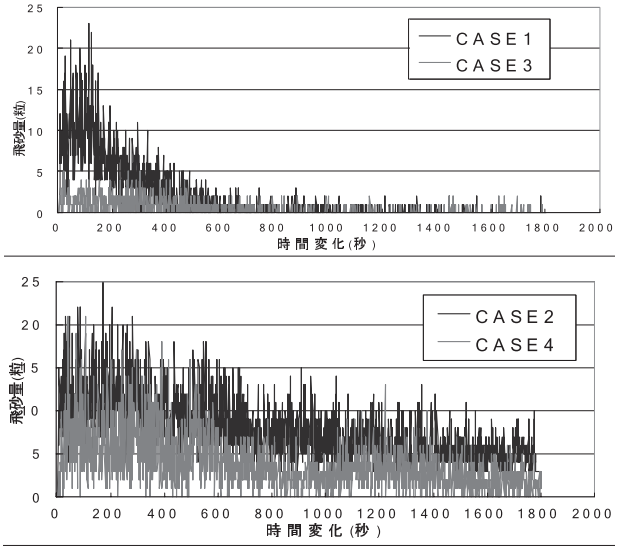


図-10　飛砂量測定機器で得た飛砂量の時間変化

3.2　沿岸方向 Line 調査　　**図-11** に定点での平均粒径の空間分布の推移を示す．夏季(7 月，9 月)から秋季(11 月)にかけて汀線付近で細粒化する傾向が見られた．特に海岸の北側では広い範囲で細粒化していることがわかる．

一方，秋季(11 月)から冬季(1 月，3 月)にかけては，冬季の強い波浪により汀線付近で粗粒化する傾向が見られただけでなく，岸側でも粗粒化する傾向が見られた．これは夏季では植生により細砂が捕捉され，表層に大きな変化は見られないが，冬季になりこれらの植生が枯死するため，捕捉効果が低減され粗粒化しやすくなるものと考えられる．冬季(1 月，3 月)から春季(3 月)にかけては，全体的には細砂の堆積傾向が見られた．

2011 年 7 月 19 日に接近した大型で強い勢力の台風 1106 号は四国各県や近畿南部に大きな被害を与えた．これらの地域は長時間にわたり大雨と暴風に見舞われた．**図-12** と**図-13** に淡路島・洲本での 2011 年 5 月～7 月の風の出現頻度分布，風速の時間変化を示す．台風が接近した 7 月 19 日に南方向からの強い風が発生していたことがわかる．この時に発達した風波により成ヶ島東岸砂浜の表層底質は前後の調査で大きく変化していることが確認された．局所的にみると，海岸北側では粒径の粗い砂礫の堆積がみられ，南側には細砂が広く堆積していることが認められた．植生が繁茂する岸側にも大きな影響があり，広い範囲で粗粒化していることが認められた．

3.3　岸沖方向 Line 調査　　**図-14** に各ラインにおける汀線，海岸の中央地点，植生が繁茂している付近の平均粒径の時間変化を示す．植生が繁茂している付近では 1 年間で平均粒径に大きな変化はみられないが，海岸の中央地点や汀線付近の平均粒径には季節変化が見られる．

変動係数はデータの大きさや単位に関係なく各データ間の分布のばらつきなどを示すのに用いる統計値である．本研究ではラインごとに次式で算出した．

$$c.v. = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\bar{x}} \tag{4}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2 + \ldots + x_n^2) - \bar{x}^2 \tag{5}$$

ここに，c.v.:変動係数，σ^2：標準偏差，x_1・x_2…：各月の測定値，$\bar{x}$：各月の測定値の平均値である．

図-15 に各地点の変動係数の時間変化を示す．植生の繁茂している地点では海岸の中央地点や汀線付近に比べ，変動係数の変化は小さいことがわかる．また冬季においては各地点とも，変動係数の変化が大きいことがわかり，夏季から秋季や春季は変化が小さいことが認められた．

図-16 に最北端ライン，最南端ラインで測定した地盤高さの季節変化を示す．岸沖方向距離(横軸)0m 地点は植生が繁茂している岸側を示しており，汀線に向かっての断面変化を表している．砂浜北端部で夏季(9 月，11 月)から冬季(1 月，3 月)にかけて 10m～15m 地点で大きく侵食されており，冬季の強い波浪の影響による

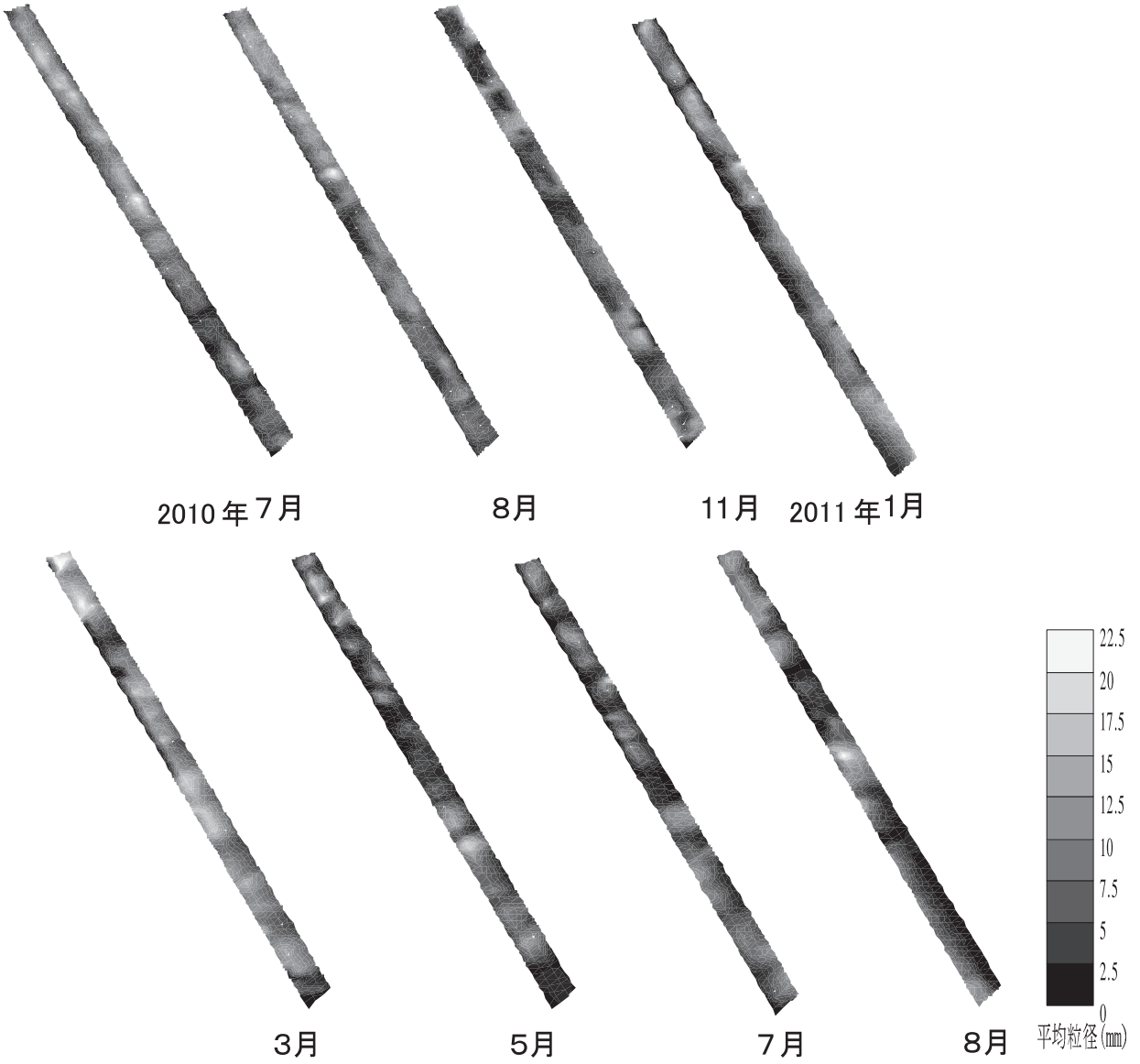


図-11　平均粒径の時空間変化

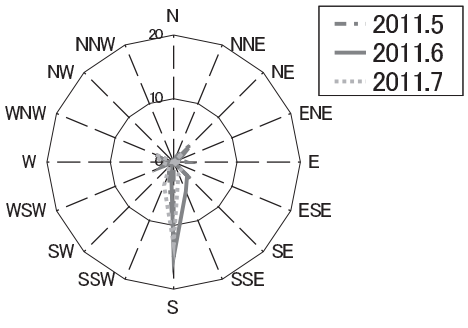


図-12　頻度分布図

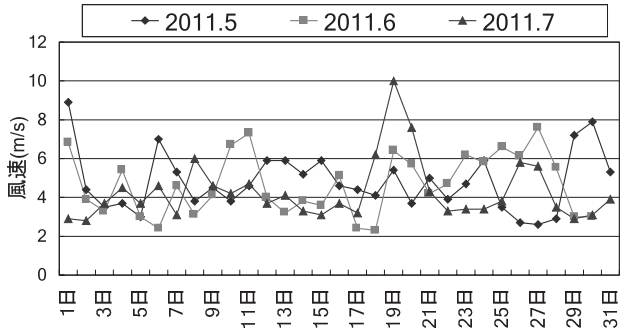


図-13　風速の時間変化図

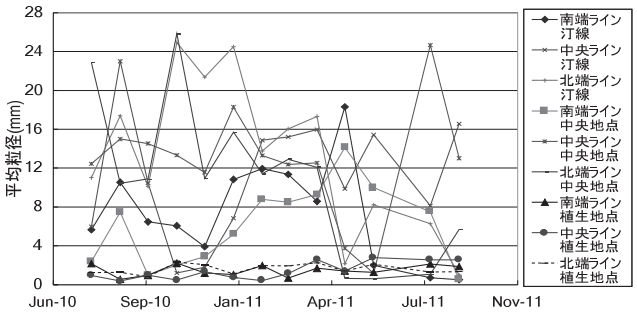


図-14　各地点の平均粒径の時間変化

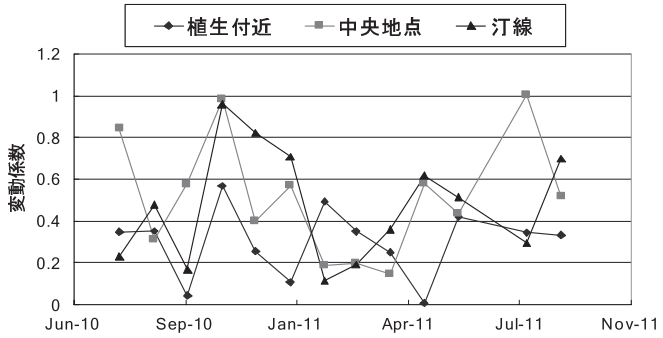


図-15　各地点の変動係数の時間変化

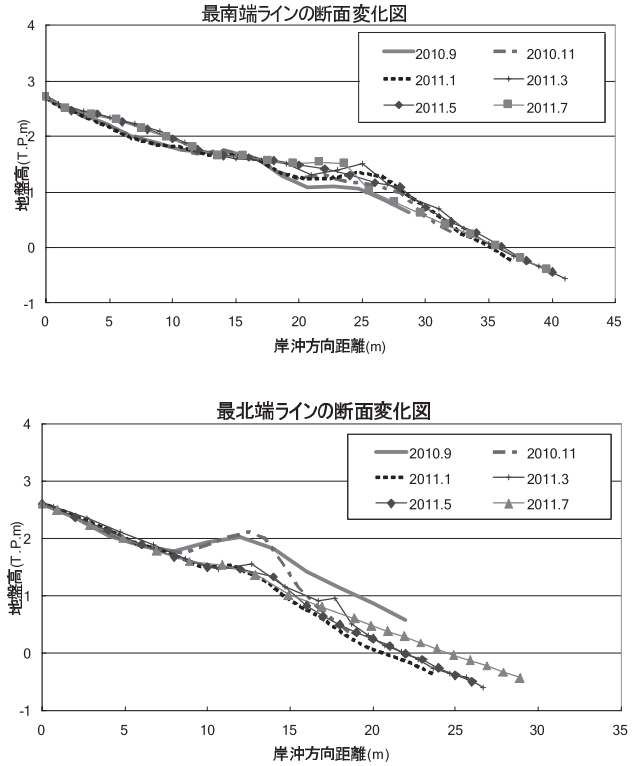


図-16　断面変化の季節変化

ものと推測される．一方，春季から翌年の夏季にかけては，大きな断面変化はみられず，波の影響は小さかったことがわかる．また夏季に植生が繁茂する岸側では汀線や砂浜中央部に比べ，断面変化が小さいということがわかった．本調査結果からも植生による細砂の捕捉効果が大きいということが示唆された．

4．まとめ

淡路島・成ヶ島東岸砂浜における現地調査により以下のことがわかった．

- 冬季から春季にかけての強い波浪により，全体的に細砂の堆積傾向が見られた．また表層底質は台風の影響により，大きく変化することが示唆された．
- 植生が繁茂している付近では平均粒径に大きな変化はみられず，海岸の中央地点や汀線付近と比べ変動係数の変化は小さいことが確認された．
- 冬季の強い波浪により，砂浜の断面は大きく変化し，侵食傾向がみられた．一方，夏季は，波浪が穏やかなので，大きな断面変化はみられなかった．現地での植生が繁茂している陸側は大きな地形変化がみられず，植生による細砂の捕捉効果が示唆された．
- 室内実験の結果でも植生による飛砂の捕捉効果が証明され，現地の結果と同様の傾向が確認された．

参考文献

(1)兵庫県
http://web.pref.hyogo.lg.jp/index.html

(2)宇野宏司・濱森彩・辻本剛三・柿木哲哉：デジタルカメラ画像を用いた淡路島・成ヶ島における底質環境モニタリング，土木学会論文集. B2, 海岸工学 66(1-1),pp 676-680, 2010.

(3)David M. Rubin : A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment, Journal of Sedimentary Reserch, Vol.74, No.1, pp.160-165，2004.

(4)Lawson , C.L.・Hawson , B.J.:Solving Least Squares Problems : Eglewood Cliffs , New Jersey , Prentice-Hall , 340p ， 1874.

(5)谷口健男：FEM のための要素自動分割ーデローニ三角分割法の利用ー，森北出版，198p，1992.

動的有限要素法による水平成層地盤モデルを用いた振幅・位相特性

河里康平*　江本浩樹**　山下典彦***　森源次****

Amplitude and Phase Characteristics of Horizontally Layer by Dynamic Finite Element Method

Kohei KAWASATO* Hiroki EMOTO** Norihiko YAMASHITA*** and Genji MORI****

ABSTRACT

In order to establish a surface wave method to estimate the depth of the soil layer , this paper has examined some of the basic relationships between the depth of the relatively harder soil thin layer and the characteristics of the P-SV wave propagation in layered media and their dynamic response due to the vertical harmonic point load applied on the ground surface . In this examination, the P-SV wave field has been simulated by the finite element method in soil layered media . It has been found from this numerical investigation that the depth of the relatively harder soil thin layer can be estimated from the information of the change of the phase velocity on ground surface at the resonant frequency of the soil layer.

Keywords: harmonic wave, P-SV wave, finite element method

１．はじめに

地盤構造を推定する方法の 1 つにレイリー波の分散性を利用した表面波探査法がある．この分散性とは，レイリー波の波長が長いほど，より地盤深部のせん断波速度を反映するという性質である．このレイリー波の分散性により得られた波長による伝播速度の違いを逆解析する事により，地盤の工学的性質であるせん断波速度構造を求める事ができる．

表面波探査法は，従来の地盤探査方法であるボーリング孔を用いた PS 検層と比較して比較的短時間に低コストで実施が可能であるとともに非破壊で調査が行えるというメリットがある．

しかし，表面波探査法のようなレイリー波の分散性を用いた手法において，起振点の近傍では P 波や S 波といった実体波が混在する為，レイリー波が形成されていないのではないかという指摘がある．そこで既存の表面波探査法では，レイリー波が形成されていると考えられる起振点より遠方に受振器を設置する必要がある．

また，表面波探査法の測定方法は，大きく分けて起振機と 2～3 個の受振器を用いる測定方法と，インパルス振源と多数の受振器を用いる測定方法が提唱されているが，現在のところ表面波探査法に関する研究は，インパルス振源による方法を踏襲した研究に留まっており，起振機といった動的荷重による振幅と位相速度の周波数特性が，地下構造によってどのように変化するかという検討がなされていないのが現状である．その為，最近は信頼性の点から多数の受振器を用いて行う測定方法が主流となっている．この多数の受振器を用いて実施する点からも，測線長が長くなる傾向にあり，広い作業スペースを必要とする事が，表面波探査法の問題点となっている．以上の点から，住宅地などといった建物が密集する地域では，十分な作業スペースを確保できない事が多く表面波探査法の実施は難しい．

本研究では，表面波探査法の住宅地などといった省スペースでの実施を可能とする為に，(1)起振機と 2 個の受振器を用いた測定方法(2)受振器を起振点の近傍に設置する事で起振点近傍での実体波やレイリー波の混在した波の位相速度を用いた測定方法，これら 2 つの有効性を検証する事を目的としている．具体的には図 1 のように起振機により発生させた波を，地表面の起振点近傍に設置した 2 個の受振器によって測定し，測定した波形から位相速度を求める．この位相速度と起振機により発生させた調和振動荷重の周波数の関係から地盤構造を推定する事が可能であるかを有限要素法による解析より検証した．

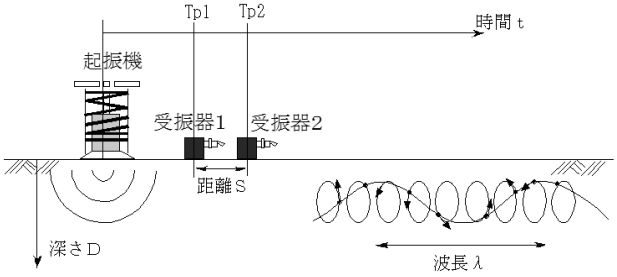


図 1 省スペースでの表面波探査法

*　都市工学科
**　神戸大学大学院　工学研究科　市民工学専攻
***　都市工学科　教授
****　古野電気株式会社　航空防衛事業部主幹技師

２．有限要素法に用いた運動方程式

有限要素法の全体系の運動方程式は，式(1)で表される[1].

$$[M]\{\ddot{x}\}+([G_L]+[G_R]+[G_B]+\alpha[M]+\beta[K])\{\dot{x}\}+[K]\{x\}=\{f\} \quad (1)$$

ここで$[M]$，$[K]$ は質量，剛性マトリクス，丸括弧内は減衰マトリクスである．$\{\ddot{x}\}$，$\{\dot{x}\}$，$\{x\}$は解析モデルの節点の加速度，速度，変位ベクトル，$\{f\}$は外力ベクトルである．減衰はレイリー減衰で評価した．α，β は減衰定数や固有円振動数と式(2)の関係がある．

$$h_i=\frac{\alpha}{2\omega_i}+\frac{\beta\omega_i}{2} \quad (2)$$

また，計算量を制限する為,表層の i 次の固有円振動数を式(3)の金井の式[2]により計算した．

$$\omega_i=\frac{\pi V_{S1}}{2h}(2i-1) \quad (3)$$

しかし，今回の解析モデルのような表層が 3 層からなる地盤を，表層が 1 層からなる表層単層地盤と仮定するには無理がある為，表層 3 層の各層の S 波速度 V_{sj} から各層厚による重みつき平均をとる事によって求まる S 波速度V_{av} を式(4)によって求め，これを表層が 1 層からなる地盤に置き換えた際の S 波速度とした[3].

$$V_{av}=\sum_{j=1}^{N}\frac{Vs_j h_j}{h} \quad (4)$$

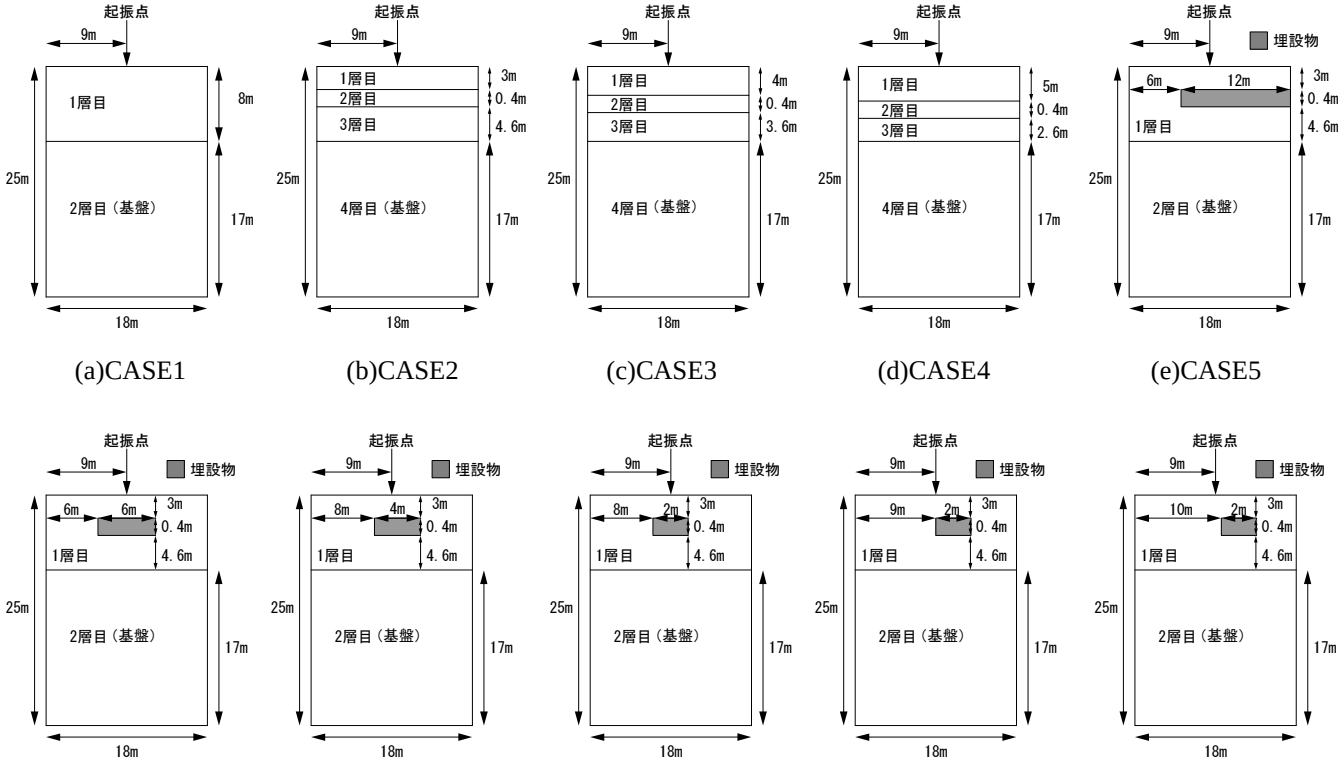
また，地盤の半無限性を考慮するために減衰項に粘性境界を導入した[4].

３．解析モデル

解析モデルを図 2 に示す．CASE1，CASE2 は，埋設物を模擬した硬い層が地盤内に存在する場合，どのような位相速度の周波数特性を示すのかを調べる為に，表層が 1 層からなる 1 層の水平成層地盤と，表層地盤中に硬い層がある 3 層の水平成層地盤をモデル化した解析モデルである．CASE3 及び CASE4 は，3 層の水平成層地盤にある硬い層の深さ位置を 4m，5m と設定した解析モデルである．CASE5 からは，硬い層の横方向の大きさを徐々に小さくする事により様々な大きさや位置の埋設物をモデル化した解析モデルである．

CASE5~CASE8 は，硬い層の横方向の大きさを起振点上を軸に左右 1/3 ずつ小さくしたもので，CASE9，CASE10 は CASE8 の埋設物の位置を起振点から右に 9m，10m としたモデルである．

表 1 に各解析モデルの材料定数を示す．各種パラメータはそれぞれ時間刻み Δt=0.0005s，解析ステップ数=4096，要素サイズは 1 要素あたり横 20cm×縦 20cm の 2 次元ひずみ要素とした．また，レイリー減衰に用いた減衰率は各固有円振動数に対して一様に 5%とした．解析にはモデル地表面の左端から 9m の位置に最大振



(a)CASE1　(b)CASE2　(c)CASE3　(d)CASE4　(e)CASE5

(f)CASE6　(g)CASE7　(h)CASE8　(i)CASE9　(j)CASE10

図 2 解析モデル

幅 20kN の 1~99Hz の調和振動荷重を外力として鉛直方向に作用させた．位相速度は，図 3 のような起振点近傍位置で起振点より右に 0.2m と 1.8m の鉛直変位波形の差分を取り，式(5)より求めた．解析にはニューマーク β 法を用い，$\beta = 0.25$ とした[5]．

表 1 材料定数

(a)CASE1

	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ=(t/m^3)	ν
1層目	490	200	1.8	0.4
2層目	980	400	2	0.4

(b)CASE2,CASE3,CASE4

	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ(t/m^3)	ν
1層目	490	200	1.8	0.4
2層目	3674	1500	2.1	0.4
3層目	490	200	1.8	0.4
4層目	980	400	2	0.4

(c)CASE5,CASE6,CASE7,CASE8,CASE9,CASE10

	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ(t/m^3)	ν
1層目	490	200	1.8	0.4
埋設物	3674	1500	2.1	0.4
2層目	980	400	2	0.4

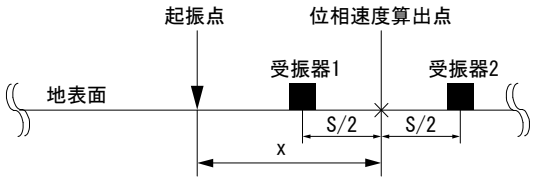


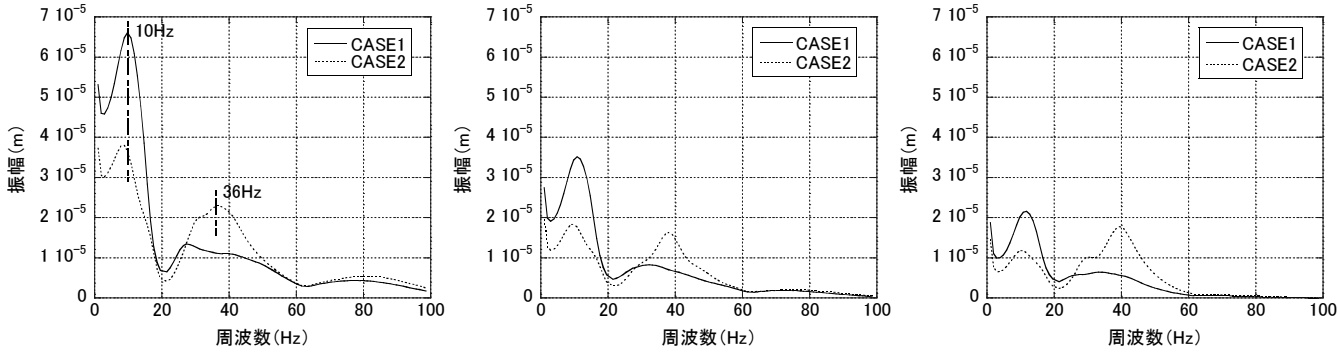
図 3 位相速度算出のイメージ

$$\text{位相速度} = \frac{2\pi S \omega_i}{\text{位相角差}} \tag{5}$$

4．数値解析結果

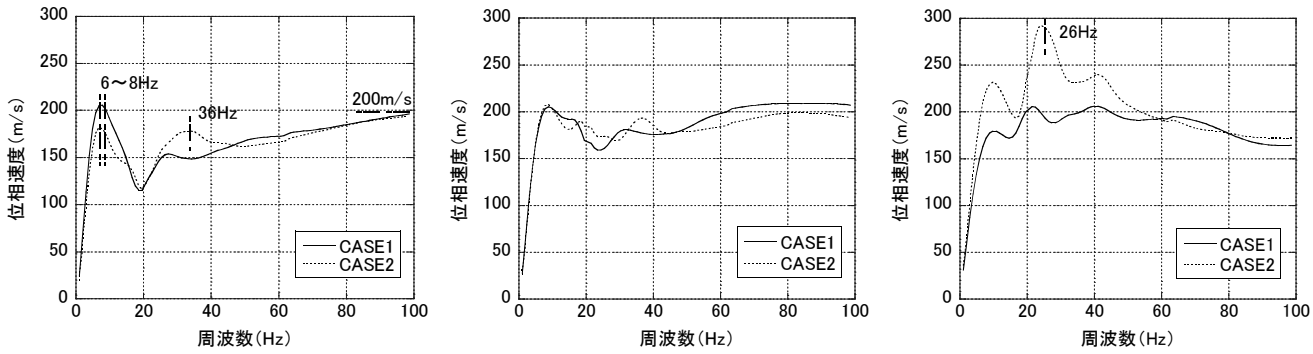
4.1 硬い層の有無による影響　図 4 に硬い層が振幅の周波数特性や位相速度の周波数特性に与える影響を示す．

まず図 4(a)(1)の，1m 地点の硬い層の有無による振幅の周波数特性について見てみると，CASE1，CASE2 共に約 10Hz で振幅が大きく増幅される地盤の卓越振動数が確認出来る．硬い層を含まない CASE1 では卓越振動数が現れた後，なだらかに減少している．しかし，硬い層を含む CASE2 では約 36Hz で再び大きなピークが現れているのが確認出来る．次に，図 4(b)(1)から 1m 地点の位相速度の周波数特性について見てみると，両



(1)1m 地点　(2)2m 地点　(3)3m 地点

(a)振幅の周波数特性



(1)1m 地点　(2)2m 地点　(3)3m 地点

(b)位相速度の周波数特性

図 4 硬い層の有無による影響

CASE で振幅の周波数特性よりも小さい 6~8Hz で位相速度が大きくなっている事が確認出来た．また，硬い層が含まれる CASE2 では振幅の周波数特性で現れたピーク周波数と同様の約 36Hz で再びピークが現れている．その後は両 CASE において 1 層目のせん断波速度 *Vs*=200m/s に近づくような傾向を示している．また，地点ごとの振幅の周波数特性を比較してみると，起振点から離れていくほど全体の振幅は小さくなる傾向が見られる．また，すべての地点で同様の周波数の振幅が大きくなる傾向が確認できる．さらに，地点ごとの位相速度の周波数特性を比較してみると，2m 地点の位相速度は，1 層地盤の CASE1 と硬い層がある CASE2 であまり違いが見られなかった．しかし 3m 地点の位相速度の周波数特性と見てみると，CASE2 の位相速度が CASE1 の位相速度とは大きく異なっており，26Hz 付近で非常に大きな 2 次のピークが現れた．

以上の事から，地盤内に硬い層が存在すると，振幅と位相速度が増加する周波数を確認出来き，起振点近傍では起振点からの距離によって位相速度特性が大きく変わる事が分かった．

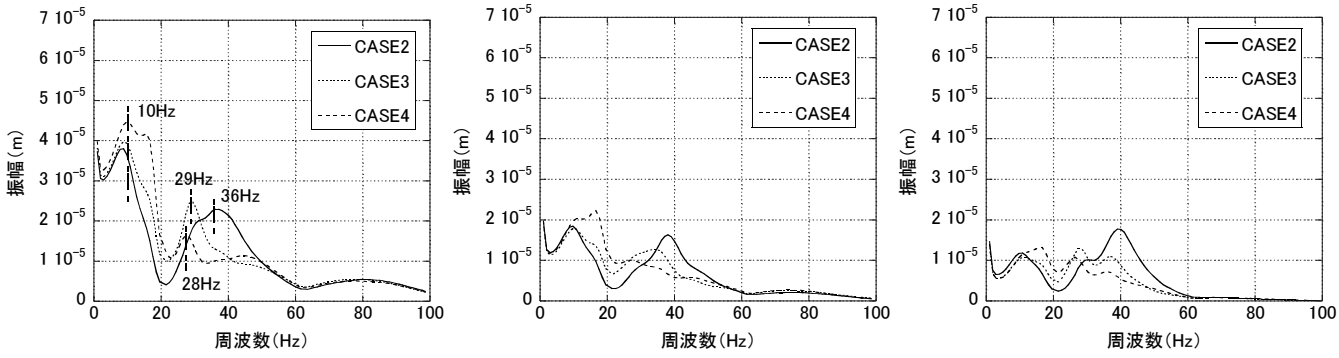
4.2 硬い層の深さ方向の位置による影響

図 5 に硬い層の深さ方向の位置が振幅の周波数特性や位相速度の周波数特性に与える影響を示す．まず，図 5(a)(1)を見ると全ての CASE で約 10Hz で振幅が大きく増幅される地盤の卓越振動数が確認出来る．その後 CASE2, CASE3，CASE4 で約 36，29，28Hz で再び大きなピークが現れているのが確認出来る．

次に，図 5(b)(1)を見てみると，全ての CASE で振幅の周波数特性よりも小さい 6~8Hz で位相速度が大きくなっている事が確認出来た．また CASE2，CASE3，CASE4 で振幅の周波数特性で現れたピーク周波数と同様の約 36，29，28Hz で再びピークが現れている．この周波数は，硬い層が深いほど小さくなる傾向が見られた．その後は全ての CASE において 1 層目のせん断波速度 *Vs*=200m/s に近づくような傾向を示している．また地点ごとに各結果を見てみると，硬い層の有無による結果の時と同様の傾向となった．

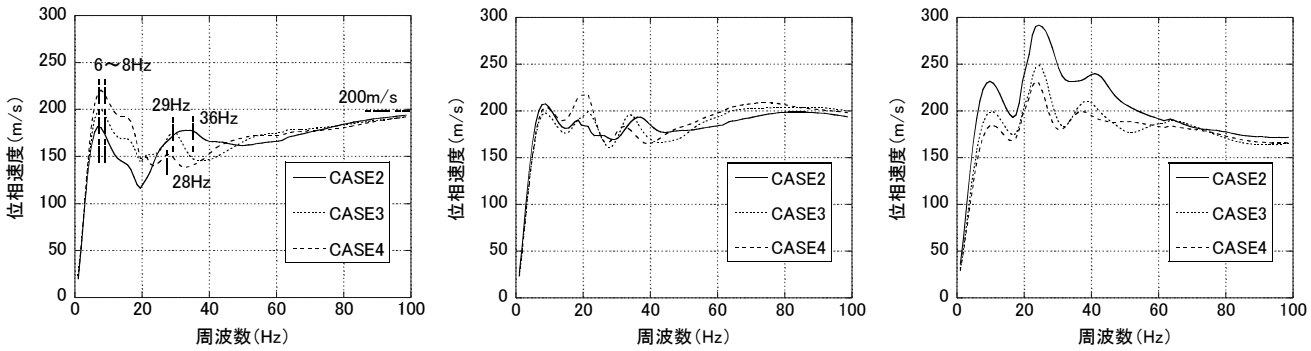
4.3 埋設物の大きさによる影響

図 6 に，埋設物の大きさが振幅の周波数特性と位相速度の周波数特性に与える影響を示す．まず，図 6(a)(1)の 1m 地点の振幅の周波数特性を見てみると，約 10Hz で 1 つ目のピークが見られ，CASE5~CASE8 についてはその後 38~40Hz 付近で 2 つ目のピークが見られる．その後，周波数が高くなるにつれ次第に減少していく結果となった．これは，硬い層がある場合で見られた傾向と同様である．また，埋設物の大きさが小さくなるにつれて 2 次のピ



(1)1m 地点　(2)2m 地点　(3)3m 地点

(a)振幅の周波数特性



(1)1m 地点　(2)2m 地点　(3)3m 地点

(b)位相速度の周波数特性

図 5 硬い層の深さ方向の位置による影響

ークが小さくなる傾向が見られた．これは，埋設物の大きさが制限される事によって埋設物の境界面で反射が生じ，埋設物を通過した波が地表面に現れにくくなった為であると考えられる．また，地点ごとの振幅の周波数特性を比較してみると，起振点から離れていくほど全体の振幅は小さくなる傾向が見られる．

次に，図 6(b)(1)の 1m 地点の位相速度の周波数特性を見てみると，8Hz 付近で 1 つ目のピークが現れた後，CASE5~CASE7 では 33Hz 付近で 2 次のピークが見られた．これらの 2 次のピークは埋設物の影響と考えられる．しかし，CASE8 については，1 層地盤の CASE1 と比較してあまり違いがなかった．この原因として考えられる事は，(i)埋設物の境界面での反射の影響(ii)位相速度を求める際の差分間隔の影響がある．(i)の理由についてはさきほどの振幅の周波数特性と同様である．(ii)については，CASE8 の埋設物の大きさが小さい為，1m 地点の差分間隔（0.2m 地点と 1.8m 地点）では，分間隔 1.8m に対して横方向の大きさ 2m の埋設物の 0.8m 分しか影響を受けない為である．よって，横方向の大きさ 2m の埋設物の影響が現状の差分間隔に対して大きくなるように，図 7 のようにこの埋設物の位置を 1m ずつ右に移動させ解析を行った．

次に，2m 地点と 3m 地点の位相速度の周波数特性を見てみると，2m 地点の位相速度は，CASE5 で小さな 2 次のピークが確認できるものの，その他の CASE については 1 層地盤の CASE1 と比較してあまり違いが見られなかった．

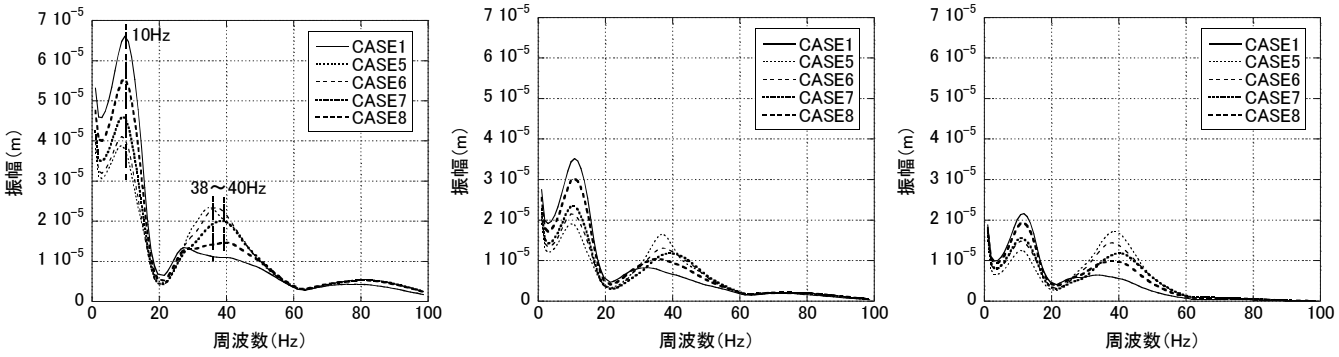
しかし，3m 地点の位相速度の周波数特性と見てみると，1 層地盤の CASE1 の位相速度とは大きく異なっており，埋設物の横方向の大きさが大きい程，位相速度結果に大きく違いが現れた．よって，起振点近傍での位相速度は，地点によって傾向が大きく変わるという結果が得られた．また，CASE8，CASE9 については 3m 地点の差分間隔の地下には埋設物は埋まっていないが，1 層地盤の CASE1 と比較して全体的に位相速度が大きくなっている事から，埋設物が地下にない差分地点においても，埋設物の影響が現れる事が分かった．

4.4　埋設物の横方向位置による影響

図 7 に，埋設物（0.4m×2m）の横方向の位置が振幅の周波数特性と位相速度の周波数特性に与える影響を示す．全ての結果において，1 層地盤の CASE1 と違いがあまり見られなかった．よって，埋設物の横方向の大きさが振幅の周波数特性や位相速度の周波数特性に影響を与える要因である事が分かった．

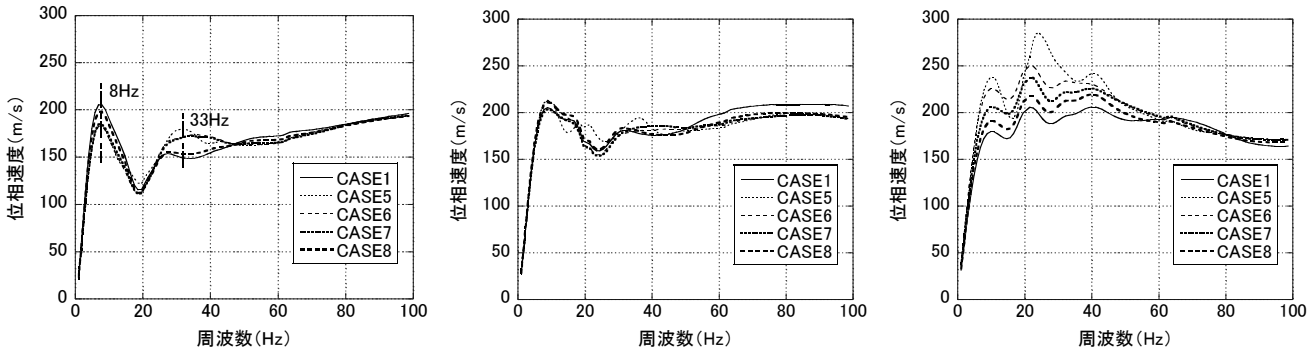
5．まとめ

表面波探査法を省スペースで実施する為に(1)起振



(1)1m 地点　(2)2m 地点　(3)3m 地点

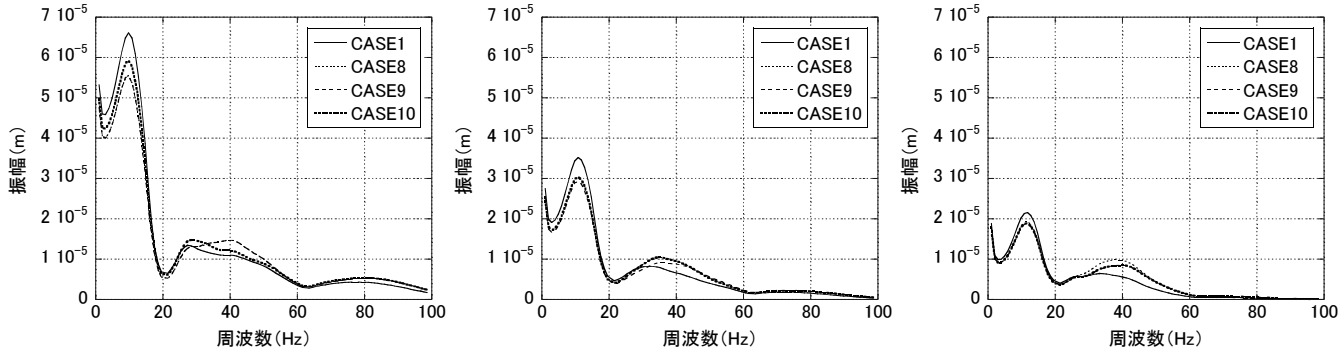
(a)振幅の周波数特性



(1)1m 地点　(2)2m 地点　(3)3m 地点

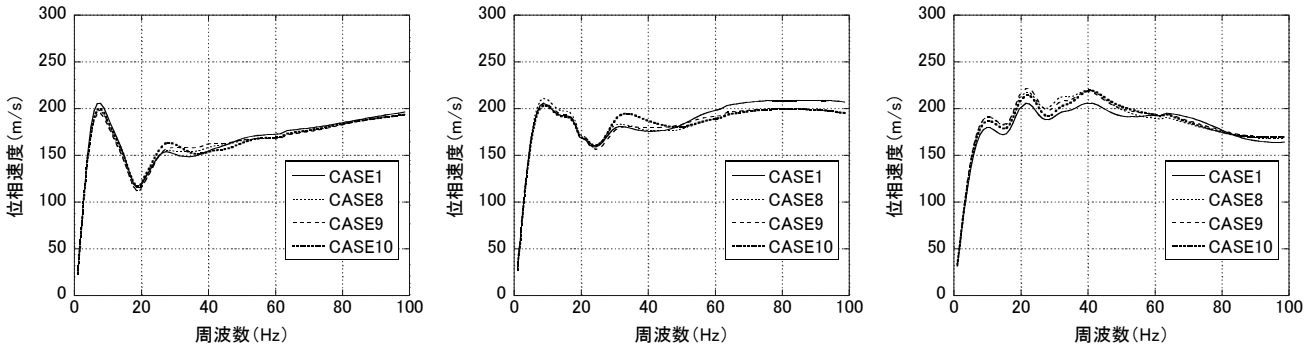
(b)位相速度の周波数特性

図 6 埋設物の大きさによる影響



(1)1m 地点　(2)2m 地点　(3)3m 地点

(a)振幅の周波数特性



(1)1m 地点　(2)2m 地点　(3)3m 地点

(b)位相速度の周波数特性

図 7 埋設物の横方向位置による影響

機と 2 個の受振器を用いた測定方法(2)起振点近傍での実体波とレイリー波が混在した波の位相速度を用いた測定方法，これら 2 つの有効性を検証した．以下にその結果を示す．

(1)地盤内に硬い層（埋設物を模擬したもの）がある場合，硬い層がない場合に比べて位相速度が大きくなる周波数が表れた．また，この位相速度の増加は全ての解析結果で 3m 地点が最も大きく，起振点からの距離が位相速度特性に大きな影響を与えている事が分かった．

(2) 3 層の水平成層地盤モデルの硬い層の深さ位置を変えた場合，位相速度の特異なピーク点は，硬い層の位置が深いほど，低い周波数で表れる傾向を示した．

(3)全ての CASE において，高周波数に近づくほど，位相速度は地表面の S 波速度に近づいていく傾向が見られた．

(4)埋設物の場合は，横方向サイズが大きい場合は振幅の周波数特性，位相速度の周波数特性の両方で特異なピーク点が現れたが，0.4m×2m の場合はあまり影響が見られなかった．この事から，埋設物の大きさが振幅の周波数特性や位相速度の周波数特性に影響を与える要因である事が分かった．

以上から，表面波探査法を省スペースで実施する為に用いた測定方法で，地下構造によって位相速度の周波数特性が異なる事を確認でき，有効性を検証する事ができた．

謝辞：本論文を作成する上で，山下研究室の専攻科 1 年生の島袋武氏，卒研生の三木拓也氏，鳥澤拓真氏，岡那捺希さんには大変お世話になりました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

(1)春海佳三郎，大槻明：有限要素法入門，共立出版 pp34-38，2006

(2)地盤工学会：地盤技術者のための FEM シリーズ② 弾塑性有限要素法がわかる，丸善，pp54-57，2003

(3)土岐憲三：土木学会編 新体系土木工学 11 構造物の耐震解析，技報堂出版，p102，1985

(4)鈴木晴彦，林宏一，信岡大：表面波を用いた地震探査－人工振源を用いた基礎的研究－，物理探査学会第 102 回学術講演会論文集，pp62-65，2000

(5)椿木紀男，正木和明，荏本孝久，岩楯敞広，中島芳久，高坂隆一：建築と土木技術者のための地震工学・振動学入門，吉井書店 pp1-6，1997

直接基礎で支持される道路橋の地震応答変位の片寄り

島袋武*　藤田麗**　山下典彦***

Asymmetry of Seismic Displacement Response of Highway Bridge Supported by Spread Foundation

Takeshi SHIMABUKURO*　Rei FUJITA**　and Norihiko YAMASHITA***

ABSTRACT

The objective of this paper is to discuss the causes of asymmetric response of superstructure using the elasto-plastic model considering the influence of P-Δ effect and simplified periodic motion of real ground motion record. The inelastic behavior subjected to the input ground motion is so complicated that it is estimated in this paper by using the procedure to simplify the ground motion. In this study, in order to establish the simple seismic design method considering the asymmetric response. We investigate the nonlinear response characteristics using four types of nonlinear model. The superstructure itself is idealized as a single degree freedom system attached to a rigid spread foundation with two degree of freedom which is flexibly supported. As a result, simplified wave is effective to explore asymmetry of response. The response behavior and residual displacement differ with each period of models.

Key Words: asymmetric response, asymmetric coefficient, P-Δ effect, ductility factor, elasto-plastic earthquake response

１．はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では，阪神高速道路3号神戸線で落橋・倒壊，5号湾岸線で落橋が生じるなど,多くの道路橋に甚大な被害が生じた.それ以降，各種基準が見直され，道路橋示方書においても耐震設計法が仕様規定型から,性能規定型に移行した．しかしながら，その具体的方法や性能の規定方法は対象とする構造物により差異が見られるのが現状で，コンクリート構造物や鋼構造物の塑性域での動的挙動や終局強度を精度良く評価する手法の開発が必要である(1).

また，構造物に設計外力を超える外乱が作用した場合に，変形が一方向に進み大きく塑性化する「応答の片寄り」が生じる場合がある．これは兵庫県南部地震のようなパルス的な直下型地震に対して生じやすく，大きな被害をもたらすと経験的に知られているが，その原因やメカニズムを検討した研究は少ない(2)．さらに,応答の片寄りにはP-Δ効果による復元力の低下の影響も検討する必要がある．わが国の橋梁の耐震設計は，塑性域の変形性能を期待しながらも，残留変位規定や慣性力の下限値規定によってある程度の変形性能と耐力を有するような橋脚が得られるようになっており,P-Δ効果の影響を無視できる領域で設計している．しかしながら，塑性応答は複雑であり，その結果として変形が片側に進み,構造物が倒壊する危険性がある．

本論文では，最大塑性率と平均塑性率の比で表される向井ら(3)の「片寄り係数」を導入し，塑性時における構造物の応答の片寄りのメカニズムについて解明することを目的とする．具体的には，P-Δ効果による降伏後の耐力低下を考慮した１質点系モデル(4)（以下，回転１自由度モデルという）と水平振動を扱った一般的な１質点系モデル（以下，水平１自由度モデルという），さらには，回転１自由度モデルと水平１自由度モデルに直接基礎をモデル化した３自由度モデル(以下，それぞれ回転３自由度モデル及び水平３自由度モデルという)を用いて 48 ケースの直接基礎で支持される道路橋を想定し，兵庫県南部地震とそれを単純化した矩形波(以下,単純波という)で弾塑性地震応答解析を行い，上部構造物の周期と高さが片寄り係数や塑性率へ与える影響や，片寄り係数と塑性率,残留変位の関係を検討し，周期別の応答変位波形の比較を行い地震応答の片寄りについて考察した．

２．運動方程式

２.１　１自由度モデル　上部構造物を図1(a)に示すような微小変形を想定して幾何学的近似（$\cos\phi=1$, $\sin\phi=\phi$）を行ってモデル化すると，回転１自由度モデルの運動方程式は次式で表される．

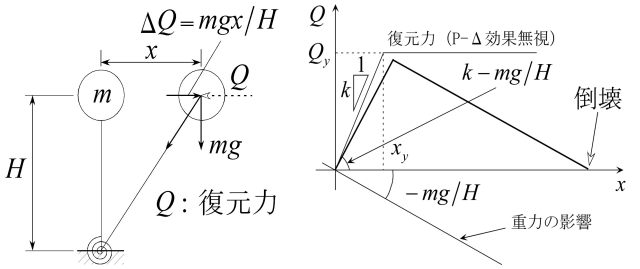
$$m\ddot{x}H + c_{RS}\dot{x} + M(\phi) - mgx = -m\ddot{u}_G H \qquad (1)$$

*　専攻科　都市工学専攻
**　阪神高速技術株式会社(元神戸高専専攻科学生)
***　都市工学科　教授

ここに, m は１質点系の質量, c_{RS} は減衰係数, $M(\phi)$ は復元モーメント，ϕ は橋脚の回転角（橋脚を剛体と仮定しており部材角と等しい），H は橋脚高さ，g は重力加速度，$\ddot{u}_G$ は水平方向の入力地震動である．さらに，回転１自由度モデル及び水平１自由度モデルを支えているばねをそれぞれ k_R, k とし $k = k_R/H^2$ の関係を用いると,水平１自由度モデルの運動方程式は次式で表される．

$$m\ddot{x} + c_S\dot{x} + Q(x) - k_{p\Delta}x = -m\ddot{u}_G \qquad (2)$$

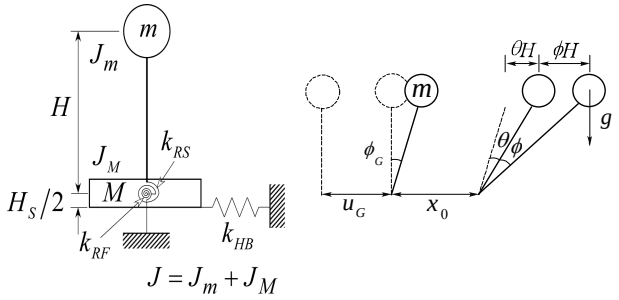
ここに，$Q(x)$ は k の復元力，$k_{p\Delta}$ はP-Δ効果による剛性の低下量 $k_{p\Delta} = mg/H$ で，$Q(x) - k_{p\Delta}x$ がこのモデルの復元力である．図 1(b) において降伏力は $Q_y = mgC_y$ とし，C_y は降伏震度で $Q(x) = 0$ になる時，つまり構造物の復元力とP-Δ効果による付加的な層せん断力が等しくなったときが倒壊（終局状態）である．



(a)回転１自由度モデル　　(b) P-Δ効果の影響

図１　回転１自由度モデルとP-Δ効果の関係

２．２　３自由度モデル　　直接基礎で支持される道路橋を図 2(a)に示すような回転３自由度モデル，つまり上部構造物の回転運動，基礎の並進運動及び回転運動にモデル化し，図 2(b)のように振動モデルの座標系を定めると減衰項を省略した振動方程式は式(3)のようになる．なお，振動方程式の誘導にあたっては，地盤-基礎系の復元力における並進と回転の連成項を無視している．



(a)モデル化　　(b)座標系

図２　回転３自由度モデルと座標系

$$[M]\{\ddot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{I_1\}\ddot{u}_G - [M]\{I_2\}\ddot{\phi}_G \qquad (3)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} mH^2 & mH & mH^2 \\ mH & m+M & mH \\ mH^2 & mH & mH^2 + J \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{RS} - mHg & 0 & -mHg \\ 0 & k_{HB} & -k_{HB}H_S/2 \\ -mHg & -k_{HB}H_S/2 & k_{RF} - mHg + k_{HB}H_S^2/4 \end{bmatrix}$$

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} \phi \\ x_0 \\ \theta \end{Bmatrix}, \{I_1\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \{I_2\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

m, M は上部構造物及び基礎の質量, $J = J_m + J_M$ は回転慣性で，J_m，J_M は上部構造物，基礎の回転慣性, k_{RS}, k_{HB}, k_{RF} は上部構造物の回転ばね剛性，基礎底部水平及び回転ばね剛性，ϕ, x_0, θ は上部構造物の回転角，基礎の水平変位及び回転角，$\ddot{u}_G, \ddot{\phi}_G$ は入力地震動を表している．$[K]\{y\}$ は上部構造物と基礎の復元力項[5]で，復元力特性として上部構造物と基礎の底部水平ばねは完全弾塑性型，基礎の底部回転ばねはトリリニア型とし，基礎と地盤の剥離及び滑りについては考慮していない．なお，水平３自由度モデルについては１自由度モデルの回転と水平ばねの関係を上部構造物に用いて振動方程式を誘導している．

３．弾塑性地震応答解析

３．１　解析条件　　弾塑性地震応答解析は増分法($\beta = 1/6$)により行い,微少時間を 0.001(s)とした．入力地震動は，神戸海洋気象台（長周期パルス型）の NS 成分とした．さらに，実地震動は周期，スペクトル特性が複雑であり応答の片寄りを検討することが困難であると考え,実地震動の継続時間 20 秒を 400 分割し，加速度を各時間間隔の平均値とした矩形波(単純波)も用いた．

神戸海洋気象台の実地震動と単純波の加速度波形の 4.0～5.0 秒間を図 3(a)，絶対加速度応答スペクトル（5%減衰）を図 3(b)，フーリエスペクトルを図 3(c)に示す．図 3(b), (c)より，短周期側で単純波のスペクトルが実地震動と比較して小さくなっていることがわかる．さらに，最大加速度の絶対値と正負の最大値の比率(片寄り比率)は単純波が約 5%減となった.

上部構造物及び基礎の諸定数については,橋脚高さ(周期)を 11m(0.712s 及び 0.965s),12m(0.812s 及び 1.100s),13(0.917s 及び 1.242s)及び 14m(1.026s 及び 1.389s)の４種類とした.表1に上部構造物及び基礎の諸定数の 48 ケースのうち 12 ケース(11m の場合)について示す.

また，表 2 に上部構造物の周期とそれらに対する固

有値解析の結果を示す．図 3(b)と表 2 において，１次～３次の固有周期と入力地震動による応答スペクトルの卓越周期の関係から，共振現象を起こす可能性を推測することができる．

さらに,降伏震度 0.2, 地盤の単位体積重量 17.6kN/m^3, ポアソン比 0.3,粘着力 0kN/m^2，N 値 40(道路橋示方書より,せん断速度 273.6m/s，内部摩擦角 39.5°),上部構造物の減衰定数 0.05，基礎の減衰定数 0.1 とした.

３.２　解析結果　図4に,48ケースの直接基礎-上部構造物系の実地震動と単純波の片寄り係数($d=\mu_{max}/\mu_{average}$)及び塑性率の比(回転/水平)を示す.１自由度モデルでは，基礎を考慮していないので橋脚高さと橋桁重量が同じ場合は同じモデルとなり，比の値も同じとなる．

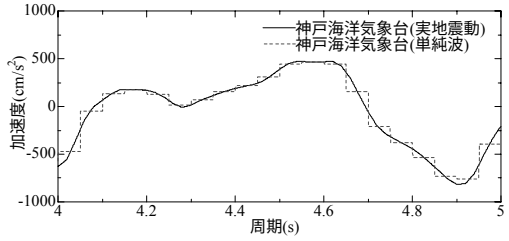
図 4(a)の実地震動と単純波の片寄り係数については,１自由度モデルでは 8 ケース中 6 ケース(48 ケース中 36 ケース)で単純波の比の方が大きくなり，３自由度モデルでは 48 ケース中 23 ケースで単純波の比の方が大きくなった．周期1.026sのケースを除く他のケースでは，橋脚高さが低いつまり周期が短くなると比が大きくなる傾向がある．

図4(b)の実地震動と単純波の塑性率については，１自由度モデルでは8ケース中6ケース(48ケース中36ケース)で単純波の比が大きくなり，３自由度モデルでは48ケース中23ケースで単純波の比が大きくなった.また,塑性率の比も片寄り係数の比と同様に,周期が短くなると比が大きくなる傾向が見られた.

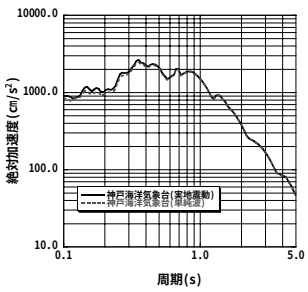
図5に,正方向の最大変位と負方向の最大変位(絶対値)を周期毎にプロットしたものを示す. 図中の対角線は,正負の最大変位に片寄りがないことを表している．全体の傾向として,周期1.389s以外の周期は,負の最大変位より正の最大変位の方が大きいことがわかる．

図5(a),(b)を比較した場合, 回転１自由度モデルは,単純波の値が実地震動の値を正の最大変位で8ケース中7ケース(48ケース中42ケース)，負の最大変位で1ケース(6ケース)上回っている．同様に，水平１自由度モデルでは正方向に8ケース(48ケース)，負方向に2ケース(12ケース)上回っていることから，１自由度モデルでは単純波を作用させると最大変位が正方向にシフトする傾向があることがわかった．

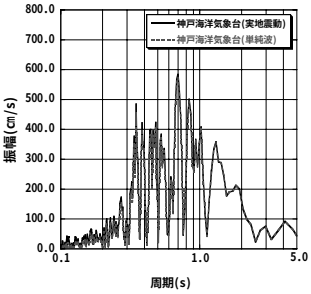
また，図5の1自由度モデルについて殆どのケースで



(a)加速度波形 4.0~5.0s



(b)応答スペクトル



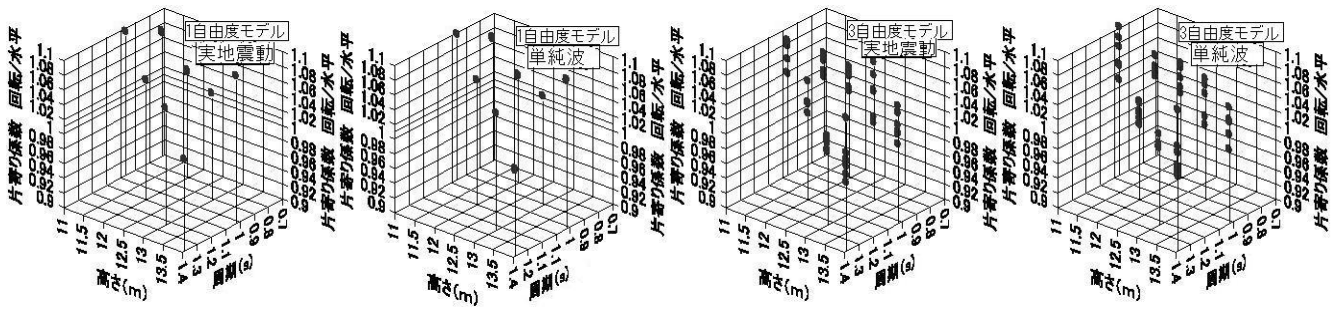
(c)フーリエスペクトル

表 2　上部構造物の周期と固有値解析結果

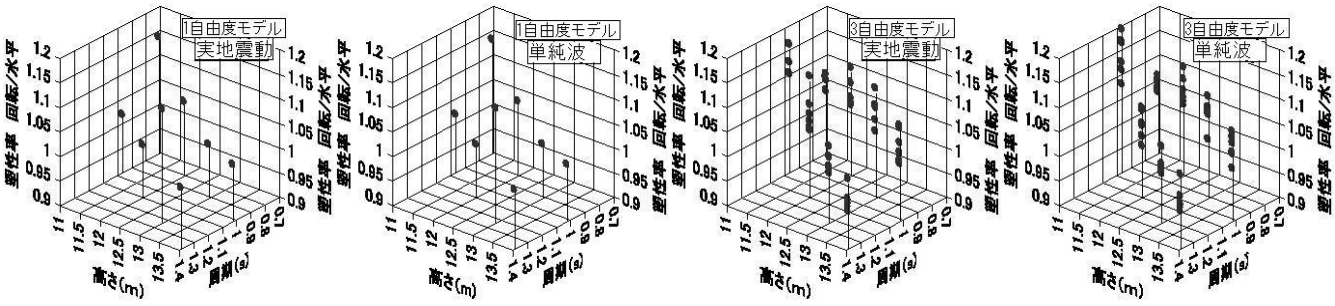
上部構造物の周期(s)	固有周期(s)		
	１次	２次	３次
0.712	1.828～2.504	0.660～0.694	0.173～0.221
0.965	2.476～3.393	0.888～0.932	0.174～0.223
0.812	1.908～2.598	0.699～0.734	0.179～0.229
1.100	2.582～3.519	0.941～0.989	0.180～0.230
0.917	1.995～2.700	0.776～0.737	0.185～0.235
1.242	2.699～3.654	0.993～1.046	0.185～0.236
1.026	2.091～2.810	0.773～0.817	0.189～0.240
1.389	2.827～3.800	1.043～1.102	0.189～0.240

表 1　上部構造物及び基礎の諸定数(橋脚高さ 11mの場合)

ケース番号	周期	橋脚高さ	上部構造物		基礎			回転慣性モーメント
			橋桁重量	橋脚重量	高さ	半径	質量	
	T(s)	H (m)	Wu(KN)	Wp(KN)	H_S (m)	a(m)	M(KNsec^2/m)	J(KNsec^2・m)
1	0.712	11	10744.7	1119.7	2	4	235.94	288267.0
2	0.712	11	10744.7	1119.7	2	4.5	298.61	288869.1
3	0.712	11	10744.7	1119.7	2	5	368.66	289703.3
4	0.712	11	10744.7	1119.7	2.5	4	294.93	288583.4
5	0.712	11	10744.7	1119.7	2.5	4.5	373.26	289350.7
6	0.712	11	10744.7	1119.7	2.5	5	460.82	290409.9
7	0.965	11	20070.4	1119.7	2	4	235.94	529188.7
8	0.965	11	20070.4	1119.7	2	4.5	298.61	529790.8
9	0.965	11	20070.4	1119.7	2	5	368.66	530625.0
10	0.965	11	20070.4	1119.7	2.5	4	294.93	529505.1
11	0.965	11	20070.4	1119.7	2.5	4.5	373.26	530272.4
12	0.965	11	20070.4	1119.7	2.5	5	460.82	531331.6

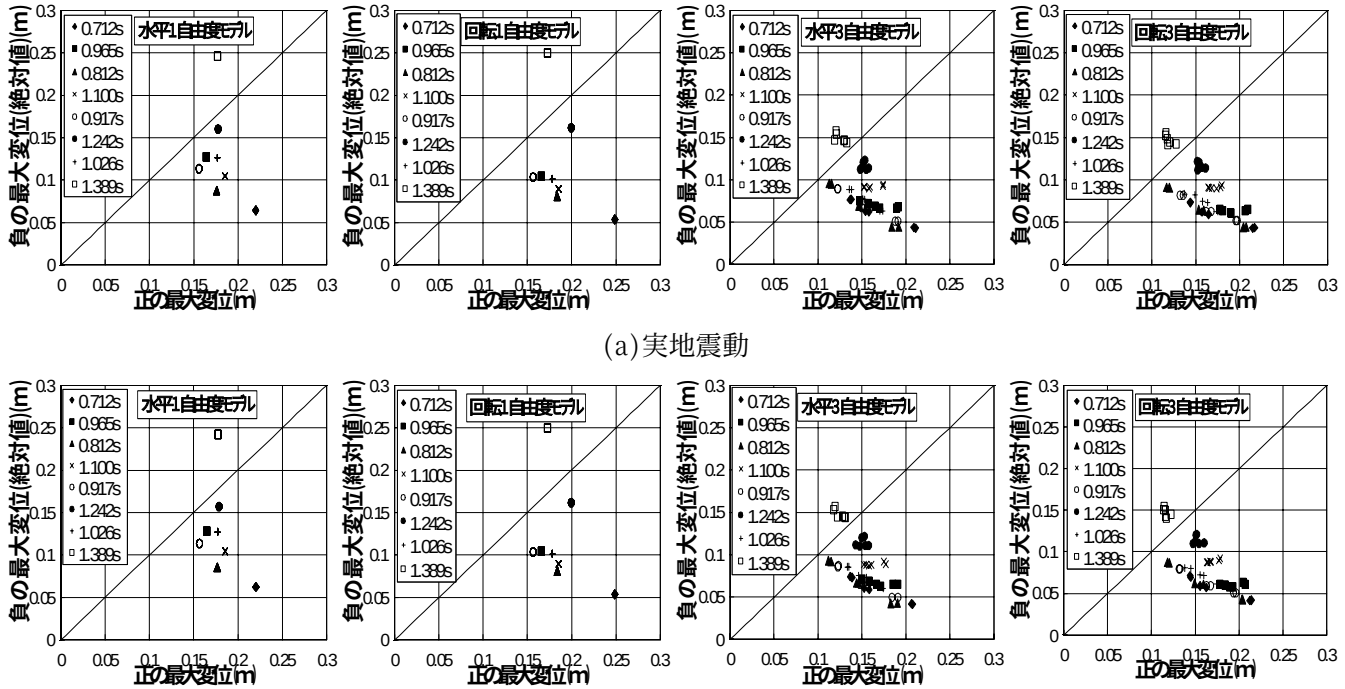


(a)片寄り係数



(b)塑性率

図４　片寄り係数及び塑性率の比(回転/水平)



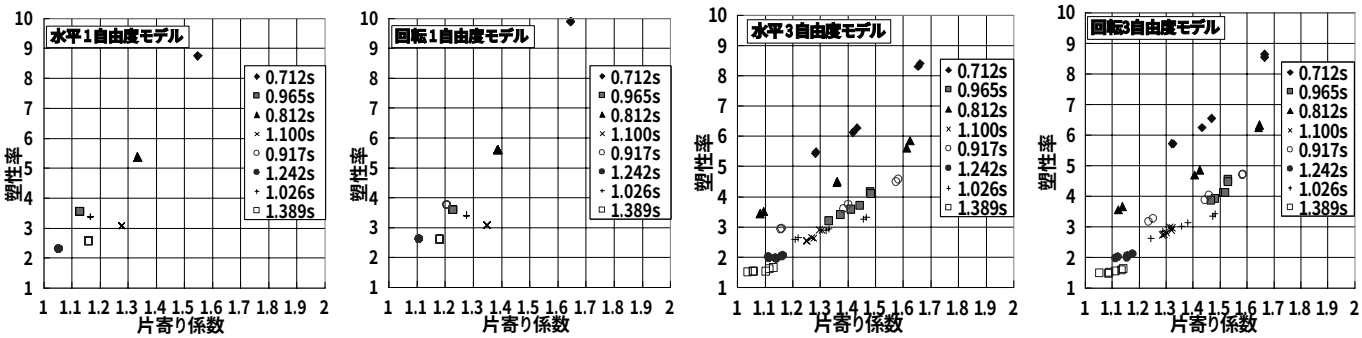
(a)実地震動

(b)単純波

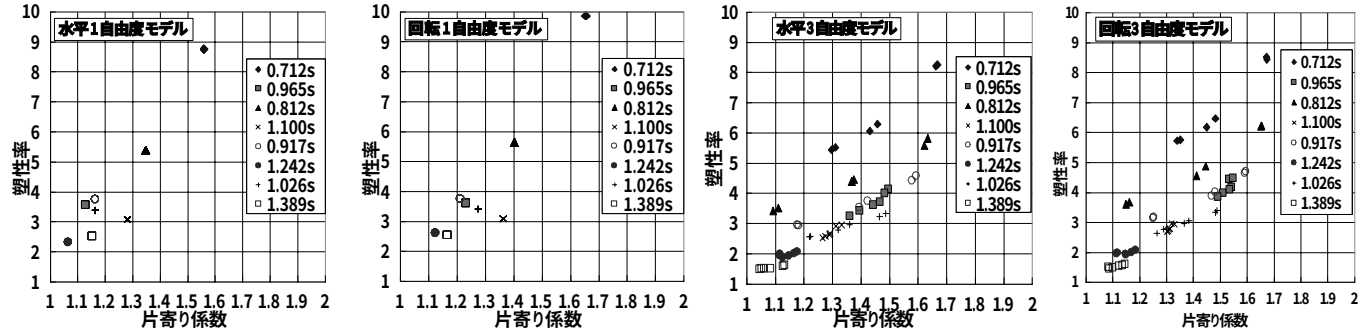
図５　最大応答変位の片寄り

回転モデルの値が水平モデルの値を上回っている(実地震動,単純波共に正方向に8ケース中7ケース(48ケース中42ケース),負方向に8ケース中6ケース(48ケース中36ケース).

実地震動を入力地震動とした場合の３自由度モデルでは，回転モデルの正の最大変位の値が,水平モデルの値を48ケース中41ケースで上回っており，単純波でも48ケース中39ケースとなり同様の傾向がみられた．しかし，負方向の値は回転３自由モデルの方が大きいケースが，48ケース中実地震動で13ケース,単純波で15ケースとなっており,３自由度モデルは地盤ばねやP-Δ効果の影響を含んだ回転モデルが水平モデルに対し

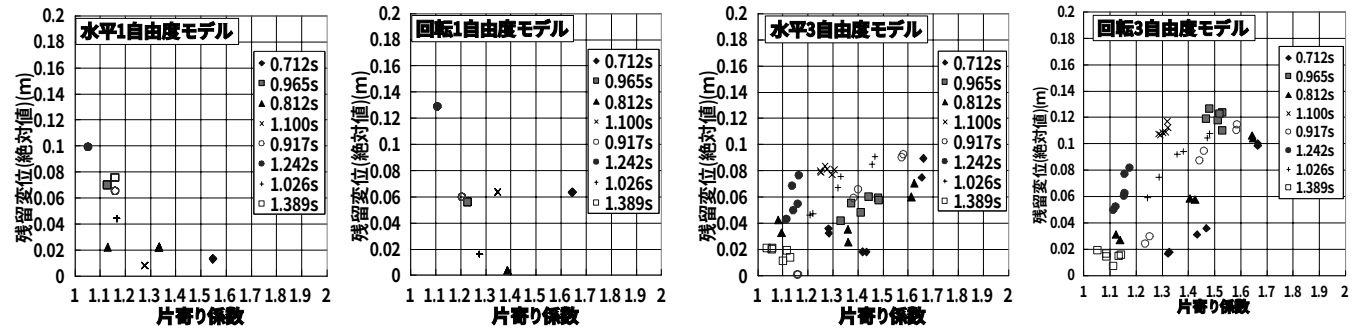


(a)実地震動

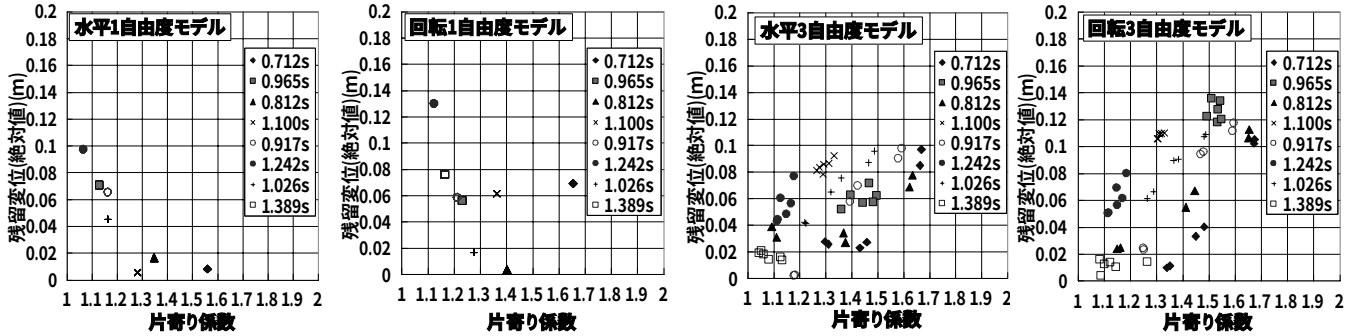


(b)単純波

図６　塑性率と片寄り係数の関係



(a)実地震動



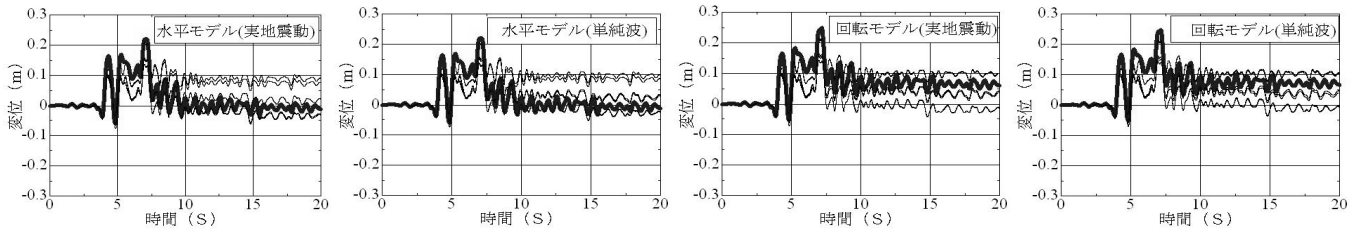
(b)単純波

図７　残留変位と片寄り係数の関係

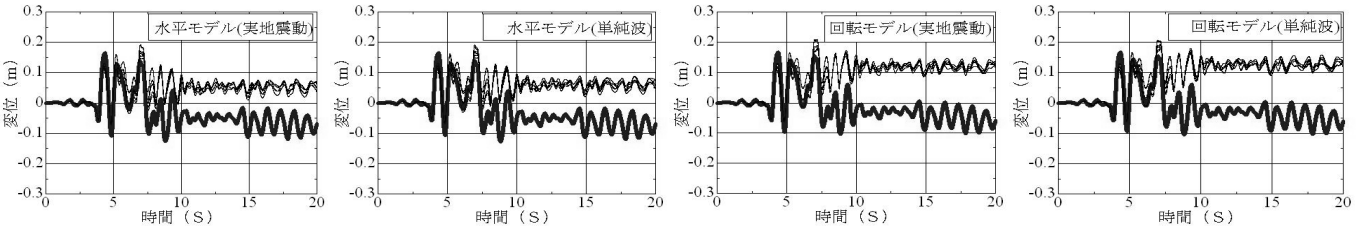
て，正方向にシフトしていることがわかる．

周期0.712sは最大応答変位の片寄りが最も大きく,実地震動，単純波共に水平１自由度モデルでは正方向の値が負方向の値の約3.4倍，同様に，回転１自由度モデルで約4.6倍,水平３自由度モデルで約5.0倍，回転３自由度モデルで約5.0倍となった．

図6に,周期毎の塑性率と片寄り係数の関係を示す．図6の全ての図で右肩上がりの傾向がみられる．この



(a)周期 0.712s



(b)周期 0.965s

図 8　上部構造物の時刻歴応答変位波形

ことから,塑性率と片寄り係数の間には相関関係があることがわかる．また，周期が短くなるほど片寄り係数，塑性率が大きくなる．

図7に,周期毎の残留変位の絶対値と片寄り係数の関係を示す．図7の回転１自由度モデルにおいて,周期が0.712s以外の周期で右肩下がりの相関関係がみられる．回転及び水平1自由度モデルの周期0.712sを比較すると,図7(a)実地震動では回転モデルが水平モデルの値より5.0cm,図7(b)単純波では6.1cm大きいことがわかる．また,図7の3自由度モデルの周期0.965sにおいては,回転モデルの値が実地震動,単純波共に平均6.8cm水平モデルの値より大きくなっている．

図7で特徴がみられた周期0.712sと0.965sの時刻歴応答変位波形を図8(a),(b)に示す．太線が１自由度モデル,その他の細線が３自由度モデルの波形である．

図8(a)において3自由度モデルの波形は残留変位7.6cm～10.6cmの波形，2.3cm～4.7cmの波形，-4.5cm～-0.4cmの波形の3つに分類でき，これらは表1に示すケース1と4，2と5，3と6の波形であることから，周期が0.712sの場合は応答変位波形に基礎半径が関係しており基礎の質量等の影響が考えられる．

図 8(b)は１自由度と３自由度の波形が 4.1 秒を境として残留変位が正負に分かれている．また,1 自由度モデルでは 14.0 秒から減衰傾向にあった応答変位波形の振幅が最大 9.9cm に増幅している．

４．まとめ

48ケースの直接基礎で支持される道路橋を想定した弾塑性地震応答解析を行い，上部構造物の周期と高さが片寄り係数や塑性率へ与える影響や，片寄り係数と塑性率,残留変位の関係を検討し，周期別の応答変位波形の比較を行い地震応答の片寄りについて考察した．これらの結果を以下にまとめる．

1) １自由度モデル及び３自由度モデルに単純波を入力地震動とした場合，片寄り係数の比及び塑性率の比が大きくなるケースが多いことから応答の片寄りを検討する上で単純波は有効である．
2) 神戸海洋気象台の実地震動及び単純波を入力地震動とした場合，殆どのケースで応答変位が片寄り，残留変位が生じ，それらは上部構造物の周期により特徴が異なる．

以上から，上部構造物の弾塑性復元力特性や入力地震動のタイプにより片寄りはばらつくと考えられる．今後は片寄りのメカニズムを解明するため，上部構造物の復元力特性を剛塑性型とし検討を行う．

参考文献

(1)日本地震工学会 性能規定型耐震設計法に関する研究委員会編：性能規定型耐震設計 現状と課題，鹿島出版会，2006.

(2)丸橋奈々子，市之瀬敏勝：完全弾塑性モデルの地震応答の片寄り,日本建築学会構造系論文集,第 609 号,pp.75-80,2006.

(3)向井智久，衣笠秀行，野村設郎：地震動を受ける RC 構造物の限界応答変形量を保障するに必要な耐力算出法とその精度検証，日本建築学会構造系論文集，第 532 号，pp.137-143, 2000.

(4)山下典彦，原田隆典：P-Δ効果が１自由度系の非線形応答に与える影響，土木学会地震工学論文集，CD-ROM，pp.1-8，2003.

(5)山下典彦，原田隆典：基礎-地盤-構造物系の非線形動的相互作用を考慮した応答スペクトルに関する研究,土木学会構造工学論文集，Vol.47A，pp.591-598，2001.

高齢化社会における公共交通の有効性と利用に関する研究

橋本渉一*

Application and Utilization of Public Transportaion in Aging Society

Shoichi HASHIMOTO*

ABSTRACT

In recent years the proportion of aging person have been growing up in Japan. Public Transportation i.e. railways, buses are useful for person of advanced age or without driving license. Person trip numbers is growing up according as aging. Many citizens hope access times reduction, frequent service, high density network. For increasing public transportation value, commuters and facilities need producing barrier free at universal design. Terminals and junctions need to be constructed close each other.

keywords：aging society raffic sharing, commuter traffic, logit model, probability model

１．はじめに

わが国では早いペースで，高齢者人口割合が高いいわゆる高齢化社会を迎えつつある．この際高齢者の移動手段の確保の観点から，公共交通の整備は重要であり各都市圏で取り組みが行われている．

国内旅客輸送は 1945 年以降鉄道主体であったが，その後道路輸送の分担率が上昇し 1970 年には旅客輸送量（人キロ）で鉄道輸送を超えるまでになった．特に大都市圏においては従来から社会基盤整備として市街地開発に先行する形で鉄道路線整備が行われてきた路線もあり，輸送人員は増加し約 50%を分担している．

わが国では西欧諸国と比較して鉄道旅客輸送の分担率が高く，特に大都市圏および都市近郊鉄道は，通勤通学輸送はもとより日常の旅客輸送に重要な役割を果たしている．これからの高齢社会においては社会活動，モビリティを支援するより利用され易い公共交通として期待されるところである．

一方，地方圏では自家用車の普及により公共交通の輸送人員が減少し，公共交通事業者の経営を圧迫し全国的に見て鉄道路線の廃止，バス系統数の減少が見られ，高齢者等の足の確保が大きな問題となっている．

本研究では高齢化社会における公共交通の現状とその役割について検証した．

＊　都市工学科　教授

２．高齢化社会への移行

2.1　人口の推移

日本の総人口は 2006 年に 1 億 2774 万人でピークを迎え，それ以降長期の人口減少過程に入ることが推計されている．しかし 65 歳以上の高齢者人口は 2020 年頃まで急激に増加し，2034 年頃までおおよそ 3,400 万人台で推移するが，2043 年にピークに達すると推計されている．

高齢者人口の割合は 2000 年の 17.4%から 2014 年には 25%台に達し，人口の 4 人に 1 人が 65 歳以上となる．その後も低出生率の影響を受けて上昇を続け，2033 年には 30%台，2050 年には 35.7%の水準に達し，2.8 人に 1 人が 65 歳以上人口となるものとみられる．

総人口が縮小する中で高齢者が増え続けることとなる．既に地方の小都市，町村部では高齢者人口の割合が高くなって久しいが，今後大都市圏においても，現在の地方都市や過疎地並みの高齢

化状況となりその後も増加傾向が続くとされている．（図 1）

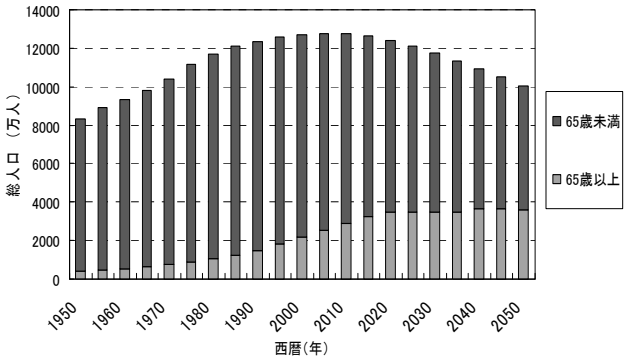


図１　日本の総人口[1)]

2.2　高齢者の交通行動

東京都市圏におけるパーソントリップ調査によると，前期高齢者（65～74 歳）では 1 人 1 日あたり 1.5 トリップ以上となっており，後期高齢者（75 歳～）も 1 トリップはしている．10 年で各年齢区分ともに増加傾向が認められ，高齢者人口の増加と相俟って総トリップ数も増加傾向にあると考えられる．（図 2）

関東地方都県における高齢者が利用する代表的交通手段の調査結果から，鉄道利用者は東京区部では 20%を超え，周辺郊外部，地方圏へ行くほどに鉄道・バスの公共交通から自動車利用の値が高い．（図 3）秋田県における高齢者の交通手段分担率の結果では，さらに公共交通利用割合が少なくなっている．（図 4）

内閣府の「高齢者の日常生活に関する意識調査」によると，近年高齢者の外出手段として自動車等の選択が増加傾向にあるものの，依然として公共交通機関も半数近くの高齢者によって選択されており鉄道の潜在需要は高いと考えられる．

外出するにあたり障害となる理由として，公共交通機関の利用のし難さを挙げる割合が高くなっている．また身体機能の低下からくる階段の昇降，段差の乗り越え等の乗換え抵抗の大きいことがあげられている．（図 5）

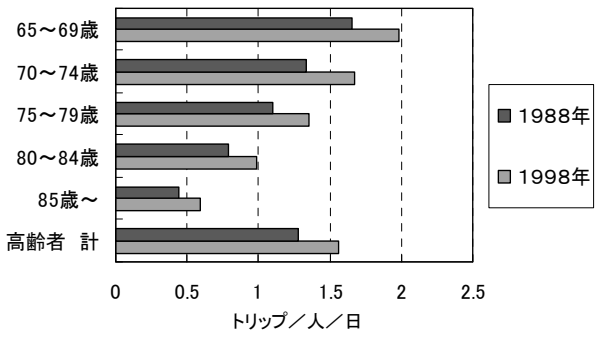


図２　高齢者トリップ数[2)]

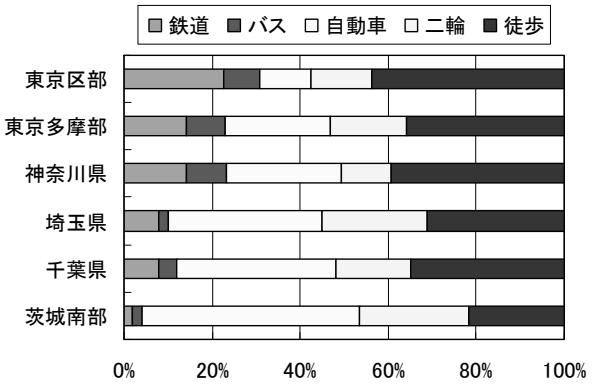


図３　高齢者の代表交通手段[2)]

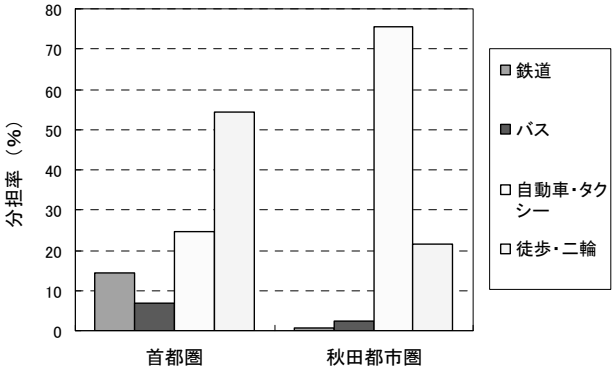


図４　高齢者の交通手段分担率[3)]

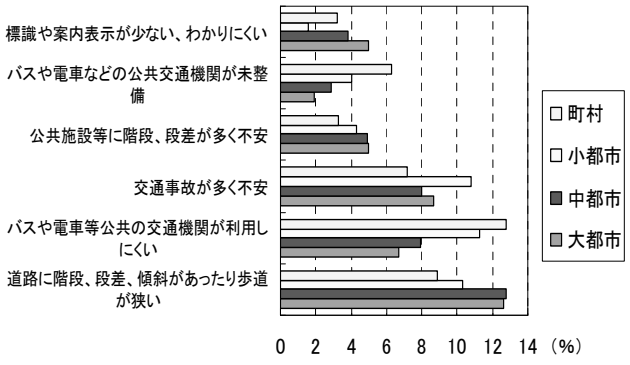


図５　高齢者外出時の障害[2)]

上記の意識調査から，高齢者の公共交通機関への潜在的需要は高く，鉄道利用に対する意識的障害，物理的障害を除去することが利用拡大につながるものと推測され，これら高齢者利用の利便性に配慮し障害となるバリアーを除去して，移動制約を低減させていくことが社会的課題になってくると考えられる．

3．公共交通をとりまく状況

3.1　旅客輸送量の推移

わが国における旅客輸送量（人キロ）は 1950 年代から約 60 年間で飛躍的な増加をみた．交通

機関分担率の推移を見ると鉄道は約 30%となり，自動車交通は社会経済の発展と相応して増加してきた旅客トリップの需要増を吸収した形となり，近年 60%を超えるまでに増加した．（図 6，図 7）

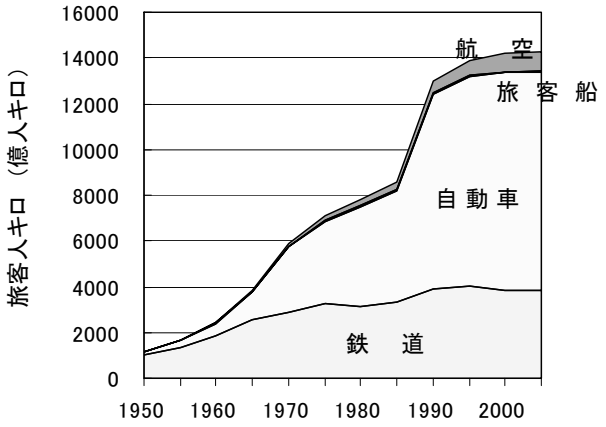


図 6　旅客輸送量[4)]

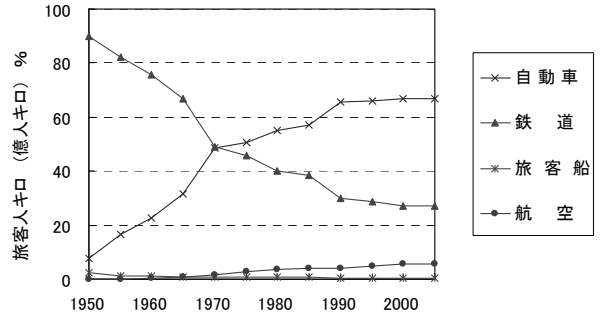


図 7　旅客輸送分担率[4)]

3.2　公共交通機関の輸送人員

現在約 40%を占める公共交通シェアの内訳は鉄道で 30%強，バスで 10%弱を分担している．鉄道およびバスの三大都市圏，地方圏における昭和 50 年を基準とする輸送人員の推移をみると，鉄道輸送は地方圏では 13%減少したものの三大都市圏では 30%以上の増加を示し，この 30 年間で全国では 20%以上の増加を示している．（図 8）これに対しバス輸送では地方圏では約 40%，三大都市圏では約 60%の減少を示し，全国では約 50%の減少を示している．（図 9）全国のバス系統数は平成に入り 15 年間で約 90%に減少したが，最近 5 年間では安定した状態である．乗合バスの輸送人キロおよび平均輸送距離はここ数年増加傾向を示しているが，これは安価で輸送距離の長い高速バス輸送が寄与しているためと考えられる．（図 10）

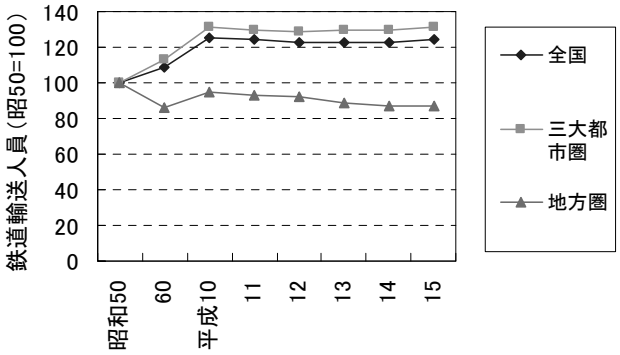


図 8　鉄道輸送人員[5)]

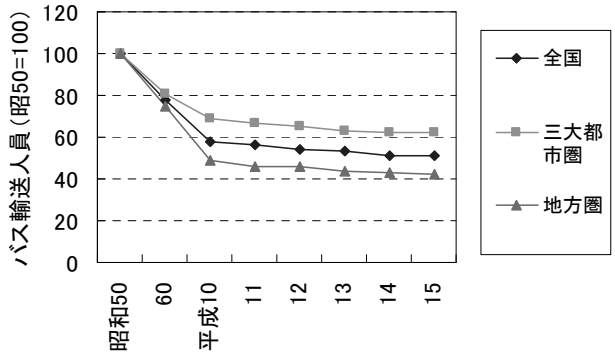


図 9　バス輸送人員[5)]

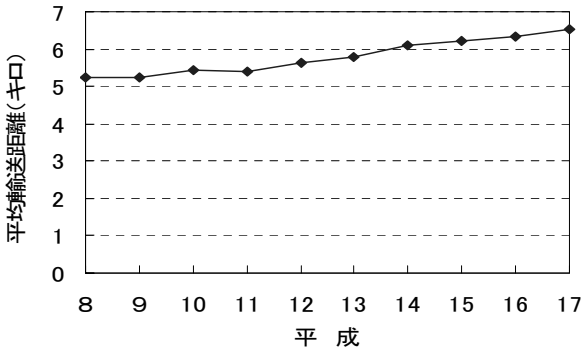


図 10　旅客バス平均輸送キロ[5)]

3.3　都市圏公共交通の分担率

三大都市圏においては社会基盤整備の中で都市鉄道路線は整備されて来たことにより，鉄道輸送人員の分担率は 50%を超えており，特に大都市圏内旅客輸送に対しては不可欠な交通機関として重要な役割を果たしている．（図 11）

4．　交通困難者と公共交通

4.1　バリアフリー

公共交通機関や建築物等のバリアフリー化，一定の地域内における施設等，およびこれら相互を連絡する経路の一体的・連続的なバリアフリー化を促進し，バリアフリー施策を総合的に展開する

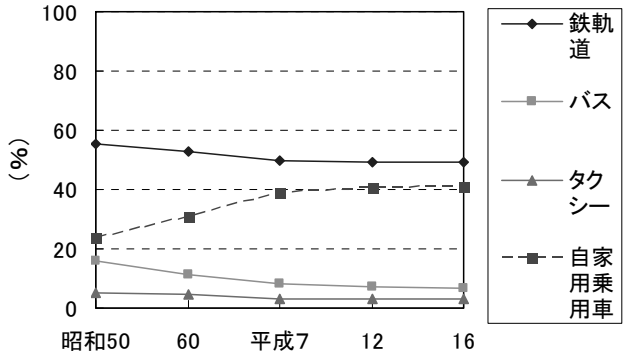


図 11　3 大都市圏輸送分担率[5)]

ため，「高齢者，障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律」(「バリアフリー新法」といわれる）が平成 18 年 12 月から施行された．

高齢者の移動の円滑化を図るため，駅・空港等の公共交通ターミナルのエレベーター設置等の高齢者の利用に配慮した施設の整備，ノンステップバス等の車両の導入などを推進している．

ノンステップバス，低床型路面電車等のバリアフリー対応車両の導入など，施設および車両の整備については，公的補助および日本政策投資銀行等による融資を行っているほか，税制上の特例措置が講じられている．このほか，路面電車の超低床を実現するため，低床型路面電車（LRT）の狭軌超低床化に関する技術開発が国から支援されている．

「交通バリアフリー法」に基づく移動円滑化基準への適合性は 2004 年度末で鉄軌道車両は約 30%，鉄道駅でエレベータあるいはエスカレータを設置しているのは全体で 60%を超えた状況である．2006 年度末でバスターミナルは 75%と，他交通機関の旅客施設と比較して多い状況である．バス車両は，低床バスおよびノンステップバス合わせて 43%を超えた状況であり，鉄軌道車両と比較して 10 ポイント以上多くなっている．（表 1，表 2）

4.2　結節点のシームレス化

利用者側からみた公共交通の不便さの一つに結節点における乗換抵抗がある．公共交通から公共交通へ乗り換える際の連続性，短時間での移動を担保することにより，お互いに公共交通機関としての効用が高くなる．

市街地開発と合わせ駅前広場の整備計画にはバスターミナル整備も合わせて計画されることが多い．近年ＬＲＴとバス乗降ホームを島式として対面乗り換えも行なわれており，鉄道とバス等をより近接させた結節点構造が望まれている．

表 1　輸送施設のバリアフリー化状況(2006 年度)[6)]

	総施設数	移動円滑化基準に適合	割合
鉄軌道駅	2,771	1,560	56.3%
バスターミナル	44	33	75.0%
旅客船ターミナル	7	5	71.4%
航空旅客ターミナル	23	10	43.5%

表 2　輸送機関のバリアフリー化状況(2006 年度)[6)]

		車両等の総数	移動円滑化基準に適合	割 合
鉄軌道車両		51,595	16,586	32.1%
バス	低床バス	57,739	16,237	28.1%
	ノンステップバス		8,639	15.0%
旅客船		1,131	90	8.0%
航空機		483	227	47.0%

５．まとめ

我が国は 21 世紀半ばに 65 歳人口が 1/3 を超える高齢社会が形成されることが明らかになっている．このなかで今後役割が期待される公共交通の状況をまとめると以下の通りである．

１．社会の高齢化と共に高齢者トリップ総数は増加傾向にあり，高齢者の社会活動への参加を支えるためには，交通手段の確保，社会資本整備が必要と考えられている．

２．高齢者へのバス・鉄道の公共交通利用に対する意識調査結果からは，駅までのアクセス時間短縮，路線網・頻度等のサービス向上を求める声が多い．

３．高齢者の移動手段として鉄道・バスの公共交通機関の果たす役割が大きい．全国では鉄道 30%強，バス 10%弱で分担しているが，特に三大都市圏では鉄道輸送が約 50%を分担している．

４．公共交通機関の価値を高めるにはユニバーサルデザインに基づくバリアフリー化，交通結節点整備におけるシームレス化が期待されている．

参考文献

1)国立社会保障・人口問題研究所：「日本の将来推計人口」厚生統計協会 2002.5
2)まちづくりと交通プランニング研究会：「高齢社会と都市のモビリティ」2004.9，学芸出版社
3) 東京都市圏交通計画協議会：「東京都市圏パーソントリップ調査」
http://www.tokyo-pt.jp/person/pt_gaiyou.html
4)国土交通省：「国土交通白書 2008」2008.5
5)国土交通省：「国土交通白書 2007」2007.5
6)内閣府：「平成 18 年版障害者白書」2002.12

五、おわりに

アンケート結果から、オリジナル資史料が古典に興味を抱く入り口になり得る可能性が高いことが明らかとなった。特に実験・実習の多い高等専門学校においては、実物にふれ、観察する行為が学生の好みともマッチしたようである。想像以上に、オリジナル資史料が彼らに与えたインパクトは大きい。しかしながら、それはあくまで入り口に過ぎないこともアンケートによって判然とする。学習に際してオリジナル資史料が必要ではないと考える者の多さは、本物に触れることは楽しいけれども、その感覚と学習は別だという意識が根強いことを示唆している。したがって、オリジナル資史料を用いた授業ののちは、常に本物に触れた際の感覚を思い出させつつ進める授業となるように工夫しなければならない。例えば和歌の解釈を行う場合も、教科書のみではなくサブテキストとしてオリジナル資史料の写真を配布するといった配慮が必要であろう。その際にタブレット端末を利用することも有益であると考えるが、この点は今後の課題としたい。

彼らに必要なのは古典のビジュアル化と体感である。古典のビジュアル化はすでに国語便覧などによって補われてきた。今後はオリジナル資史料を加えることで、古典を体感する場を増やし、単なる学習ではなく、経験としての古典を教授する必要があると考える。

なお、近代文学作品においても、著者の自筆原稿というオリジナル資史料を用いることで同様の成果が期待されると考えるが、追って報告したい。

＊“Japanese Classics Education Employing Original Materials”, Kazuya FUNAMI

参考文献

・渡辺春美 2005.7「発見に導き、学び手を育てる古典教育」(『月刊国語教育』200)
・内藤一志 1999「〈学校古典〉と〈受験古典〉の関係」『月刊国語教育』19-9
・内藤一志 1999「〈学校古典〉と〈受験古典〉の違い」『函館国語』15
・吉村誠 2006.9「古典文学研究と古典教育」『山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要』22
・小松英雄 1990『徒然草抜書』講談社学術文庫

書き方で見る方が読みにくい部分が多いけど、古文を読んでいるという実感があってよかった。

・博物館にしかないような本物を間近で見たり触れたりすることは、教科書の中だけで学ぶのとは違って、とっても興味がわいた。

・昔の紙は現代使われている紙と違って繊維が大きめに残っていた。

・実体験を通して古文を学ぶことができたので、もう忘れることはないと思う。

・実物を見ることでイメージが定着して授業も受けやすいと思う。

・勉強の上で必要とは思わないが、良い経験となった。

・本物を知らなくても勉強はできます。

・本物を触る事により古文を勉強することができるかと聞かれると、それはまた違った話であると私は思いました。



写真1　伝飛鳥井雅綱筆切



写真2　繊維調査



写真3　古今集他



写真4　和漢朗詠集

実物を実際に触れることで「物」としての古典を知り、そのうえで内容へと入っていく方法は、活字本文からでは想像しずらい古典の世界をビジュアル化することに一役かうところがあると考える（絵入り本や装飾料紙を用いた写本であればその効果はより高い）。ともあれ、古典に対する興味を喚起することからはじめなければ、古典嫌いを減らすことはできない。即物的ではあるけれども、最も分かりやすい形で興味をひく方法として、オリジナル資史料には以上のような効果が期待されるのである。

さて、オリジナル資史料を授業に取り入れるにあたって留意すべき点が二点ある。第一点は装幀である。古典籍の装幀は、巻子本、折本、粘葉装、列帖装（綴葉装）、袋綴装、包背装、古筆切などと多様である。専門的な書誌学的説明は必要なくとも、紙同士を繋ぐ方法として、糊によるもの／糸によるものの二種類があること、形態としては、巻く／折る／綴じるという三形態にわけられることは示しておくことが望ましい。本と一口に言っても、時代や目的によってその姿が多様であることは、専ら製本された冊子本にのみ触れてきた学生にとって新たな知の地平を開く可能性が高いからである。第二の留意点は書写年代である。時代や書流によって筆跡は大きく異なる。さらに時代によって利用される紙にも変化が生じる。したがって、平安期から江戸期までの幅広い資料を用意し、それぞれの特徴を体感させることも必要である。

近年は印刷技術も発達し、精巧な複製本も作られるようになった。そのため、オリジナル資史料でなくとも複製本でもよいという向きがあるかもしれない。しかしながら、冊子として刊行された複製本では装幀を知ることができない。また、装幀まで復元した複製本であっても、やはり印刷物であることには変わりなく、オリジナル資史料のもつ、紙の感覚や墨の風合いは体感できず、とくに筆の動きや連綿の姿を感得するためには、オリジナル資史料こそが最適である。

以上をふまえて、稿者が行ったオリジナル資史料を利用した授業の成果を次に示す。今回は全ての装幀本を用意することができなかったため、一部に複製本を利用した。また、書写年代を幅広くカバーするために、古筆切（冊子本等の一部を切り取り観賞用に装幀し直したもの）を利用することにした。なお、実験的にマイクロスコープを用いて紙質の違いを測定する試みも行った（写真２）。

四、実践例とアンケート結果

１　実施日　2011/10/17、2011/10/21

２　対象　機械工学科二年Ａ組・Ｂ組、応用化学科二年、都市工学科二年　計一六〇人

３　単元　国語（古文）「和歌史　中古～中世」初回および第二回

４　資料

・筆者未詳真言儀軌問答　断簡　（奈良時代末期書写）
・伝源頼政筆古今和歌集　断簡　（平安時代末期頃書写）
・伝二条為氏筆古今和歌集　断簡　（鎌倉時代後期頃書写）
・伝飛鳥井雅綱筆古今和歌集　断簡　（室町時代後期頃書写）写真１
・伝富小路通治筆後撰和歌集　断簡　（室町時代後期頃書写）
・筆者未詳新続古今和歌集　袋綴装・零本　（室町時代末期頃書写）
・古今和歌集版本　（江戸時代初期刊行）　写真３
・筆のまよひ版本　（江戸時代後期刊行）
※和漢朗詠集巻子本　（複製）
※前田家本古今和歌集　綴葉装　（複製）
※粘葉本和漢朗詠集　粘葉装　（複製）　写真４

アンケート結果　一六〇人（無回答０）

①本物に触れることは、古文を学ぶ時に役立つと思いましたか。

ア	役立つ	122／160　76.3％
イ	そうかもしれない	30／160　18.8％
ウ	役に立つとは思わない	8／160　5.0％

②本物に触れることは、古文を勉強するときに必要だと思いますか。

ア	必要だ	55／160　34.4％
イ	そうかもしれない	65／160　40.6％
ウ	必要ではない	40／160　25.0％

③感想

・理科の実験のように国語にもこういう機会は必要と思う。
・教科書で読みやすくされた字を見るよりも、昔の人が書いた、昔の

ういものであることは事実である。その危うさを理解し、最も蓋然性の高い新たな研究成果を反映した授業が高等専門学校ではできることは、大きな利点と言える。

一例を挙げよう。卜部兼好『徒然草』の「序文」は大方の教科書に掲載されているが、その一節に次の著名な部分がある。

つれ〴〵なるまゝにひくらし硯に向かひて……

この「ひくらし」という四文字を如何に読み、訳すべきか。ある教科書・参考書では「ひぐらし」と読み、「一日中」などと訳されるが、ある本では「日暮らし」と表記され、読み方が明記されおらず、しかしながらやはり「一日中」と訳す。国文学研究・国語学の立場からは、『日葡辞書』(1603～)に「ひぐらし」「ひくらし」ともに立項されておらず、「一日中」という副詞として「ひめもす(Fimemosu)」「みめむす(Fimemusu)」「終日(Xujit)」しか立項されていないことなどを根拠として、「ひくらし」＝「日を暮らす」と解釈するのが近年の通説である（小松英雄 1990 ほか）。受験古典では、そもそもこの部分が問題として出題される可能性が極めて低いために、とくに取り上げられることはない。

しかしながら、この「ひくらし」というたった四つの文字羅列からは、ひとつの大きな課題を学生に示しうる。「清濁とはなにか」という問題である。これは本稿で提示する「オリジナル資史料」を用いた授業とも密に関わる。そもそも文学作品は近世期に到るまで清濁を施すことをしない。したがって、清濁を施すこと（さらには句読点を施すこと）は言葉と文脈の解釈に直結する。「ひくらし」を「ひぐらし」とよむためには、相応の①理的根拠が必要であり、一語の理解には相当の研究が必要なのである。こういった事実を知らないまま、教科書や参考書通りに音読してすましてしまうと、耳慣れない言葉を羅列した文章を無批判に覚えることになり、③果として「古典はよく分からないから嫌いだ」という感想に陥りやすい。④ぜ濁るのか、その根拠と研究史を提示してこそ、言葉そのものへの関心は芽生えると考える。

⑤このように、国文学や国語学・言語学の研究成果を知っているゆえにできる深い教育――ひとつの問題点から派生し、言葉そのものへと関心を羽ばたかせることができることも、高等専門学校における古典教育の強みなのである。

以上、高等専門学校における古典教育が、一般の高等学校のそれよりも大きな可能性をもつことを述べてきた。その特徴を最大限に活かし、古典離れを回避しつつ深い古典理解を促すためには具体的に何ができるのだろうか。稿者はその具体案として「オリジナル資史料」を用いた授業を以下に提示したい。

三、オリジナル資史料とその教育効果

文学作品におけるオリジナルの定義は難しい。これがオリジナルである、というためには、著者が確定していることが前提となるが、古典作品では、著者が判然としない作品が大半だからである。かの『源氏物語』ですら、著者を紫式部と確定することは現段階でもできていないことは周知の通りであろう。では著者がわかっている場合のオリジナルとはなにか。著者自筆本が現存していれば、それがオリジナルとなろう（初稿本・再稿本の問題はひとまずおく）。このように厳密に規定していくと、古典作品のなかでオリジナルが存する例は極めて稀で、平安期成立の作品にオリジナルは現存しないといってよい。おそらく、冷泉家時雨亭文庫に所蔵される、藤原俊成自筆『古来風躰抄』が最古の資料になるのではなかろうか。そこで本稿では、紙に筆で書写された資料（江戸期までに限定する）を、活字化される以前の姿を残すという意味で「オリジナル」と定義する。

オリジナル資史料を授業に取り込む第一の目的は、学生の古典離れを解決することにある。古文の教科書・参考書には、前述のように活字化された本文が掲載されている。そのため一文字一文字は理解できるのだが、仮名遣いが現代と違い、聞いたことのない単語が並ぶことに、微妙な違和感を感じる学生が多いようだ。読めるけれど意味が分からない、しかし日本語である、というある種の矛盾が彼らのなかにはある。そこで、そもそも本来は活字ではないという事実、句読点や濁点がない事実を教えることで、彼らの抱く違和感がむしろ正しい情動反応であることを認めることからはじめることは、半ば強制的に、古文とはこういうものだと形式的に教える教授法よりも、古典嫌いを減らす作用があると期待されるのである。また、

オリジナル資史料に基づく古典教育の可能性

舟見一哉

一、はじめに

平成十四年度高等学校教育課程実施状況調査質問紙調査によると、古文・漢文が好きか否かという設問に対し、総数2270人のうち74.8％の学生が「どちらかといえばそう思わない」、「そう思わない」と回答している。渡辺春美2005の指摘する通り、「古典離れ、古典嫌いに至っているという実態の報告は、戦後の早い時期からなされていたが、今日の実学志向と相俟って、その傾向は強まっている」とみて誤りない。古典離れ・古典嫌いが引き起こす種々の弊害は容易に想像されるが、国際化が進む現在こそ、自国のアイデンティティである文化・言葉・歴史等を知っておく必要があることは言うまでもなく、現在ほど古典教育が必要とされる時期はないように思われる。そこで本稿では高等専門学校という場に於ける古典離れを回避する一手段として、「オリジナル資史料」を用いる授業案を提案し、その実践報告と分析を行う。

二、高等専門学校における古典教育

古典教育は「受験古典」と「学校古典」に大別される（内藤一志1999）。「受験古典」とは、大学入試対策のために行われる教育を指し、品詞分解などの文法学習や内容読解のテクニックをその内容とする。「入試に出る古文単語」「敬語の見分け方」といった試験対策方法の教授を想像されたい。一方の「学校古典」とは、高等学校学習指導要領の「目的」がいう「古典としての古文と漢文を読む能力を養うとともに、ものの見方、感じ方、考え方を広くし、古典に親しむことによって人生を豊かにする態度を育てる」ことを目的とする教育である。

一般の高等学校は大学受験を前提としているため、必然的に受験古典が優先される傾向にある。大学入試科目から古文・漢文が除かれるケースも近年増えてはいるが、おそらくこの傾向は今後も大きく変わることはなかろう。それに対して高等専門学校では、一般の高等学校ほどに受験という枠組みに縛られることがない。高等学校学習指導要領にいう「古典に親しむことによって人生を豊かにする態度」を存分に教授することが可能である。先述の国際化と関連させるならば、国際的に活躍するエンジニアの基礎教養としての「自国の文化」を身につけさせることができる。高等専門学校における古典教育は、この点で一般の高等学校よりも深い教育を行えるわけである。

さらに高等専門学校の国語教員は、最先端の国文学研究を進める研究者でもある。教科教育学としての古典教育と、研究機関において行われる国文学研究とが乖離していることはすでに問題視されており（吉村誠2006ほか）、一般の教員による授業が、国文学研究の立場から言えば極めて危

一般科講師

クルージウスにおける「蓋然性の方法」の展開

手代木　陽*

Die Entwicklung des Wegs der Wahrscheinlichkeit bei Crusius

Yo TESHIROGI*

ABSTRACT

Crusius entwickelt den Weg der Wahrscheinlichkeit in seiner Metaphysik als die Beweisart, darauf man den Satz vor wahr halten ohne seinen Gegensatz zu verneinen. Wenngleich dieser Weg eine andere Art als die Demonstration ist, kann man darauf die gleiche Gewißheit wie die demonstrative bekommen. Crusius beweist darauf das Dasein Gottes als des Urhebers der Ordnung der Welt. Gegen Wolff determiniert er nicht, daß Gott diese Welt als die beste Welt in aller möglicher Welten gewählt und erschaffen hat. Er glaubt, daß Gott die Freiheit gehabt hat, eine andere Welt einzurichten. Der Weg der Wahrscheinlichkeit ist für Crusius sehr treffend, um die Freiheit Gottes rational zu beweisen.

Keywords:　Weg der Wahrscheinlichkeit, moralische Gewißheit, Design Argument

１．はじめに

ドイツ啓蒙主義哲学において蓋然性を自らの哲学の基本的スタンスとして展開したのは、トマジウス以降のいわゆる反ヴォルフ学派の哲学者たちである。中でもクルージウスはそれまでのヴォルフ批判の論点を、独創的な哲学に基づいて体系化した。形而上学をもっぱら「論証の方法」によって展開したヴォルフを批判して、クルージウスは「蓋然性の方法」を形而上学の方法として採用する。それが最も効果的に適用されるのが、「デザイン論証」と称される神の存在証明においてである。

世界には一定の秩序（デザイン）が存在し、秩序が存在するところには秩序を与える者（デザイナー）がその原因として存在する―この一見極めて単純な論理に基づいて世界の秩序の創始者としての神の存在を証明するのがデザイン論証である。その歴史はプラトンのデミウルゴスの証明にまで遡ることができるが、中世のキリスト教世界では護教論として、自然神学の範囲で神の存在を証明する論証として展開された。近世哲学においては否定的に評価されることが多くなったものの、その影響力はなお隠然として継続し、現代の生命科学においてはダーウィニズムに対抗する「インテリジェント・デザイン」と称する新しいパラダイムとしても展開されている(1)。

こうしたデザイン論証はヴォルフ以降のドイツ啓蒙主義哲学においても、信仰を確証する理論として様々な形で展開された。本稿の目的はクルージウスのデザイン論証の独自性を、蓋然性の方法との関係において解明することにある。われわれははじめに1747年の『人間の認識の確実性と信頼性への道』（以下『論理学』と記す。）(2)における蓋然性の方法について概観する。次に1745年の『偶然的な理性真理と対立する限りでの必然的な理性真理の構想』（以下『形而上学』と記す。）(3)の「自然神学」の章におけるデザイン論証を考察し、蓋然性の方法との関係を解明する。さらにヴォルフのデザイン論証との比較を通して、クルージウスの論証の独自性が1750年（1743年初版）の『決定根拠律の、あるいは通俗的には充足根拠律の、用法ならびに限界に関する哲学論稿』（以下『根拠律論文』と記す。）(4)で展開された「充足根拠律」批判に基づいていることを明らかにする。

２．『論理学』における蓋然性

２．１．論証の方法と蓋然性の方法

クルージウスは『論理学』を当時の論理学のテキストの慣習にしたがって「理論的部門」と「実践的部門」に分ける。この理論的部門は伝統的論理学の手続きにしたがい、概念論（第３章～第５章）、判断（命題）論（第６章）、推理論（第７，８章）に区分される。推理論第７章では「推理の第一の根拠」として「矛盾律」、「不可分離律」、「不可結合律」という「理性の最高三原則」を提示する（Ⅲ, S.475-6）。この原則は同時に形而上学の原則で

*一般科　教授

もあり、クルージウス哲学の根幹を成す原則である（Ⅱ, S.26-7）[5]。次に第８章では「推理の異なる方式」として、「論証的推理方式」と「蓋然的推理方式」が提示され（Ⅲ, S.489-490）、第１部で両方式に共通する「推理規則」が、第２部では論証的推理方式が提示される。従来の論理学では理論的部門において扱われているのは論証的推理方式のみであり、蓋然性はたんに論証的推理方式を具体的な内容に適用する仕方の問題として実践的部門で取り扱われた[6]。これに対しクルージウスは蓋然的推理も論証的方式と同等の推理方式として理論的部門に算入する[7]。クルージウスによれば２つの推理方式は推理形式においては一致する。両者が異なるのは「たんに質料において」（ebd.）、すなわち推理に含まれている「命題とその内容」（Ⅲ,S.460）においてである。以下で見るように、クルージウスが理論的部門の第９章「蓋然的なものについて」において論じるのはもっぱら「命題の蓋然性」についてである。したがって厳密にいえば蓋然的推理方式は論証的推理方式を内容的に補完する方式であるということができる[8]。

クルージウスは第９章でまず「論証の方法」と「蓋然性の方法」とを区別する。論証の方法とは「ある命題に矛盾する命題がまったく思考されない場合、…その命題は真と見なされる」（Ⅲ,S.639-640）認識の方法である。これに対し蓋然性の方法とはある命題を「その反対が…なお思考されるにもかかわらず、どちらかと言えば真と見なしたり、偽と見なしたり、あるいは完全に確実であるとさえ見なす」（Ⅲ, S.640）認識の方法である。ここでクルージウスは理性の最高三原則にしたがい蓋然性を以下のように定義する。

> …蓋然性とは、第一義的には、反対が思考されるにもかかわらず、すなわち反対が矛盾を含まず、また一方が本性上他方なしには思考されない諸概念を分離したと言わず、また一方が本性上他方と一つの概念において結合されない諸概念を結合したと言わないにもかかわらず、それによってその命題を真と見なすか、あるいは反対よりも真と見なす傾向のある命題の性質のことである（ebd.）。

蓋然性は矛盾律、不可分離律、不可結合律にしたがってその反対が思考されるにもかかわらず、それによって命題を真と見なす命題の性質である。蓋然性にはその程度に応じて３種類がある。ある命題が「その反対よりも容易に可能であり、どちらかと言えば真と見なされると判断する」場合の蓋然性を「憶測」（Muthmassung）と称する。またある命題が「疑いなくそれにしたがって振る舞うことができる程度に真と見なされるに値すると判断する」場合の蓋然性を「信頼性のある」（zuverlässig）もしくは「信憑性のある」（glaubwürdig）と称する。そして「その反対が思考されるにもかかわらず、多くのことを端的に矛盾なく確実であると見なす」場合の蓋然性を「モラーリッシュな確実性」（moralische Gewißheit）と称する（Ⅲ, S.641）[9]。たとえば「アテネという町が存在した」という命題はモラーリッシュな確実性を有する。モラーリッシュな確実性は、「継続的な探求においてさらに多くの蓋然性の諸根拠が見出される」事物の認識において成立する場合、「無限の蓋然性」とも称せられる（Ⅲ, S.732）。後に見るようにクルージウスはモラーリッシュな確実性を論証の確実性と同等の確実性と見なしている。

２．２．蓋然性の最高原則と源泉

クルージウスによれば、蓋然性の素材は命題の「論理中立的な可能性」（logikalische Möglichkeit）である。「論理中立的な可能性」とは「真と見なすいかなる根拠も、不可能と拒絶するいかなる根拠も持たない命題」（Ⅲ, S.644）の性質である。蓋然性の本質は論理中立的に可能な命題の性質にあり、「その命題の定立において、それに矛盾する命題の定立においてよりも、より少ないものが論証なしに仮定される」（Ⅲ, S.648）命題の性質にある。あらゆる蓋然性は「二つの矛盾的に対立する命題においては必然的に一方が真である」という推理規則と、「いかなるものも十分な認識根拠なしに理性によって真と見なすことはできない」という推理規則から成立する（ebd.）。すなわち命題がたんに論理中立的にのみ可能であるにもかかわらず、その真偽を決定しなければならない場合、その決定はどちらがより十分な認識根拠に基づくかに拠るのである。たとえば「ローマが存在した」という命題は「ローマが存在しなかった」という命題と形式的には矛盾的に対立するが、たんに論理中立的にのみ可能な命題であるが故に、その真偽は認識根拠の量と質によって決定される。クルージウスは蓋然性の最高原則を、「それに矛盾する命題によってよりも、そこにおいてあるいはそれによって論証なしに仮定されることがより少ない命題は蓋然的である」と規定する（Ⅲ, S.649）。そしてこの最高原則に基づいて、「源泉」（Quelle）と称する６つの蓋然的推理の基本形式を提示する。

第一の源泉は「より多様な可能性の考察」で、具体的には起こりうる事象の総数に対して着目事象が起こる可能性の度合いという数学的な確率の定理に相当する源泉である。しかしクルージウスはここで頻度という「数量」を問題にするのではなく、命題の「性質」を問題としており、これを「より多くの仕方で可能なものを措定する人は、…より少ない仕方で可能なものを措定する人よりも、より少ないことを根拠なしに仮定する」と表現する（Ⅲ, S.661）。たとえば当たりより外れが多い籤を引くことは得するより損する可能性が高い。なぜなら損するほうが「より多くの仕方で可能」だからである。

第二の源泉は「より多くの可能性の偶然の一致の考察」

である。すなわちより多くの出来事が同時に起こる可能性はある一つの出来事が起こる可能性よりも低い。なぜならより多くの出来事が同時に起こるためには、ある一つの出来事が起こることより多くの条件を必要とするからである。したがって「偶然に一致しなければならない可能性が、ある命題においてあるいは命題によってより多く仮定されるほど、より多くのことが証明なしに仮定されることになり、それ故その命題は同じことが仮定されない他の命題よりも非蓋然的になる」（Ⅲ, S.665）。後に見るようにこの源泉はデザイン論証に適用される。

第三の源泉は「より実在的な可能性の考察」である。すなわち「述語が主語に属する仕方がより判明に理解されている可能性」は理解されていない可能性より、「より実在的」であり、したがって蓋然的である。またある命題について実例が知られている場合にはそれが知られていない場合よりも、より実在的な可能性があり、蓋然的である（Ⅲ, S.670-1）。

第四の源泉は「類似した事例の期待、あるいは類推」である。これはある事物が持つ性質から他の類似した事物にも同じ性質があることを推理する方法で、「帰納法」を意味する。すなわちこれまで絶えず起こり続けてきたことは、「それによって同じものが表象される共通の本質において、あるいはそれらが相互に共有する恒常的な外的原因においてその根拠を持つ限り」（Ⅲ, S.676）、そのような種類の実例が生じるあらゆる他の未来の場合においても蓋然的である。

第五の源泉は「すでに知られた原因あるいは事物の性質との対立の考察」である。これは「それ自身一般的に見て十分なすでにある原因」に対立する結果は非蓋然的であるとする推理である（Ⅲ, S.689）。

第六の源泉は「諸現象あるいは諸状態との一致」である。これは「ある可能な命題がその反対に比してすでに知られた諸現象とよりよく一致する場合、その命題はそのことによって蓋然的である」（Ⅲ, S.691-2）という推理であり、後に見る「一致の蓋然性」の原理である。現象には２種類ある。いくつかの現象が仮説とのみ一致しそれ自身では相互に連関しない場合、「単純な諸現象もしくは諸状態」と称する。いくつかの現象が相互に連関して一つの仮説と一致する場合「調和した諸現象もしくは諸状態」と称する（Ⅲ, S.693）。クルージウスによれば単純な現象の多数よりも調和した少数の現象の方が命題により大なる蓋然性を与えることができる（Ⅲ, S.694）。

２．３．仮定の蓋然性と一致の蓋然性

次にクルージウスはこれらの源泉から、異なる分野における特殊な推理の基礎となる「仮定」（Präsumition）と称する普遍的・蓋然的命題を導出する。源泉と仮定との関係は、蓋然的推理の基本形式である源泉が特殊な分野や対象に適用されるときに規則として機能するのが仮定であると見なすべきであろう。理論的に解明された源泉は、実際の推理の場面では仮定として機能すると言ってもよいであろう。第一の源泉からは「より多様な可能性の仮定」が生じる。すなわちわれわれは「より多くの仕方で可能なこと」を仮定するが、「原因が稀にしか存在しないこと」は仮定しない。後者を「希少性の仮定」と称する（Ⅲ, S.713）。第二の源泉からは「奇蹟の仮定」（praesumtio mirabilitatis）が生じる。これは「多くの可能性が偶然に一致しなければならないものは仮定されない」（Ⅲ, S.714）というもので、デザイン論証で前提とされる仮定である。第三の源泉からは「より実在的な可能性の仮定」が、とりわけ「十分な原因の仮定」が生じる。すなわち「結果に対する十分な原因を知っており、いかなる妨害も見出さないとき、それが結果として生じることが仮定される」（ebd.）のである。第四の源泉からは「つねに生じる類推の仮定」と「たびたび生じる類推の仮定」が生じる。すなわち「これまでつねに生じたことあるいはたびたび生じたこと」が適合した条件の下で仮定される（Ⅲ, S.716-7）。第五の源泉からは「すでに存在する十分な原因に対立するものは期待されない」という「不一致の仮定」が生じる（Ⅲ, S.718）。

ところで「諸現象あるいは諸状態との一致」という第六の源泉からは仮定が導出されない。これは第六の源泉が他の源泉とは性格を異にする源泉であることを意味する。これを説明するのが「仮定の蓋然性」（Präsumitions=Wahrscheinlichkeit）と「一致の蓋然性」（Uebereinstimmungs=Wahrscheinlichkeit）という二つの蓋然性の区別である。クルージウスによれば命題の蓋然性は上述の諸仮定に基づくか、諸現象や諸状態との一致に基づくか、あるいはその両方に基づくかのいずれかである（Ⅲ, S.711）。諸仮定に基づく場合が「仮定の蓋然性」である。たとえば「嘘つきは将来嘘をつくであろう」という命題は、蓋然性の第三の源泉から導出された「より実在的な可能性の仮定」に基づいて、「嘘をつかないであろう」という反対命題より蓋然的であると判断される。仮定の蓋然性は反対命題が仮定に反することにのみ基づいているので、その度合いを規定することは不可能である。したがって仮定の蓋然性には「対立する諸根拠の非規定的な比較のみ」[(10)] が存在するのであり、一般に蓋然性の度合いの規定は、命題がどれだけの諸現象や諸状態と一致しているかという「一致の蓋然性」においてのみ可能である。すなわち第六の源泉から導出されるのはこの「一致の蓋然性」なのである。

クルージウスによれば「一致の蓋然性」にはさらに二つの蓋然性の区別が存在する。たんに諸現象や諸状態との一致のみから命題の蓋然性を認識する場合、この蓋然性は「単純な一致の蓋然性」と称する。これに対して「一致の蓋然性」が「仮定の蓋然性」と混合する場合がある。この混合は両種の蓋然性の根拠の結合によってか、ある

いは両種の蓋然性から同時に証明力を受容した蓋然性の根拠から生じる。前者の場合、両種の蓋然性の根拠はその結合においてもなお「異なる証明根拠」と見なされている。これに対して後者は上述の「調和した諸現象もしくは諸状態」から生じる蓋然性で、「合成された一致の蓋然性」(zusammengesetzte Uebereinstimmungs=Wahrscheinlichkeit)と称する。この場合調和した状態は、「もしそれらが調和していると仮定しなければ、われわれはある普遍的・蓋然的命題に反して行動しなければならなくなるという理由で、調和的であることを維持している」(Ⅲ, S.712)のであり、両種の蓋然性の根拠は言わば相即的に成立し、より大なる証明力を生み出している。デザイン論証で問題となる蓋然性はまさしくこの「合成された一致の蓋然性」に他ならない。この点を次に『形而上学』において考察する。

３.『形而上学』における蓋然性

３．１．形而上学と蓋然性の方法

クルージウスは『形而上学』の「存在論」の第１章において、形而上学の方法として論証の方法のみを重視する立場を批判して、「蓋然的証明が形而上学から除外されなければならないということを認めることはできない」(Ⅱ, S.18)と主張する。蓋然性を除外することを望む意見は、一つには「多くの論理学の不完全性」に、今一つには「確実性と必然性が混同されていること」に基づいている(ebd.)。クルージウスによれば確実性とは「思考する者がある事柄について持つ認識に関して、その事柄について措定したことにおいて、もはやいかなる反対への恐れも存在しない思考する者の状態」(Ⅲ, S.750)のことであり、「たんに悟性のうちにあるもの」(Ⅱ, S.18)である。これに対して必然性は事柄が「それ以外ではありえない場合」の状態のことであるが、それは「事柄自身の性質のうちにあるもの」(ebd.)である。われわれは事柄そのものが必然的であれ偶然的であれ、「より確実な根拠を洞察し、その事柄について抱く思考がわれわれを欺くという、恐れるべき原因をもはや持たない」(Ⅱ, S.18-9)とき、それを確実に認識する。事柄の存在が確実であるということから直ちに「その反対が矛盾するが故に、あるいはまったく思考されないが故にそのことを認識しなければならない」(Ⅱ, S.19)ということは帰結しない。事柄の必然性についての判明な認識は確かに確実性を与えるが、逆に「必然性を判明に洞察する以前には確実性を持たないことは帰結しない」(ebd.)のである。

クルージウスにとって形而上学の目的は、その著作の表題が示す通り、必然的真理の探究にある。そして真理を必然的たらしめるものは「われわれの思考の外にある事物そのもの性質のうちにおける或るもの」(Ⅱ, S.17)である。これに対して「論証と蓋然性はわれわれの認識のたんなる区別された種類にすぎない」(ebd.)のである。ここからクルージウスは次のように言う。

> ひとつの真理が論証的証明同様蓋然的証明によって何度も示される。論証的に証明すべきところでも、蓋然的証明がつねに不必要であるわけではない。なぜなら心とその状態の相違にしたがって、ときにはある種の証明が、ときには他の種類の証明が最も強い印象をなすのであり、したがって極めて重要な命題においては、両者が統括されるのが妥当であることは言うまでもないことだからである。さらにその推理様式から見て蓋然的である証明は、ある状態においては論証的証明と同様に確実性へと導くのであり、幾人かがこれを洞察しないのは、たんに欠陥のある論理学にその責任があることは言うまでもないことである。だから一般にわれわれが論証的推理様式にしたがってなされた証明自身にも、蓋然性のゆえにはじめて疑いえない賛同をあたえることは、とりわけ蓋然的証明の擁護に役立つであろう(Ⅱ, S.17-8)。

クルージウスが蓋然性の方法を形而上学から除外することに反対するのは、この方法が形而上学の方法として論証の方法と種類を異にする方法でありながら、同様に確実性を有する方法でもあることにその理由があった。そしてこの方法が形而上学において最も効果的に適用されるのがデザイン論証である。

３．２．デザイン論証と蓋然性

クルージウスは『形而上学』の「自然神学」の第１章において、神の存在証明を論証の方法、「無限の蓋然性」の方法、一般的な蓋然性の方法という三つの方法を用いて行っている(Ⅱ, S.361)。論証の方法はいわゆる「宇宙論的証明」に適用され、クルージウスはこの証明を、世界を構成する単純な事物からの証明、世界において見出される諸変化に基づく証明、運動の系列からの証明、偶然性の証明、「一義的な原因」(causae univocae)の系列からの証明として行っている。「無限の蓋然性」の方法とは神の存在を、その反対の論理的可能性を否定することなく、無限に多くの根拠に基づいて証明する方法であり、デザイン論証に適用される[(11)]。一般的な蓋然性の方法は歴史からの証明、「神が存在する」という意見の普遍性からの証明、本性的な良心の欲求からの証明に適用される。「無限の蓋然性」の方法が論証の確実性に匹敵する「モラーリッシュな確実性」に到達する方法であるのに対し、一般的な蓋然性の方法は根拠の量と質に応じた蓋然性の度合いに到達する方法である。

クルージウスはまず神の存在証明において前提されなければならない主要原則として、矛盾律、充足根拠律、「その非存在が考えられるすべてのものはかつて存在しなかった」という偶然律、そして「理性的な人間はその理性

の本質にも適うように振舞わなければならない」という道徳律を挙げる（Ⅱ,S.350-1）。このうちデザイン論証の前提となる原則は道徳律である。クルージウスは道徳律によって理解されている重要な命題として、「多くの偶然的な事物が、…それらの連関から秩序や合法則性が発現するという仕方で統合されていると考えることは理性的ではない」（Ⅱ, S.353）という命題を挙げる。この命題は上述の「奇蹟の仮定」に当たる。この論理的前提の根拠は「…一方の命題の措定において、他方の命題の措定においてよりも多くのことが根拠なしに仮定されなければならない場合、その措定において最も少ないことが根拠なしに仮定される命題を真と見なすことが理性に適っている」（Ⅱ, S.355）という蓋然的推理の第二の源泉である。世界の秩序の原因としての神の存在の蓋然性は第一に「奇蹟の仮定」に基づく「仮定の蓋然性」として評価される。さらにクルージウスはこの蓋然性を「一致の蓋然性」と結合する。すなわち「…一致する状態の数あるいは一致そのものとその多様性が考えられないほど大きい場合には、そしてわれわれの認識が拡大すればするほど、われわれはより多くの一致をも知覚するであろうということを見通すことができる場合には、あるいはさらにその上に、このような仕方で証明されたものが、さらにもっと多くの他の仕方でも示されうる場合には、そこから完全な確実性が生じることは疑いえないことである」（Ⅱ, S.357）。この蓋然性は上述の「無限の蓋然性」に他ならない。また「世界の異なった部分はつねに相互に関係している」（Ⅱ, S.390）から、この「一致の蓋然性」は「調和した諸現象もしくは諸状態」から生じる蓋然性である。したがってクルージウスのデザイン論証の骨格は「合成された一致の蓋然性」に他ならないのである。以上の前提を踏まえてクルージウスは『形而上学』第 221 節で以下の証明を展開している。

> 物質はいかなる理念を持つこともできないので、思慮のある原因によって統治されることなしには、理念にしたがって秩序ある作用を及ぼすことはできない。したがってこの秩序と合法則性は、世界がそこから区別された思慮のある原因によって形成されたことを示しているか、あるいはこの秩序や合法則性はたんに見かけ上のものであり、偶然生じたあるものが存在することを認めなければならないかのいずれかである。ところで後者は無限大の非蓋然性を有する。それ故、それでもなお後者を仮定することは極めて愚かなことであろう。したがって、前者すなわち世界における秩序と合法則性が世界から区別された思慮のある原因に帰せられるということ、したがって神は存在するということは、論証的（demonstrativ）に確実であると見なされるべきである（Ⅱ, S.387-8）[12]。

すなわち世界の秩序と合法則性の原因をまったくの偶然の所産とすることは、「多くの可能性」が同時に成立することを前提とするため、「奇蹟の仮定」に基づくことになり、「無限大の非蓋然性」を有することになる。これに対して「思慮のある原因」としての神の存在という「ただ一つの可能性」（Ⅱ, S.395）を承認すれば、世界の秩序と合法則性を合理的に説明できる。それ故に神が存在する、というのがこの証明の趣旨である。

デザイン論証は世界の秩序という経験的な事実からその創始者としての神の存在を推理する証明であり、本来ア・ポステリオリな証明である。しかしクルージウスの推理は単純な帰納的推理ではない。それは今日の科学的推理法の一つである「アブダクション」すなわち「最善の説明への推論」に相当すると考えられる。すなわちある説明を必要としている事実があって、さまざまな仮説の可能性の中で唯一実行可能な仮説を正しい仮説として選択する方法である[13]。たとえば「シーザーが存在していた」という仮説は、われわれは直接シーザーを見たわけではないが、しかしその人が実在したと考えなければ彼に関わる無数の文書や遺跡を説明することができないから正しい仮説であるという推理である。この推理は単純に黒いカラスを枚挙することから「すべてのカラスは黒い」という一般的真理を導出する帰納的推理とは異なり、さまざまな文書や遺跡を説明するために「シーザーが存在していた」というわれわれが直接経験することのできない仮説を形成する推論であり、独特の飛躍を伴う推理である[14]。こうした推理によるデザイン論証は反ヴォルフ学派の他の哲学者にも見出されるが、クルージウスの証明の最も特徴的であると同時に最も問題とされるべき点は、世界の秩序や合法則性を思慮のある原因としての神に帰することが「論証的に確実であると見なされるべきである」とされていることであろう。ここで「論証的に」というのは文字通り論証の方法によってということではなく、その確実性に関して「論証の確実性」に匹敵する「無限の蓋然性」によってということを意味すると考えられる[15]。なぜ無限の蓋然性による確実性が論証の確実性に匹敵するのだろうか。これについてクルージウスは『形而上学』第 207 節で次のように述べる。

> そこから生じる確信の確実性は、さもなければ無限に多くの蓋然性が一度に欺かなければならないことになるから、その同意への自然的（physicalisch）傾向に関してと同時に、そこに源を発する同意への道徳的責務に関して、幾何学的論証と完全に同じであるほど大きな確実性である（Ⅱ, S.357）（傍点は隔字体）。

その主たる理由の一つは「同意への自然的傾向」すなわち「心を同意へと傾ける自然的作用に関して」（ebd.）無

限の蓋然性による証明が幾何学的論証と同じ力を及ぼすことができるという心理的理由である。上述のように確実性とは「思考する者がある事柄について持つ認識に関して、その事柄について措定したことにおいて、もはやいかなる反対への恐れも存在しない思考する者の状態」（Ⅲ, S.750）のことであり、思考する者の心理状態を意味する。ここでは本来異なる推理方式と見なされた論証の方法と蓋然性の方法が、確実性という心理的メルクマールに還元されることで、その区別が解消される傾向にある。今一つは「同意への道徳的責務」に関して、蓋然性を拒否すれば愚かさや悪意が無限に増大するという理由である。さらにクルージウスによれば無限の蓋然性はわれわれの心に対する作用において、論証よりも大きな力を持ちうる。われわれはしばしば真の論証と誤った論証とを混同することを知っている。たとえ「…論証の結論が客観的に確実であるとしても、それが正しい論証であることが決定されるまでは主観的に確実ではなく、悟性を反対の恐れから解放しない」（Ⅲ, S.748-9）のである。論証の正しさは蓋然的推理によってはじめて確証される。また論証は「唯一の箇所においてあることが見誤られれば、論証全体が用をなさず、結論は些かの確実性さえもそれによって得られなくなる」（Ⅱ, S.359）ことが知られている。しかし無限に多くの蓋然性による命題の証明は、「無限に多くの状態や蓋然性が証明に一致するので、このような恐れは取り除かれる」（ebd.）のである。

こうした無限の蓋然性による確実性すなわち「モラーリッシュな確実性」を論証の確実性と同等の確実性と見なすクルージウスの見解をわれわれはどのように評価すべきであろうか。論証的に確実な命題とは、その反対が矛盾するが故に「論理的に不可能」な命題である。これに対してモラーリッシュに確実な命題とは、その反対は矛盾を含まず論理的に不可能ではないが、これまで一度も成立していないが故に「現実的には不可能」と見なされている。たとえば「太陽は東から昇る」という命題はその反対を考えることは論理的に可能であるが、現実的には不可能である。しかしわれわれはその反対が不可能であることを「証明する」ことはできず、せいぜい「仮定的に想定」することができるのみである。これに対し論証的に確実な命題の場合、われわれはその反対の不可能性を矛盾律にしたがって「証明する」ことができる。ここに両者の相違があるのではないだろうか[16]。モラーリッシュな確実性が無限の蓋然性によって保証されるものであっても、その反対の不可能性が証明されない以上、これを論証の確実性と同一視することはできないであろう。無限の蓋然性は「蓋然性の最大限」であっても、論証の確実性と見なすことはできないであろう。ではわれわれはクルージウスの論証の独自性をどこに見出すべきであろうか。次にこの点をヴォルフのデザイン論証との比較を通して考察する。

３．３．ヴォルフの論証との比較―「充足根拠律」批判

ヴォルフは1730年の『マールブルク時間外講義』の「自然の秩序から神の存在を論証する方法について」と題する章においてデザイン論証を展開している[17]。そこでヴォルフは以前この論証方法について批判したことに言及し、「秩序が存在するところには、秩序を与えるものが存在する」という命題は、偶然的な秩序について是認されるのでなければ真理ではないと述べる。なぜなら自然の秩序はヴォルフが批判するスピノザや宿命論者も認めているのであり、しかも彼らはその偶然性を否定しているからである。ヴォルフにとって自然の秩序とは「運動力の変容」のうちに存する秩序であり、「自然の秩序が存在することを証明しようとすれば、物体における速度と方向が一定の確立された法則にしたがって変化することを証明しなければならない」のである[18]。すなわちここで自然の秩序とは自然の因果法則を意味する。重要なのはこの因果法則が偶然的であることを証明することである。ヴォルフは「すべての仕事は自然の運動の法則が、言わば偶然的なものの源泉である充足根拠律に依存することを認識することにある」と述べる[19]。自然の運動の法則の充足根拠とは「物体の運動がなぜ他の法則よりもむしろこの法則にしたがって生じるのかという根拠」である。すなわちヴォルフが自然の運動の法則を偶然的と見なすのは、スピノザのように他の法則が存在する可能性を否定してはいないからである。

そしてこの根拠が含まれているのが「秩序の創始者」すなわち神である。ヴォルフは『世界論』において、他のものに還元不可能な物体の内的原理を「要素」（elementum）と称し、この要素が単純実体であることを明らかにした[20]。物体の運動の法則はこの単純実体の変化の法則に由来し、他の運動法則がなければならないときは他の単純実体が存在しなければならない。すなわち物体の運動法則の偶然性は物体の要素である単純実体の偶然的な存在に依存し、この世界の偶然的な存在もそれに還元される。ところでヴォルフは『世界論』において、これらの要素が「目的根拠」（ratio finalis）によって「同位的秩序」（coordinatio）に置かれ、究極的には神に由来すると述べている[21]。なぜ他の要素よりもむしろこの要素が存在するのかという根拠は「秩序の創始者」である神に由来するのである。そして「秩序の創始者」が神であることは、聖書の中の神に一致する属性、たとえば全知や全能といった属性を有する存在者だけが自然の秩序の充足根拠を含みうることから明らかである。

以上のようにヴォルフは自然の秩序の偶然性が物体の要素である単純実体の偶然性に依存すること、そして要素の目的根拠が神にあることを明らかにすることによって、自然の秩序の創始者が神であることを証明しようとしているのである。その証明の前提となっているのは「充足根拠律」である。すなわちヴォルフのデザイン論証は

自然の秩序の原因としての神の存在を充足根拠律に基づいて「論証的に」証明する試みであると言える。

これに対してクルージウスのデザイン論証は充足根拠律に基づく証明ではなく、「理性的な人間はその理性の本質にも適うように振舞わなければならない」という道徳律に基づく証明と見なされていた。これはクルージウスの充足根拠律批判に基づいている。クルージウスによれば、神の存在証明に必要な原則のうち充足根拠律、偶然律、道徳律は、従来一括してライプニッツの充足根拠律に置き換えられていた。しかし充足根拠律は極めて多義的であり、部分的に誤った意味も含まれている。たとえば「純粋に観念的なア・プリオリな認識根拠」が含まれることによって、スピノザのように実体の概念から世界の必然性がア・プリオリに導出されることになる（Ⅱ, S.351-2, Ⅳ.1, S.249）。確かにライプニッツの充足根拠律は反対の事態の可能性を否定していない点においてスピノザの決定論とは異なる。しかし実際に成立するのは唯一の事態のみであり、結局はある事態が「このあり方においてのみ存在あるいは生起するように決定する」根拠であるが故に「決定根拠律」（principium rationis determinantis）と称されるべきである（Ⅳ.1, S.192）。そしてその妥当性は作用因と現実存在決定根拠すなわち「同時にア・プリオリな認識根拠でもある実在根拠」に制限されるべきである、というのが『根拠律論文』におけるクルージウスの批判の主旨であった。

確かにクルージウスは「作用因」としての神の存在を充足根拠律に基づいて論証的に証明している（Ⅱ, S.362 ff.）。しかしデザイン論証は世界の秩序という経験的事実からその「目的因」としての神の存在を証明する営みであり、本来ア・ポステリオリな論証である。クルージウスによればア・ポステリオリな論証とは事柄がたんにある「ということ」（quod）の認識であるのに対し、ア・プリオリな論証とは事柄が「なぜあるのか」（cur）という認識である（Ⅳ.1, S.243）。デザイン論証がア・ポステリオリな論証であるとすれば、それは世界の秩序に基づいて「神が存在すること」を証明することである。ライプニッツの充足根拠律では、根拠とはそれによって事柄が「なぜあるのか」が認識されるものであるから、ア・プリオリな認識根拠のみが含まれていることになる（Ⅳ.1, S.243-4）。もしライプニッツの充足根拠律に基づいてデザイン論証を行うとすれば、本来ア・ポステリオリな認識根拠をア・プリオリな認識根拠と見なす誤謬を犯すことになる。ヴォルフのデザイン論証は「なぜ他の秩序よりもむしろこの秩序が存在するのか」ということの充足根拠としての神の存在証明であった。しかしクルージウスにとってそれは神を「この秩序」の根拠として決定してしまうことを意味した。すなわち他の仕方が不可能ではない世界の秩序の成立を「このあり方においてのみ」決定することで、他の可能性を排除してしまうのである。クルージウスの意図は神が唯一「この秩序」の根拠であることを決定することなく、神が存在することを証明することにあった。クルージウスはデザイン論証の本質がこうした「非決定性」にあることを示していると言える。ではこの非決定性は何を意味するのであろうか。

３．４．神の自由と蓋然性

クルージウスがア・ポステリオリな認識根拠で最も問題にしたいのは、実は人間の自由な行為の予知の問題であった[(22)]。クルージウスによれば自由な行為はア・ポステリオリにのみ認識可能である。なぜなら「自由な行為は十全な決定根拠を欠いているが故に、有限の知性によっては蓋然的にしか予知されえない」からである（Ⅳ.1, S.254）。ライプニッツの決定根拠律は「いかなるものについてもア・プリオリの根拠が存在する」と主張する原理であるため、ア・ポステリオリな認識根拠の意義を正当に評価していないのである（ebd.）。そして自由な行為のア・ポステリオリな認識は蓋然性の方法による認識に他ならないのである。

> 有限な悟性が自由な行為について予知すべきことは、蓋然性の方法によって認識しなければならない。なぜなら論証の方法で認識するとしたら、有限な悟性はその存在や性質をその決定根拠から予知することができるに違いないが、それは矛盾している。なぜなら自由な行為はそれによって自由であることをやめてしまうからである（Ⅲ, S.735）。

クルージウスによれば自由とは「それによって主体が一様に措定された諸状態において、ある行為を行ったり、中止したり、他の仕方で企てることができる作用」（Ⅱ, S.876）である。彼は「存在論」第５章でこの作用を「自由の根本作用」（Grundthätigkeiten der Freyheit, actiones primae liberae）と称し、存在論的に解明している（Ⅱ, S. 143）。「根本作用」とは「他の作用を介さずに主体の力から直接生じる作用」（Ⅱ, S.139）であり、「自由の根本作用」とは「諸条件が措定されれば生じうるが、しかし生じないことも、あるいは他の仕方で企てられることもありうる」（Ⅱ, S.140）根本作用である。しかしこの作用は「盲目の偶然」によって生じるのではなく、作用する主体においてつねにしかるべき原因を持っている。その原因とは「それによって根拠づけられたものが、これらの諸状態においては他にはありえないという仕方で現実的あるいは可能的になる根拠」である「決定根拠」（determinirender Grund）ではなく、「そこにおいて原因性にとって必然的ないかなるものも欠けていない」ところの「充足原因」（zureichende Ursache）である（Ⅱ, S.148-9）。クルージウスはこの充足原因について『根拠律論文』第 45 節で以下のように述べる。

したがって正確かつ厳密に言えば、私見によると自由な行為においても充足根拠が保持されている。もちろんそれはたんに充足原因であって、それに加えてさらにただ一つの行動様式へと決定された原因ではない。なぜなら自由な実体は、それが自由に行為するときは行為への十分な力を備えているが、しかし確かに自由に行為している限り、その行為を中止するために同様に十分な力も備えているからである。自由な実体が企てることはその力を越えておらず、それ故にそのための十分な力が存在している。しかし同時にそれらを実現するためにこの同じ力が同様に十分であった他の多くの行為も存在していたのである。私は留まることもできるが、私は去る。私は去ることもできるが、留まる。私はどちらもできるが、新たな決定根拠を必要としているわけではなく、自分で自分を決定する。すなわち存在あるいは行為の等しく可能な数多くの様式のうちから、或る一つの様式を選び出し、私の行動力は行為できることから行為することそれ自体へと、その生得的な能力（habilitas）によって移行していくのである（Ⅳ.1, S.259-260）（傍点は隔字体）。

充足根拠はある行為を行うのに十分な力を備えているが、決して唯一つの行為に決定するように強制する根拠ではない。それはその行為を中止することにも、あるいはその行為以外の行為を実現することにも、同等に十分な力を備えた根拠でありうる。充足根拠は「自由な行為を完全に決定するのではなく、行為する精神をたんにあるものに傾かせる（geneigt machen）」（Ⅱ, S.877）だけの根拠である。たとえば強さが等しい二つの根拠のうち一方を選択しそれにしたがって行為することもできるし、より強い根拠に対抗してより弱い根拠を選択しそれにしたがって行為することも可能である。クルージウスは自由が「理性的精神の欲求の諸対象において選択することができる力」（Ⅱ, S.878）であるとも述べている。「自由の根本作用」はクルージウスの形而上学の「本質的動機」であり、ヴォルフの決定論的な存在論に対する「論争の要石」でもあるのである[23]。

こうした「自由の根本作用」によって、クルージウスは神の自由をも存在論的に説明する。クルージウスによれば、神の自由とは「それによって行為が諸状態において生じたり、中止されたり、あるいは他の仕方で生じることができるほどに、神が自らの行為を始めたり、継続したり、終わらせたりできる神の意志の特性」（Ⅱ, S.570）である。神が行為を諸状態において実行したり中断したりする自由を「矛盾の自由」（libertas contradictionis）、神が諸状態においてあの仕方あるいは他の仕方で行為を企てることができる自由を「反対の自由」（libertas contrarietatis）と称する（Ⅱ, S.570-1）。この「反対の自由」について、クルージウスは次のように述べる。

したがって神は世界をより先にもより後にも創造することができたのである。そして神がなぜ世界を神の永遠性の他の時点ではなくこの時点において創造したのか、といういかなる決定根拠も不可能である。したがって神は世界の始まりをたんに任意に規定したのであり、反対の自由を持っているのである（Ⅱ, S.572）。

ヴォルフはこの世界が「最大完全性」を有するが故に神によって選ばれた「最善世界」であると考えていた。これに対してクルージウスは、「最善世界」という命題は「誤ってそう名付けられた充足根拠律」によって、「神が多くの可能的諸世界の中から、なぜ他の世界ではなくこの世界を選んだのかという決定根拠を持っていたに違いないということが信じられた」ために主張されたと述べる（Ⅱ,S.748）。すなわちこの命題においては「あらゆる可能的諸世界の中である一つの世界が最善であることが前提とされている」ために、神は創造において最善世界のみを選ぶことが「決定」されており、「最善世界以外のいかなる世界も現実化することはできなかった」ことになってしまうのである（Ⅱ, S.749）。もしライプニッツの「決定根拠律」が無制限に認められれば、神の「反対の自由」は廃棄されてしまうであろう（Ⅱ, S.749-750）。また世界が「最大完全性」を有するということ自体が不可能である。なぜなら世界の完全性は「有限な完全性」であり、つねに「より大なる完全性が考えられる」からである（Ⅱ, S.298）。すなわち神は「前進的無限」（Infinitas progressiva）によってより多くを付加することができるのである（Ⅱ, S.743）。神が創造する世界は最善世界ではなく、たんに「非常に善い世界」に過ぎないのである（Ⅱ, S.753-4）。クルージウスは決定根拠律に基づく最善世界を否定することによって神の「反対の自由」を確保しているのである。

4．結論

以上の考察からクルージウスが主張する自由の本質はその「非決定性」にあると言える。そしてこの非決定性はデザイン論証の非決定性に通じている。なぜならクルージウスはこの論証において、世界の秩序を「他の仕方においても」創造できる自由なデザイナーとしての神の存在を証明していると言えるからである。したがってクルージウスの意図は、人間の自由な行為を蓋然性の方法によって認識するのと同様に、自由な神の存在をこの方法に基づくデザイン論証によって証明することにあったと言えるのではないだろうか。世界の秩序を偶然の所産と見なすことは不可能ではないが、「合理的」ではない。世界の秩序の原因をその創始者としての神に帰することは「合理的」であるが、予め決定されているわけではな

い―クルージウスのデザイン論証の主旨を簡潔に表現すればこのように言うことができるであろう。一見消極的とも思われるデザイン論証の非決定性は、実は神の自由を合理的に確保する巧妙な戦略であり、それを可能にしたのが蓋然性の方法なのである。したがって、クルージウスの蓋然性の方法の独自性はヴォルフ学派に見られる決定論的な困難を緩和した「非決定的合理性」にあると言えるであろう。

註

(1) cf. William A. Dembski & Sean McDowell, *Understanding Intelligent Design: Everything You Need to Know in Plain Language*, Oregon, 2008.

(2) Christian August Crusius, *Weg zur Gewißheit und Zuverlässigkeit der menschlichen Erkenntnis,* Leipzig, 1747, in： ders., *Die philosophischen Hauptwerke* (=CP), Bd.Ⅲ, hrsg.v. Giorgio Tonelli, repr. Hildesheim, 1965.『哲学主要著作集』からの引用は巻数（ローマ数字）、分冊数（アラビア数字）、頁数（アラビア数字）を本文中と註で表記した。

(3) C. A. Crusius, *Entwurf der nothwendigen Vernunft=Wahrheiten, wiefern sie den zufälligen entgegen gesetzt werden*, Leipzig, 1745, CP. Bd.Ⅱ, repr. Hildesheim, 1964.

(4) C. A. Crusius, *Dissertatio philosophica de usu et limitibus principii rationis determinantis, vulgo sufficientis,* 1750(2), 1743(1), CP. Bd.Ⅳ.1, *Kleinere philosophische Schriften*, hrsg.v. Sonia Carboncini und Reinhard Finster, Teil 1, repr. Hildesheim, 1987, S.182-324.（邦訳：C. A. クルージウス『決定根拠律の、あるいは通俗的には充足根拠律の、用法ならびに限界に関する哲学論稿』、山本道雄訳、『文化學年報』神戸大学大学院文化学研究科、第９号、1990 年、P.44-116 所収.）

(5) 『形而上学』第 15 節では、矛盾律は「いかなるものもあると同時にないことはできない」、不可分離律は「互いに他方なしに思惟されえないものは、他方なしに存在しえない」、不可結合律は「互いに結合されて思惟されえないものは、たがいに結合されて存在しえない」と表現されている。

(6) クルージウスの『論理学』は彼の師であるＡ．Ｆ.ホフマンの『論理学』（Adolf Friedrich Hoffmann, *Vernunft=Lehre, Darinnen die Kennzeichen des Wahren und Falschen Aus den Gesetzen des menschlichen Verstandes hergeleitet werden*, Leipzig, 1737）の強い影響下で成立し、多くの学説を共有しているが相違点もある。ホフマンの『論理学』においては従来通り蓋然性の問題は実践的部門で扱われている（A.F.Hoffmann, a.a.O., 2.Teil, 8.Cap., S.1075ff. テキストは Dietrich Scheglmann Reprintverlag の CD-ROM 版を使用した）。

(7) 理論的部門では蓋然性についての一般的な理論が展開されるのに対し、クルージウスが実践的部門で扱っている蓋然性は、「歴史的蓋然性」や「解釈学的蓋然性」といったより特殊な対象に適用された蓋然性である（Ⅲ, S.1041ff.）。現在の解釈学においては、トマジウス以降の解釈学的蓋然性の理論の展開をシュライエルマッハーの先駆的業績として評価する見解もある。Carlos Spoerhase, Die „mittelstrasse“ zwischen Skeptizismus und Dogmatismus： Konzeptionen hermeneutischer Wahrscheinlichkeit um 1750. in: *Unsicheres Wissen. Skeptizismus und Wahrscheinlichkeit 1550-1850*, hrsg. v. C. Spoerhase, Dirk Werle, Markus Wild, Berlin/New York, 2009, S.269-300.

(8) クルージウスは『形而上学』第 15 節で「これら最高の根拠（＝理性の最高三原則：論者）から、…すべての真理の認識が、つまり論証的真理や蓋然的真理が導出される」（Ⅱ, S.27）、また『論理学』第 421 節で「蓋然性の認識方法は最高原則に源を発する推理規則の特殊な適用に他ならない」（Ⅲ, S.753）とも述べている。

(9) moralisch を「道徳的」と訳さず、原語の通り「モラーリッシュ」と表記したのは、この語が極めて多義的に用いられ、「道徳的」という一語では到底訳しおおせない含みの多い語であるからである。Ｓ．Ｋ．クネーベルによれば、近世初期のスコラ哲学においては確実性や必然性に関して、〉moralisch〈/〉physisch〈/〉metaphysisch〈という三文法が頻繁に用いられた。しかしこの三文法は「世界を異なる事象の領域に区分すること」ではなく、「形式的で、高度に普遍化可能な識別方法」を意味し、討論や証明において「矛盾したものを回避する一つの戦略」を意味したのである（Sven K.Knebel, *Wille, Würfel und Wahrscheinlichkeit. Das System der moralischen Notwendigkeit in der Jesuitenscholastik 1550-1700,* Paradeigmata 21, Hamburg, 2000, S.127.）。すなわち moralisch という語は physisch や metaphysisch と異なる対象の確実性や必然性を示すために用いられたのではなく、確実性や必然性の異なるレベルを示す語として用いられたのである。metaphysisch が付加される場合にはその反対が不可能な「絶対的必然性」が含意されるのに対し、moralisch や physisch が付加される場合にはその反対が可能な必然性が含意されている。physisch が付加される場合、その反対が意味するのは「奇蹟」のような「超自然的出来事」であり、moralisch が付加される場合、その反対が意味するのは「極端に非蓋

然的な出来事」である。したがって moralisch が付加される場合にも、自然現象から区別された人間の行為の必然性が問題になっているわけではなく、physisch が付加される場合と同様に「一定の出来事の出来」を含意しているのである（S.K. Knebel, a.a.O., S.131-2.）。また physische Gewißheit は moralische Gewißheit よりも高次の確実性を含意とする解釈もある（Joachim Ritter/ Karlfried Gründer/Gottfried Gabriel(hrsg.), *Historisches Wörterbuch der Philosophie,* Basel, 1971-2007, Bd.3., S.593）。こうした用語法をドイツ啓蒙主義哲学に導入したのはライプニッツであり、クルージウスはこの用語法を継承していると言える。

(10) A.F.Hoffmann, a.a.O., 2.Teil, 8.Cap., §91, S.1133.

(11) ホフマンの『論理学』においても、蓋然性の根拠の数が無数である場合「計り知れないほどの大きさの蓋然性」が成立すると述べられている（A.F. Hoffmann, a.a.O., 2.Teil, 9.Cap., §38, S.1177.）。しかしこの蓋然性が形而上学に適用可能であるという主張は見られない。

(12) この証明は形式的には「選言三段論法」にしたがっている。

大前提：世界の秩序と合法則性は思慮のある原因（神）によって形成されたか、偶然生じたかである。

小前提：後者は非蓋然的である。

結論：故に世界の秩序と合法則性を思慮のある原因（神）に帰することが蓋然的である。

クルージウス自身蓋然性の方法の基礎には「選言的推理」があることを指摘している（Ⅲ,S.651）。ここでクルージウスは世界の秩序と合法則性が思慮のある原因（神）に帰せられることをその反対の「非蓋然性」を示すことによって証明することを試みており、いわゆる「帰謬法」を用いている。帰謬法は本来ある命題の反対の「不可能性」によってその命題の真理を証明する方法であるが、反対の「非蓋然性」においてはすべての秩序と合法則性を偶然に帰することの不可能性が証明されたわけではないので、完全に不可能であることを証明するためには残りの選択肢をなお消去し続けなければならない。したがってクルージウスの証明は「論証的」ではなく、むしろ論証を目標とした「弁証法的過程」とも見なされるであろう。C.Spoerhase, a.a.O., S.287-8.

(13) マイケル・ルース『ダーウィンとデザイン―進化に目的はあるのか？』佐倉統・土明文・矢島壮平訳、共立出版、2008 年、P.42. 同書ではこうした方法がヒュームの批判に対してデザイン論証を擁護したウィリアム・ペイリー（1743-1805）によって採用されたことが指摘されている。

(14) 帰納的推理とアブダクションの相違点については以下の文献を参照した。米盛裕二『アブダクション―仮説と発見の論理』勁草書房、2007 年、P.81ff.

(15) クルージウスはこの箇所で『形而上学』第 207 節を指示しており、第 207 節では論証の確実性と無限の蓋然性による確実性が等価であると述べられている（Ⅱ, S.357）。

(16) Luigi Cataldi Madonna, Gewißheit, Wahrscheinlichkeit und Wissenschaft in der Philosophie von Leibniz, in: *Aufklärung* 5/1, 1990, S.114.

(17) Christian Wolff, *Horae subsecivae Marburgenses Anni MDCCXXX, quibus Philosophia ad publicam privatamque utilitatem aptatur,* trimestre brumale, Frankfurt u. Leipzig 1731-2, Ⅲ. De Methodo existentiam Dei ex Ordine Naturae demonstrandi, § 1ff., in: ders., *Gesammelte Werke* (=WW), hrsg. u. bearb. v. Jean École, Joseph Ehrenfried Hofmann, Marcel Thomann, Hans Werner Arndt, Hildesheim, 1962ff., Ⅱ Abt., Bd.34.2, S.660ff.. Vgl. Anton Bissinger, *Die Struktur der Gotteserkenntnis. Studien zur Philosophie Christian Wolffs*, in: *Abhandlungen zur Philosophie, Psychologie und Pädagogik*, Bd.63, Bonn, 1970, S.255-9.

(18) C. Wolff, a.a.O., § 3, WW. Ⅱ Abt., Bd.34.2, S.672.

(19) C. Wolff, a.a.O., § 4, WW. Ⅱ Abt., Bd.34.2, S.674.

(20) C. Wolff, *Cosmologia generalis*, *methodo scientifica pertractata, qua ad solidam, inprimis Dei atque Naturae, cognitionem via sternitur ,* § 182, Frankfurt u. Leipzig 1737(2), 1731(1), WW. Ⅱ Abt., Bd.4, Hildesheim, 1964, S.146.

(21) C. Wolff, a.a.O., § 204, WW. Ⅱ Abt., Bd.4, S.157.

(22) 山本道雄『カントとその時代―ドイツ啓蒙思想の一潮流―』(改訂増補版)、晃洋書房、2010 年、P.261.「カントはなぜクルージウスを理解できなかったか―分析判断と総合判断―」、神戸大学文学部「紀要」第 23 号、1996 年初出、P.45.

(23) Carl Festner, *Christian August Crusius als Metaphysiker,* Inaugural-Dissertation zur Erlangung der philosophischen Doctorwürde der hohen philosophischen Fakultät der Vereinigten Friedrichs-Universität Halle-Wittenberg, Halle a.S., 1892, S.18.

契丹陶磁の「周縁性」に関する検討（２）
－唐代の三彩窯との比較を通して－

町田　吉隆*

Examining on the Border Character of the Kitai Pottery in China (2)
: To compare with the Kilns which to produce Tricoloured Pottery in the Tang Dynasty

Yoshitaka MACHIDA*

ABSTRACT

We are able to find out an archaic style in the Kitai (契丹) Pottery. These styles are similar to the pottery in the Tang (唐) Dynasty rather than the pottery in the Nothern Sung (北宋) Dynasty of the same era (A.D.10-12c). In other words, the style of the Kitai pottery is the border character. This paper will survey one of the characteristics of the Kitai pottery. It seems reasonable to assume that the style of the Kitai pottery in the Liao Dynasty (遼朝) is not archaic but combined. We can see the combined feature to compare with the kilns which to produce the tri-coloured Pottery (三彩) in the Tang (唐) Dynasty.

Keywords：pottery, Kitai (契丹), Liao Dynasty (遼朝), China, history

１．はじめに

10 世紀初めから 12 世紀初めにかけて華北の一部を含む北東アジアから内陸アジアにまたがる領域を支配した契丹国（遼朝，以下，契丹国と表記）の陶磁器のうち，その領域内で生産された陶磁器を，ここでは「契丹陶磁」と規定する．

契丹国の陶磁器には古風な特徴があることが指摘されている．それは 10 世紀から 12 世紀にかけて生産されたものであるにもかかわらず，むしろ唐代の陶磁器に類似しており，同時代の北宋時代の陶磁器とは異なる様式であることを意味する．そして，それはしばしば中心文化が地方へと波及する時差により遅れることを意味する「周縁性」として説明されてきた［1］［2］.

この論考では前稿を受けて，「周縁性」の由来の一つとされる唐代の陶磁器窯との関係を考察する．対象とするのは三彩を含む低火度鉛釉陶磁器を生産していた陶磁器窯である．一つは三彩が唐代を代表する陶磁器とみなされると共に，契丹陶磁の典型として評価されてきたこと．二つめには，実際に三彩を焼成していたことが確認される陶磁器窯は唐代，契丹国時代ともに，その数は多くはないこと．つまり，唐代の陶磁器生産と契丹陶磁の生産，および両者の陶磁器窯を継承関係を探る上で，よい対象となると思われるからである．契丹陶磁の鉛釉陶磁器としては，このほかに渤海系の瓦と長瓶（牛腿瓶）も含まれるが，ここでは考察の対象には加えなかった．

*一般科教授

２．契丹陶磁の特色

一般に契丹国の陶磁器と呼ばれるものには，契丹国の陶磁器窯で生産されたもの，北宋や西夏などからの輸入陶磁器，そのどちらとも判別がつかないもの，三つのグループに分けることができる．本稿で取り上げる低火度鉛釉陶磁器は，その何れにも含まれる．筆者は先に一番目のグループを「契丹陶磁」として分類した．いわゆる「遼三彩」を含む低火度鉛釉陶磁器は，ここにに含まれるが，実際には輸入陶磁器であるところの「宋三彩」も含まれるし，三番目のグループ，判別のつかない陶磁器も存在する．

このように個々の陶磁器の生産地を特定するには微妙な問題も存在するが，まず，先に契丹国の境域内で低火度鉛釉陶磁器を焼成していた陶磁器窯について確認しておく必要があるだろう．

現在，契丹国の陶磁器窯として確認されているものについて，整理してみよう［3］.

①遼上京窯址

内蒙古自治区赤峰市巴林左旗林東鎮の南側約 1.5km に残る遼上京城址内で確認されている．城址の北部は「皇城」域と想定されているが，その西部に位置する．窯址は発掘された後，原状復帰されたということであるが，窯壁などは当初から残っておらず，地表面から窺える形態は直経 10m 前後の楕円形窯１基である．「皇城」域西側の「乾徳門」と

想定される付近には版築を施した城壁が残存しているが，ここにも窯址があったとされる．ただし，現状からはその形態は不明であった．スリップを施さない白磁および鉄釉を施した黒釉磁，低火度焼成鉛釉陶器である緑釉の瓶類を焼成していたことが確認されている．ここの活動時期については，10 世紀初頭建国期の短期間だけという説，建国期から契丹国の衰亡期までという説，11 世紀の後期に開窯したという説，契丹国の滅亡後，金朝治下で活動していたという諸説がある．

②遼上京の南山窯址

窯址は遼上京遺址内の南西部に残る南塔がある丘の北西に位置している．林東鎮の南西側約 1 km にあたる．周辺はトウモロコシ，ソバなどの畑になっており，窯址は原形を留めていない．現地の畑の地表面上には，陶磁器片やトチンなど窯具が見られ，窯址であることが確認できる．白土をスリップした白磁や白磁，黄褐釉に緑釉を施した「二彩」などを焼成していたことが確認される．残存遺物の量から見て，活動期間は短いとされる．報告書類に記載は少ないが，中期の 11 世紀前半頃から後半にかけて焼成していたと理解されているようである．

③林東白音戈勒（バインゴル）窯

赤峰市巴林左旗の林東鎮の西約 2.5km に位置している．鉄釉の甕類や小壺などを焼成していた．規模は大きく，10 世紀から活動していた日常雑器を生産していた磁窯のようである．

④赤峰缸瓦窯

赤峰市の中心部から西へ約 70km の松山区缸瓦窯村に遺址がある．現在までに発掘調査された窯炉が 20 を超える東西 1.5km，南北 1 km の範囲に広がる広大な磁窯址である．現地には東西に烏台図河が流れ，南には馬家南山が迫り，山腹に龍窯（登り窯）の窯炉址が確認できた．窯道具以外にも，文様を施す際に用いる模範（型）も多く見つかっている．白磁が数量としては最も多く，黄釉，緑釉の陶磁器や三彩及び磁州窯に多い白地鉄絵や白地線彫りなど品種は多彩である．鉄釉を用いる黒褐色釉磁器は鶏腿瓶と呼ばれる長壺以外は数が少ない．契丹国を代表する器形である鶏冠壺や鳳首瓶，海棠花形の長円盤などを焼成していた．また瑠璃瓦の焼成も行っていたことが判明している．前期にあたる 10 世紀には成立していたと考えられるこの磁窯は元代まで活動を続けていたと思われるが，その盛期は三彩の生産が活発であった後期 11 世紀後半と考えられる．

⑤遼陽江官屯窯

遼寧省遼陽市の東約 30km に位置する．太子河のほとりにあるこの陶磁器窯は白磁を主に焼成していたとのことである．その規模は大きい．生産していた器種は内蒙古自治区内の磁窯に同じであるが，窯具としての匣鉢を用いず，トチンを器物の上下に挟んで，窯入れしていた点が異なっていたとされる．11 世紀末の契丹国の晩期に起こり，金朝治下でも焼成を続けていたとされる．

⑥北京龍泉務窯

現在の北京市は 10 世紀の前半に契丹国の「南京」が置かれた．11 世紀の後半には，人口も約 30 万人を有する契丹国最大の都市になっていた．龍泉務窯の窯址は現在の北京市南西郊外にあり，契丹国の陶磁器窯では唯一，近年になって本格的な発掘調査が行われた陶磁器窯である．河北の定窯に類似した硬質な白釉磁器と，同じく磁州窯風の白化粧土を施した白地鉄釉の陶磁器，緑釉と茶褐色の低火度鉛釉陶磁器を焼成していたことが判明している．

活動時期は，10 世紀後半から 11 世紀半ばまでの前期と，11 世紀半ばから 12 世紀初めまでの後期，12 世紀から 13 世紀までの金朝が支配していた時期に分けることができると言う．

⑦山西渾源界荘窯

山西省大同市は契丹国の「西京」にあたるが，その南東約 30km に位置する窯址である．白化粧土を施した胎土に青磁釉をかける特異な陶磁器を生産しており，彭善国氏は高麗青磁の「象嵌」技法と比較している．白地線彫り，白地鉄絵や鉄釉線彫りなど磁州窯系の陶磁器が出土していない点においても，契丹国時代の陶磁器窯としては特異な陶磁器窯であると言えよう．

以上，契丹国時代の陶磁器窯を概観する中で，すぐに気づくことは契丹陶磁を象徴する低火度鉛釉陶磁器の黄釉，緑釉，「遼三彩」を生産していた陶磁器窯は，④赤峰缸瓦窯と⑥北京龍泉務窯しかないということである．今後の調査により低火度鉛釉陶磁器を焼成していた陶磁器窯が発見される可能性もあるが，いわゆる「遼三彩」を含む契丹陶磁はこの二箇所の陶磁器窯で生産されていたとみなされる．

３．契丹国の陶磁器生産と徙民政策

低火度鉛釉陶磁器の生産が赤峰缸瓦窯と北京龍泉務窯を含む契丹国の陶磁器窯で始まったのは，契丹国の建国後 10 世紀に入ってから後のことである．つまり，その生産技術は契丹国の外部から移入されたものである．先述したように，その中で，深緑釉の硬質陶磁器は，10 世紀の初めに契丹国の攻撃により滅亡した渤海国から移入された．「遼三彩」を含む低火度鉛釉陶磁器についても，「渤海三彩」との関係も考えられるが，「渤海三彩」については生産地も不明であり，その関係を考察することは難しい．契丹国の建国後に移入された技術とすれば，華北もしくは中原地方の陶磁器窯から移入されたと考えられる．華北に相当する現在の河北省，河南省，

山西省や中原地方の陝西省には唐代から宋代にかけて数多くの陶磁器窯が存在した．契丹国の陶磁器窯はどの陶磁器窯の影響を受けたのであろうか．

当然，そこには技術や陶磁器だけでなく，陶工ら工人の移動がともなったはずである．契丹はその建国以前から，徙民政策を採用して，華北から住民を自らの領域に移住させていた［4］［5］．

太祖の耶律阿保機は遙輦氏に代わり，迭剌部を率いて，シラムレン河に沿った東京臨潢府に決起して，都とし，渤海を 926 年に滅ぼして，州県城の基になる城邑103箇所を獲得した．後を継いだ2代目の太宗・耶律堯骨は現在の遼寧省南西部，河北省北部，山西省東北部にまたがる，いわゆる「燕雲十六州」，正しくは燕薊十六州を後晉建国支援の見返りに獲得した（ａ）．

（ａ）太祖以迭剌部之衆代遙輦氏，起臨潢，建皇都，東併渤海，得城邑之居百有三．太宗立晉，有幽，涿，檀，薊，順，営，平，蔚，朔，雲，應，新，嬀，儒，武，寰十六州，於是割古幽，并，營之境而跨有之．

『遼史』巻 37・地理志

また，太祖が即位する以前，つまり 9 世紀末から国境を接する河北の地域からは漢人が多く移住していた（ｂ）．

（ｂ）初，唐末，藩鎮驕横，互相併呑隣藩．燕人軍士多亡帰契丹．契丹日益強大．

『契丹国志』巻 1・太祖紀

実際，建国当初においてもこれらの漢人に対しては，建設した都城に居住させるに当たって，結婚を奨め，開墾や技芸を奨励して，生活を可能にしたため，逃亡する者も少なかったとされる（ｃ）．

（ｃ）乃請樹城郭，分市里，以居漢人之降者．又為定配偶，教墾藝，以生養之．以故逃亡者少．

『遼史』巻 74・韓延徽伝

これら「技芸」を持つ人々の中に，陶工の名称は含まれていないが，含まれていた可能性は検討に値しよう．問題は彼らがどこから連れて来られたのか，という点である．

10 世紀前半に獲得した先述の「燕雲十六州」，現在の遼寧省南西部，河北省北部，山西省東北部が候補地となるが，たとえば，白磁で有名な「定窯」があった定州や，北宋代に白化粧土を施した白地線彫りや白地鉄絵などの陶磁器を産した磁州は，この時期には契丹国の領域に含まれてはいない．定州，磁州を含む華北の陶磁器生産地が契丹国によって一時的に占領されるのが 10 世紀半ばの太宗・耶律堯骨による後晉攻略時期であった．

943 年に後晉に攻め込んだ契丹国は，白磁の産地であった定州を含む現在の河北省各地を占領した（ｄ）．翌年には同じく白磁を焼成していた邢州の東隣の貝州を取った際に，住民を北方の契丹国へ移住させている（ｅ）．一方で当然のことながら戦争の過程で，戦場になった地域では略奪，破壊が続いた．邢州や宋代10世紀後半以降，華北地方最大の陶磁器の産地となる磁州も例外ではなかった（ｆ）．

947 年には後晉の首都・汴京，現在の河南省開封市を攻略，占領し，多くの器物と共に，後晉に仕えていた職人集団を契丹国の都である上京（現在の内蒙古自治区巴林左旗）に連れ帰った（ｇ）．

（ｄ）（会同六年）十二月丁未，如南京，議伐晉．命趙延壽，趙延昭，安端，解里等由滄，恒，易，定分道而進，大軍継之．

『遼史』巻 4・太宗本紀

（ｅ）（会同七年・三月）壬午，留趙延昭守貝州，徙所俘戸于内地．

『遼史』巻 4・太宗本紀

（ｆ）（会同八年）春正月，庚子，分兵攻邢，洺，磁三州，殺掠殆盡．

『遼史』巻 4・太宗本紀

（ｇ）（大同元年・三月）壬寅，晉諸司僚吏，嬪御，宦寺，方技，百工，図籍，暦象，石経，銅人，明堂刻漏，太常楽譜，諸宮縣，鹵簿，法物及鎧仗，悉送上京．

『遼史』巻 4・太宗本紀

このような状況下において，他の技術と共に契丹国の陶磁器窯に低火度鉛釉陶磁器の技術が導入されたとすれば，それは 10 世紀半ば以降と予想される．

より具体的には，どこの陶磁器窯の技術が導入されたのであろうか．

契丹国が侵攻した地域は現在の河北省，山西省，河南省の北部に相当する．華北の東半を占領したことになるが，947 年に太宗・耶律堯骨が占領地で病没すると，現在の山西省中部にあたる地域に傀儡国家とも言うべき北漢を置いて，燕薊十六州以北へ戻ってしまう．つまり，山西省を除けば，華北の陶磁器窯が立地していた地域を契丹国が長期間にわたり，支配することはなかった．

また，この時期に侵攻した現在の河北省，山西省，河南省には，定窯，磁州窯など 10 世紀後半以降，北宋，金，元代と，中国陶磁史に名を残す陶磁器窯が生まれることになるが，10 世紀以前に低火度鉛釉陶磁器，就中，「三彩」を焼成していたことが確認されている陶磁器窯は多くはない．陝西省銅川市の黄堡窯，陝西省西安市の醴泉坊窯，河北省邢台市の邢窯，河南省鞏義市の黄冶窯などである．

現在の陝西省には契丹国時代を通して，その支配は及ばなかったので除外すると，検討を要するのは，華北の中でも，河北省，河南省の陶磁器窯ということになる．

４．河北の邢州窯

邢州窯は現在の河北省邢台市にあった陶磁器窯群であり，省の南部，さらに南約 50㎞には磁州窯の陶磁器窯群がある邯鄲市がある．古来，唐代白磁の産地として名高いが，近年の調査の結果，金代 13 世紀ころまで焼成していた陶磁器窯も見い出されており，広く言えば磁州窯系の陶磁器窯と言える[6]．

邢台市の臨城県からはおおよそ 17 箇所の陶磁器窯が確認されているが，そのうちの 4 箇所は唐代の陶磁器窯である．ここでは白化粧土を施した上に釉薬をかける白磁が出土しているが，色のついた低火度鉛釉陶磁器は見られない．ただし，騎馬俑や扁壺など，唐三彩と共通する器形も見られる．窯炉は饅頭窯であるが，火膛（焚き口）の下には，草木灰が大量に堆積しており，燃料として柴薪を用いていたことが明らかになっている．大きな碗や盤（大皿）を重ねて焼成する際には，三角形のハマ(陶磁器を焼成する際に，窯の中で融着してしまわないように器物の間に挟む窯道具)を用いている．

臨城県および南の内丘県では，28 箇所の陶磁器窯の遺構が確認されている．報告によれば，青磁，白化粧土を施した白磁，定窯風の白化粧土を施さない白磁，鉄釉を用いた黒褐色の陶磁器，そして，契丹陶磁にも見られる黄釉磁器と，低火度鉛釉陶磁器の三彩などの陶磁器が作られていた．

試掘された遺構は２箇所ある．一つは李陽河の東南岸に位置する内丘県の市域西部一帯で，南北 1.2km，東西 700m に及ぶ範囲で，西関遺址と呼ばれる．もう一箇所は臨城県の西北約 7.5km の祁村の東南部に広がる約６万 km^2 の地表遺物が確認されている祁村遺址である．

遺構は第１期から第５期に区分されると言う．

第１期は内丘県西関遺址の灰坑を含む出土層で，青磁，白化粧土を掛けた白磁が多く，次いで定窯風の良質な白磁，ごく少数の鉄釉の黄色や黒色の陶磁器が見られる．碗や罐などの器形から隋代に相当するとみなされる．

第２期は内丘県西関遺址の第２層に相当し，白化粧土を掛けた白磁以外に，黄色釉薬や黒色釉薬など鉄分を含む低火度鉛釉陶磁器が比較的多く含まれる．また三彩の大鉢と胡人をかたどった陶俑が見られ，唐代前期７世紀初めから８世紀に比定されている．

第３期は内丘県の一部と臨城県の祁村遺址に見られる．白化粧を掛けた白磁が多く，低火度鉛釉陶磁器としては，黒釉や黄釉が見られる．「開元通宝」や「乾元通宝」が伴出することから，唐代中期７世紀末から９世紀の初めの遺構と考えられている．

第４期は臨城県の祁村遺址のみに見られ，唐代末期９世紀から 10 世紀の初めに相当すると考えられる．鉄釉を用いた黒色陶磁器が多く作られているところに特色がある．また支釘（トチン）に三角形に加え，四角形が現れている点にも相違がある．

第５期は第４期を継承しており，白磁，黒釉陶磁が中心であり，陶枕や動物や人形のミニチュアも見られる．10 世紀の半ば，五代に相当する遺構と考えられている．

邢州窯を契丹陶磁との関係から考察するならば，まず，生産していた器形に共通点がある．扁壺，方形の陶枕，動物や人形などのミニチュアなどは契丹陶磁（赤峰缸瓦窯や北京龍泉務窯）などに特徴的な陶磁器であり，唐代末期から五代にかけて邢州窯で作られていたこれらの器形は，そのまま契丹陶磁に継承された可能性がある．

また三角支釘は時期により，その形状が変化するが,第２期から第４期にかけて広く用いられている．この窯具は第５期になると割合が減り，その形状も円形の薄片になってしまうと言う．筆者は現地での見学（2008 年，2009 年，2011 年）の際に，赤峰缸瓦窯で作られたとされる陶磁器を実見する機会を得たが，碗，盤などには器の内面（見込の部分）に三箇所の釘目痕があり，匣鉢ではなく，三角支釘を使用していたであろうと推測している．つまり，赤峰缸瓦窯は邢州窯で９世紀まで用いられていた技術を使用していたと考えられる．

同様に低火度鉛釉陶磁器としての黄釉や三彩の陶磁器は第２期，唐代前期を最盛期として，第３期，７世紀末から９世紀にかけては数量も器形の種類も減少している．邢州窯の陶磁器生産量が大きかったのは，この第３期と考えられており，以降は白磁と鉄釉を中心とする磁州窯系陶磁器窯の魁となった．

５．河南の鞏義窯

河南省鞏義市は洛陽から東流する洛河の南岸に位置している．洛陽市からは東に約 50km，五代，宋代に首都となった汴京，現在の開封市からは西へ約 100km である．この地域を契丹国が支配下に置いたのは，太宗が後晋を攻めた 10 世紀半ばだけであり，現在の河北省に存在した陶磁器窯，定州窯，磁州窯，邢州窯などに比べ，その関係性は低いように思われる．ただし，前述したように，この侵攻の際には，各種の工人を含む捕虜が契丹国に連れ去られ，その後，契丹国の各州県に居住させられており，契丹陶磁における低火度鉛釉陶磁器の源流を考える上で考慮する必要がある．

鞏義市黄冶にある陶磁器窯址群では，唐代に比定される窯炉が 10 基，調査されている[7]．それらは皆，饅頭窯である．工房址も５箇所で発掘調査されている．これらの遺構や土坑（ピット）から出土した陶磁器の器形は，碗，盆，杯，鉢，瓶などの生

活用品が数量としては多く，また白釉陶磁器，黒釉陶磁器が圧倒的に多く，黄色釉や黒色釉の陶磁器がこれに次ぎ，数量としては三彩は少ないと言う．

遺構の年代区分は大きく４期に分かれると言う．

第１期は堆積層も薄く，また出土した遺物も少ない．６世紀の北方白磁として，日本では知られている青みを帯びた白釉の四耳壺などが見られ，７世紀初めまでの隋代の陶磁器と考えられている．

第２期は白釉陶磁器と鉄釉を用いた黒色陶磁器が多い．器形の種類は多いが，胎土や釉薬の状態は一定の品質を保っており，技術的に成熟していると言う．唐代前期７世紀末までが，この時期に該当するとされる．

第３期は白釉陶磁器にすぐれた遺物が多く，邢州窯や定窯のそれに匹敵するという．ただし，白釉陶磁器よりも数量としては三彩が多く，鉄釉の陶磁器の数は減少している．白釉陶磁器にコバルト釉の絵具で描く白釉藍彩が現れることも注目される要素である．この時期が鞏義黄冶窯の最盛期であり，それは唐代中期の７世紀末から９世紀半ばと比定されている．

第４期は精巧な白釉磁器と三彩が減り，相対的に日用の陶磁器が増加する．注目されるのは，白釉藍彩，絞胎の陶枕，鮮やかな発色の黄釉陶磁器の碗，皿が見られること，および動物，人形など玩具と思われるミニチュアが多く生産されたことであろう．唐代晩期９世紀後半から 10 世紀初めの時期と想定されている．

唐代に三彩を焼成していた陶磁器窯としては，陝西省銅川市の黄堡窯，同じく現在の西安市郊外にああった長安醴泉坊の唐三彩窯があるが，銅川黄堡窯では早期から匣鉢を用いていたのに対し，長安醴泉坊と鞏義黄冶窯では三角支釘が主流で，匣鉢は鞏義黄冶窯では第４期になって現れる．邢州窯もやはり三角支釘を用いる．ただし，鞏義黄冶窯のそれには環状の円周上に３点突起を持つタイプがあるが，邢州窯では三角形や円盤上に３点突起を持つもの，三本足のヒトデ形のタイプしかない．

鞏義黄冶窯は最も詳細な調査報告がある唐三彩窯であるが，契丹陶磁との関連で言えば，最盛期の唐三彩よりも，白釉藍彩（契丹陶磁では白釉緑彩が多い），陶枕やミニチュア・玩具，鮮やかな黄釉陶磁器などにおいて，晩唐期の様相との類似点が多いように思われる．

６．窯業技術伝播の問題点

契丹国の陶磁器が，唐代の陶磁器の影響を受けていることは多くの先学が指摘してきたことである．特に「遼三彩」が唐三彩の影響を受けていることは言を俟たないであろう．

ただし，両者の関係は何に直接的な影響を受けて，いつから，どのように変化したのかについては，わからない点が多い．

黒田源次氏は「これらの調査によっていえることは，遼代の陶磁の窯はいわゆる北方系に属する丸窯焼成であって，まったくその影響を華北地方からうけていることである．しかもその系統には定窯・磁州窯系と三彩系（唐三彩の系統），それに瑠璃瓦系がある．また別に遼陽の缸官屯窯・撫順窯があって，これは民窯として，遼・金時代と後世にまで続いている．」と総括している［8］．

本稿では，このうちの低火度鉛釉陶磁器について検証してきたわけであるが，契丹国の国内で，三彩を含む低火度鉛釉陶磁器を焼成していたと考えられる陶磁器窯は前述のように内モンゴル自治区東部の赤峰市の缸瓦窯と北京市の龍泉務窯の二箇所である．唐代に唐三彩を焼成していたことがある，その最も近くの陶磁器窯は河北省の邢州窯であるが，ここでは唐代後期，五代にあたる９世紀から 10 世紀にかけては，唐三彩を含む低火度鉛釉陶磁器は生産していなかった．また 10 世紀半ばに契丹国が侵攻して，工人を移住させた河南省においても，８世紀に盛んに三彩を焼成していた鞏義黄冶窯は，９世紀にはやはり三彩は焼成しなくなってしまう．

彭善国氏は，「遼三彩」は 11 世紀の半ばに現れるが，それは厚葬の禁令と関係があると考えておられる［9］．つまり，白釉緑彩などが先行してあったと考えるわけであるが，「遼三彩」の誕生を 11 世紀半ばと考える場合，首肯できる考えであろう．つまり，契丹陶磁の「遼三彩」の誕生には，直接的に影響を与えた陶磁器窯は存在せず，間接的な影響は排除しないものの独自に発生したことになる．彭善国氏は白釉緑彩の源流について，山東省淄博市の磁村窯に比定しているが，類似した技法が存在したという以外には，特に根拠は示されていない．

仮に工人が集団で移住させられたことを想定した場合，釉薬の使用方法はもちろん，窯具や窯炉の作成や使用，生産する器形など「生産の形態」というセットの形で，契丹陶磁に移入されたであろう．釉薬の組み合わせ，装飾の技法などは時代の様式によっても，また支配者や市場の需要によっても変容するが，「生産の形態」というセットの形には大きな変化はなかったと考えられる．

「生産の形態」という視点に立つならば，三彩を含む低火度鉛釉陶磁器を生産したことがあり，饅頭形の窯炉を用い，窯具としては三角支釘を匣鉢に先行して使用していた邢州窯と黄冶窯は 10 世紀半ばに徙民が行われたことも含め，契丹陶磁の形成に影響した可能性が高い陶磁器窯であったとみなされよう．

特に唐代晩期，五代の 9 世紀から 10 世紀前半に，黄釉陶磁器を中心に焼成し，動物や人形のミニチュアや陶枕などを作っていた鞏義黄冶窯は，契丹陶磁に特徴的な生産の形態に類似する点が多く，赤峰缸瓦窯および北京龍泉務窯との関係が注目される．

また北宋から金代，10-12 世紀に現在の山西省内に位置する陶磁器窯では，伝世品や表面採集を中心とした調査報告によって低火度鉛釉陶磁器を生産していたことがわかっている．山西省の北部は早い段階で契丹国支配下に入っており，今後の本格的な考古学的調査によっては，山西省の陶磁器窯について契丹陶磁における位置づけを検討する必要があるかもしれない．

7．むすびにかえて

契丹陶磁と唐代の陶磁器の関係については，「周縁性」という視点から，契丹国の後進性，あるいは，唐文化への憧憬という形で語られてきたが，両者の具体的な継承関係については不明な点がなお多い．

ここでは，近年，調査報告が公刊された唐代の陶磁器窯，河北省邢台市の邢州窯と河南省鞏義市の黄冶窯を例に考察を試みた．契丹国の徙民政策による工人集団の移動の痕跡は，焼成に際して用いる三角支釘（トチン）の形態と使用方法に見い出される．

ただし，契丹国国内で契丹陶磁を焼成していたと思われる赤峰缸瓦窯と北京龍泉務窯と河北，河南両省の唐代陶磁器窯の生産活動時期は直接にはつながらず，空白期間を挟むように思われることをはじめとして，その関係には，なお少なくない問題が存在する．

また陶磁器そのものについても，契丹陶磁と唐代の陶磁器，双方について「生産の形態」－窯具や窯炉の作成など生産に用いた技法，商品としての陶磁器の生産と流通，それにともなう器形など様式の変化－をより詳細に比較・考察することが必要である．

それ以外の課題についても例を二つあげておく．

その一つは宋代から金代，10 世紀から 12 世紀にかけて華北で生産された「宋三彩」との関係である．「宋三彩」と唐三彩との継承関係も不分明な点が多く，その生産時期から考えれば，やはり別個に形成された生産の技法と言える．「宋三彩」を焼成していた陶磁器窯としては，河南省禹県や魯山県の段店窯があり，また鞏義黄冶窯の近く，鞏義市南西の芝田鎮にも陶磁器窯があったことが判明している．

「宋三彩」は金代 12 世紀に至るまで焼成されており，また器形，装飾の両面において，契丹陶磁の「遼三彩」とは異なっている．唐三彩とは時期的に断絶して現れた両者がどのように関係していたのか，現時点では必ずしも明確ではなく，器形，装飾の両面から考えれば，契丹陶磁は生産された時期が近い「宋三彩」よりも，むしろ唐三彩に近い要素を持っていたという点を，どのように考えるべきか．

もう一つは焼成燃料の問題である．華北の陶磁器窯では 10 世紀を境界として，窯炉の燃料が柴薪から石炭へと転換している．陝西省銅川市の黄堡窯では，唐代は柴薪を，五代を挟み，宋代には石炭燃料へと転換している．契丹国の陶磁器窯では柴薪燃料と石炭燃料が同時期に用いられていたと，筆者は現時点では考えているが［10］，低火度鉛釉陶磁器を焼成した場合，いつの時点においてか，石炭燃料に転じたであろうと思われる．その時期はいつなのか．

各陶磁器窯の調査を待つと共に，今後の課題としたい．

参考文献

［1］町田吉隆「契丹陶磁の「周縁性」に関する検討－唾壺と陶枕を例に」神戸高専紀要(48)，pp.161-166, 2010, .

［2］小川裕充「遼・西夏の絵画　総論」『世界美術大全集　東洋編 5　五代・北宋・遼・西夏』p.125, 1998.

［3］町田吉隆「契丹国（遼朝）の陶磁窯とその特色」町田吉隆編『契丹陶磁－遼代陶磁の資料と研究－』朋友書店，pp.10-11, 2008.

［4］田村實造「徙民政策と州縣制の成立」『中国征服王朝の研究　上』東洋史研究会，pp. 273-313, 1964.

［5］島田正郎「漢人の遷徙と州縣制の成立」，「移住漢人の経済生活」『遼代社会史研究』厳南堂書店，pp.213-267, 1978.

［6］邢台市文物管理所，臨城県文物保管所編『邢窯遺址研究』科学出版社，pp.60-112, 2007.

［7］河南省文物考古研究所ほか編『鞏義黄冶唐三彩』大象出版社, 2002.（翻訳　奈良文化財研究所『鞏義黄冶唐三彩』奈良文化財研究所史料 61 冊, 2003.）

河南省文物考古研究所ほか編『黄冶窯考古新発現』科学出版社, 2005.（翻訳　奈良文化財研究所『黄冶唐三彩窯の考古新発見』奈良文化財研究所史料 73 冊, 2006.）

［8］黒田源次，杉村勇造『遼の陶磁』平凡社，p.1，および p.7, 1958.

［9］彭善国『遼代陶瓷的考古学的研究』吉林大学出版社, p.67, 2003.

［10］町田吉隆「磚瓦焼成燃料に関する一考察－元代大都の「蓑城」をめぐって」立命館東洋史學（25）, pp.1-28, 2002.

検索可能計画の構成と検索確率による比較

末次武明 *

Construction of Search Designs and Comparison of Designs Using Search Probabilities

Takeaki SUETSUGU*

ABSTRACT

This paper gives search designs for 2^m factorials when effects are searched in the two-factor or three-factor interactions. For a certain design T_1, we consider the problem of finding a design T_2 are presented so that the design $T = T_1 + T_2$ is a search design with the above property, where "+" stands for a union of two designs. And then, we define the search probability and try to compare search designs using search probabilities.

Keywords: search design, two levels, search probability

1．はじめに

Srivastava(1) の検索可能計画に対する先駆的な研究以来，この計画に対する研究は，さまざまな統計モデルの下で行なわれてきた．その中でも，筆者達が手がけた次のような一連の検索可能計画の構成と検索確率による検索可能計画の比較の結果をまとめたい．(ページ数の都合で，定理の詳細な証明は省く)

まず，2^m 要因計画を考え，T_1 をある決まった計画とするとき，$T = T_1 + T_2$（"+" は２つの計画の並置）が次の各条件を満たすような計画の構成について考える．

(a) ２因子 (と３因子) 交互作用から高々１個の未知効果が検索でき，主効果と共に推定可能である．(MEP.1 計画 と名付ける)

(b) ２因子交互作用から高々２個の未知効果が検索でき，主効果と共に推定可能である．(MEP.2 計画 と名付ける)

(c) ２因子交互作用から高々３個の未知効果が検索でき，主効果と共に推定可能である．(MEP.3 計画 と名付ける)

(d) ２因子と３因子交互作用から高々２個の未知効果が検索でき，主効果と共に推定可能である（ただし，３因子交互作用からの未知効果は高々１個しか含まない）．(MEP.2(1;1) 計画 と名付ける)

その後，検索可能計画で，未知母数がどの程度本当に検索できるかを調べる為に検索確率を定義し，(a), (b) の場合に絞って，検索確率をシミュレーションによって計算して，検索可能計画を比較することを考える．

* 一般科 教授

2．準備

次のような線形モデルを考える．

$$\mathbf{y} = A_1\boldsymbol{\xi_1} + A_2\boldsymbol{\xi_2} + \mathbf{e} \tag{1}$$

ただし，$\mathbf{y}(N \times 1)$ は観測値ベクトル，$A_i(N \times \nu_i)$ は計画行列 $(i = 1, 2)$，$\boldsymbol{\xi_i}(\nu_i \times 1)$ は母数ベクトル $(i = 1, 2)$，$\mathbf{e}(N \times 1)$ は誤差ベクトルで $N(\mathbf{0}, \sigma^2 I_N)$ に従う．ここで σ^2 は誤差分散，I_N は大きさ N の単位行列である．

特に，モデル (1) において，$\boldsymbol{\xi_1}$ のすべての要素は未知で，$\boldsymbol{\xi_2}$ の中に，どれか分からないが高々 k 個の未知母数が含まれ，残りは 0 である（k は大きくない既知の正の整数）場合を考える．

基本定理 (Srivastava(1))　$\boldsymbol{\xi_2}$ の高々 k 個の未知母数が検索可能かつ $\boldsymbol{\xi_1}$ と共に推定可能である必要条件は，A_2 のすべての $N \times 2k$ 部分行列 A_{20} に対して，次の等式が成り立つことである．

$$rank(A_1 : A_{20}) = \nu_1 + 2k \tag{2}$$

特に，誤差がない $(\sigma^2 = 0)$ 場合には十分条件になる．条件 (2) を満たす計画を 検索可能計画という．

次に，m 個の因子 $F_1, ..., F_m$ をもつ 2^m 要因計画を考える．処理組合せは，j 番目の因子のレベル $t_j = 0$ or 1 $(1 \le j \le m)$ である $(t_1,\ ...,\ t_m)$ で表される．T を，各行がそれぞれ処理組合せを表す $N \times m$ 行列だとする．

そのとき，２因子交互作用（３因子交互作用）まで考えると，T に対する計画行列は，次のように与えられる．

$$[\mathbf{1}_N, \mathbf{g}_1, ..., \mathbf{g}_m, \mathbf{g}_{12}, \mathbf{g}_{13}, ..., \mathbf{g}_{m-1\,m} \\ (, \mathbf{g}_{123}, \mathbf{g}_{124}, ..., \mathbf{g}_{m-2\,m-1\,m})]$$

但し，正の整数 N に対して，$\mathbf{1}_N$ は全ての要素が 1 である $N\times 1$ ベクトルで，一般平均に対応している．$\mathbf{g}_j$ $(1\le j\le m)$ は j 番目の主効果を，$\mathbf{g}_{ju}$ $(1\le j\le u\le m)$ は j 番目と u 番目の２因子交互作用に，$\mathbf{g}_{jkl}$ $(1\le j\le k\le l\le m)$ は j 番目と k 番目と l 番目の３因子交互作用にそれぞれ対応している．

$$\begin{aligned}\mathbf{g}_j &= 2\mathbf{t}_j-\mathbf{1}_N, \quad 1\le j\le m,\\ \mathbf{g}_{ju} &= \mathbf{g}_j*\mathbf{g}_u, \quad 1\le j<u\le m,\\ (\mathbf{g}_{jkl} &= \mathbf{g}_j*\mathbf{g}_k*\mathbf{g}_l, \quad 1\le j<k<l\le m)\end{aligned} \tag{3}$$

ここで，$\mathbf{t}_j$ は T の j 番目の列で，$*$ はアダマール積を表す．

このとき，基本定理は次のように表される．

定理１　T が MEP.k 計画 $(k=1,\,2,\,3)$ である為の必要条件は，$s\ne s'$ なら $1\le p_s<q_s\le m$, $(p_s,q_s)\ne(p_{s'},q_{s'})$ であるそれぞれの (p_s,q_s), $1\le s\le 2k$ の選び方に対して，行列

$$G=[\ \mathbf{1}_N,\mathbf{g}_1,...,\mathbf{g}_m,\mathbf{g}_{p_1q_1},\mathbf{g}_{p_2q_2},\mathbf{g}_{p_3q_3},\mathbf{g}_{p_4q_4} (,\mathbf{g}_{p_5q_5},\mathbf{g}_{p_6q_6})(,\mathbf{g}_{r_1s_1t_1},\mathbf{g}_{r_2s_2t_2})\ ]$$

が

$$rank\,G=m+1+2k \tag{4}$$

であることである．特に，誤差がない場合は，十分条件になる．

ここで，Mukerjee and Chatterjee[2] で注意しているように，２因子交互作用までしか考えていないときは，$\mathbf{t}_{ju}=\mathbf{t}_j*\mathbf{t}_u$ とするとき，

$$U=[\ \mathbf{1}_N,\mathbf{t}_1,...,\mathbf{t}_m,\mathbf{t}_{p_1q_1},\mathbf{t}_{p_2q_2},\mathbf{t}_{p_3q_3},\mathbf{t}_{p_4q_4} (,\mathbf{t}_{p_5q_5},\mathbf{t}_{p_6q_6})\ ] \tag{5}$$

とすると，rank G = rank U であることが示されるので，(4) の条件を，計画行列の代わりに T から直接作った U を使って調べることができる．

３．MEP.1 計画 の場合

これから，2^m 要因計画を考え，T_1 ： ある計画とするとき，$T=T_1+T_2$（“+” は２つの計画の並置）が MEP.1 計画であるような３種の計画の構成の結果を示していくが，前の２つの場合は，既に研究紀要第 47 号 (末次 [3]) で紹介したので，簡単に結果をまとめるだけにする．

これから，$\Omega(m,j)$ は，１の数が j $(j=0,...,m)$ であるような処理組合せ全てから成る $\binom{m}{j}\times m$ 行列を表すことにする．

３．１ $T_1=(\Omega(m,0)',\Omega(m,1)')'$ で $\boldsymbol{\xi_2}$ が２因子交互作用からのとき

Shirakura[4] の結果を踏まえて研究した場合で，できるだけ T_2 の処理組合せの数 N_2 が小さくなる構成を探った．Shirakura[4] の Table 2 $(3\le m\le 10)$ に対し，それより大きい $11\le m\le 15$ に対して，T_2 の N_2 を最小にする計画を構成した．

次の表１に結果をまとめているが，Shirakura[4] にならい，N_2 の最小値を $g(m)$ としている．また，${N_2}^*$ は $2^{N_2}-2\ge m(m-1)/2$ を満たす N_2 の最小値で $g(m)$ の１つの下限であり，$g^*(m)=m-1(m>3)$ は $g(m)$ の１つの上限である．

表１　N_2 の最小値 $g(m)$ $(11\le m\le 15)$

m	${N_2}^*$	$g(m)$	$g^*(m)$
11	6	8	10
12	7	8	11
13	7	9	12
14	7	10	13
15	7	10	14

特に，系統的な構成の例としては，証明は省くが，4.1.1 節の LC タイプから $(0,\ldots,0)'$ の列を除いた計画 W^* を T_2 に用いると，MEP.1 計画になることが示される．
例）3.3 節の例 1 を参照

３．２ $T_1=(\Omega(m,0)',\Omega(m,m-1)',\Omega(m,m)')'$ で $\boldsymbol{\xi_2}$ が２因子・３因子交互作用からのとき

Ghosh[5], Ohnishi,Shirakura[6] の結果を踏まえて研究した場合で，できるだけ T_2 の処理組合せの数 N_2 が小さくなる構成を探った．

Ohnishi,Shirakura[6] が T_2 の処理組合せの数 N_2 の最小値を，$3\le m\le 8$ まで調べているので，それより大きい $9\le m\le 13$ まで調べた結果を次の表２にあげている．

表２　N_2 の最小値 $l(m)$ $(9\le m\le 13)$

m	N_1	$l(m)$	N
9	11	10	21
10	12	11	23
11	13	11	24
12	14	12	26
13	15	13	28

特に，系統的な構成の例としては，Hadamard 行列から $(1,\cdots,1)$ の１行と $(1,\cdots,1)'$ の１列を除いた行列 H^* を T_2 に用いると，MEP.1 計画になることが示される．(証明は省く)
例）5.2 節の例 9 を参照

3．3 $T_1 = (\Omega(m,0)', \Omega(m,1)')'$ で $\boldsymbol{\xi_2}$ が2因子・3因子交互作用からのとき

この節では，線型モデル (1) で，$\boldsymbol{\xi_2}$ を2因子交互作用と3因子交互作用からとするとき，

$$T_1 = (\Omega(m,0)', \Omega(m,1)')' \tag{6}$$

を考え (処理組合せの個数 $N_1 = m+1$)，T_2 を併置して，MEP.1 計画 を構成する問題を考える．

まず，T_2 が MEP.1 計画 になる必要十分条件を考え直してみる．

T_1 に対する計画行列は2因子交互作用に対応する2列，3因子交互作用に対応する2列を取ると，例えば，次のようになる．

$$\left(\begin{array}{c|cccccc|cc|cc} 1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ \hline 1 & 1 & -1 & \dots & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & \dots & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & \dots & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & \dots & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{array}\right)$$

行の基本変形で

$$\left(\begin{array}{c|cccccc|cc|cc} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 & 2 \\ \hline 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array}\right)$$

さらに，$\mathbf{c}_{ij} = \mathbf{g}_{ij} + \mathbf{g}_i + \mathbf{g}_j + \mathbf{1}$, $\mathbf{c}_{ijk} = \mathbf{g}_{ijk} - \mathbf{g}_i - \mathbf{g}_j - \mathbf{g}_k - \mathbf{2}$ とすると，2因子交互作用に対応する列は $\mathbf{c}_{ij}$ で，3因子交互作用に対応する列は $\mathbf{c}_{ijk}$ で置き換える（列の基本変形）と，次のように変形される．

$$\left(\begin{array}{c|cccccc|cc|cc} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right)$$

以上のことから，次の定理が導かれる．

定理 4　(6) の T_1 について，$T = T_1 + T_2$ が MEP.1 計画 である必要十分条件は，T_2 からの計画行列で，$1 \le i < j \le m$, $1 \le p < q < r \le m$ を満たす任意の i, j と p, q, r について，$\mathbf{c}_{ij} = \mathbf{g}_{ij} + \mathbf{g}_i + \mathbf{g}_j + \mathbf{1}$, $\mathbf{c}_{pqr} = \mathbf{g}_{pqr} - \mathbf{g}_p - \mathbf{g}_q - \mathbf{g}_r - \mathbf{2}$ を考えるとき，どの2つのベクトルも $\mathbf{0}$ でなく，互いに異なることである．

例えば，証明は省くが，定理4を用いて，T_2 に 4.1.1 節の LC タイプから $(0, \dots, 0)$ の列を除いた計画 W^* を用いると，MEP.1 計画になることが示される．

（前節で，W^* が，$\boldsymbol{\xi_2}$ を2因子交互作用だけからとした場合の T_2 になることを示したが，さらに，$\boldsymbol{\xi_2}$ を2因子・3因子交互作用からとしても，検索できることが分かった．）

例 **1**)　$m = 7$ に対する T_2 は次のように表される．

	0	0	0	1	1	1	1
	0	1	1	0	0	1	1
	1	0	1	0	1	0	1
$(1,0,0)$	0	0	0	1	1	1	1
$(0,1,0)$	0	1	1	0	0	1	1
$(0,0,1)$	1	0	1	0	1	0	1
$(1,1,0)$	0	1	1	1	1	0	0
$(1,0,1)$	1	0	1	1	0	1	0
$(0,1,1)$	1	1	0	0	1	1	0

4．MEP.2 計画 の構成

この章では，T_1 をある決まった計画とするとき，$T = T_1 + T_2$（“+” は2つの計画の並置）が MEP.2 計画になるような T_2 を構成することを考える．但し，検索する未知母数は2因子交互作用からとする．

4．1 $T_1 = (\Omega(m,0)', \Omega(m,1)', \Omega(m,m-1)')'$ のとき

この節では，T_1 を weight(1 の数) が $0, 1, m-1$ の処理組合せを全部集めた計画とするとき，$T = T_1 + T_2$（“+” は2つの計画の並置）が MEP.2 計画になるような T_2 を構成する．

この問題は Mukerjee and Chatterjee[(2)] が Hadamard 行列を T_2 に応用することで，MEP.2 計画を構成したことから，研究が始まっている．

上記の条件 (4) をこの構成の場合に考えて，次の定理を得る．

定理 2　上記の T_1 について，$T = T_1 + T_2$ が MEP.2 計画になる必要十分条件は，$\{1, 2, \dots, m\}$ からの異なる整数 a, b, c, d のどんな組合せに対しても，$t_a \ne t_d$ かつ $t_b \ne t_c$ である処理組合せ $(t_1, t_2, \dots, t_m)$ が T_2 に存在することである．

次の定義は，定理 2 を満たす T_2 の組合せ的性質を調べていくときに大切な役割を演じる．

定義　D を $n \times m$ の $(0,1)$ 行列だとするとき，D が n 行，m 列の **ST 配列**(ST 配列 (n,m)) であるのは，D のどの4列を取っても，$\binom{1}{1}, \binom{1}{0}, \binom{0}{1}, \binom{0}{0}$ が全て含まれているような2行が存在することである．

注）上記の定義は，次のように言い換えられる．
「どの4列でも，同じでなく complement でもない weight 2 の行が必ず2行存在する」

例２）　ST 配列 (4, 6)

$$\begin{array}{cccccc} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{array}$$

定理 3　先に定義した計画 T_1 について，$T = T_1 + T_2$ が MEP.2 計画になる必要十分条件は，T_2 が ST 配列 (N_2, m) であることである．

ST 配列は，次の３種類の構成が考えられている．
(Shirakura,Suetsugu and Tuji[7] による)

4.1.1 ST 配列の構成 (1)　　＜ＬＣタイプ＞

r が 3 以上の整数のとき，各成分が 0, 1 である r-次元の点 $A = (\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_r)$ を考える．$n = r(r+1)/2$ とするとき，$n \times 2^r$ 行列 W を次のように決める．列は，$(0, \ldots, 0)$ から始まる上記の全ての r-次元の点でラベルづけられているとする．行は，成分中の 1 の数が 1 か 2 であるような点 $B = (\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_r)$ でラベルづけられているとする．このとき，B 番目の行で A 番目の列の W の要素は次のように与えられる．

$$\sum_{i=1}^{r} \alpha_i \beta_i \pmod 2$$

定理 4　$r \geq 3$ で $n = r(r+1)/2$ とする．上記のように定義した行列 W は ST 配列 $(n, 2^r)$ である．

例３）　$r = 3$ に対する ST 計画 (6, 8) : W は次のように表される．

	0	0	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	1	0	0	1	1
	0	1	0	1	0	1	0	1
$(1,0,0)$	0	0	0	0	1	1	1	1
$(0,1,0)$	0	0	1	1	0	0	1	1
$(0,0,1)$	0	1	0	1	0	1	0	1
$(1,1,0)$	0	0	1	1	1	1	0	0
$(1,0,1)$	0	1	0	1	1	0	1	0
$(0,1,1)$	0	1	1	0	0	1	1	0

4.1.2 ST 配列の構成 (2)　　＜ＢＩタイプ＞

良く知られたパラメータ v, b, r, k, λ をもった釣合い不完備ブロック計画 $BIBD(v, b, r, k, \lambda)$ を利用する．$M'(v \times b)$ が $BIBD(v, b, r, k, \lambda)$ の生起行列だとすると，次の定理が成り立つ．

定理 5　$M(b \times v)$ の，どの 4 列を取った部分行列にも weight 2 の行が少なくとも 1 つ含まれていれば，M からどれか 1 行を除いた M^* は ST 配列 $(b-1, v)$ である．

注）定理 5 で，M も，ST 配列である．

例４）　BIBD(7, 7, 3, 3, 1) から，最初の行を除くことで，次のような ST 配列 (6,7) が得られる．

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

4.1.3 ST 配列の構成 (3)　　＜ＱＲタイプ＞

標数が奇素数 p である有限体 $GF(p^n)$ に対して，0 でない要素 α は，$\alpha = \beta^2$ であるような要素 $\beta \in GF(p^n)$ が存在するとき，quadratic residue (Q.R.) であるという．

$1 \leq i, j \leq p^n$ で，ρ_i が $GF(p^n)$ の任意の元なら，$p^n \times p^n$ 行列 $V = \{v_{ij}\}$ を次のように定義する．

$i = j$ のときは $v_{ij} = 0$,　$i \neq j$ のときは $\rho_j - \rho_i$ が Q.R. なら $v_{ij} = 1$ で，Q.R. でないなら $v_{ij} = 0$

このとき，次の定理が成り立つ．

定理 6　$m = 4t + 1 = p^n$ (t は 2 以上の整数, p は素数, n は正整数) とするとき，上記のように定義した V は ST 計画 (m, m) になる．

例５）　$p = 3$ で $n = 2$ とすると，9×9 行列 V は次のように与えられる．

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

注）Mukerjee and Chatterjee[2] の場合は，3.2 節の場合と同様に，Hadamard 行列から $(1, \cdots, 1)$ の 1 行と $(1, \cdots, 1)'$ の 1 列を除いた行列 H^* を考え，さらにどれか 1 行を除いても ST 配列になる，ということになる．H^* は $m = 4t - 1$ の場合であり，QR タイプとよく似た構造をしていて，「HA タイプ」と呼ぶことにする．

４．２ $T_1 = (\Omega(m, 0)', \Omega(m, 1)')'$ のとき

この節では，T_1 を前節より小さい weight が 0, 1 の処理組合せを全部集めた計画とするとき，$T = T_1 + T_2$ が MEP.2 計画になるようにするには，どんな T_2 を取ればよいか，という問題を考える．

このとき，$T = T_1 + T_2$ に対する (5) の行列 U は，T_2 の処理組合せの数を N_2，T_1, T_2 から 2 列ずつのアダマール積を取ったベクトルを並べた行列をそれぞれ T_{12}, T_{22} とすると，$T_{12} = O$ より，次のようになる．

$$U = \left(\begin{array}{c|c|c} 1 & \mathbf{0}_m' & \\ \hline \mathbf{1}_m & I_m & O \\ \hline \mathbf{1}_{N_2} & T_2 & T_{22} \end{array} \right) \tag{7}$$

ただし，$\mathbf{0}_m$ は $m\times 1$ 零ベクトル，I_m は $m\times m$ 単位行列，$\mathbf{1}_m$ は 各要素が 1 の $m\times 1$ ベクトル，O は $(m+1)\times\binom{m}{2}$ 零行列だとする．

U の T_1 と一般平均に対応する部分行列の rank が m+1 で $T_{12}=O$ であることから，条件 (4) より，次の定理が導かれる．

定理 7　上記の T_1 について，$T=T_1+T_2$ が MEP.2 計画になる必要十分条件は，上記の T_{22} から任意の 4 列を取った部分行列 T_0 のランクが 4 であることである．

○ T_2 が BI タイプのとき

T_2 に 会合数が 2 以上の BIBD を転置した行列（BI タイプ）を用いると，$T=T_1+T_2$ が MEP.2 計画になるのでは，と考えて，探求した結果，$m\le 12$ では，次のような場合に MEP.2 計画になることが分かった．

（ BIBD が $\Omega(m,j)$ である場合は除く）

BIBD(6,10,3,5,2)　BIBD(8,14,4,7,3)
BIBD(9,12,6,8,5)　BIBD(9,18,4,8,3)
BIBD(9,18,5,10,5)　BIBD(10,30,7,21,14)
BIBD(11,55,3,15,3)　BIBD(11,55,4,20,6)
BIBD(12,22,6,11,5)　BIBD(12,33,4,11,3)
BIBD(12,44,3,11,2)

一方，次の場合には，MEP.2 計画にならない．

BIBD(7,7,4,4,2)　BIBD(10,15,4,6,2)
BIBD(10,18,5,9,4)　BIBD(10,30,3,9,2)
BIBD(11,11,5,5,2)

例６）　BI タイプ　$(m=9)$ ： BIBD(9,12,6,8,5)

$$\begin{bmatrix}
0&0&0&1&1&1&1&1&1\\
1&1&1&0&0&0&1&1&1\\
1&1&1&1&1&1&0&0&0\\
0&1&1&0&1&1&0&1&1\\
1&0&1&1&0&1&1&0&1\\
1&1&0&1&1&0&1&1&0\\
0&1&1&1&0&1&1&1&0\\
1&0&1&1&1&0&0&1&1\\
1&1&0&0&1&1&1&0&1\\
0&1&1&1&1&0&1&0&1\\
1&0&1&0&1&1&1&1&0\\
1&1&0&1&0&1&0&1&1
\end{bmatrix}$$

だから，一般的に，会合数が 2 以上の BIBD を転置した行列（BI タイプ）が T_2 になる訳ではないが，上記の例 BIBD(9,12,6,8,5) の場合のように，前節で構成した MEP.2 計画よりずっと処理組合せが少ない MEP.2 計画が構成できた．

(BIBD(9,12,6,8,5) の場合は $N=1+9+12=22$ で，前節のＱＲタイプの場合は $N=1+18+9=28$)

また，これだけで T_2 にならない場合でも，次のようにして，T_2 を構成できる場合がある．

例７）BIBD(10,18,5,9,4) のときは，例えば，0101010101 という行を加えると T_2 になる．

（この場合は $N=1$+10+19 = 30 で，前節の LC タイプ 10×16 から 6 列を除いた場合は $N=1$+20+10 = 31）

例８）　BIBD(7,7,4,4,2), BIBD(11,11,5,5,2) のときは，0,1 を反転した行列を付加すると T_2 になる．

５．MEP.3 計画 の場合

MEP.3 計画 は，T_1 ： weight が $0,1,m-1$ の処理組合せを全部集めた計画で 2 因子交互作用から高々 3 個の未知効果が検索でき，主効果と共に推定可能であるような検索可能計画なので，4.1 節の MEP.2 計画と同様の議論ができる．

５．１ T_1 の取り方から言えること

MEP.2 計画 のときと同様，まず，T_1 とそれから導かれる U_1 を考え，rank U_1 が $m+1+6$ になるかどうかを探っていく．それには，

$$V_1=(\mathbf{e}_{p_1q_1}\ \mathbf{e}_{p_2q_2}\ \mathbf{e}_{p_3q_3}\ \mathbf{e}_{p_4q_4}\ \mathbf{e}_{p_5q_5}\ \mathbf{e}_{p_6q_6})$$

の rank が 6 になるかどうかだけを調べればよいことがすぐに分かる．但し，$\mathbf{e}_{ij}$ は，i,j 成分が 0，他の成分は 1 のベクトルである．

さらに，$p_1,q_1,\sim,p_6,q_6$ の選び方を考えると，同型でないものは 68 種類が考えられ，そのうち，V_1 の rank が落ちるのは 15 種類であることが示される．

各場合に T_2 で rank が落ちないようにする為に必要な条件を考えていくと，T_2 は，ST 配列であることと，次の各条件のいずれかを満たすことが必要であることが分かる．

・４列条件：
「ある行列から任意の 4 列を取ると，その中に，
互いに等しくなく complement(01 反転) でもない，
weight ２の ３行が存在する.」

・５列条件：
「ある行列から任意の 5 列を取った部分行列 W で，どの列 $\mathbf{a}$ を考えても，
　要素 $a_i=0$ なら その行の weight が 3，
　$a_i=1$ なら その行の weight が 2
であるような第 i 行が W の中に存在する.」

・６列条件：
「下記のように，2×3 の $(0,1)$ 行列 A,B を定める．
ある行列の任意の 6 列を取った部分行列 W を考える．
W の任意の 3 列をまとめて，それに残りの 3 列をまとめて加えた行列から 2 行を取った部分行列を W_0 とすると，$W_0=[A:B]$ または $W_0=[B:A]$ となるものを選ぶことができる．
A: 2 行は weight が 1 か 2 で，等しいか complement
B:どの 3 列も異なる行列 」

以上の条件を使って，次の定理が導かれる．

定理６　T_2 が ST 配列を含み，５列条件と６列条件を満たすか，４列条件と６列条件を満たせば，T_2 は MEP.3 計画 である．

５．２ MEP.3 計画 の例

残念ながら，MEP.3 計画になる T_2 を，定理の形で示すことはできなかったが，次のような２種の T_2 を構成した．

1)「T_2 が $m \times m$ の QR タイプまたは HA タイプ（但し，m は素数で 43 までを確かめている) のとき，$m =$ 7, 13, 19 以外は MEP.3 計画 である．」

例９）　m=11 のとき　（ＨＡタイプ）

0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0
0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0
0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0

2) ST-array からの構成（$m = 6,\ 7,\ 8$ のとき）

定理６から示唆されるように，Shirakura,Suetsugu and Tuji[7] に示した $m = 6,\ 7,\ 8$ のときの最小の ST-array にそれぞれ１行，３行，３行を付け加えて T_2 を構成できる．

例 **10**）　$T_2\,(9 \times 7)$

0	0	1	1	0	1	0
0	0	0	1	1	0	1
1	0	0	0	1	1	0
0	1	0	0	0	1	1
1	0	1	0	0	0	1
1	1	0	1	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0	1
1	1	0	1	0	0	1

６．MEP.2(1;1) 計画 の場合

これから，T_1：weight が $0, 1, m-1$ の処理組合せを全部集めた計画で２因子と３因子交互作用から高々２個の未知効果が検索でき（但し，３因子交互作用からの未知効果は高々１個)，主効果と共に推定可能であるような検索可能計画を考える．

６．１ MEP.2(1;1) 計画 になるための T_2 の条件

このとき，Srivastava[1] の基本定理に相当する次の定理が導かれる．

定理７　T が上記の計画であるための必要条件は，T の計画行列において，一般平均と各主効果に対応する $m+1$ 列と，２因子と３因子交互作用に対応する任意の４列（但し，３因子交互作用に対応する列は２列までしか選べない）から得られる部分行列を G とすると，

$$\text{rank } G = m + 1 + 4 \tag{8}$$

であることである．特に，誤差がない場合には十分条件になる．

これから，$T = T_1 + T_2$ が定理７の条件を満たすような T_2 を考えていくが，まず，各交互作用に対応する列からの４列の選び方には，次の３通りがある．

１）２因子交互作用に対応する列から４列を選ぶ場合

前の節で扱ったように，この場合に定理７を満たすような T_2 が ST-array であった．

２）２因子交互作用に対応する列から３列，３因子交互作用に対応する列から１列を選ぶ場合

この場合は，3.1 節と同様に，T_1 に対する計画行列の基本変形を考えて，２因子交互作用に対応する３列の独立性だけを考えれば良く，rank が落ちることはないことが示される．

３）２因子交互作用に対応する列から２列，３因子交互作用に対応する列から２列を選ぶ場合

この場合も，3.3 節と同様に，T_1 に対する計画行列の基本変形を考えて，rank が落ちないためには，３因子交互作用に対応する２列で rank が落ちなければよい．これを言い直すと，$\mathbf{c}_{ijk} = \mathbf{g}_{ijk} - \mathbf{g}_i - \mathbf{g}_j - \mathbf{g}_k$ を考えて，$\mathbf{c}_{ijk} \neq \mathbf{c}_{lmn}$（但し，$i, j, k$ と l, m, n には同じものがあっても良い）であればよい．

これを T_2 に戻して考えると，$\mathbf{c}_{ijk} \neq \mathbf{c}_{lmn}$ になるのは，T_2 の行の中で，次のような組合せの行があるときである．

$$\begin{array}{ccc} i\ j\ k & & l\ m\ n \\ weight: 0\ or\ 1 & \rightarrow & weight: 2\ or\ 3 \\ weight: 2\ or\ 3 & \rightarrow & weight: 0\ or\ 1 \end{array}$$

以上のことから，T_2 からの３列で weight が 0 or 1 の行を「タイプ A」, weight が 2 or 3 の行を「タイプ B」とするとき，次の定理が導かれる．

定理８　上記の T_1 に対し，$T = T_1 + T_2$ が２因子と３因子交互作用から高々２個の未知効果が検索でき（但し，３因子交互作用からの未知効果は高々１個)，主効果と共に推定可能であるための必要条件は，T_2 が ST-array であり，T_2 から任意に３列と３列を選んだ時，タイプ A － タイプ B の行があるか，または タイプ B － タイプ A の行があることである．

特に，誤差がない場合には十分条件になる．

T_2 として，次の２タイプで，定理８の条件を満たすことが示される．いずれの場合も，任意に３列と３列を取った時，タイプＡ－Ａ，タイプＢ－Ｂの行しかないとすると，「どの４列でも，同じでなく complement でもない weight2 の行が必ず２行存在する」という ST-array の条件に矛盾することが示される．

1) LC タイプのとき

例） 3.2 節の例２）を参照．

2) BI タイプのとき

例 **11**） BI タイプ $(m=7)$

$$\begin{bmatrix} 1&0&1&0&0&1&0\\ 0&1&1&0&1&0&0\\ 0&1&0&1&0&1&0\\ 0&0&1&1&0&0&1\\ 1&1&0&0&0&0&1\\ 0&0&0&0&1&1&1\\ 1&0&0&1&1&0&0 \end{bmatrix}$$

７．検索確率の比較

以下，Ｔを検索可能計画とし，$\sigma^2>0$ の場合を考える．

$\boldsymbol{\zeta}(k\times 1)$ を $\boldsymbol{\xi_2}$ の未知母数ベクトル，$A_{20}(\boldsymbol{\zeta})$ は $\boldsymbol{\zeta}$ に対応する A_2 の $N\times k$ 部分行列とすると，(1) より，

$$\mathbf{y}=A_1\boldsymbol{\xi_1}+A_{20}(\boldsymbol{\zeta})\,\boldsymbol{\zeta}+\mathbf{e}$$

ここで，

$$A(\boldsymbol{\zeta})=[A_1:A_{20}(\boldsymbol{\zeta})],\ M(\boldsymbol{\zeta})=A'(\boldsymbol{\zeta})A(\boldsymbol{\zeta}),$$
$$Q(\boldsymbol{\zeta})=A(\boldsymbol{\zeta})M^{-1}(\boldsymbol{\zeta})A'(\boldsymbol{\zeta})$$

とおくと，

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}=\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{\xi_1}}\\ \hat{\boldsymbol{\zeta}}\end{bmatrix}=M^{-1}(\boldsymbol{\zeta})A'(\boldsymbol{\zeta})\,\boldsymbol{y},$$
$$\hat{\boldsymbol{y}}=A(\boldsymbol{\zeta})\hat{\boldsymbol{\theta}}=Q(\boldsymbol{\zeta})\,\boldsymbol{y}$$

となり，残差平方和は，以下で与えられる．

$$S_e^2(\boldsymbol{\zeta})=|\mathbf{y}-\hat{\mathbf{y}}|^2=\mathbf{y}'(I-Q(\boldsymbol{\zeta}))\mathbf{y} \tag{9}$$

このとき，検索手順は，次のように与えられる．

$\mathbf{y}$ に対して，

(i) 全ての $\boldsymbol{\zeta}\subset\boldsymbol{\xi_2}$ に対して，$S_e^2(\boldsymbol{\zeta})$ を求める．

(ii) $S_e^2(\boldsymbol{\zeta})$ を最小にする $\boldsymbol{\zeta}^*(k\times 1)\subset\boldsymbol{\xi_2}$ を求める．

(iii) $\boldsymbol{\zeta}^*$ が求める未知母数ベクトルである．

このとき，

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}=M^{-1}(\boldsymbol{\zeta}^*)A'(\boldsymbol{\zeta}^*)\boldsymbol{y}$$

である．

これから，検索確率を次のように考えて，定義する．

真のモデル：$\boldsymbol{\zeta}_0(k\times 1)\subset\boldsymbol{\xi_2}$ に対して，

$$\mathbf{y}=A_1\boldsymbol{\xi_1}+A_{20}(\boldsymbol{\zeta}_0)\,\boldsymbol{\zeta}_0+\mathbf{e}$$

とすると，理想的には，一意的に $\boldsymbol{\zeta}^*=\boldsymbol{\zeta}_0$ となること，すなわち，全ての $\boldsymbol{\zeta}(\neq\boldsymbol{\zeta}_0)\subset\boldsymbol{\xi_2}$ に対して，

$$S_e^2(\boldsymbol{\zeta_0}))<S_e^2(\boldsymbol{\zeta}) \tag{10}$$

となることが望ましいが，誤差があるので，(10) が成り立つとは限らない．そこで，次の確率を考える．

$$P(\boldsymbol{\zeta_0})=Pr(\ S_e^2(\boldsymbol{\zeta_0})<S_e^2(\boldsymbol{\zeta})\text{ for any }\boldsymbol{\zeta}(\neq\boldsymbol{\zeta_0})\subset\boldsymbol{\xi_2})$$
$$P=\min_{\boldsymbol{\zeta_0}\subset\boldsymbol{\xi_2}}P(\boldsymbol{\zeta_0}) \tag{11}$$

この P を，検索確率（または検索力）という．

また，検索可能計画 (SD) T に対する検索確率を P_T とすると，２つの SD T_1, T_2 に対して，

$$P_{T_1}\geq P_{T_2}$$

であるとき，T_1 は T_2 より “より良い” という．

但し，(11) の検索確率を解析的に求めるのは難しいので，シミュレーションで求めていくことにする．だから，検索確率 (11) は，未知母数の大きさを決めて N 回，試行した中で，何回，$S_e^2(\zeta_0)$ が実際に最小になるかという割合を求め，$\boldsymbol{\zeta_0}$ のとり方のそれぞれについてその最小値を取ったものになる．

７．１ MEP.1 計画の検索確率による比較

これから，MEP.1 計画の検索確率を求めていくが，ρ は未知母数の真の大きさと誤差の標準偏差 σ の比 ($\rho=\dfrac{|\boldsymbol{\zeta}_0|}{\sigma}$) であり，試行回数 N はいずれも 100000 回である．

7.1.1 検索する未知母数は２因子交互作用からの場合

次のような２種の検索可能計画について，検索確率を求めてみる．

タイプ１

タイプ１は，Shirakura and Tazawa[8] により次のように与えられる．

$$T=\begin{cases}(\Omega(4,0)':\Omega(4,1)':\Omega(4,3)')' & \text{for } m=4\\ (\Omega(m,1)':\Omega(m,m-1)')' & \text{for } m\geq 5\end{cases}$$

例 **12**） $(\Omega(6,1)':\Omega(6,5)')'\quad <12\times 6>$

$$\begin{array}{cccccc}1&0&0&0&0&0\\0&1&0&0&0&0\\0&0&1&0&0&0\\0&0&0&1&0&0\\0&0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0&1\\\hline 1&1&1&1&1&0\\1&1&1&1&0&1\\1&1&1&0&1&1\\1&1&0&1&1&1\\1&0&1&1&1&1\\0&1&1&1&1&1\end{array}$$

注）タイプ１は，$\Omega(m,j)$ の処理組合せだけからなる‘Simple Array’と呼ばれる計画の１つである．

Simple Array については，どんな２因子交互作用が未知母数であっても検索確率は同じであることが示されるので，この計画に対する検索確率は，どれか１つの $\mathbf{a}_{pq}$ についての確率を計算すればよい．

表３　検索確率（タイプ１）

ρ	m 5	6	7	8
	$<10\times5>$	$<12\times6>$	$<14\times7>$	$<16\times8>$
1.0	0.69160	0.73189	0.74327	0.74279
1.5	0.91212	0.95564	0.96842	0.97275
2.0	0.98232	0.99601	0.99795	0.99840
2.5	0.99723	0.99933	0.99937	0.99937

タイプ２

タイプ２は，$T_1=(\Omega(m,0)',\Omega(m,1)')'$ に，行列 T_2 を付加してできるだけ処理組合せの数の少ない MEP.1 計画を構成したものである．(3.1 節を参照)

例 **13**）　$(\Omega(6,0)',\Omega(6,1)')'+T_2$　　$<12\times6>$

$$
\begin{array}{cccccc}
0&0&0&0&0&0\\
1&0&0&0&0&0\\
0&1&0&0&0&0\\
0&0&1&0&0&0\\
0&0&0&1&0&0\\
0&0&0&0&1&0\\
0&0&0&0&0&1\\
\hline
1&1&1&0&1&0\\
1&0&1&1&0&1\\
1&1&0&1&1&0\\
1&0&1&0&1&1\\
1&1&0&1&0&1
\end{array}
$$

表４　検索確率（タイプ２）

ρ	m 5	6	7	8
	$<10\times5>$	$<12\times6>$	$<14\times7>$	$<15\times8>$
1.0	0.52974	0.44748	0.38667	0.30270
1.5	0.74675	0.70467	0.69183	0.58656
2.0	0.85946	0.85048	0.88775	0.78474
2.5	0.91951	0.91929	0.96841	0.86228

結論

タイプ１はシンプルな計画ではあるが，ρ が小さくても検索確率がよい．それに比べるとタイプ２では，T_2 の部分で N_2 を小さくしようとして無理をしているのか，検索確率が良くない．

7.1.2 検索する未知母数は２因子・３因子交互作用からの場合

検索する未知母数は２因子・３因子交互作用からの場合として，3.2 節では，$T_1=(\Omega(m,0)',\Omega(m,m-1)',\Omega(m,m)')'$ の場合に研究した結果を述べた．3.3 節では，$T_1=(\Omega(m,0)',\Omega(m,1)')'$ の場合に研究した結果を述べた．どちらの場合も，構成の関心が，処理組合せ N を小さくすることに置いていたため，検索確率を比べるには，m, N がそろった計画が少ない．その為，各場合に典型的で，比較的比べやすい次の場合をあげるだけにする．

例 **14**）　$m=7$，$N=15$ である次の２つの MEP.1 計画を比較する．

・「Had−」は，3.2 節からの例で $T_1=(\Omega(7,0)',\Omega(7,6)')'$ に HA タイプの T_2 を付加したものである．

（$\Omega(7,7)$ の行は削除しても，MEP.1 であることが言える）

・「LC+」は，3.3 節からの例で，$T_1=(\Omega(7,0)',\Omega(7,1)')'$ に，T_2 として，3.3 節の W^* に $N=15$ になるように１行 1101001 を付加したものである．

（この行は，各列の weight が同じになるように選んでいる）

”Had−” $<15\times7>$

$$
\begin{array}{ccccccc}
0&0&0&0&0&0&0\\
1&1&1&1&1&1&0\\
1&1&1&1&1&0&1\\
1&1&1&1&0&1&1\\
1&1&1&0&1&1&1\\
1&1&0&1&1&1&1\\
1&0&1&1&1&1&1\\
0&1&1&1&1&1&1\\
\hline
0&1&1&0&1&0&0\\
0&0&1&1&0&1&0\\
0&0&0&1&1&0&1\\
1&0&0&0&1&1&0\\
0&1&0&0&0&1&1\\
1&0&1&0&0&0&1\\
1&1&0&1&0&0&0
\end{array}
$$

”LC+” $<15\times7>$

$$
\begin{array}{ccccccc}
0&0&0&0&0&0&0\\
1&0&0&0&0&0&0\\
0&1&0&0&0&0&0\\
0&0&1&0&0&0&0\\
0&0&0&1&0&0&0\\
0&0&0&0&1&0&0\\
0&0&0&0&0&1&0\\
0&0&0&0&0&0&1\\
\hline
0&0&0&1&1&1&1\\
0&1&1&0&0&1&1\\
1&0&1&0&1&0&1\\
0&1&1&1&1&0&0\\
1&0&1&1&0&1&0\\
1&1&0&0&1&1&0\\
\hline
1&1&0&1&0&0&1
\end{array}
$$

次の表５に「Had−」と「LC+」の検索確率を与えているが，参考として,「Had」として「Had−」の１行を削除する前の SD について,「LC」として「LC+」の１行を付加する前の SD についての検索確率を与えている．

表５　検索確率

ρ	$Had-$ 15×7	$LC+$ 15×7	Had 16×7	LC 14×7
1.0	0.38869	0.32309	0.44046	0.16795
1.5	0.74440	0.64962	0.80205	0.30600
2.0	0.93192	0.88216	0.95499	0.48347
2.5	0.98719	0.97277	0.99161	0.65685
3.0	0.99763	0.99542	0.99824	0.79840
4.0				0.95342

結論

どちらも，$\rho=1$ のときは検索確率が低いが，$\rho=3$ 程度になると，よい検索確率になる．

ρ の値に関わらず,「Had−」の方が「LC+」より検索確率がよいことが伺える．

7．2 MEP.2 計画の検索確率による比較

MEP.2 計画についても，(11) の検索確率を解析的に求めるのは難しいので，シミュレーションで求めていくことにするが，シミュレーションを実行し易くする為に，検索確率を求める式を変形していく．

まず，残差平方和 S_e^2 は (9) で与えられていたが，さらに，

$$Q = A_1(A_1'A_1)^{-1}A_1'$$

と置くと，次のように変形される．

$$\begin{aligned} S_e^2 &= \mathbf{y}'[I - Q - (Q(\boldsymbol{\zeta}) - Q)]\mathbf{y} \\ &= \mathbf{y}'[I - Q]\mathbf{y} - \mathbf{y}'[Q(\boldsymbol{\zeta}) - Q]\mathbf{y} \end{aligned} \tag{12}$$

式 (12) の第 1 項は $\boldsymbol{\zeta}$ の取り方に依存しないので，第 2 項を $h(\boldsymbol{\zeta}) = \mathbf{y}'[Q(\boldsymbol{\zeta}) - Q]\mathbf{y}$ とすれば，

$$S_e^2(\boldsymbol{\zeta_0}) < S_e^2(\boldsymbol{\zeta}) \iff h(\boldsymbol{\zeta_0}) > h(\boldsymbol{\zeta})$$

である，$S_e^2(\boldsymbol{\zeta_0})$ が最小になることを確かめる代わりに $h(\boldsymbol{\zeta})$ が最大になることを確かめることができる．

シミュレーションでは，$\boldsymbol{\zeta_0} = (\zeta_1, \zeta_2)'$ とすると，ζ_1, ζ_2 をいろいろ変えて検索確率を求めていくことになるが，$|\zeta_1| = |\zeta_2|$ の場合を調べると傾向がつかめるので，以下の例ではこの場合のみをあげている．また，ζ_1 の大きさと誤差の標準偏差 σ との比を $\rho = |\zeta_1|/\sigma$ として，ρ が 1.0〜2.4 の範囲を示す．ただし，試行回数は $m \leqq 9$ のときは 10000 回である．

次のような各種の MEP.2 計画 について，検索確率を求める．但し，検索する未知母数は 2 因子交互作用からの場合だけに絞る．

タイプ 1

タイプ 1 は，Shirakura and Tazawa[8] により，$m \geq 6$ で，次のように与えられる．

$$T = (\Omega(m,2)' : \Omega(m,m)')'$$

例 **15**)　$(\Omega(6,2)', \Omega(6,6)')'$　$< 16 \times 6 >$

1	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	0	0	0	0	1
0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0
0	1	0	0	0	1
0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	1
0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1

表 6　検索確率（タイプ 1）

ρ	m				
	6	7	8	9	6
	16×6	22×7	29×8	37×9	17×6
1.0	0.5382	0.6341	0.6672	0.6819	0.5821
1.2	0.7341	0.8251	0.8602	0.8738	0.7699
1.4	0.8699	0.9354	0.9545	0.9632	0.8917
1.6	0.9451	0.9799	0.9878	0.9916	0.9561
1.8	0.9796	0.9945	0.9969	0.9977	0.9852
2.0	0.9923	0.9987	0.9993	0.9995	0.9951
2.2	0.9975	0.9996	0.9998	0.9999	0.9985
2.4	0.9992	0.9999	0.9999	0.9999	0.9995

注）$m = 6 < 17 \times 6 >$ の列は，後述のタイプと N をそろえる為に，000111 の行を加えたものである．

タイプ 1 は，7.1.1 節と同様 ‘Simple Array’ で，次に示すように，Simple Array から構成される MEP.2 計画については，検索確率を求める際の確率 $P(\boldsymbol{\zeta_0})$ が 2 種類だけであることが示される．(証明は省略する)

定理 9　検索可能計画 T が Simple Array である MEP.2 計画 とする．T に対して，確率 $P_1 = P(\ (\theta_{12},\ \theta_{34})')$ と $P_2 = P(\ (\theta_{12},\ \theta_{23})')$ とすると，検索確率は以下で与えられる．

$$P = \min(P_1,\ P_2)$$

タイプ 2

タイプ 2 は，$T_1 = (\Omega(m,0)', \Omega(m,1)', \Omega(m,m-1)')'$ に，T_2 を付加して MEP.2 計画を構成したものである．(4.1 節を参照)

次の表 7 に示す例で T_2 の部分は，$m = 6$ のときが 4×6 の ST 配列，$m = 8$ のときが 6×8 の LC タイプ，$m = 9$ のときが 9×9 の QR タイプ，$m = 7,\ 11$ のときが $m \times m$ の BI タイプである．

表 7　検索確率（タイプ 2）

ρ	m			
	6	7	8	9
	$< 17 \times 6 >$	$< 22 \times 7 >$	$< 23 \times 8 >$	$< 28 \times 9 >$
1.0	0.6453	0.8016	0.6554	0.7513
1.2	0.8095	0.9337	0.8388	0.8850
1.4	0.9102	0.9816	0.9292	0.9476
1.6	0.9646	0.9952	0.9682	0.9737
1.8	0.9858	0.9989	0.9867	0.9880
2.0	0.9943	0.9996	0.9940	0.9939
2.2	0.9978	0.9998	0.9972	0.9968
2.4	0.9993	0.9999	0.9984	0.9985

タイプ 3

タイプ 3 は，$T_1 = (\Omega(m,0)', \Omega(m,1)')'$ に，T_2 を付加して MEP.2 計画を構成したものである．(4.2 節を参照)

次の表 8 には，BIBD の転置だけで T_2 になる $m = 6(10 \times 6),\ m = 8(14 \times 8),\ m = 9(18 \times 9)$ の場合をあげている．　($m = 9$ の場合は，N の小さい 12×9 の場合も参考にあげている)

表８　検索確率（タイプ３）

ρ	m 6 $<17\times6>$	8 $<23\times8>$	9 $<28\times9>$	9(参考) $<22\times9>$
1.0	0.5744	0.5886	0.5160	0.4358
1.2	0.7656	0.8092	0.7343	0.6469
1.4	0.8911	0.9269	0.8809	0.8044
1.6	0.9584	0.9762	0.9563	0.9043
1.8	0.9853	0.9918	0.9859	0.9546
2.0	0.9952	0.9963	0.9954	0.9816
2.2	0.9984	0.9990	0.9988	0.9920
2.4	0.9996	0.9996	0.9994	0.9967

注）$m=7$ の場合は，BIBD(7,7,4,4,2) の 01 を反転した行列 (complement) を付加して MEP.2 Plan を構成したものしかできていない．少し異質な構成になるので，検索確率は省く．

結論

まず，どのタイプでも $\rho=2.0$ くらいで検索確率が 99 %以上になり，実用的には，いずれも良い計画と言える．

次に，タイプ１では，m が大きくなると N が大きくなるので，検索確率がより良くなる傾向がある．タイプ２では，m の増え方と検索確率には単純な傾向はない．タイプ３では，小さな ρ の値で検索確率が低いのが目立つ．

サイズが同じ計画で直接比べると，例えば，22×7 の場合，ρ の各値でタイプ２の方がタイプ１より良い．28×9 の場合は，ρ の各値で，タイプ２の方がタイプ３より良い．他の m の場合はサイズが違うので直接比較できないが，ρ が小さい可能性があるときは，タイプ２を使う方が良いと思われる．

８．終わりに

検索可能計画についての研究は，神戸大の白倉先生のもとで，まず，3.1 節の MEP.1 計画で，できるだけ処理組合せの数の小さな SD を構成することから始めた．それから，4.1 節の MEP.2 計画で，白倉先生と共に，T_2 の満たすべき条件から ST 配列という美しい関係を得た．その後，5 章の MEP.3 計画, 4.2 節の MEP.2(1;1) 計画, 3.2 節の MEP.1 計画の再検討，3.3 節の MEP.1 計画の構成と進んでいった．MEP.2 計画で構成された３つのタイプが，MEP.3 計画, MEP.2(1;1) 計画などの場合でも，大きな役割を果たしていることが伺えるが，それぞれに特有のタイプが他にも作れるかどうかは，まだ分かっていない．

検索確率については，MEP.2 計画の比較に最も力を入れて研究し，単一構成のタイプ１の場合より，T_1+T_2 という構成のタイプ２の方が検索確率がよいことが分かった．MEP.1 計画の場合も研究したが，処理組合せが少なくてすむ計画の構成に力を注いでいたので，例えば，２因子交互作用を検索する場合は，タイプ１のシンプルな計画の方が良い，という結果になった．検索可能計画の構成に検索確率を良くする，という観点も入れていくことが，これからの課題である．

参考文献

(1) J.N.Srivastava :“Designs for searching non-negligible effects” in: A Survey of Statistical Design and Linear Model (ed. J.N.Srivastava),pp.507-519, North-Holland, 1975.

(2) R.Mukerjee and K.hatterjee : “An application of Hadamard matrices for the construction of main effect plus two plans for 2^m factorials”, Utilitas Math. Vol.45, pp.213-218,1994.

(3) 末次武明：「MEP.1 plan の構成について」, 神戸高専研究紀要第 47 号, pp.123-127,2009.

(4) T.Shirakua:“Fractional factorial designs of two and three levels”. Discrete Mathematics Vol.116, pp. 99-135, North-Holland,1993.

(5) S.Ghosh:“On some new search designs for 2^m factorial experiments”, J.Statistical Planning and Inference Vol.5,pp.381-389,1981.

(6) T.Ohnishi and T.Shirakura:“Search designs for 2^m factorial experiments”, J.Statistical Planning and Inference Vol.11,pp.241-245,1985.

(7) T.Shirakura, T.Suetsugu and T.Tsuji:“Construction of main effect plus two plans for 2^m factorials”,J. Statistical Planning and Inference,Vol.105,pp.405-415,2002.

(8) T.Shirakua and S.Tazawa,S:“Series of main effect plus one or two plans for 2^m factorials when three-factor and higher order interactions are negligible” ,J.Japan Statist.Soc., Vol.21,pp.211-219,1991.

遷移金属錯体を用いたチオールとヒドロシランの脱水素縮合反応

福本晃造* 笠実千穂** 大家 創** 中沢 浩***

Synthesis of Silylthioether via Dehydrogenation of Thiol and Hydrosilane Catalyzed by a Transition Metal Complex

Kozo FUKUMOTO* Michiho KASA** Tsukuru OYA** Hiroshi NAKAZAWA***

ABSTRACT

Photo reaction of Et_3SiH with PhSH in the presence of a stoichiometric amount of $Cp[M](CO)_2Me$ ([M] = Fe(**1**), Mo(CO)(**2**)) exhibited dehydrogenative Si-S coupling reaction to give $Et_3SiSSPh$. Catalytic condensation with $CoFe(CO)_2Me$ could be achieved under heat conditions. In order to optimize the dehydrogenative coupling reaction catalyzed by **1**, several solvents were examined, and toluene and 1,2-dichloroethane were found to be the best solvents. The molar ratio of **1**, thiol and hydrosilane was also examined and it was found that TON of 20 was recorded when the ratio was 1 : 10 : 1000. A plausible reaction mechanism is proposed involving an Fe(IV) complex with $SiEt_3$, SPh and H ligands, from which reductive elimination of $SiEt_3$ and SPh takes place to give $Et_3SiSSPh$.

Keywords: hydrosilane, thiol, dehydrogenative coupling, catalyst, transition metal

1. はじめに

官能基を複数有する有機化合物において、特定の部位を選択的に反応させるには、他の官能部位を反応しないように保護しておくことが必要となる。この保護基としてシリル基がよく用いられている[(1),(2)]。このような観点から、シリル基を有機物に導入する反応は有機化学において重要な反応となる。シリル基導入反応として広く利用されているものにハロゲン化ケイ素化合物と有機物のアルカリ金属塩との反応がある[(3)]。この反応は化学量論反応であり、また、ハロゲン化アルカリが塩として副生する。近年、原子効率、取り扱いの容易さ、環境への配慮などの観点から、遷移金属触媒を用いたヒドロシランと有機物との脱水素縮合反応が注目を集めている。Sommer らは、パラジウムチャコール(Pd-C)存在下、アルコール(R-OH)、アミン(RNH_2)、そして塩化水素(HCl)とヒドロシランを反応させることにより触媒的脱水素縮合反応が進行し、高収率でのシリル基を導入することに成功した[(4),(5)] (eq. 1-4)。しかし、アルコールと等電子構造をもつチオール(R-SH)に対しては、この反応はまったく活性を示さない。これはチオールの硫黄原子上に存在する孤立電子対が、触媒活性種に強く配位することにより、触媒の活性を低下、あるいは阻害するためと考えられる。このように、触媒的脱水素縮合反応において、硫黄原子は触媒毒として作用することが知られている[(4),(6),(7)]。このように困難なチオールとヒドロシランの脱水素縮合反応は、Wilkinson 触媒(Pd ナノ粒子)とトリス（ペンタフルオロフェニル）ボラン($B(C_6F_5)_3$)を用いた方法でのみ達成されている[(8),(9),(10)]。本研究では、安価な遷移金属である鉄、モリブデンを用いたチオールとヒドロシランの脱水素縮合反応に成功したので報告する[(11)]。

$CH_3OH + HSiEt_3 \xrightarrow{10\ \%\ Pd\text{-}C} CH_3OSiEt_3$ 95 % Yield (1)

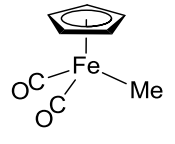
$^tBuNH_2 + HSiEt_3 \xrightarrow{10\ \%\ Pd\text{-}C} {}^tBuNHSiEt_3$ 76 % Yield (2)

$HCl + HSiEt_3 \xrightarrow{10\ \%\ Pd\text{-}C} ClSiEt_3$ 89 % Yield (3)

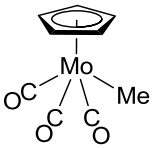
$CH_3SH + HSiEt_3 \xrightarrow{10\ \%\ Pd\text{-}C} CH_3SSiEt_3$ No Reaction (4)

2. 結果と考察

鉄メチル錯体 $Cp(CO)_2Fe(CH_3)$ (**1**, 図-1)に対し、1 当量のベンゼンチオール (PhSH)、トリエチルシラン($HSiEt_3$)を加えたトルエン溶液を、窒素雰囲気下、中圧



$Cp(CO)_2Fe(CH_3)$ **1**



$Cp(CO)_3Mo(CH_3)$ **2**

図-1 $Cp(CO)_2Fe(CH_3)$ **1** と $Cp(CO)_3Mo(CH_3)$ **2** の構造

* 一般科 講師
** 大阪市立大学大学院理学研究科
*** 大阪市立大学大学院理学研究科 教授

表-1　メチル錯体を用いた PhSH と $HSiEt_3$ との化学量論反応

Me Complex + PhSH + $HSiEt_3$ $\xrightarrow[\text{Toluene, 24 H}]{h\nu \text{ or } \Delta}$ PhS–$SiEt_3$

Entry[a]	Complex	Condition	^{1}H NMR yield of $PhSSiEt_3$ (%)	TON[b]
1	**1**	hν	47	0.47
2	**1**	80 ℃	0	0
3	**2**	hν	6.0	0.06
4	**2**	100 ℃	0	0

[a]Entries 1-4 : 0.025 M solution.
[b]TON was determined by the ^{1}H NMR yield of $PhSSiEt_3$.

水銀灯を用いて 24 時間光照射を行った。反応終了後の溶液を調べたところ、トリエチルシリルベンゼンチオール($PhSSiEt_3$)の生成を、^{1}H NMR 収率 47 %で確認した(表-1, entry 1)。なお、$PhSSiEt_3$ については、合成例が報告されていなかったため、Davis らの報告[(12)]を参考に、別途合成を行っている。我々が見出したこの反応は、鉄触媒を用いてチオールとヒドロシランの脱水素縮合反応を行った初めての報告である[(11)]。同様の反応を、加熱条件下でも試みた。鉄メチル錯体に対して、1 当量の PhSH と $HSiEt_3$ を含むトルエン溶液を作成し、80℃条件下、24 時間の反応を行い、反応溶液を調べたが、$PhSSiEt_3$ の生成を確認することができなかった(表-1, entry 2)。モリブデンメチル錯体 $Cp(CO)_3Mo(CH_3)$ (**2**, 図-1）を用いた、同様の検討も行った(表-1, entries 3, 4)。反応溶液を調べたところ、光照射条件下ではわずかな脱水素縮合反応の進行を観測できたが、加熱条件下では、観測することができなかった。以上より、鉄メチル錯体もしくはモリブデンメチル錯体を、チオールとヒドロシランに対し、化学量論量用いた場合、光照射条件下において脱水素縮合反応が進行することが明らかになった。次に、これらの反応を触媒反応へと展開するため、触媒量の遷移金属錯体を用いた脱水素縮合反応について検討を行った(表-2)。

表-2　メチル錯体を用いた PhSH と $HSiEt_3$ との触媒反応

Me Copmlex +10 eq. PhSH+100 eq. $HSiEt_3$ $\xrightarrow[\text{Toluene, 24 H}]{h\nu \text{ or } \Delta}$ PhS–$SiEt_3$

Entry[a]	Complex	Condition	^{1}H NMR yield of $PhSSiEt_3$ (%)	TON[b]
1	**1**	hν	0.36	0.036
2	**1**	80 ℃	87	8.7
3	**2**	hν	0.42	0.042
4	**2**	100 ℃	1.8	0.18

[a]Entries 1-4 : 0.025 M solution.
[b]TON was determined by the ^{1}H NMR yield of $PhSSiEt_3$.

鉄メチル錯体に対し、10 当量の PhSH、100 当量の $HSiEt_3$ を加えたトルエン溶液を作成し、光照射を行った。反応終了後の溶液を調べたところ、脱水素縮合反応の進行は観測されたが、触媒反応を達成するには至らなかった(表-2, entry 1)。しかし、反応溶液を 80 °C 加熱したところ、触媒的脱水素縮合反応の進行が観測された(TON = 8.7, 表-2, entry 2)。この反応を C_6D_6 溶媒中で行い、^{1}H NMR を用いて反応後の溶液を調べたところ、H_2 とアセトアルデヒド(MeCHO)の生成も確認した。光照射条件、加熱条件下での反応検討を、モリブデンメチル錯体に対しても行った。共に脱水素縮合反応が観測され、加熱条件下の方が、より反応活性が高かったが、触媒反応を達成するには至らなかった(表-2, entries 3 and 4)。

加熱条件下、鉄メチル錯体を用いた反応では、PhSH と $HSiEt_3$ の触媒的脱水素縮合が観測されたため、反応機構について検討を行った(図-2)。鉄メチル錯体 **1** を加熱することで、鉄上のカルボニル基が、Fe-Me 結合に対して挿入し、アセチル錯体 **1'**が生成する。反応溶液中には、$HSiEt_3$ と PhSH が共存するため、錯体 **1'**と $HSiEt_3$ との反応、もしくは PhSH との反応が予想される。$HSiEt_3$ と反応した場合、錯体 **1'**に対し Si-H 結合の酸化的付加、アセトアルデヒド(MeCHO)の還元的脱離が進行し、16 電子シリル錯体 **a** が生成する。この錯体に、PhSH の酸化的付加、$PhSSiEt_3$ の還元的脱離により、ヒドリド錯体 **c** が生成する。錯体 **c** に対して $HSiEt_3$ が酸化的付加、H_2 の還元的脱離を経由することで錯体 **a**

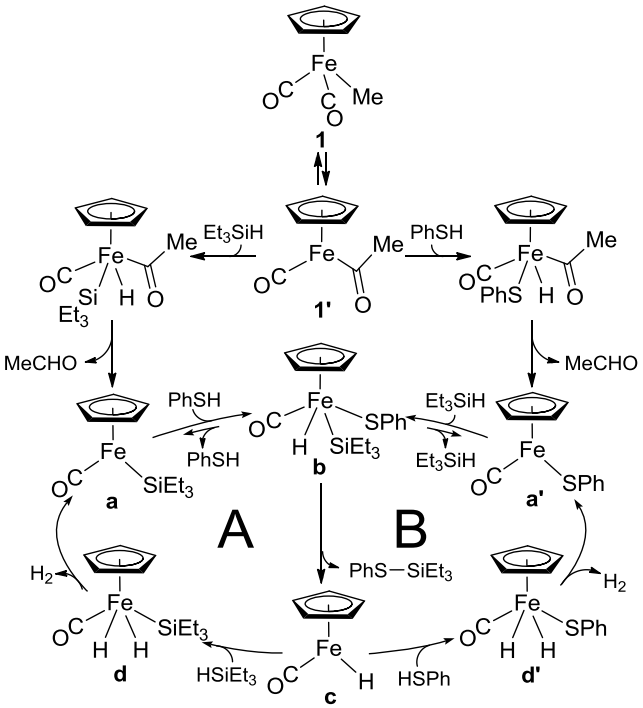


図-2　予想される触媒サイクル

表-3　各種溶媒中での脱水素縮合反応検討

1 + 10 eq. PhSH + 100 eq. $HSiEt_3$ → (80 ℃, 24 H) $PhS-SiEt_3$

Entry[a]	Solvent	^{1}H NMR yield of $PhSSiEt_3$ (%)[b]	TON[c]
1	Toluene	58	5.8
2	1,2-dichloroethane	59	5.9
3	THF	4.0	0.4
4	NEt_3	0	0
5	DMA	0	0
6	DMF	0	0

[a]Entries 1-6 : 0.25 M toluene solution.
[b]Yields were based on PhSH.
[c]TON was determined by ^{1}H NMR yield of $PhSSiEt_3$.

表-4　反応試薬の量比検討

1 + PhSH + $HSiEt_3$ → (80 °C) $PhS–SiEt_3$

Entry	**1** : PhSH : $HSiEt_3$[a]	solvent	Time / H	^{1}H NMR yield of $PhSSiEt_3$ (%)[b]	TON[c]
1	1 : 10 : 10	toluene	12	0	0
2	1 : 10 : 50	toluene	12	51	5.1
3	1 : 10 : 100	toluene	24	>99	10
4	1 : 10 : 100	toluene	12	34	3.4
5	1 : 100 : 1000	none	12	20	20
6	1 : 100 : 1000	none	24	6.8	6.8

[a]Molar ratio of 1, PhSH and $HSiEt_3$.
[b]Yields were based on PhSH.
[c]TON was determined by the ^{1}H NMR yield of $PhSSiEt_3$.

が再生され、触媒サイクルが完成する(サイクル A)。一方、錯体 **1'**に PhSH の S-H 結合が酸化的付加した場合、MeCHO の還元的脱離を経て 16 電子チオラト錯体 **a'**が生成する。これに、$HSiEt_3$ の酸化的付加、$PhSSiEt_3$ の還元的脱離が進行することで錯体 **c** が生成する。錯体 **c** に対して PhSH が酸化的付加、H_2 の還元的脱離が進行することで、錯体 **a'**が再生される(サイクル B)。先の加熱条件での反応検討では、$HSiEt_3$ を過剰量添加した場合のみ、脱水素縮合反応が進行した。これは錯体 **c**、もしくは錯体 **a'**の熱力学的安定性が低いため分解反応が進行しやすく、過剰量の $HSiEt_3$ を共存させ、次の反応を促すことで触媒サイクルが有効に働いたと考えられる。

次に、触媒活性を向上させるための検討を行った。1,2-ジクロロエタン、テトラヒドロフラン(THF)、トリエチルアミン(NEt_3)、ジメチルアセトアミド(DMA)、*N*,*N*-ジメチルホルムアミド(DMF)中で反応を検討したところ、NEt_3, DMA, DMF 中では、$PhSSiEt_3$ の生成を全く確認することができなかったが、1,2-ジクロロエタン中ではトルエン中と同程度、THF 中ではわずかではあるが脱水素縮合反応が観測された(表-3)。分子内にルイス塩基性の高い孤立電子対を有する溶媒中では、反応系中で生成する 16 電子錯体などの化学種と反応してしまい、反応が阻害されることに起因すると思われる。一方で、1,2-ジクロロエタンの様に、ハロゲン原子を含む溶媒であっても、脱水素縮合反応が進行することが分かった。ハロゲン系溶媒による環境負荷に配慮し、以後の検討はトルエンを溶媒として用いた。

鉄メチル錯体 **1** の 0.25 mol/L トルエン溶液を作成し、添加する基質、量比、反応時間について検討を行った(表-4)。PhSH と $HSiEt_3$ をそれぞれ 10 当量用いて反応を行ったところ、$PhSSiEt_3$ の生成は確認できなかった(entry 1)。しかし $HSiEt_3$ のみをさらに添加することにより、触媒活性が向上することが明らかになった(entries 2, 3)。Entry 3 では添加した PhSH がすべて $PhSSiEt_3$ に変換された。このことから、チオールに対して、ヒドロシランを過剰量添加することで、触媒活性向上が可能であることが分かった。また、entry 1 と entry 4 との比較では、チオールとヒドロシランに対して、添加する鉄メチル錯体の量比を少なくすることで、触媒活性の向上がみられている。これら 2 点を踏まえ、entry 5 では鉄メチル錯体に対し、100 当量のチオール、1000 当量のヒドロシランを加え、反応を検討したところ、これまでの反応の中で、最大の触媒活性(TON = 20)を示した。この反応の反応時間を 24 時間に延ばしたところ、反応溶液に含まれる $PhSSiEt_3$ は減少した。これは系中で生成する化学種によって、$PhSSiEt_3$ の分解反応が進行したためだと思われる。反応時間としては、12 時間が最適条件であることが明らかとなった。

3. 実験項

(1)　一般事項

すべての操作は、窒素雰囲気下、シュレンク管を用いて行った。トルエンは金属ナトリウム、ジクロロエタン、DMA、DMF は水素化カルシウムを用いて脱水を行った後、蒸留操作を行い精製した。各種 NMR スペクトル(^{1}H, ^{13}C{^{1}H}, ^{29}Si{^{1}H})の測定には、JEOL 社 JNM-AL400 を使用した。^{1}H, ^{13}C{^{1}H} NMR スペクトルは、それぞれの溶媒のピークを参照ピークとした。^{29}Si{^{1}H} NMR スペクトルは、テトラメチルシラン(δ = 0 ppm)を参照ピークとした。

(2)　$PhSSiEt_3$ の各種 NMR スペクトル

^{1}H NMR (400 MHz, C_6D_6, 25 °C) δ = 0.64 (q, J_{HH} = 7.8 Hz, 6H, CH_3CH_2), 0.96 (t, J_{HH}= 7.8 Hz, 9H, CH_3CH_2), 6.97 (d, J_{HH} = 7.4 Hz, 2H, Ph), 7.49-7.51 (m, 3H, Ph). ^{13}C{^{1}H} NMR (100.4 MHz, C_6D_6, 25 °C) δ = 5.70 (CH_3CH_2), 7.41 (s, CH_3CH_2), 126.95, 128.98, 132.01, 135.59 (Ph). ^{29}Si{^{1}H} NMR (79.3 MHz, C_6D_6, 25 °C) δ = 23.37.

(3)　遷移金属錯体を用いた、PhSH と $HSiEt_3$ の化学量

論的脱水素縮合反応

$Cp(CO)_2Fe(CH_3)$ (**1**) (0.205 mmol, 40.0 mg)のトルエン溶液(8.19 mL, 0.025 M)を作成した。この溶液に PhSH (0.205 mmol, 0.02 mL)と $HSiEt_3$ (0.205 mmol, 0.03 mL)を添加した。その後、25 °C で光照射、もしくは 80 °C で 24 時間加熱を行った。100-150 Pa で揮発性の物質を除去した後、標準物質としてジフェニルメタン(Ph_2CH_2) (0.205 mmol, 34.3 µL)を添加し、^{1}H NMR によって $PhSSiEt_3$ の収率を求めた。$Cp(CO)_3Mo(CH_3)$ (**2**)に対しても、同様に、各基質を含んだトルエン溶液を作成し、25 °C 光照射もしくは 100 °C 加熱を 24 時間行った後、$PhSSiEt_3$ の収率を求めた。

(4) 鉄メチル錯体を用いた PhSH と $HSiEt_3$ の触媒的脱水素縮合反応

$Cp(CO)_2Fe(CH_3)$ (**1**) (0.112 mmol, 22.0 mg)を量り取り、トルエン溶液(0.46 mL, 0.25 M)を作成した。この溶液に PhSH (1.12 mmol, 115 µL)と $HSiEt_3$ (11.2 mmol, 1.79 mL)を添加した。その後、80 °C 加熱を 24 時間行った。100-150 Pa で揮発性の物質を除去した後、標準物質として Ph_2CH_2 (0.560 mmol, 93.6 µL)を添加し、^{1}H NMR により $PhSSiEt_3$ の収率を求めた。

4. まとめ

本研究では、光照射条件下、遷移金属錯体を用いたチオールとヒドロシランの脱水素縮合反応に初めて成功した。鉄メチル錯体を用い、加熱条件下で反応を行うことで、触媒的縮合反応が進行することを明らかにした。この反応では、トルエン、もしくは CH_2Cl_2 が最適溶媒であり、大過剰量の $HSiEt_3$ を用いることで TON = 20 まで触媒活性を向上させることに成功した。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費若手研究(B) (No. 23750067)の助成を受けたものである。

参考文献

(1) Green, T. W.; Wuts, P. G. M. *Protective Group in Organic Synthesis,* 3rd ed.; John Wiley & Sons: New York, p 116, 1999.
(2) Sartori, G.; Ballini, R.; Bigi, F.; Bosica, G. Maggi, R.; Righi, P. *Chem. Rev.,* 104, pp. 199-205, 2004.
(3) Armitage, D. A. F. Chemistry of Compounds with *Silicon-Sulphur, Silicon-Selenium and Silicon-Tellurium Bonds;* Patai, S.; Rappoprt, Z. Eds.; John, Wiley & Sons: Tronto, p 213, 1991 and references there in.
(4) Sommer, L. H.; Citron, J. D. *J. Org. Chem.*, 32, pp. 2470-2472, 1967.
(5) Sommer, L. H.; Lyons, J. E. *J. Am. Chem. Soc.*, 89, pp. 1521-1522, 1967.
(6) Baruah, J. B.; Osakada, K.; Yamamoto, T. *Organometallics*, 15, pp. 456-459, 1996 and references therein.
(7) Corriu, R. J. P.; Fernadez, J. M.; Guerin, C.; Kpton, A. *Bull. Chem. Soc. Belg.*, 39, pp. 783-790, 1980.
(8) (a) Ojima, I.; Nihonyanagi, M. *J. Organomet. Chem.*, 50, pp. C26-C28, 1973 (b) Ojima, I. *J. Organomet. Chem.*, 57, pp. C42-C44, 1973 (c) Brauah, J. B.; Osakada, K.; Yamamoto, T. *J. Mol. Catal. A: Chem.*, 101, pp. 17-24, 1995 (d) Chauhan, B. P. S.; Boudjouk, P. *Tetrahedon Lett.*, 41, pp. 1127-1130, 2000.
(9) Chung, M. –K.; Schlaf, M. *J. Am. Chem. Soc.*, 126, pp. 7386-7392, 2004.
(10) Harrison, D. J.; Edwards, D. R.; McDonald, R.; Rosenberg, L. *Dalton Trans.*, pp. 3401-3411, 2008.
(11) Fukumoto, K.; Kasa, M.; Oya, T.; Itazaki, M.; Nakazawa, H. *Organometallics*, 30, pp. 3461-3464, 2011.
(12) Davis, F. A.; Rizvi, S. Q. A.; Ardecky, R.; Gosciniak, D. J. *J. Org. Chem.*, 45, pp. 1650-1653, 1980.

手作り瞬間冷却材の製作

難波真大[*] 伊藤　健[*] 木村優友[**] 福原一平[†] 渡邉大生[‡] 正戸麻樹葉[*] 馬場雅也[**]
布浦博之[§] 吉本隆光[‖] 八木善彦[⊥] 大多喜重明[⊥] 福本晃造[#]

Formation of a Disposable Coolant

Mao NAMBA,[*] Takeshi ITO,[*] Yuu KIMURA,[**] Ippei FUKUHARA,[†] Taisei WATANABE,[‡]
Makiha SHOTO,[*] Masaya BABA,[**] Hiroyuki NUNOURA,[§] Takamitu YOSHIMOTO,[‖]
Yoshihiko YAGI,[⊥] Shigeaki OHTAKI[⊥] and Kozo FUKUMOTO[#]

ABSTRACT

As some mineral salts show an endothermic reaction when it is dissolved in water, we examined the effect of several salts on the endothermic temperature. Among ammonium nitrate, potassium nitrate, urea and the mixed salts of barium hydroxide and ammonium chloride, it was found that ammonium nitrate showed the best performance. The best ratio of ammonium nitrate and water was found to be 20 : 15 in terms of how cool the system is achieved and how long the system keeps the cooling temperature. The best solvent among water, methanol, ethanol and acetone was found to be water.

Keywords: disposable coolant, heat of dissolution

1. はじめに

身近な化学反応を用いた日用品の一つとして、瞬間冷却材が挙げられる。特に、2011 年の夏は、猛暑であったのに加え、東日本大震災の影響で原子力発電所が停止し、大規模な電力不足が懸念されたため、瞬間冷却材が注目を集めた(1)。一方で、一般的な瞬間冷却材は使い捨てであり、環境に大きな負荷を与えていることが懸念される。本研究では環境負荷の小さい瞬間冷却材の開発を目指し、まずは使用する試薬や素材について検討を行った。

瞬間冷却材の内容物を観察してみると、製品のほとんどに硝酸アンモニウム（NH_4NO_3）の白い粉と、水が入った袋が入っていた。最初に我々が検討を行ったのは、瞬間冷却材として必要な硝酸アンモニウムと水の分量を求めるため、最適な硝酸アンモニウムと水の比率を導くことにした。また、瞬間冷却材に利用できる反応について調査したところ、水酸化バリウムと塩化アンモニウム、水を混合させる反応も、検討に値することが分かったため、これらの最適な比率も求めることにした。さらに、用いる溶媒として、水のみならず、アルコールなどの有機溶媒についても検討を行った。

[*] 電気工学科
[**] 機械工学科
[†] 応用化学科
[‡] 電子工学科
[§] 都市工学科
[‖] 機械工学科　教授
[⊥] 一般科　教授
[#] 一般科　講師

2. 結果と考察

硝酸アンモニウム 20 g を量りとり、200 mL ビーカーに入れ、イオン交換水（以下、水と表記）を加え、ガラス棒を用いて撹拌し、温度計にて温度変化を測定した（図 1）。加えた水の量はそれぞれ、5 mL, 10 mL, 15 mL, 20 mL である。混合した後の温度変化を図 2 に示す。加える水の量を 5 mL, 10 mL, 15 mL, 20 mL へと増やすことで、最も低くなる温度は、13.0 ℃, 5.0 ℃, 3.0 ℃, 2.0 ℃ と、低下していることがわかる。一方、加える水の量を 25 mL にすると、最も低くなる温度は 16 ℃ と、他の実験と比較して最低温度が高くなっていることが分かった。これらの実験の上で、注意すべきなのが、溶け残りが発生する場合があることである。水を 5 mL, 10 mL, 15 mL, 20 mL 用いた実験



図 1. 実験装置と温度測定中の様子

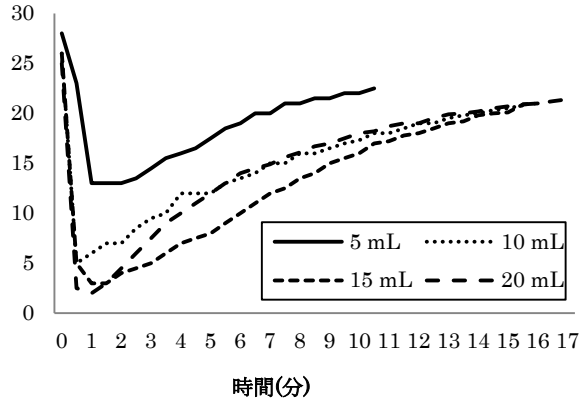


図 2. $(NH_4)NO_3$ 20 g に水を加えた時の温度変化

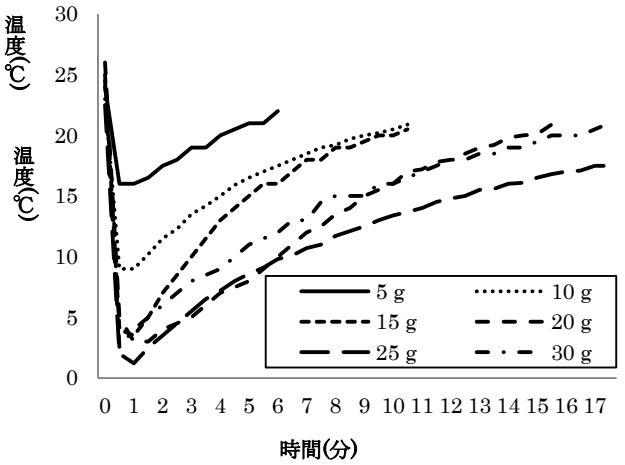


図 3. $(NH_4)NO_3$ に水 15 mL を加えた時の温度変化

では、溶け残りが発生している。5 mL, 10 mL を用いた実験では、最後まで溶け残りが発生し、15 mL, 20 mL 用いた実験では、それぞれ 9 分 30 秒後、3 分後に全て溶け切った。以上の結果より、これらの実験結果を次の様に考察する。5 mL, 10 mL, 15 mL の水を用いた実験より、最低温度を低くするためには、硝酸アンモニウムに対し、ある程度の水が必要であることが分かる。しかし、15 mL の水を用いた実験と、20 mL の水を用いた実験とを比較すると、最低温度に大きな違いは見られない。一方で、低温状態の保持時間には大きな違いが見られる。15 mL の水を用いた実験では 9 分 30 秒後に溶けきっているが、20 mL の水を用いた実験では 3 分後に溶けきっており、溶け残った試薬が徐々に溶解することで、低温状態が保持される。25 mL の水を用いた実験では溶け残りが見られず、これまでとは異なり、多量の水を加えたことにより、冷却に必要な熱量が増加するという、低温化の阻害が起こったと思われる。これらの実験により、瞬間冷却材に用いる硝酸アンモニウムと水の比率は硝酸アンモニウム：水＝20：15 であることが分かった。

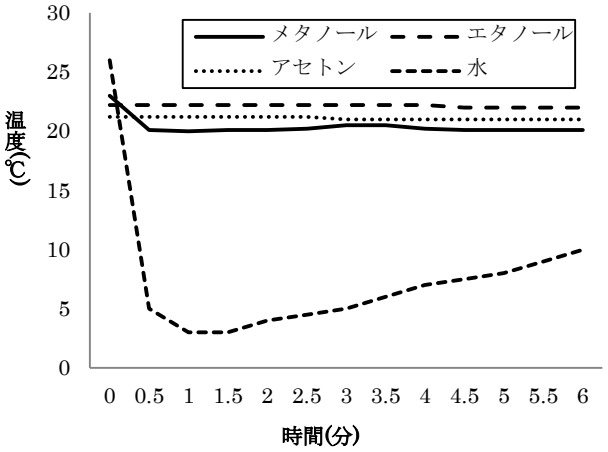


図 4. $(NH_4)NO_3$ 20 g を各種溶媒に混ぜた時の温度変化

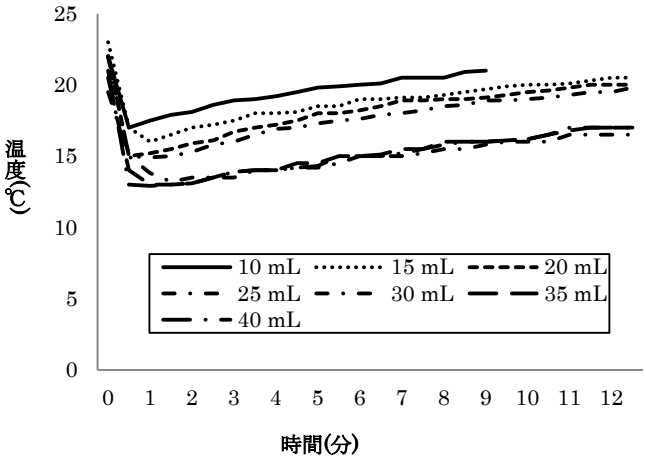


図 5. KNO_3 20 g に水を加えた時の温度変化

硝酸アンモニウムと水との比率の再現性を確認するため、今度は、水 15 mL に対し、様々な量の硝酸アンモニウムを加え、温度変化を観察した。結果を図 3 に示す。この結果からも、硝酸 20 g に対し、水 15 mL を加えた条件が、最低温度、低温状態の保持の両面で、最もよいことが分かった。次に水以外の各種溶媒についても検討を行った(図 4)。硝酸アンモニウム 20 g を、メタノール、エタノール、アセトン 15 mL に加え、撹拌しながら、温度変化を測定した。エタノール、アセトンを溶媒として用いた検討では、ほとんど温度変化が観測されなかったが、メタノールを用いた場合のみ、わずかな冷却効果が観測された。しかし、水溶媒の検討と比較すると、冷却温度、冷却時間共に能力が劣ることが明らかになった。溶け残りが、冷却保持時間に大きな影響を与えるが、これらの溶媒では溶解度が低かったため、十分な冷却効果が得られなかったと思われる。

低温化させる方法として、硝酸アンモニウムと水とを混合する方法以外の手法についても検討を行った。

硝酸カリウムの溶解熱は-34.9 kcal/mol [(2)]と、硝酸アンモニウムの溶解熱(-25.7 kcal/mol [(2)])よりも低い値が報告されている。そこで、まず硝酸カリウムと水とを混合させたときの冷却について調べることにした。硝酸カリウム 20 g に対し、10 mL,15 mL, 20 mL, 25 mL, 30 mL, 35 mL, 40 mL の水を加えた時の温度変化を測定した(図 5)。加える水の量を 10 mL から 30 mL へと増加させたところ、最低温度は 17℃から 14 ℃ へと降下した。しかし、加える水の量が 30 mL、35 mL、40 mL と変化させても、最低温度、冷却保持時間に大きな変化は観測されなかった。

低温化させる方法として、混合塩と水による方法についても検討を行ったところ、水酸化バリウムと塩化アンモニウムとを混ぜた粉末に、水を加えることによる低温化が良い条件であることを見出したので、条件の最適化を検討した。水酸化バリウム 15 g、塩化アンモニウム 5 g に水を 3 mL, 5 mL, 10 mL, 15 mL, 20 mL, 25 mL 加え、温度変化を観察した。結果を図 6 に示す。最も低い、最低温度を示したのは水を 3 mL 加えた実験であり、開始 1 分後に 3.0 ℃ を示した。低温状態の保持が長時間に渡って観測されたのは、水を 15 mL 加えた時であった。水酸化バリウム、塩化アンモニウムの混合粉末を用いた方法では、硝酸アンモニウムを用いた時と同程度の最低温度を実現することは可能であったが、低温状態の保持時間は短く、瞬間冷却材としては、硝酸アンモニウムの方が優れていることが明らかとなった。

一般生活の中で、入手容易で環境負荷が小さく、かつ安価な試薬[(3)]として尿素が挙げられる。尿素の溶解熱は-15.4 kcal/mol[(2)]であり、吸熱的であるため、これを用いた冷却効果確認についても行った。尿素 20 g に水 15 mL を加え、温度変化を測定した（図 7)。最低温度として 8.2 ℃ を観測した。尿素のみでは、冷却能力が小さいと考え、尿素と硝酸アンモニウムを混ぜた塩を用いた検討も行った。尿素 10 g に硝酸アンモニウム 10 g を混ぜ、水を 15 mL 加えたところ、4.0 ℃ の最低温度を記録し、硝酸アンモニウム 20 g と水 15 mL との実験による、最低温度 3 ℃ に近い値を示している。これは、硝酸アンモニウムの一部を尿素に代用できる可能性を示している。　以上の検討結果から、硝酸アンモニウム 20 g と水 15 mL とを混ぜる比率が、瞬間冷却材として最もよい条件であることを明らかにした。そこで、この結果を基に、瞬間冷却材の試作を行った（図 8 左)。瞬間冷却材は、①水をためる部分、②試薬を入れる部分の 2 か所から構成されている。水をためる部分については、持ち運び時の衝撃に耐えうるだけの強度を必要とする一方、必要に応じて水を取り出す機能が必要である。各種検討を行ったところ、密閉したビニール袋に水のみをいれた袋を用意し、使用時に破裂させる方法が最適であることが分かった。この袋の中には、一切の空気を入れないことが重要である。空気が封入されると、使用時に、衝撃を与えても、空気がクッションの役割をしてしまい、水が外に出ない。このような袋を作るため、家庭用シーラー[(4)]を多用することで、空気を封入しない水を入れた袋を作ることに成功した（図 8 右)。

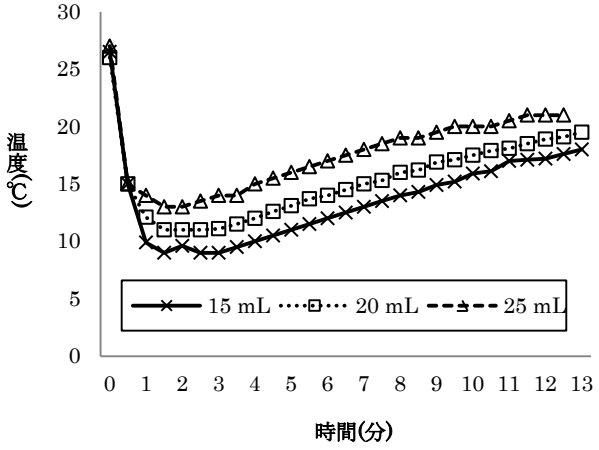


図 6. $Ba(OH)_2$ 15 g と NH_4Cl 5 g に水を加えた時の温度変化

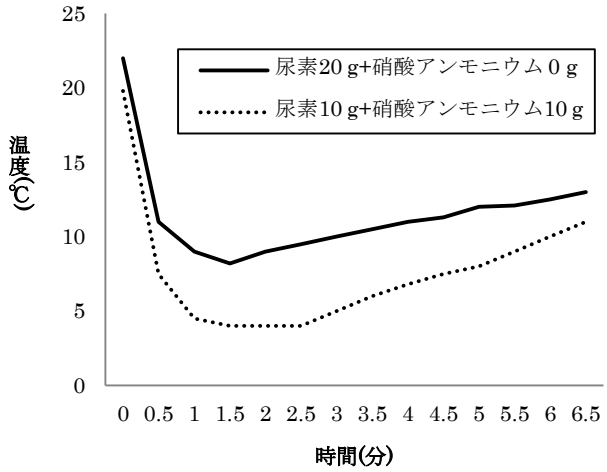


図 7. $(H_2N)_2CO$ と $(NH_4)NO_3$ に水 15 mL を加えた時の温度変化



図 8. 水、試薬を入れた袋（左）と水を入れた袋の拡大図（右）

3. まとめ

本研究では、瞬間冷却材の内容物として使用する試薬や水の配分の検討を行った。冷却温度、冷却時間について検討を行ったところ、硝酸アンモニウム 20 g に水 15mL を加える比率が最も良いことが分かった。この結果を基に瞬間冷却材の試作品製作も行った。メタノールを溶媒として用いることで、わずかな冷却が見られたが、最もよい溶媒は水であることがわかった。この試作品は、水を入れる部分と試薬を入れる部分から構成されており、水を入れる部分については、空気を入れない密閉した袋に水だけを入れる必要があることが分かった。家庭用シーラーを用いることで、要求した密閉袋を製作することに成功した。

謝辞

本研究は、財団法人　理工学振興会の教育研究助成を受けたものである。関係の皆様に感謝申し上げる。

参考文献

(1) (a)日本経済新聞, 2011 年 5 月 20 日夕刊, 「涼感商品、節電を応援、衣類・日用品各社、一斉に増産、吸湿速乾性肌着、冷却シート」; (b) 朝日新聞, 2011 年 7 月 7 日朝刊, 「冷感へ激戦　ひんやり商品が続々　冷たい寝具やブラウス・汗ふきシート」.

(2) 改訂 5 版化学便覧基礎編 II, 日本化学会編, 丸善出版株式会社, 2004.

(3) キシダ化学株式会社　1,800 円/kg (製品コード : 000-83223, 2011 年 10 月 25 日時点).

(4) 株式会社テクノインパルス, Clip Sealer Z-1.

日本手話の視覚表現に基づく虚構移動

今里典子*

Fictive Motion in the Visual Expressions in Japanese Sign Language

Noriko IMAZATO*

ABSTRACT

This paper explores expressions of visual perception in Japanese Sign Language (JSL), comparing the corresponding expressions in Japanese. It is shown that these expressions in JSL are also based on three kinds of fictive motion, which are firstly proposed for Japanese by Matsumoto (2004). The three kinds are visual emanation, movement and processing of visual image, and movement of the point of visual attention. It is also argued that these expressions of visual perception are established by utilizing patterns of JSL motion constructions. Those patterns consist of a motion verb conflated with a CL (classifier) as a moving entity and often with manner of motion, and sometimes with a preceding manner verb, and a co-occurring CL as the boundary through which the movement of the motion verb is made. However the verbal expression representing the “crossing of the boundary” never follows the motion verb, though it is one of the essential components for the pattern of motion construction in JSL.

Keywords: JSL, fictive motion, expressions of visual perception, CL

１．はじめに

視覚的知覚を表現する文の中には，実際に物体が移動する場合に使われる表現が現れる事がある．一部の視覚表現には，現実には起こっていない虚構移動（fictive motion）が関与しているというTalmy(1996, 2000a, b)[(1)-(3)]の指摘を出発点として，松本(2004)は,「日本語の視覚表現にも同様の虚構移動が関与する事を指摘し，その性質について考察」(112:15-6)[(4)]している．そしてその移動には，以下の(1)～(3)の例に見るように，視覚的放射，映像の移動，注視点の移動の３つがあり，それらが人間のどのような認知基盤の上に成り立っているかを議論している．

(1) 視覚的放射
　太郎はその窓から山の方を見る．
(2) 映像の移動
　富士山が目に飛び込んで来た．
(3) 注視点の移動
　花子はその子に目を移した．

＊　一般科　准教授

本論では，松本の日本語を対象とした研究によって明らかにされた３種類の視覚に基づく虚構移動表現に対応する表現が，音声日本語とのバイリンガルである聾者が第１言語とする日本手話（以下，JSL）でも見られるのかどうか，また，3 種類の虚構移動以外の表現の可能性があるのかどうかを観察し，日本語との相違を明らかにする．その上で，JSL において，視覚表現に基づく虚構移動表現を成立させる構文構造との関係についても明らかにしていく．

２．日本手話の[見る]動詞

日本手話においては「見る」にあたる複数の動詞があり，それらには使用にあたっての区別がある．最も使用頻度が高い[見る 1]という動詞は，人差し指と中指を伸ばして目の近くにおき，指先を知覚対象に向ける手形で表す．次に[見る 2]は，人差し指と親指の指先を接触させて輪を作った手形を，その輪からのぞき見るように目にあてがう仕草で表現される．[見つめる]は、[見る 2]と同じ手形の両指の接している部分を，目の少し下に接触させる表現，[眺める]は，５指を伸ばし軽くたわめた手形の親指

側を，掌を下にして目の上にあてがう表現である．以上４つのうち後半の２つ,つまり[みつめる]と[眺める]は手形の位置がどちらも目の付近と決まっており，手形を移動させることはできない．しかしながら，[見る 1]と[見る 2]では，(4)でみるように，サイナーの目の位置から知覚対象の方向へ手を移動させてあらわすことが可能である．

(4)a. [友達 i] [見る 1 S-i]
b. [友達 i] [見る 2 S-1]
(私が友達を見る)

しかし，(5)で見るように，[見る 1]は２人称や３人称からサイナーを見ることもでき，主語の人称に制限はないが，[見る 2]は，１人称以外の位置から手形を動かす事で１人称以外を主語とすることはできない．

(5)a. [友達 i] [見る 1 i-S]
b. *[友達 i] [見る 2 i-S]
(友達が私を見る)

このような差異は，二つの動詞があらわす意味の違いから出ていると考えられる．[見る 2]には通常，何かを積極的に見ようとする意思が必要であって，例えば，自分が好む映画や演劇，テレビなどを積極的に見ようと思って見る場合に使用される語彙であるが，[見る 1]にはそのような知覚者の意図や意思の含意があってもかまわないが，必ずしも必要でなく，何かが「見える」という場合も含めて使用される語彙である．サイナーは，自分自身が見ようとする意思があるかどうかは自分で認識できるが，自分以外の２人称や３人称の意思を確認することは不可能なので,１人称であるサイナー自身の位置[S]から知覚対象[i]へ手形を動かして[見る 2]ことは出来るが，その逆の動きは許されないのである．

[見る 2]には移動について今述べたような主語の人称制限があるものの，少なくとも[見る 1]も[見る 2]もサイナーの位置[S]からの手形移動に制限はない．このように，手形を移動させる事が可能な動詞は，その動きの始点が主語である知覚者を表現した位置に，終点は目的語である知覚対象を表現した位置にそれぞれ一致する．そこでこのような動詞は，“一致動詞”と呼ぶ．他方，[みつめる]や[眺める]のように，手形の移動が許されず，結果として主語である知覚者および目的語である知覚対象の位置と一致を起さず，他の方法を利用しなければ文法関係をマークできない動詞は，“非一致動詞”と呼ぶ．

これら JSL の視覚に関する動詞の特徴をふまえて，次節では,視覚表現にみられる虚構移動を考察する．

３．JSL の視覚表現に基づく虚構移動

３．１　視覚的放射

松本では，まず次の日本語の例を提示している．

(6)a. 部屋の中から窓越しに空を見た．
b. 空を見上げた．
c. その子に目を注いだ．

JSL において，(6c)をはじめとする流動体のメタファーに基づく表現方法は見当たらないが,(6a),(6b)に類似する表現を見つける事ができる．

(7)a. [壷] [覗く] [見る１S-D]
[CL C]----------|
(私は壷の奥を覗きこんで見る)
b. [階段] [友達] [PT Ui] [見る 1 S-Ui]
(私は階段の上にいる友達を見る)

(7a)では，両手で壷の形を作り，非利き手で壷の口の丸い形をイメージした[CL C]を作り，非利き手はそのままで，覗き込むような仕草をしてから［見る 1]の手形をサイナーの目の位置から[CL C]の横を通過してさらにずっと下まで手を伸ばして移動させ，壷の底まで目線を届かせることを表現する．手が動く距離は目の位置から底までの深さをあらわしている．また(7b)では，[PT Ui]で表したように，目の高さより上の前方の位置を指差して，そこが[友達]の位置である事を示してから,その位置を目ざして[見る 1]を目の位置から移動させる． これらの例をみると，少なくとも[見る 1]と[見る 2]では，「目から出ると考えられる放射物が視線に沿って移動する」(113:24-5)[(4)]ことが，実際の手の動きとして表現されると考えても差し支えないだろう．JSL では，視線が，知覚対象の方向へ向かう手形の移動として，手話空間内に具現化しているわけである．

さらに，視覚的放射の例として，JSL には，日本語ではみられない例がある.「友達が２人，１人は建物の２階に，もう１人は１階にいて，１階の友達が２階の友達に手を振っている.」という状況の映像をサイナーに提示して，その内容を状況の観察者の視点から JSL で表現してもらったところ，以下の(8)に見るようなバリエーションが得られた．但し，１階の友人（非利き手側下の位置：YD）が２階の友人（利き手側上の位置：XU）に手を振る部分の述語部分のみ抜粋し記述したことをことわっておく．

(8)a. [手を振る YD<XU]
b. [手を振る YD<XU] [見る 1 YD-XU]
[body YD<XU]

c. [手を振る YD<XU] [移動する YD-XU]
[body YD<XU]
(下にいる友達が上の友達に手を振る)

(8a)において，[手を振る]は，さよならを言うときのように手を振る仕草で表す典型的な非一致動詞のみでの表現なので，文法関係は，手の動き以外の方法，つまりサイナーの体の位置（YD:主語）と体の向き（<XU:目的語）として表現されることになる．

映像の状況を表す JSL の文として，(8b)や(8c)の表現を表出するサイナーもいた．(8b) は，[手を振る]という非一致動詞に一致動詞の[見る 1]を付加した表現である．(8c)は，同じ非一致動詞に，指差しと同じ手形である[CL ヒ]を YD から XY までまっすぐに移動させる一致動詞[移動する]を付加する．興味深い事に，(8c)を表出したサイナーからは，[移動する]は移動動詞であるが，同時に１階にいる友達から２階にいる友達への視線の意味が含まれているというコメントを得た．つまり(8b)や(8c)の例は，[手を振る]際に主語である１階の友達から目的語である２階の友達に注がれる視線を意識し，その視線自身や視線の動きを具現化した[見る 1]や[移動する]という一致動詞を追加する事で，[手を振る]という述語の主語・目的語を明らかにして表現する働きを持たせていると考えられる．但し，一致動詞を付加するどちらの例でも，[手を振る]を表現する際に，サイナーの体の位置は１階にいる友達の位置[YD]にあり，体の向きも２階の友達の方向[XU]に向けておく必要がある．つまり，主語と目的語の関係は，サイナーの体の位置および向きと，付加する一致動詞で手形が移動する際の始点および終点と，その両方を使って重複して明示される．

(8c)では，文法関係を明示する機能を持つ[移動する X-Y]を見たが，これと同形の別の JSL 表現が存在する．この表現は[移動する]と同じように，指差しの[CL ヒ]の手形を，そのまま指先方向に大きな弧を描くように動かす表現であり，その始点と終点によってそれぞれ主語と目的語を明示する機能を持つ．Fischer(1996)[5]では[AUX]と記述されて紹介されているので，本論でもこれに従い，主語[i]の位置から目的語[j]の位置までの移動を[AUX i-j]のように記述する．

(9)a. [彼 i] [彼女 j] [AUX i-j] [知る]
b. *[彼 i] [彼女 j] [知る] [AUX i-j]
c. [彼 i] [彼女 j] [知る] [AUX i-j]
[body i/<j]
(彼は彼女を知っている)

述部が，[知る]，[知らない]，[好む]，[嫌う]などの典型的な非一致動詞の場合に，(9a)のように表現されることがある．[AUX]の位置は一致動詞の前であり，(9b)のように後置する事はできない．しかし，(9c)のように，非一致動詞を表現する際に，[body i/<j] のように体の位置や向きで主語や目的語をマークして，主語・目的語マーク機能を表す責任を軽減すると，(9c)は問題なく容認されるようになる．このような言語事実から，[AUX i-j]は，(8b)のような虚構移動表現と構文上の類似性が高い事がわかる．さらに，この[AUX]も視覚，特に視覚的放射の表現と関係があることを見ておきたい．

(10) [彼 i] [彼女 j] [見る 1 i-j] [知る]

例文(10)は(9a)と同じ意味を表す．但し(9a)は「顔は知っている」，(10)は「性格や考え方までよく知っている」という含意があり，意味の区別がある．(9a)や(10)の例に至っては，非一致動詞の前という決まった位置を獲得し，主語・目的語を区別する機能をもつ文法的な要素（助動詞）になっており，(8c)の移動動詞に類似しているが，虚構移動の表現ではもはやなくなったものだと考えられるだろう．

(8b)の例は日本語では見られない例で，JSL に独自の表現である．

３．２　映像の移動

映像の移動については，以下のような例がある．

(11) [富士山 i] [近づく i-S] [PTi]
(富士山が目に入る)

サイナーの前方に[富士山]を表し，それと同じ位置から，掌をサイナー側に向けて５指を伸ばした両手をそのまま同時にサイナー自身の目に向かって移動させる．もちろん富士山が動くわけではなく，富士山の映像が目に近づいてくる，つまり「目に入る」という意味を表す．

３．３　注視点の移動

注視点の移動に関する例で，日本語では「目を移す」，「目を止める」のように注視点がメトニミーに基づいて「目」という名詞によって表現される例が多くみられるが．JSL では手形の指先の方向が注視点を表している[見る 1]や，[見る 2]などの手形を，実際の注視点の移動に応じて手話空間内を自由に移動させて表現する．(12a)では，[見る 1]の手形の指先を，[本]を表す[CL テ]から上に移動させることで表現する．(12b)に見るように，移動の始点と終点を表す[から]や[まで]とも問題なく共起できる．

(12)a. [本 i] [CL テ i] [見る 1 i-U]
(本から目を上げる)

b. [PT X] [から] [PT Y] [まで] [見る X-Y]
(端から端まで見る)

また「目をとめる」という表現は，JSL でも，手形の移動を実際に途中でとめてその位置で保持する(hold)ことで表す.

(13) [見る 1 X-Y hold]
((Y に) 目をとめる)

３．４　視覚的放射への注視点の移動

日本語にみられる３種類の移動だけでなく，JSL では，視覚的放射と注視点の移動が一度に関与して組み合わされた用例が存在する.(8)で見られたバリエーションの１つに次のような例がある.

(14)　　[手を振る<U]
[友達] [CL ナ YD]---| [移動する YD-XU]
[body YD<F / WHQ]

まず非利き手で１階にいる友達を[CL ナ]の手形で非利き手側下部の位置[YD]に作り，その手を空間内に残したままで,次に利き手で顔は上に向けて[手を振る]. この２つの表現を同時に終えて，次に非利き手の手形[CL ヒ]を，[YD]の位置から２階の[XU]の位置まで滑らかに移動させる．この移動は既に(8c)で見たように，主語である１階の友達の視線を移動動詞で表した表現である．[移動する YD-XU]の主語が[CL ナ YD]であることは,サイナーの体の位置が[YD]の位置にあること，手形の移動が[YD]の位置からはじまっている事からわかる．ところが同時に，サイナーの体は前方に傾けられ([<F]),かつ WH 疑問の意味をあらわす眉寄せの表情が伴われている．つまりこの[移動する YD-XU]の動詞は，この状況を観察しているサイナーが，なぜ１階にいる友達は上を向いて手を振っているのか疑問に思いながら，その友達の視線をなぞるように１階の友達の位置[YD]から２階[XU]まで注視点を移動させているという意味も含んでいる．この場合には，WH 疑問とサイナーの体の前方への傾きという２つの指標から，[移動する YD-XU]の主語はサイナー自身であるとも解釈されうるのである．このような例は 3 次元の手話空間を利用した JSL に特徴的な表現だと言えるかも知れない.

3 節では，日本語で見られる 3 種類の視覚表現に基づく虚構移動に対応する表現の多くが JSL にも存在し，かつ(8b)(8c)で見たように，JSL のみで見られる表現や，それが独自に発展して文法要素を作っている可能性も示唆した．さらに(14)で 3 種類の視覚表現のうち視覚放射と注視点移動の２つが１つの動詞で同時に実現することが可能である事も見た.

次節では JSL の移動構文のパタンを見た上で，これらと,既に見た視覚表現との関係を明らかにする.

４．移動構文の述語の構造と視覚表現

４．１　JSL 移動構文のパタン

JSL の移動構文の述語部分の構造には典型的なパタンがある．代表的な様式４つとその複合のパタンを，それぞれの例と共に見ていく.

なお，ここで“移動動詞”とは，例えば[行く]，[来る]が[CL ヒ]の手形を，指先を下にして移動の始点から終点までなめらかに動かすことで表現されるように，手形の動きの始点および終点が，実際の物体移動の始点および終点を手話空間に写像した位置と一致する表現のことを指し,一致動詞に分類される.

移動動詞の特徴として，[行く／来る]のように手形[CL ヒ]が手話空間内で動くその移動のみで表す語彙もあれば，[歩く]のように，移動する人間が[CL ナ]の手形で，「徒歩で」という様態が手形の動かし方として包合され，語彙化されている場合もある．また，[ヨロヨロ歩く]のように，あとから動き方の変化で，速度を含む様態が包合される場合もある.

他方“様態動詞”とは，[走る]，[泳ぐ]等のように,体全体で実際にその仕草を行う表現で,表現上,手形の移動を含まない非一致動詞の事をいう.

次に,“非利き手境界”とは,例えばサッカーの「ゴール」の中と外のように，隣接する２つのエリアを分ける境界の位置を明示するため，主に非利き手で表す手形のことで，移動動詞と頻繁に共起する．例えば，非利き手で，ゴールポストの枠をかたどった手形[CL テ]を作り，同時にその手形が形成する内側のエリアを通り過ぎるように利き手の移動動詞の動きを表現することで，ボールがゴールに入った事を表現するような場合の[CL テ]を指す.

最後に“利き手境界”とは，例えば「出る」「帰る」「入る」などの有限個の動詞を移動動詞や様態動詞の必ず後に表現することで，前置された動詞であらわされる移動が，ある境界を越えたことを示す方法である．なお，代表的な４つのパタンのそれぞれの例は，順番に(15a)～(15d)に対応している.

代表的な４つのパタン
(A) 様態動詞＋（様態）移動動詞
(B) φ＋（様態）(CL) 移動動詞
(C) 非利き手境界／（様態）移動動詞
(D) （様態）移動動詞＋利き手境界

(15)a. [女] [道] ***[走る] [CL ヒ_歩く S-F]***
(彼女が道を走って行く)
b. [女] [道] ***[歩く S-F]***
(彼女が道を歩いて行く)

c.（[ボール]）[ゴール] ***[移動する S-F]***
[CL テ]
（ボールがゴールに入る）
d. [女] ***[CL ヒ_歩く S-F] [出る]***
（彼女が歩いて行ってしまった）

これらの例で見るように，JSL の移動表現の述部は，移動物や様態が包合される可能性がある移動動詞を中心に，その前に，様態動詞が付随するかしないか，またはそれと非利き手境界が共起するかしないか，その後に利き手境界が付随するかしないか，という可能性の組み合わせで表現される事がわかる．

従って，例えば，(A)に(C)で見たような非利き手境界が組み合わさると次の(16)，そして(A)に (D)でみたような利き手境界が組み合わさると(17)のような表現が可能になる．

(A)+非利き手境界
(16)[門] ***[自転車こぐ] [CL テ移動する S-F]***
[CL ヒ]----------/
（門の向こうに自転車をこぎ入れる）

(A)+利き手境界
(17)[女] [道] ***[走る] [CL1-歩く S-F] [出る]***
+(PA)
（彼女が道を走って行ってしまった）

このような複雑な組み合わせの可能性も含めて，移動表現の述部の構造鋳型を(18)にまとめておく．＋を付した横の並びは語順を，上下に書き分けているのは共起関係を表す．下線部の要素は最低限必要で、それ以外は表現されないこともある．JSL の典型的な移動表現の述部は，これらの各部分に対応する語彙を当てはめることで作りだされる．

(18)移動表現の鋳型
様態動詞 + 様態/CL/移動動詞 + 非利き手境界
非利き手境界

移動表現における述部の最低限の表現は，一致動詞である移動動詞，言い換えると，ある手形が手話空間内で，始点から終点まで移動する表現である．つまり名詞表現（例えば CL）を手話空間内で動かせば，そのものが移動したと理解される訳である．例えば[見る 1]は[行く／来る]や[歩く]のような、いわゆる移動動詞ではないが．手形の２本の指を伸ばした形が２つの目とその視線を表現していることは明らかで，具体的な視線の移動が手話空間内で具現化していると理解するのは自然なことだ．言い方を変えれば，視覚表現である[見る 1]や[見る 2]は，移動表現を基盤に生まれて来たと考えられる．認識されている物体の，または視線や注視点の始点から終点までの移動が，手話空間内ではどちらも手形の始点から終点までの移動として具現化し，それゆえどちらも一致動詞として分類される事になる．両者の違いは，[見る]では，手形が移動する始点と終点が，動詞の主語と目的語をマークする機能をもつが，移動動詞の場合には，文法関係とは関連しない点である．それでは，視覚表現は全ての可能な移動構文の述部のパタンに従うのだろうか．

４．２　移動表現と視覚表現の関係

既に見た視覚表現を，もう一度移動表現のパタンと比較して，両者の関係について明らかにしておく．既に見た視覚に基づく虚構移動の例において，例えば，(A)のパタンは，視覚的放射の(8b)(8c)の例に見られる．(B)のパタンは，視覚的放射では(4a)(4b)(7b)，映像の移動では(11)，注視点の移動では(12)の例が観察される．(C)では，例えば(7a)を非一致動詞の[覗く]を削除して以下に見るように変えた文も文法的で，その例となる．

(7)a’[壷] [見る１S-D]
[CL C]--- |
（私は壷の奥を見る）

さらに上で見た(A)と非利き手境界が複合したパタンは(7a)の例がそれにあたる．ところが，(D)で見た利き手境界とその他の要素の複合は，一切例が見当たらない．視覚表現（またはそれに基づく虚構移動の表現）は，JSL の移動表現を利用して作られているものの，可能な全てのパタンを利用している訳ではなく，“境界越え”の述部を含む表現だけは利用していないのである．この理由は知覚対象を見るという行為の認識に関わりがあると思われる．何かを「見る」場合には，見る目標はまさに知覚対象であり，視覚的放射としての視線は，知覚対象の位置が終点であり，それを越えていくような状況は想定できない．故に，物体の移動を表現する場合の“境界越え”の表現は虚構移動をそのベースにするといえども，視覚表現内に現れることはない．

５．まとめと課題

日本語で見られるような視覚表現に基づく，視覚的放射，映像の移動，注視点の移動の３種類の虚構移動表現が，JSL においても対応する表現例が全て存在することを明らかにした．また視線移動の例では，日本語には見られない，JSL のみに観察される虚構移動の表現が見られ，かつそのような表現が発展して，助動詞として存在している可能性も示唆した．さらに，JSL の視覚表現は移動表現のパタンを

利用して表現されており，一部は[見る 1]のようにすでに語彙化しているものもある．一方で，視覚の虚構移動表現では，移動表現パタンのうち，いわゆる“境界越え”のパタンだけは取れないが，その現象にも人間の視覚経験に裏打ちされた理由があることをみた．

今後は，JSL のみで観察された虚構移動の表現が助動詞として発展しているという可能性が正しいかどうか実証的に研究する必要があると考える．また，視覚以外の知覚表現が同様の虚構移動表現を作るのかどうかも観察が必要であろう．

凡例

本文内では日本語の語彙は「日本語」のように括弧で囲んであるが，JSL 表現については以下のルールに従って記述している．

[ ] ：手話語彙
S ：サイナー（＝１人称）およびその位置
X ：サイナーの利き手側の位置
Y ：サイナーの非利き手側の位置
D ：サイナーの下方の位置
U ：サイナーの上方の位置
F ：サイナーの前方の位置
B ：サイナーの後方の位置
S-D ：(一致動詞で) 手形のＳからＤの位置への移動
X<Y ： Ｘから Y の方向向きに表現
[CL C] ：類辞．指文字Ｃの手形
５指を全て伸ばしてＣを作った手形
[CL テ] ：類辞．指文字テの手形
５指を全て伸ばした手形
[CL ヒ] ：類辞．指文字ヒの手形
人差し指のみ伸ばした手形
[CL ナ] ：類辞．指文字ナの手形
人差し指／中指を指先下で伸ばした手形
PT ：指差し
PA ：完了．口形「パ」を動詞と共起
i / j ：同じ節内で複数の語彙に付いて同位置を指示
[body i] ：体がｉの位置に存在
[body <i] ：体がｊの方向向き
[hold] ：手形をしばらく同じ位置で固定
---| ：この前に書かれた表現が，|に記載されている表現が終わるまで共起
/ ：その前後の語彙が共起
WHQ ：WH 疑詞．眉寄せ

謝辞

*論文内のデータについては,次の方々にお忙しい中貴重な時間を割いて撮影に御協力を頂き，また表現に関する貴重なコメントもいただいた．撮影に参加して下さった， 浅香諒，小野夏子，小林泉，坂田加代子，志方龍，嶋本恭規，高岡真美，中山美代子，西崎芳正，馬場博史，馬場仁奈，藤井孝子，古隆喜，前川和美，湊惟律子，山本紋子，山本芙由美の諸氏に心からお礼を申し上げたい．なお，論文に残る不備はすべて筆者の責任である．

＊本研究は，科学研究費基盤研究(C)「日本手話のコーパスによる類辞構文研究」課題番号：20520405，（研究代表者：今里典子)，および，国立国語研究所共同研究「空間移動表現の類型論と日本語」，(研究代表者：松本曜）を受けている．

参考文献

(1) Talmy, Leonard:“Fictive Motion in Language and “Ception””, in Language and Space, Bloom P. et.al.(eds.),pp.211-276,1996.
(2) Talmy, Leonard:“Toward a Cognitive Semantics Vol.1:Concept Structure Systems”, Cambridge: MIT Press,2000a.
(3) Talmy, Leonard:“Toward a Cognitive Semantics Vol.1:Typology and Process in Concept Structuring, Cambridge: MIT Press,2000b.
(4) 松本曜:「日本語の視覚表現における虚構移動」,『日本語文法』4 巻 1 号, 2004.
(5) Fischer, Suzan,:“The Role of Agreement and Auxiliaries in Sign Language”, Lingua 98: pp.103-119,1996.

新しい LL 教室の紹介

上垣　宗明*

The Introduction of the New LL

Muneaki UEGAKI*

ABSTRACT

On August 16th 2010, the new LL (Language Laboratory) room was introduced to the parents and the teachers of junior high school at the open campus of the Kobe City College of Technology. This was the first day of the introduction of the new LL room. The new LL room replaced the old, which was used for about ten years. The largest improvement of the system was that a PC was placed there for each student, a total of 47 computers. With these computers, students can use the internet, e-learning, and so on. For teachers, it will be an effective teaching tool for students to use the computers individually. From September 1st, the LL room has been used.

In this article, I introduce the new LL room.

Keywords：Language Laboratory, CALL, e-learning,

1. はじめに

神戸市立工業高等専門学校（以降、本高専）の LL（Language Laboratory）教室は、2011 年度の夏季休業中に全面改修された。以前の LL 教室は、2001 年度の夏季休業中に改装され、それ以降 10 年間にわたって、本高専の英語教育で重要な役割を担ってきた。しかし、システムの老朽化に伴い、早急な改修が望まれるようになった。

LL 教室の必要性については、高等専門学校設置基準（第二十三条 2）に、「校舎には、第一項に掲げる施設のほか、なるべく情報処理及び語学の学習のための施設を備えるものとする。」(1) という記述がある。本高専にとっても情報処理教育が行える総合情報センターの演習室と同じように、語学、特に英語教育や英語学習が行える LL 教室は非常に重要な施設といえる。

2. 新システムの導入まで

旧 LL 教室のシステムは、教師用のマスターコントロールや学生用ブースの機器類は Victor 社製で、MD を媒体としたものであった。また、マスターコントロールのシステムは、OS が Windows ME の PC で制御されており、非常に不安定であったために、不具合が何度か生じ、予備の PC を常時準備しなければならない状態であった。そこで、教師用 PC を入れ替えることが最優先の課題となっていた。マスターコントロールの PC を入れ替えてしまうと、LL 教室全ての機器類の動作が困難となり、LL 教室の全面改修が必要となる。つまり、新システム導入に踏み切らざるを得ない状況になったことも事実である。また、学生用ブースのディスプレイも、10 年前のものは 2011 年 10 月 1 日現在、47 台中 4 台しか残っておらず、LL 教室の全面改修は必然的なものであるといえた。

LL 教室の全面改修にあたり、2010 年度に、LL システムを販売している 3 社に本高専に来て頂き、英語科教員の前でデモを行って頂いた。各社の担当からそれぞれの特徴の説明があった。また、本高専英語科教員の数名が、2010 年度の夏季休業中前後に、新規に LL システムを導入した 2 つの教育機関に出向き、実際の運用状況や使いやすさなどの現場の生の声を授業担当の先生から聞かせて頂いた。このような状況の中で、2010 年度後期から新 LL システムについての検討を始めた。

新システムを選定するときの最優先事項は、旧システムが可能であったことを新システムでも可能にすることであった。また、旧システムの使い方に英語科教員が慣れており、その利用しやすさを新システムでも踏襲することにも注意を払った。

* 一般科　准教授

学生にとっての利用しやすさ、と同様に、教師にとっての利用しやすさ、という 2 つの視点に立っての新システムの検討であった。

旧システムの改修時に当時の学生の音楽視聴用の媒体を調査するためのアンケートを実施した。そのアンケート結果を表１[(2)]に示す。

表１　記録媒体別再生可能学生数とその割合 (2001 年)

	回答数	MD	MD(購入予定含む)	テープ	CD
1 年	239 名	169 名 71%	187 名 78%	217 名 91%	233 名 97%
2 年	237 名	184 名 78%	193 名 81%	208 名 88%	227 名 96%
3 年	227 名	533 名 79%	190 名 84%	207 名 82%	213% 94%
全体	703 名	533 名 76%	570 名 81%	612 名 87%	673 名 96%

以上のように、2001 年度の改修時では、学生の音楽を聞く媒体は、CD かカセットテープが多くの割合をしめている。しかし、学年が上がるにつれて MD の割合が高くなっており、このようなことを配慮して、MD を媒体とする LL システムを導入することとなった。しかし、以前の改修から 10 年が経過した 2009 年度では、学生の音楽を聞く媒体が大きく変化している事が予想される。そのために、旧システム改修時と同様に、今回も、学生の音楽視聴用の媒体を調査するアンケートを実施した。そのアンケート結果を表２[(3)]に示す。学年の表記はアンケートを実施した当時の学年である。

表２　記録媒体別再生可能学生数とその割合 (2009 年)

	回答数	A. P .*	CD	MD	携帯電話	ゲーム機
1 年	235 名	187 名 80%	59 名 25%	11 名 5%	88 名 37%	38 名 16%
2 年	238 名	191 名 80%	42 名 18%	11 名 5%	92 名 39%	46 名 19%
3 年	230 名	191 名 83%	55 名 24%	17 名 7%	77 名 34%	35 名 15%
5 年	164 名	140 名 85%	20 名 12%	7 名 4%	50 名 31%	10 名 6%
専攻	28 名	27 名 96%	4 名 14%	1 名 4%	4 名 14%	0 名 0%
全体	895 名	736 名 82%	180 名 20%	47 名 5%	311 名 35%	129 名 14%

A.P.*（携帯オーディオプレイヤー : iPod, Walkman 等）

この結果から、学生が音楽を聞く媒体は CD や MD から携帯オーディオプレーヤー（iPod や Walkman）へと変化していることがわかる。学年が上がるにつれてその割合が高くなる傾向がある。1・2 年生では、携帯オーディオプレーヤーの保有率が 80%と他の学年に比べて低いが、携帯電話やゲーム機がその代わりをしている。この要因として、携帯電話が非常に高性能となり、iPhone や smartphone に代表されるように、携帯電話としての使用だけではなく、アプリケーションを追加し小さな PC としての使用に十分耐えることができるようになったことがあげられる。ゲーム機（PSP や DSi など）に関しても、携帯電話と同様に非常に用途が広がり、オーディオプレーヤーとしても十分使用できる。携帯オーディオプレーヤー、携帯電話、ゲーム機は、PC と USB で接続でき、音声を MP3 形式などのファイルで保存できる。これらの機器は本体だけではなく、SD カードなどの記録媒体を備えているものもあるので、多くのデータをその機器に保存できるという特徴がある。学生が授業中に視聴する音声を自宅や通学途中に聞くためには、データとして学生の携帯オーディオプレーヤーなどに保存することが必要であるように思われる。表には示していないが、MP3 形式の音声ファイルを再生できないと回答した学生（895 名中 62 名 7%）もいる。この学生たちは、その機器に合った形式のファイルしか再生できないので、PC からデータを保存するときに別形式のファイルに変換すれば再生可能な音声データとして保存が可能である。つまり、個人の PC からしか再生可能なデータファイルを保存できない。やはり、学生個人に PC が必要である。

3. 新システムについて

新システムの仕様書の作成後、事務室、神戸市教育委員会との打ち合わせ、入札等を経て、新システムの導入業者がリコージャパン株式会社に決定した。リコージャパン社と同様にラウンド社にも本高専の実情に合うように、多くの機器の開発や変更の無理を聞き入れて頂き、なんとか導入することができた。

導入業者決定後も業者との打ち合わせや本高専の総合情報センターの先生方との打ち合わせの後に、実際の新システムの概要が具体的になってきた。特に、学生用の 47 台の PC を LAN 接続し、インターネット閲覧を可能にすることにおいては、

本高専電子工学科橋本先生や一般科横山先生には貴重な意見や多くの作業をして頂き、新システムの設置、運用が可能となった。

本来の LL システムの機能のほとんどはラウンド社製の機器類にコントロールされている。リコージャパン社には、CALL 教室としての利用が可能になるように環境整備をして頂いた。つまり、旧システムの機能をラウンド社が受け持ち、PC を利用した学習に関してはリコージャパン社が受け持っている。

新 LL 教室の全景を図１に示す。



図１　LL 教室の全景（後部から）

このように、全景は旧システムとはほとんど変化がない。旧システムと同様に、天井に設置してあるプロジェクターから 80 インチのスクリーンへ映像を映すことが可能である。

3.1　教師用ブースについて

－ マスターコントロール（教師用 PC 等）－

教師用ブースを紹介する（図２）。教師用ブースには、3 台のディスプレイが設置されている。左の17インチのディスプレイは教師用PCの画像を映すものである。中央の 17 インチのディスプレイは、学生用のディスプレイに配信する画像等が確認できるようになっているほか、教師用ディスプレイとリンクしており、様々な作業をこのディスプレイで行うことができる。右のディスプレイがLLシステムをコントロールしている19インチのタッチパネルのディスプレイである。この 3 台とも 1 台の PC で制御されており、カーソルは 3 台を自由に動くことが可能となっている。図３は、この 3 台のディスプレイの画面をプリントスクリーンしたものである。先述したように左の画面が通常の PC として使える画面となっている。中央は、学生用ブースの PC の画面を映している。学生が視聴している画面を確認できる。右がラウンド社の LL システムの画面を映している。

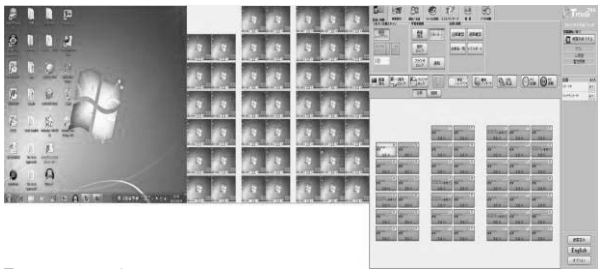


図３　３台のディスプレイのプリントスクリーン

次に、3 台のディスプレイを個別に紹介する。まずは、教師用 PC の画面について紹介する（図３の左画面）。この画面が LL 教室の全てを制御しているものである。ラウンド社の LL システムのプログラムもこの PC で制御しているが、LL システム自体は図３の右画面でしか操作できない。主に、リコージャパン社の CALL システムを制御している。CALL システムとして使用するときには作業用 PC として利用できる。

教員の授業指定・・教員が受け持つ授業や時間割、クラスの情報を入力できる。

座席の指定・・csv 形式のデータを作成し、授業ごとに学生の座席を指定できる。

学生用 PC の保護やその解除・・学生用 PC にソフトウェアをインストールする際の保護や解除を行う。



図２　教師用ブース

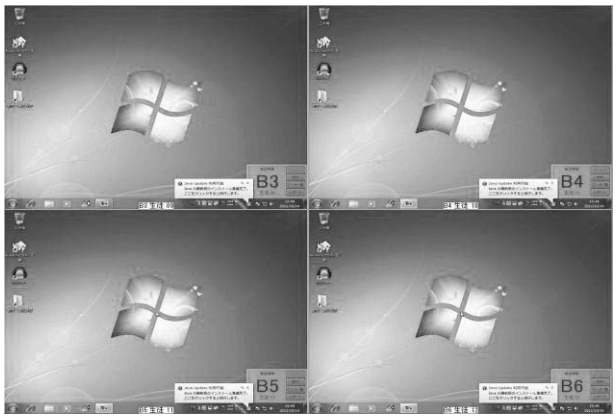


図４　学生用ブースのディスプレイの監視（４台）

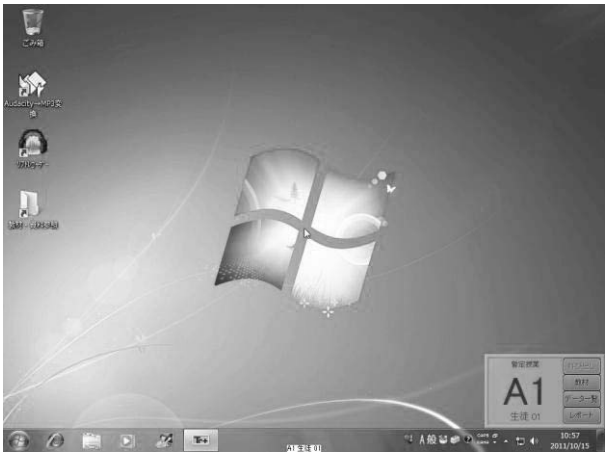


図５　学生用ブースのディスプレイの監視（１台）

中央のディスプレイで行う主な作業は以下の通りである。

学生用モニターの監視・・図３の中央の画面や、図４の画面がこのディスプレイで映している画面である。図４は、学生用ブースのディスプレイを 4 台ごとに監視している。また、図５は、学生用ディスプレイ１台を監視しており、リモート機能で教師用 PC から、この画面の操作が可能である。教材提示装置の画像を学生用ディスプレイに配信する時の画像確認用ディスプレイとしても利用している。

教師用ブースの右のディスプレイを拡大し、図６に示す。

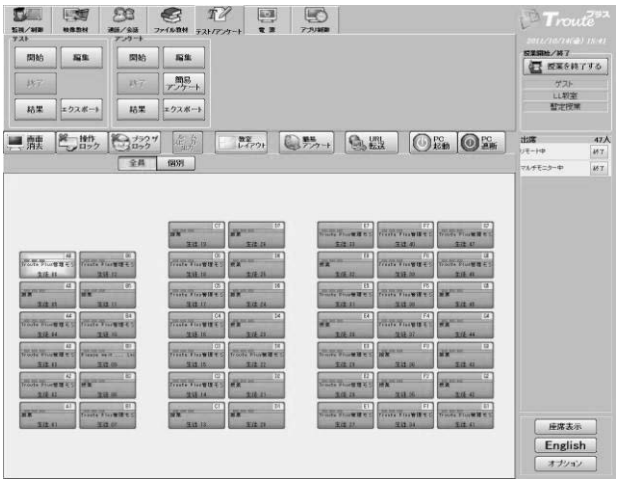


図６　LL システムのメイン画面

この画面で画像や音声の配信、出席の管理等、すべての LL 機能を操作することができる。図６の一番上部のタブが、メニュータブで、左から、監視/制御、映像教材、通話/会話、ファイル教材、テスト/アンケート、電源、アプリ制御、の７つに分類されている。

1）監視/制御

・マルチ/自動スキャン・・学生用ディスプレイのオールスキャンや 5 秒で変わっていく４分割のスキャンが可能である。

・学習者制御・・学習者用 PC の画面制御、操作ロック、ブラウザロック、通知、リモート操作を行う。通知機能は、配信先を全員や個別に指定でき、学習者と教員のチャットが可能である。

・出席/退席・・出席や早退等を PC の電源の状態を確認して記録し、データとして保存可能。

2）映像教材

・PC、教材提示装置、DVD/VHS レコーダーなどの送信元や、学生用ディスプレイ、プロジェクターなどの送信先も、自由に指定できる。また、外部の送信元として、持ち込み PC が接続できる RGB とステレオミニジャック（外部 RGB）、外部の AV と接続できるコンポジットケーブル（外部 AV）の指定も可能である。

3）通話/会話

・特定、不特定の学生がペアやグループを組んで会話練習ができる機能。

・サイマル機能・・マイクを通しての自分の声をヘッドホンに流したり、流さない機能。

・ソフトレコーダ機能は、学習者用 PC にソフトレコーダというソフトがインストールされており、そのソフトを起動させる機能である。この機能については、学習者ブースで詳しく説明する。

4）ファイル教材

・30 メガバイト以下のファイルを学習者 PC に送信できる。また、学習者用 PC から教材を回収し、教師用 PC に保存できる機能。

・URL を学習者用 PC に転送でき、閲覧すべきサイトを指定できる・

5）テスト/アンケート

・アンケートやテストを編集し、学生の回答をデータとして保存できる。採点や分析が容易に可能である。

6）電源

・学習者用 PC の電源を全員や個別に指定して起動、遮断、再起動できる。

7）アプリ制御

・学習者用 PC にインストールされているアプリケーションを指定し、許可したり禁止したりする機能。

8）教材の編集に関して

・ソフトレコーダと GOM ENCORDER を利用し、画像と音声を合わせた教材が作成可能である。また、ソフトレコーダと CaptionMaker で、音声と文字を合わせた教材作成やディクテーション教材が作成可能である。

次に、教師用 PC に制御されずに動く機能について説明する。

図７は、ルームスピーカーや学生用ヘッドセットに配信する音声をコントロールしているユニットである。図８の左は、教師用 PC の“2) 映像教材”を、PC を介さないでも利用できるユニットである。画像の配信だけなら、このユニットだけでも十分可能である。右は、スクリーンを操作できるものである。旧 LL 教室では、マスターシステムでコントロールしていたが、今回は、教師用 PC を立ち上げなくても、操作が可能となった。また、教師用机の下に、A4 が印刷可能なカラーレザープリンターを２台設置し、教師用 PC や学生用 PC と LAN で接続されている（図９　カラーレザープリンター)。



図７　音声コントロールユニット

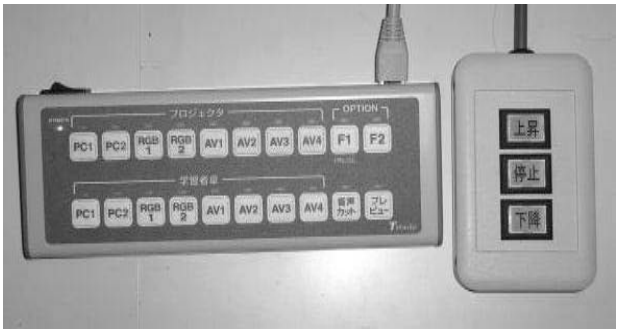


図８　画像コントロールユニット



図９　カラーレザープリンター

3.2　学生用ブースについて

他の教育機関の LL 教室との大きな違いは、学生用ブースの机上にディスプレイを設置せずに、机の中に埋め込んでいることである。机上にディスプレイがないことで教員と学生のアイコンタクトが可能となり、学生の様子を見て授業を進めることができるので、非常に教師にとっては授業がしやすい環境となっている。

学生用ブースを図９に示す。



図１０　学生用ブース

このように、PC 本体、ディスプレイ、ヘッドセット、キーボード、マウスが、学生一人一人に設置されている。この PC には、Basic Shield というプログラムがインストールされており、PC の保護を教師が解除しない限り、PC を起動した時の設定に絶えず戻してくれるというプログラムである。もし、授業中に学生が操作ミスで必要なプログラムやファイルを削除してしまっても、再起動で元の状態に復元できるプログラムである。また、ソフトレコーダもインストールされていて、教師から配信された音声を、波形を確認しながら何度も練習できるようになっている。旧システムの MD コントローラーと同じ役割を担っている。大きな違いは、ソフトレコーダで録音した音声を教師用の PC へ送信し、データとして教員が管理できることである。

導入当初の学生用 PC には、ワープロなどのソフトが全くインストールされていなかったために、英語科教員が OpenOffice という無料総合ソフトウェアを一台一台にインストールした。このソフトをインストールすることで、ワープロ、表計算、プレゼンテーション用画像ファイル等の作成が可能になった。このソフトは、Microsoft 社の Office と互換性があり、拡張子を.doc や.els、.ppt で保存できる。

学生個人に PC を設置することで、一番効果が期待できるのが、e-learning を通しての英語学習効果である。e-learning の特徴について次のよう

な記述がある。

> 音声が中心の LL 教室とは異なり、総合的な学習ができることである。英語の音声を聞きながら、それに関する場面やリスニングテキストを見たり、辞書や文法書までを参照することができる。それに加え、聞いた内容に関する Q & A もあり、解答した場合、その解答が正解であるかどうかを教えてくれる。また, 正解率が悪いと次のレッスンに進めず復習を指示されることもある、マイクが付いているタイプでは, 音声を録音でき、その音声の波長を英語母語話者のものと比べたりできる [(4)]。

e-learning は、このような学習効果が期待できる。e-learning 教材として一般的に使われているものに、ALC 社の NetAcademy 2 という教材がある。この教材は本高専の総合情報センターに設置してある。現在は、本高専内の学内 LAN に接続されているどの端末からも接続可能であるが、十分に活用されていないのが現状である。NetAcademy 2 についての周知度や活用状況などを調査した。その結果を表 3 [(5)] に示す。

表 3 ALC NetAcademy 2 に関しての調査（2009）

	回答数	知っている	利用経験あり	放課後 LL を利用希望
1 年生	235 名	5 名　2%	5 名　2%	77 名 33%
2 年生	238 名	10 名 4%	2 名　1%	62 名 26%
3 年生	230 名	27 名 12%	5 名　2%	65 名 28%
5 年生	164 名	8 名　5%	2 名　1%	21 名 13%
専攻科	28 名	19 名 68%	3 名 11%	5 名　18%
全体	895 名	69 名 8%	12 名 2%	230 名 26%

この結果から、NetAcademy 2 が利用できることを知らない学生が非常に多いことが明らかである。周知度の低さが、利用状況を悪くしている主な要因といえる。また、NetAcademy 2 に接続可能な端末は情報処理演習室や図書館、本部棟に設置してあるが、その端末にはヘッドセットやマイクなどが準備されていないのも、その要因の一つではないかと思われる。

LL 教室を利用する英語演習の時間に、少しでも NetAcademy 2 を利用させ、自学自習の習慣を身につけさせたいと思っている。アンケート結果から、低学年の学生が放課後の LL 教室の開放を希望している事がわかる。今後は、LL 教室を放課後利用できるように、環境整備を行っていき、多くの学生が NetAcademy をはじめ、PC を介しての e-learning で、英語の力を身につけて欲しいものである。

6. 今後の課題

2011 年 9 月に新しい LL 教室を利用し始めたばかりなので、本高専の英語科教員がこのシステムを使い慣れていないのが現状である。旧システムと比較すれば、PC を学生個人に設置したことで可能となる教育活動が増すことが予想される。また、英語学習教材も新システムでは、音声と文字、音声と画像、を組み合わせた視聴覚教材の作成が非常に容易になっている。このような教材を教師用 PC に蓄積していき、学習者のレベルにあった教材で学習すれば、効果も更に期待できる。また、理解度をはかるディクテーションも容易に作成できるので、学習の定着度を確認しやすくなった。今後は、学生にとっての効果的な英語学習が可能となるように、英語科教員が新しい LL 教室の使い方に慣れ、学生が望むような英語学習を行えるようにすべきである。

最後に、LL 教室のメンテナンスについてである。旧 LL 教室でも教師用 PC や学習者用ディスプレイの不備等が幾度となく生じた。その都度、特定の英語科教員が中心となって、非常に労力と時間をかけて対応して頂いていた。現在は、英語科教員 2 名が LL 教室の担当をしている。しかし、2 名で 47 台の PC を管理することは可能であるが、非常に多くの時間を必要とするものである。先述したように、47 台の PC に OpenOffice をインストールするのに、5 時間を要した。また、セキュリティ・チェーンを 47 台の PC に設置するのにもかなりの時間を割いている。今後の LL 教室の管理の仕方については検討が必要である。

参考文献

（1）http://law.e-gov.go.jp/高等専門学校設置基
（2）西山正秋・滝沢雄一：「コミュニケーション能力育成のために LL 教室での授業 －過去・現在・未来」, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要, 第 40 号, pp. 157 - 162, 2002.
（3）上垣宗明：「LL 教室について」, 神戸市立工業高等専門学校総合情報センター広報, 第 23 号, pp.14 - 19, 2011.
（4）JACET 教育問題研究会 編：新英語科教育の基礎と実践　授業力のさらなる向上を目指して』, 三修社, 2005.
（5）（3）に同じ。

ＰＬＣを用いたアーチェリー競技用信号灯の開発

和田 明浩*　　笠井 正三郎**

Development of Signal Light for Archery using PLC

Akihiro WADA　Shozaburo KASAI

Keywords **:** archery, signal light, PLC, sequence control

１．はじめに

アーチェリー競技とは，弓で矢を射ち，標的上の得点を争う競技であり，日本では，主にターゲット，フィールド，インドアの 3 競技が行われている(1)．アーチェリー競技は他のスポーツに比べて競技人口も少なく，全国的に見てもアーチェリー部を持つ高専は数少ない．このため，近畿大会に相当する大会が存在せず，西日本地区の 5 高専（徳山高専，呉高専，大阪府立高専，奈良高専，本校）が輪番制で幹事校を担当し，毎年 1 回の頻度で西日本地区高専アーチェリー競技会を開催している．今年度は，本校が幹事校となり，8/23, 24 の 2 日間，神戸しあわせの村アーチェリー場において第 20 回大会を開催した．

アーチェリー競技では試合進行にあたり，行射管理をする信号灯が必要とされる．しかし，しあわせの村アーチェリー場には常設の信号灯設備がなく，従来はストップウォッチとホイッスルを用いて人間が行射時間の管理をしていた．そこで今回，アーチェリー競技用信号灯を開発し，上記大会で実用したので，その成果を報告する．

２．高専大会の競技形態

西日本地区高専アーチェリー競技会ではアウトドアターゲットラウンドと呼ばれる試合形式で競技が行われている．高学年は 50m，30m をそれぞれ 36 射，合計で 72 射の得点を競い，低学年は 30m 36 射を 2 回繰り返し，合計 72 射の得点を競う競技形式である．標的の直径は 80cm であり，図 1 のように，5 色の色環帯（中心から，黄，赤，青，黒，白色）で構成され，これがさらに 10 個の得点帯に分割されている(2)．72 射の満点は 720 点であるが，今年度の優勝者スコアは 600 点（1 射あたり平均 8.3 点）であった．

高専大会では 1 人の選手が 1 立ちで行射できる矢の数が 3 本に制限されており，選手は 3 射 1 セットを 12 回繰り返すことで 36 射の行射を行う．行射時間は 1 セット（3 本行射）あたり 2 分以内に制限されており，時間外に行射した矢は無効となる．実際に時間外発射があった場合には，標的上にある 3 本の矢の中で最高得点の矢を削除する．このようにアーチェリー競技では行射時間の管理が重要であり，選手が残り時間を確認できる競技用信号灯が必要となる．また，高専大会では参加選手が 100 名程度となるため，一度に全員が行射することはできず，2 グループに分かれて交互に行射するスタイルとなる．全体としては，図 2 に示すような繰り返しパターンで試合進行する．

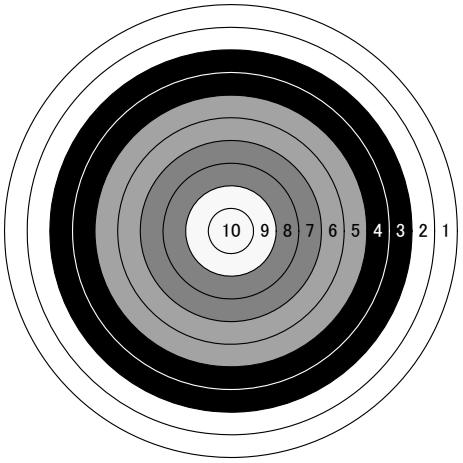


図 1　アーチェリー標的

第1グループ行射
第2グループ行射
矢取り
第2グループ行射
第1グループ行射
矢取り
： 以下繰返し

図 2　高専大会の競技進行形式

＊　神戸高専　機械工学科　准教授
＊＊ 神戸高専　電子工学科　教授

３．信号灯に求められる動作

信号灯に求められる要素として，赤黄青の 3 色ランプ，ブザー，デジタル時間表示がある．以下に各要素の動作手順を示す．実際の競技進行では，制限時間内に全選手が行射し終わった場合には，試合時間短縮のために 2 分経過を待たずに次の動作に移る必要がある．そこで，行射終了状態にショートカットできる機能が必要とされる．また，競技開始前にはフリープラクティスとして全選手に 4 分間の試射時間が与えられるため，その時間管理用としても上記信号灯を使用できることが望ましい．

実用に耐える信号灯とするためには，以上のような各動作モードを短時間で切り換え可能であることが求められる．

■競技モード

１）スタートボタンを押す
　→　ブザー２鈴　赤ライト点灯
　　（第 1 グループが行射準備）
２）１５秒経過
　→　ブザー１鈴　青ライト点灯
　　（第 1 グループが行射開始）
３）２）のブザー後，１分３０秒経過
　→　黄ライト点灯
　　（行射終了 30 秒前）
４）２）のブザー後，１分５０秒経過
　→　黄ライト点滅
　　（行射終了 10 秒前）
５）２）のブザー後，２分経過
　→　ブザー２鈴　赤ライト点灯
　　（第 1 グループの行射終了）
　　（第 2 グループが行射準備）
６）５）のブザー後，１５秒経過
　→　ブザー１鈴　青ライト点灯
　　（第 2 グループが行射開始）
７）６）のブザー後，１分３０秒経過
　→　黄ライト点灯
　　（行射終了 30 秒前）
８）６）のブザー後，１分５０秒経過
　→　黄ライト点滅
　　（行射終了 10 秒前）
９）５）のブザー後，２分経過
　→　ブザー３鈴　赤ライト点灯
　　（第 2 グループの行射終了）
　　（矢取り）

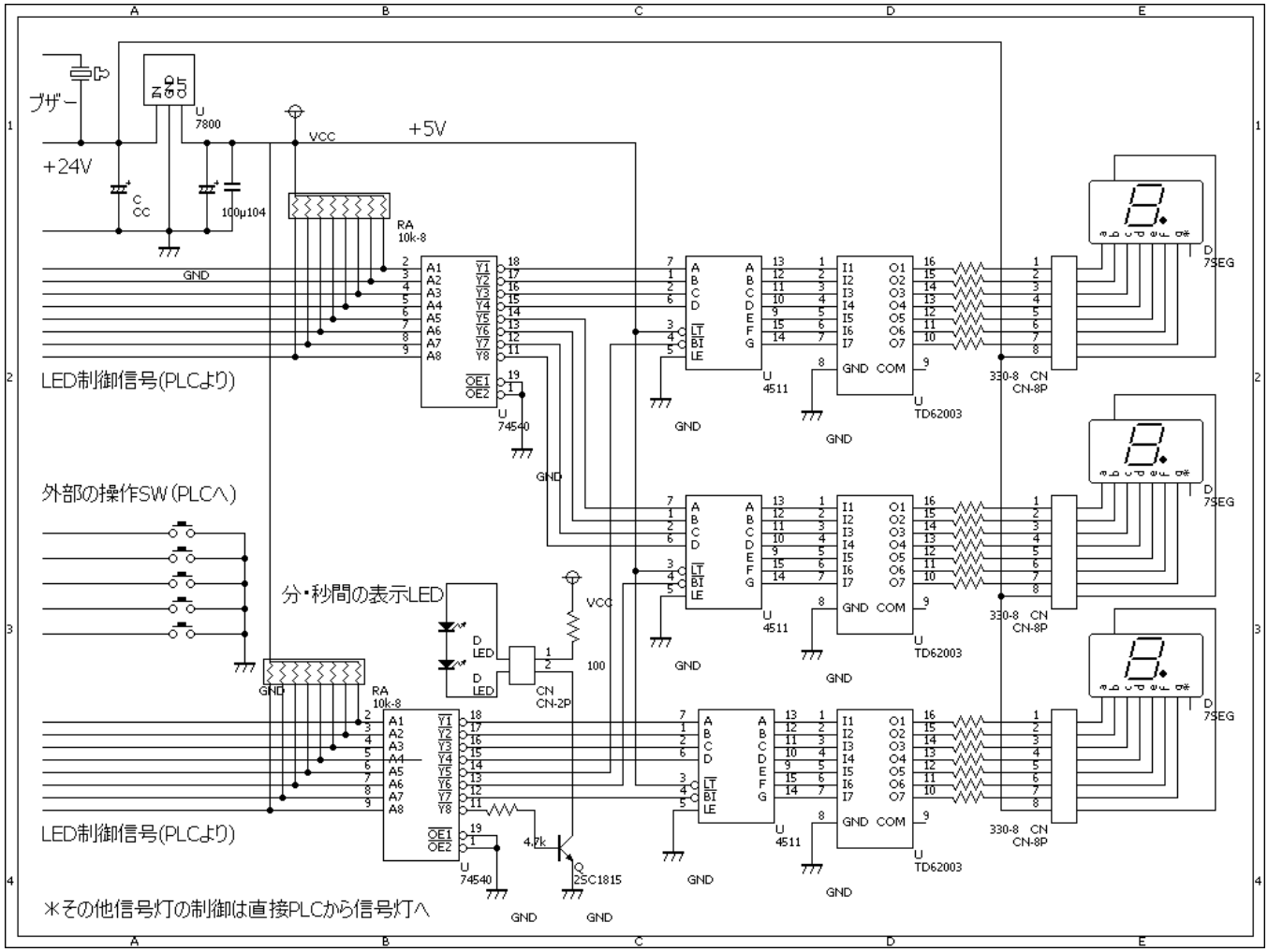
■フリープラクティスモード

１）スタートボタンを押す
　→　ブザー２鈴　赤ライト点灯
　　（行射準備）
２）１５秒経過
　→　ブザー１鈴　青ライト点灯
　　（行射開始）
３）２）のブザー後，３分３０秒経過
　→　黄ライト点灯
　　（行射終了 30 秒前）
４）２）のブザー後，３分５０秒経過
　→　黄ライト点滅
　　（行射終了 10 秒前）
５）２）のブザー後，２分経過
　→　ブザー３鈴　赤ライト点灯
　　（行射終了）
　　（矢取り）

４．信号灯の製作

前章で述べた各要求項目を実現するために，PLC（programmable logic controller）を用いたシーケンス制御による信号灯を製作した．回路図と主な使用機器のリストを図 3 に示す．また，図 4 に信号灯の外観写真と内部構造を示す．信号灯は時間表示部とコントロール部に分かれており，時間表示部には時間表示用の 7 セグメントデジタルディスプレイを 3 個配置し，1 個を「分」表示，残りの 2 個を「秒」表示に用いた．また，電子ブザーと LED 駆動回路を内蔵し，空冷用ファンも配置した．さらに，3 色ランプは未使用時に折りたためる構造とした．

一方，コントロール部には PLC 本体，電源ユニット，タッチパネル式ディスプレイおよび空冷用ファンを配置し，PC との接続用コネクタとして USB コネクタを取り付けた．時間表示部とコントロール部の間は Dsub25 芯のストレートケーブルで接続し，コントロール部から時間表示部に電源供給する形式とした．また，コントロール部から着脱式の手動スイッチを分岐させ，入力用接点とした．手動スイッチは左から順に「開始ボタン」，「終了ボタン」，「前半ショートカットボタン」，「後半ショートカットボタン」の 4 個である．コントロール部に配置したタッチパネル式ディスプレイは入力接点としても利用できるが，製作時間の制約から，今回はディスプレイにはランプやブザーなどの各要素の動作状況と，経過時間のみを表示させる仕様とした．

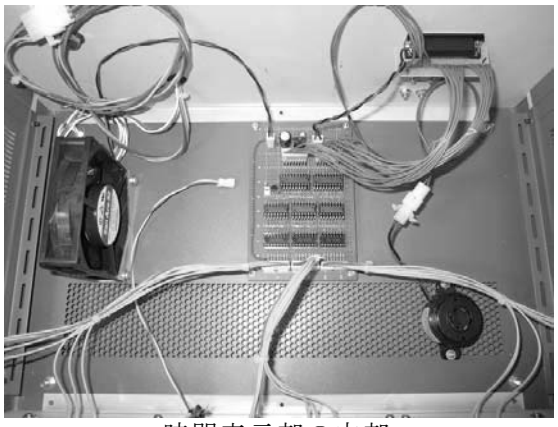


PLC	OMRON SYSMAC CP1L
拡張I/Oユニット	OMRON CP1W-16ER(16接点)
タッチパネル式ディスプレイ	OMRON Interactive Display NP3-MQ001B
24V電源	OMRON S8TS-06024
ノイズフィルター	TDK ZGB2203-01U
7セグメントデジタルディスプレイ	5.0 INCH SINGLE DIGIT DISPLAY(A-5001SR)
3色ライト	PATLITE LHE-302A-RYB
電子ブザー	Panasonic EB1114
冷却用ファン	SANYO DENKI San Ace 92 109P0924H402
LED駆動用IC	TOSHIBA HD74HC540P(7セグメント デコーダ ドライバ)
	TOSHIBA HD74HC4511P(7セグメント デコーダ ドライバ)
	TOSHIBA TD62003APG(7ch ダーリントン シンク ドライバ)

図３　信号灯の回路図および主な使用機器



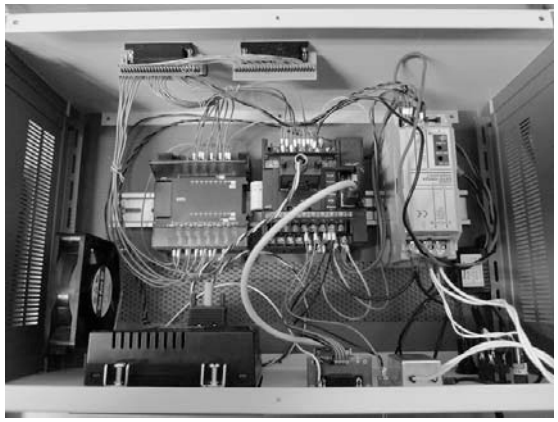
時間表示部の外観



時間表示部の内部



コントロール部の外観



コントロール部の内部

図 4　信号灯の外観写真および内部構造

製作した信号灯に所定の動作をさせるためには，PLCにラダー図プログラムを登録する必要がある．今回は「競技モード」と「フリープラクティスモード」のラダー図プログラムを個別に作成し，必要に応じてPLCに登録することで異なる動作を可能にした．

５．高専大会での使用状況

製作した信号灯を，8/23，24 の 2 日間，神戸しあわせの村アーチェリー場で開催された西日本地区高専アーチェリー競技会で使用した．試合での使用状況を図 5 に示す．競技フィールドは幅約 40m あるため，時間表示部を 2 台製作して，左右 2 ヶ所に設置した．競技者からの距離は約 10m である．今回使用した 7 セグメントデジタルディスプレイは屋内仕様であり，日中の強い日差しの中では視認性に問題があった．そこで，写真のような日除けフードを取り付けることで改善した． また，3 色ライトは 360° 全方向に光を放射するため，光量が減少しライトの点灯を確認しづらいという問題が生じたが，ライト背面に反射板を張り付けることで改善した．

信号灯の動作状況としては，2 日間を通して大きな問題は生じず，スムーズに試合進行ができた．特に，行射時間終了へのショートカット機能を用意したことで，試合時間を短縮でき，効率的な大会運営をすることが出来た．今後は他高専主管時にも今回製作した信号灯を貸与して活用していく予定である．

謝辞

本信号灯の開発の一部はオムロン株式会社の寄附事業により実施しました．ここに謝意を表します．



図 5　高専大会での使用状況

参考文献

(1) 全日本アーチェリー連盟 Web ページ
http://www.archery.or.jp/
(2) 全日本アーチェリー連盟競技規則

英賀城およびその周辺の時系列地理情報データベースの作成

小西良幸*，中尾幸一**

Creation of Multi-temporal Geographic Information Database of Aga Castle and the Neighberhood

Yosiyuki KONISI* ， Kouichi NAKAO**

Keywords：castle，geographic，database

１．はじめに

英賀は兵庫県姫路市飾磨区にある古くからの地名で，現在でも飾磨区英賀や飾磨区英賀清水町などがある．また，付近の飾磨区中浜町，飾磨区西浜町などを含めた地域の名称としても使われる．ここにはかつて英賀城が築城されていたが，現在往時の姿をしのぶ建築物等は見当たらない．そこでその実態を知るためのデータとして，海岸線・河川・街道・村落などの記録を整理し，GISを用いた工学的な観点から，英賀周辺の経年的な地理情報データベースを整備すること，また，英賀城を復元することを本研究の目的とした．特に英賀城を中心とする地域の歴史的な変化についてより容易に調査できるような資料を作成することに重点をおいた．

２．データベースの構成

データベースは，英賀城のあった南播磨地域のものと，英賀城に関するものに分けて保存した．また，地図データを用いて各種の主題図を作成した．データベース全体の構成は図１に示すとおりとした．

３．南播磨地域のデータ

３．１　海岸線の変化　戦国時代線から現在までの海岸線の変化をデジタルマップとして保存した．これを使ってその変化を表したものが図２である．英賀城が城として機能していた時期には，英賀城付近までが海で，港を持つ城であったことがわかる．

３．２　地質図　南播磨地区の地質図に，海岸線と英賀城のデジタルマップを重ねがきすることにより地質からみた英賀城の立地を表す図を作成したものが図３である．この図から英賀城は砂州上にあることがわかる．また，周囲は沖積層であり，湿地帯であったことがわかる．これは文献(1) にある「北は人馬の膝をも没する柳樹蒼生泥濘湧水の深い沼沢が天然の要害となって・・」を裏付けるものである．

*都市工学科2010年度卒業生
**都市工学科　教授

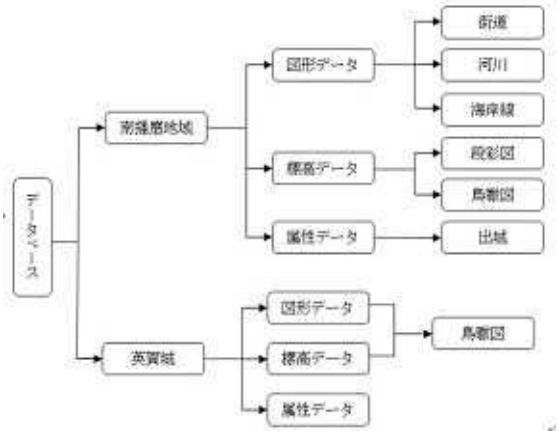


図１　データベースの構成



図２　姫路の海岸線の変化

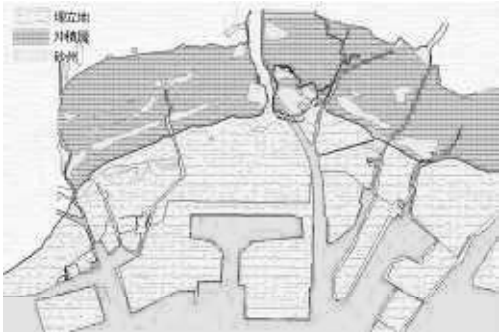


図３　英賀城周辺の地質図

３．３　英賀城の支城

英賀城周辺にある，英賀城に関係をもつ城主の城，館，構について，その所在地の座標と名称を記録した．座標は日本平面直角座標系のⅤ系（原点 経度134°20′0″，緯度36°0′0″）としている．表１がそのデータである．このデータと地図を結合することにより，英賀城の勢力範囲を示す図を作成することができた．図４がそれであり，その状況がよくわかるものとなっている．

表１　英賀城の支城のデータ

X　(m)	Y　(m)	名称
-133960.149	24519.642	凸平松
-132541.937	25953.703	凸西土井
-132391.33	26349.287	凸小坂
-131776.378	25677.815	凸熊見
-131489.879	26825.445	凸才
-132805.519	27556.692	凸広畑
-131725.731	28021.108	凸山崎
-130852.648	29019.193	凸苫編
-129445.258	30109.383	凸西庄
-130249.017	30385.059	凸岡田
-130986.137	30126.288	凸町の坪
-131469.439	30021.732	凸玉手
-131994.196	30502.699	凸構
-132717.875	30116.665	凸加茂
-131044.571	31475.742	凸栗山
-131923.173	31470.86	凸亀山
-132802.554	31606.044	凸清水
-133426.984	31691.711	凸下中島
-130951.62	33080.712	凸北條
-132918.994	31936.475	凸下野田
-131617.994	29256.881	凸高町
-131040.043	30660.806	凸中地
-133220.623	24345.478	凸井口
-129195.258	28659.124	凸岸

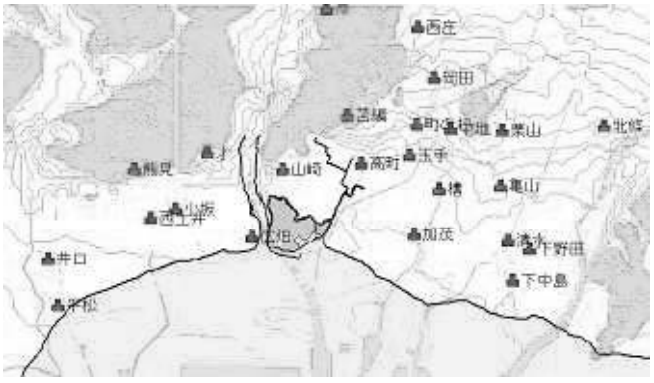


図４　英賀城の支城

３．４　南播磨の鳥瞰図の作成

図２，図３，図４を国土地理院発行の２５０００分の１地形図「網干姫路南部」に張り付けることで，網干姫路南部と対応する数値地図５０ｍメッシュ(標高)の523414.mem，523415.memを用いて，鳥瞰図を作成することができる．図５，図６，図７はそれぞれ図２，図３，図４を鳥瞰図としたものである．鳥瞰図にするために用いたのは，フリーソフトのカシミールである．それぞれ平面図とは違った立体的な表現となり地図を見慣れていない人にも分かりやすい表現となっている．

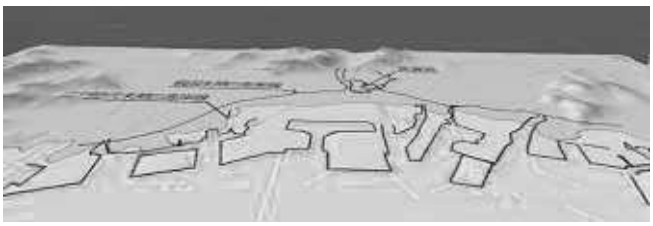


図５　英賀城周辺の海岸線の変化を表す鳥瞰図

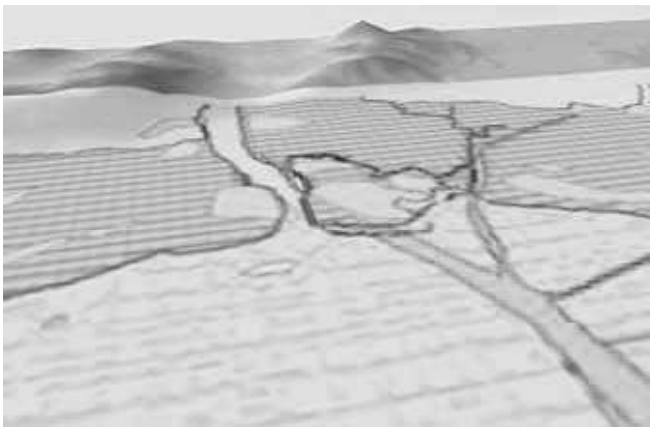


図６　英賀城周辺の地質を表す鳥瞰図



図７　英賀城の支城を表す鳥瞰図

４．英賀城跡の復元

４．１平面図の復元　大正１２年陸地測量部発行の２万５千分の一地形図の英賀城周辺を切り出したものが図８である．地図のなかに土塁跡と思われる表現があり，英賀城の復元の資料となるものと思われる．また，図９の英賀保めぐり案内図に描かれている英賀城，図１０の中世末期における「英賀町」

の想定図などを参考にして明治３４年の地図上に復元をした．図１１がその復元平面図である．

４．２　標高データの作成　　復元した平面図を，その標高により色分けした図を作成（図１２）する．具体的には，図中の地物の標高および色を，それぞれ定めて，間隔を縦３m，横３．７２mで，その点の色から高さを求めて記録し，国土地理院発行の数値地図50mメッシュ(標高)と同じフォーマットの標高データを作成する．

４．３　復元鳥瞰図の作成　　図１２の範囲と同一の復元平面図を作成する．図１３がその例である．図１２より作成した標高データと図１３を重ねることで鳥瞰図を作成することができる．鳥瞰図の作成にはBird's View（マプコン社製）を使用した．図１４，図１５はその例である．

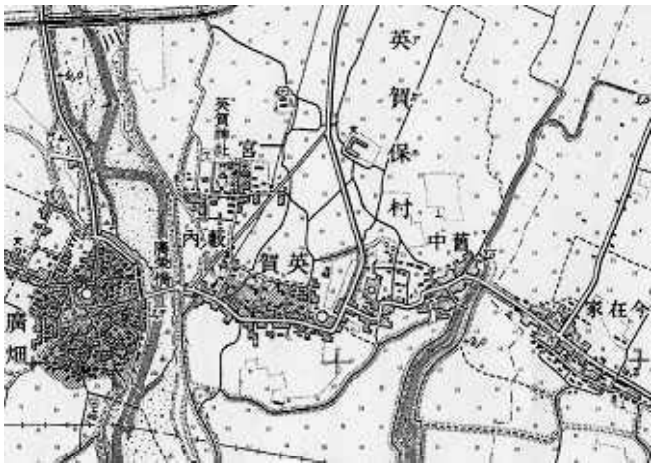


図８　明治３４年の英賀城周辺の地図

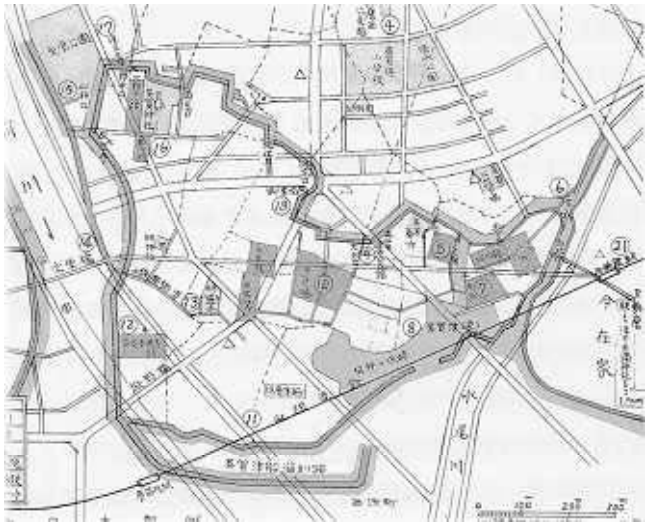


図９　英賀保めぐり案内図の英賀城



図１０　中世末期における「英賀町」の想定図



図１１　英賀城復元平面図

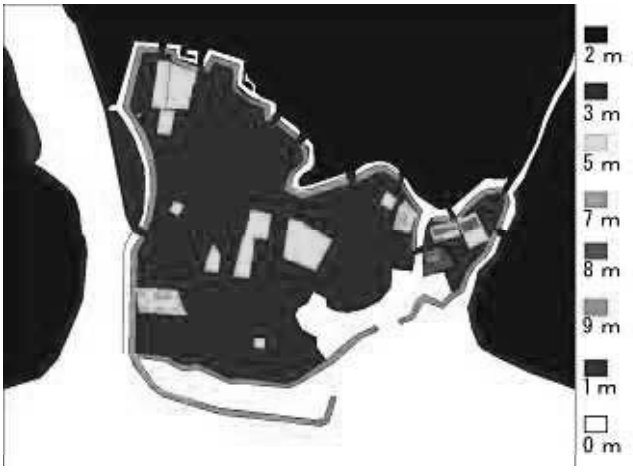


図１２　標高により色分けした図

５．英賀城跡の現在の位置

英賀城の復元図は，デジタルマップとしているので，現在の地図に重ねがきすることで，その位置を確認することができる．図１６は英賀保周辺の住宅地図に英賀城を重ねがきしたものである．一部の道路は土塁の線や明治の道路と重なっている．また，

夢前川が昭和前期の改修により流れを変えて城内の一部が川底にあることもわかる．

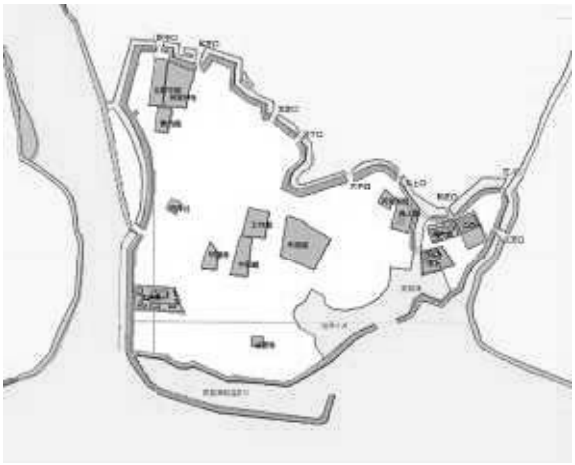


図１３　英賀城復元図

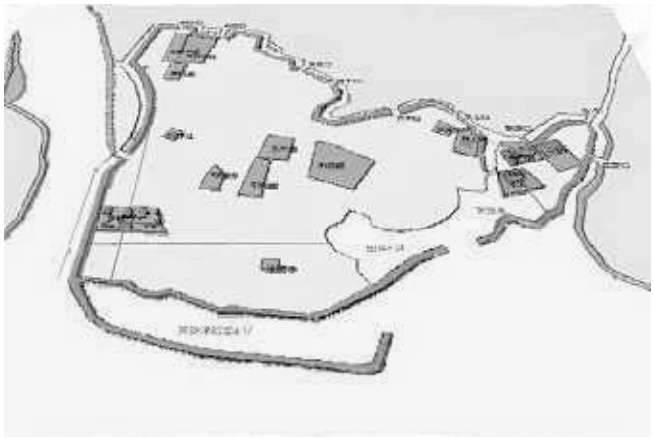


図１４　南方向より見た鳥瞰図



図１５　北方向の低空から見た鳥瞰図

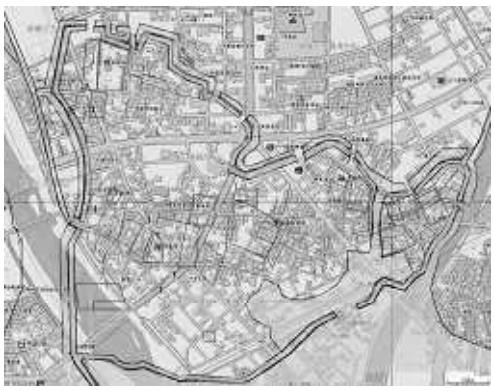


図１６　復元した英賀城と現在の地図の重ねがき

６．おわりに

本研究では，地理情報データベースを整備し，英賀城周辺地域を容易に調査できる検索システムを作成することを目的に上記のデータを作成した．

文献だけではイメージしにくいが，作成したデータを用いて図として表示させることで，現在の地理情報と過去の地理情報を簡単に，わかりやすく比較することができた．

作成したデータから，英賀城は，東西，南北とも約１ｋｍあり，大変大規模な城郭都市であったことがうかがえる．また，港を持っており，港を守る機能も備えた城であったことがわかった．英賀城は，１３６０年頃から１５８０年に羽柴秀吉に攻め落とされるまでの約２００年の間，南播磨ではきわめて大規模な城郭として，重要な位置を占めていたものと思われる．

謝辞

英賀城に関するデータベースを作成するにあたり多くの資料を提供いただいた池田善考氏に感謝の意を表します．

参考文献

(1)西木馨：英賀城史，英賀保史蹟保存会，p.81，1977．

数式処理での数学問題の解答

八木善彦*

Mathematics Problem Solving with Computer Algebra Systems

Yoshihiko YAGI*

Keywords: Mathematica, mathematics education, computer algebra system

1. はじめに

近年, 数学問題の答え合わせをして欲しいという学生がよく来る. 正解の載っていない問題等についての問い合わせである.

その中には数式処理で答えの分かるものも含まれる. 神戸工業高専の総合情報センターには数式処理システム「Mathematica」(1) が導入されている. すぐ解答を得たい学生や質問担当の先生が不在のときなどにも利用できるよう, 「Mathematica」を用いて解答を得る際の手順等についてまとめる.

2. Mathematica について

2.1 Mathematica とは

Mathematica は数学やその応用分野のための科学技術計算を手助けするためのソフトウェアだ. 1986 年後半, スティーブンウルフラムは Mathematica の開発を開始し 1988 年 6 月に最初のバージョンが発表された. それ以来商業的に最も成功した数式処理システムとして世界的に認められている. 開発が古いこともあり, 仕様は大型コンピュータの端末から使える機能を保持している. これはキーボードからの操作が可能ということであり, 研究などで数式処理を利用する者には, 使い易い仕様となっている. Mathematica は, バージョンがあがるに従って機能も向上し現在ではマウスを使ったグラフィックユーザインターフェースに対応している. これは、初心者が使用する際に関数名を覚えていなくてもすぐ使えるように配慮したものになっている.

バージョン 4 から TraditionalForm が採用されたことにより数式表示は数学表記に近づき, パレットを使用した入力により初めて使う人が計算式を入力する敷居が低下したが, 入力の曖昧さや入力時のエラーを避けるにはキーボードからの操作を理解しておくのがよい. このまとめでは, プログラムなどの高度な使用法は無しで, 基本関数を使用して計算を行い, 数式処理システム Mathematica の基本関数で問題の解を得ることを想定する.

2.2 システムの操作

Linux での Mathematica は ターミナルから

```
Mathematica &
```

と入力することで起動する.

起動したらファイルメニューから使いそうなパレットを開いておくと便利である. (パレットメニュー→基本数学アシスタント, 古いバージョンではファイルメニュー→パレット→基本的入出力)

ヘルプメニューで Mathematica ブックを読むと詳しい使用法がわかる.

使用上の注意として

- Mathematica は関数型言語である
  計算の開始は shift + enter の入力である

- システムの組み込み関数は関数名の先頭を大文字にすることで区別している
  したがってユーザ定義の関数や変数は小文字ではじめるのがよい

- 計算の順序を指定する括弧は”(”, ”)”のみを多重で使用し中括弧”{”, ”}”はリスト, 大括弧”[”, ”]”は関数の入力変数を表す記号である

- 定数も値を返す関数である
  例
  Pi π
  E e 自然対数の底
  I i 虚数単位
  これらはパレットを使用する場合はボタンをクリックするだけであるが, キーボードから入力する場合は知っておかなければならない

*一般科 教授

- 積はスペース” ”またはアスタリスク”*”である. $2x$ は $2 \times x$ と解釈されるが, $x2$ は”$x2$”という変数名になってしまう
  スペースがかけ算に解釈されることは表示が数学表記に近くなって式が見やすくなるが, その式を見て入力する時, 誤った計算式となってしまう原因となる. 特に表示された式は, 見た目上, スペースが入っているか区別しづらいので注意が必要である

- Mathematica は一度定義された変数はすべて記憶しているため, 次の計算で同じ変数名を使用する場合は定義内容を再定義するか, 消去せねばならない

- 標準パッケージを読み込むときディレクトリの区切り文字バッククォート”`”は普段使うことの少ないキーなので入力時に間違えないよう注意して入力する必要がある

など独自の構文をもっており, 使用にあたっては, 事前に動作を確認しておくのがよい [2].

3. フーリエ級数

高専の低学年 (1 〜 3 年) での数学計算は Mathematica で問題の解を得ることができることを報告した [3]. 今回は, 4 年の応用数学の範囲を取り上げる.

ラプラス変換, フーリエ変換, 留数の計算などは Mathematica の基本関数で計算できる. ベクトル解析については, 標準のベクトル解析パッケージを読み込むことで, 球座標や円柱座標にも対応した勾配・発散・回転・ラプラシアンなどの計算を行うことができる. Mathematica は, フーリエ変換の基本関数をもっている. これは, 離散的な数値データのフーリエ変換である. Mathematica のフーリエ変換は, 物理科学でよく使われる表記で符号が決定されるため, 電子工学で使われる表記と逆になっているため注意が必要だ.

また Mathematica は, フーリエ級数またはフーリエ係数を直接得る基本関数はもっていない. Mathematica Book に示されるフーリエ級数の計算は, Fit[ ] 関数を用いて, 数値データに対し 三角関数の n 倍角 $\sin x,\ \sin 2x,\ \sin 3x, \cdots, \cos x,\ \cos 2x,\ \cos 3x, \cdots$ の線形結合に対する最適曲線を決定する問題として係数を計算するものである. この方法では, 近似計算であり, あらかじめ展開する項数を制限したものになる. 標準のフーリエ変換パッケージを使えばフーリエ級数を得られるが, 級数展開の項数を指定したものであるので, 問題解答として欲するものと異なり, 変数変換をしてやる必要がある. これらフーリエ級数の計算を, 計算上の注意も含めて検証する.

3.1 フーリエ係数の計算

Mathematica は, 積分計算が可能であるので, フーリエ係数は定義式により直接計算できる.

問題　次の周期 2π のフーリエ係数を求めよ.

(1) $f(x) = \begin{cases} -x & (-\pi \leqq x < 0) \\ 0 & (0 \leqq x < \pi) \end{cases}$
$f(x + 2\pi) = f(x)$

数学での周期 2ℓ のフーリエ係数の定義式 [4] は

$$c_0 = \frac{1}{2\ell}\int_{-\ell}^{\ell} f(x)dx$$
$$a_n = \frac{1}{\ell}\int_{-\ell}^{\ell} f(x)\cos\frac{n\pi x}{\ell}dx$$
$$b_n = \frac{1}{\ell}\int_{-\ell}^{\ell} f(x)\sin\frac{n\pi x}{\ell}dx$$

である. 科学技術分野では, 分野により異なった様々な定義が用いられるために定義にあわせる必要がある.

Mathematica の計算は図 1 のように進められる.

$$\text{In[1]} := \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{0} -x\ dx$$
$$\text{Out[1]} := \frac{\pi}{4}$$
$$\text{In[2]} := \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{0} -x\text{Cos}\ [nx]\ dx$$
$$\text{Out[2]} := \frac{-1 + \text{Cos}\,[n\pi] + n\pi\text{Sin}\,[n\pi]}{n^2\pi}$$
$$\text{In[3]} := \text{Simplify}\,[\%, n \in \text{Integers}]$$
$$\text{Out[3]} := \frac{-1 + (-1)^n}{n^2\pi}$$
$$\text{In[4]} := \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{0} -x\text{Sin}\ [nx]\ dx$$
$$\text{Out[4]} := \frac{n\pi\text{Cos}\,[n\pi] - \text{Sin}\,[n\pi]}{n^2\pi}$$
$$\text{In[5]} := \text{Simplify}\,[\%, n \in \text{Integers}]$$
$$\text{Out[5]} := \frac{(-1)^n}{n}$$

図 1 :Mathematica によるフーリエ係数の計算

図 1 で In[1] は係数 c_0 の計算, 次に In[2] は係数 a_n

の計算である. 計算時に n が整数であることを指定しなかったので In[3] で n は整数と指定し正しい値を得る. このことがあらかじめ分かっている場合は In[2] の式であわせて指定してもよい. In[4] は係数 b_n の計算である. 集合の要素を表す記号 (関数)"∈"はパレットのタイプセットの中にある. キーボードからの入力では ESC elem ESC であり, 関数で指定する場合は Element[n, Integers] と入力する.

計算式を正しく入力すれば正解を得る. 区分的な関数なので定積分の範囲を正しくとらねばならない. なお, この区分的な関数を組み込み関数の絶対値"| |"と x を使って $\frac{|x|-x}{2}$ と定義した場合は定義式の通りの上端・下端で計算できる.

3.2 Mathematica 標準パッケージ

Mathematica は拡張性があり標準的な組み込み関数では計算できない種々の関数や機能を簡単に組み込むことができる. これらの関数は Mathematica のプログラムとしてファイルにまとめられパッケージとして Mathematica に追加できる. 特に定型的な関数操作を繰り返し用いる場合, 計算手順を新しいユーザ定義関数とし, パッケージにしておくことで, あとから繰り返し使うことができるようになる. それらの中で Mathematica に標準で付属しているパッケージ群を標準パッケージ [5] と言う. Mathematica のバージョン 7 からは, FourierSeries とその関連関数は Mathematica カーネルにも含まれているため, パッケージの読み込みは不要になった.

それ以前のバージョンのシステムを使用する場合, パッケージの読み込み前に関連関数を入力してしまうと"関数が存在しません"という警告がでるとともにその関数名が新関数として登録されるため, そこでパッケージの読み込みを忘れたことに気づいてパッケージの読み込みを行っても登録された関数名のために読み込みに失敗する. もし, 誤ってそうしてしまったら, Remove["*name*"] を実行し, 定義されてしまった関数名を取り除いてからパッケージの読み込みを再実行なければならない.

Mathematica は当初のバージョンから標準パッケージをもっており, 早くから使用されたこともあって, ネット上等に配布されたパッケージは数多い. 機能がないと思えばネット上で検索すると, 有ればよいと思う関数がすでに作成されていることが多い. また, それらの関数は自分の要求にあうようカスタマイズできる. このあたりの手軽さ, 便利さは, Mathematica が広く使われるようになった要因の 1 つであると思う. 本稿ではパッケージの解説が目的ではないので, それらの紹介はしないが, 標準パッケージの名前だけ以下にあげておく.

- 統計パッケージ　・分散分析　・階層的クラスタ　・仮説検定　・多変量統計　・統計プロット
- プロット, グラフパッケージ　・エラーバープロット　・プロットの凡例　・スプライン
- 離散数学パッケージ　・Combinatorica　・計算幾何学　・グラフユーティリティ
- 微積分パッケージ　・方程式トレッカー　・フーリエ級数　・関数近似　・数値計算　・微分方程式の数値解析　・変分法　・ベクトル解析
- 代数パッケージ　・有限体　・四元数
- 多面体および多胞体パッケージ　・多面体操作　・多胞体
- その他の数学的パッケージ　・コンピュータ演算　・素数証明
- 地図製作および日付パッケージ　・暦　・測地学　・世界プロット
- サウンドパッケージ　・オーディオ　・ミュージック
- 物理量および物理特性パッケージ　・黒体輻射　・物理定数　・共鳴吸収線　・標準大気　・単位
- ユーティリティパッケージ　・ベンチマーク　・開発者ユーティリティ　・試験的関数　・Notation　・XML

3.3 フーリエ変換パッケージ

Mathematica のフーリエ変換パッケージを使用した計算は図 2 のように進められる.

In[6] := << Caluculus‘FourierTransform‘

In[7] := FourierTrigSeries $\left[\frac{\text{Abs}[x]-x}{2}, x, 3\right]$

Out[7] := $-\sin(x)+\frac{1}{2}\sin(2x)-\frac{1}{3}\sin(3x)-\frac{2\cos(x)}{\pi}-\frac{2\cos(3x)}{9\pi}+\frac{\pi}{4}$

In[8] := FourierSeries $\left[\frac{\text{Abs}[x]-x}{2}, x, 3\right]$

Out[8] := $\frac{1}{2}ie^{-it}-\frac{1}{2}ie^{it}-\frac{1}{4}ie^{-2it}+\frac{1}{4}ie^{2it}+\frac{1}{6}ie^{-3it}-\frac{1}{6}ie^{3it}$

図 2 :パッケージよるフーリエ係数の計算

図 2 で In[6] はフーリエ変換パッケージの読み込み

である. (バージョン７以降のシステムではフーリエ変換パッケージがカーネルに含まれるようになったためこの行の入力は不要である)
In[7] で３次までの三角フーリエ級数を計算させた. 同様に In[8] で３次までの複素フーリエ級数を計算させた. 残念ながらパッケージは実計算向きであり, 一般の n 次のフーリエ係数は求められない.

3.4 区分関数

フーリエ係数の計算では, 区分関数を扱えると便利である. Mathematica の区分関数は記号的にも数値的にも扱える. 図２の計算では絶対値をうまく使って区分関数を表したが, バージョン７以降の Mathematica では区分関数を直接的に作ることが可能である.

矩形波 SquareWave[ ], 三角波 TriangleWave[ ] や鋸波 SawtoothWave[ ] が使えるようになった. これらの関数に, 絶対値 Abs[x], 単位階段関数 UnitStep[x], 符号 Sign[x], 整数部 IntegerPart[x], 小数部 FractionalPart[x], 最大の整数 (切り下げ)Floor[x], 四捨五入 Round[x], 最小の整数 (切り上げ)Ceiling[x], 切り取り Clip[x] 等の関数を組み合わせて区分関数を構成する. また, 範囲を指定して区分関数を作る Bool[ ] や Piecewise[ ] がある.

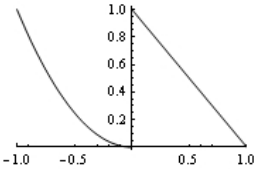
次の図３に区分関数, 図４に矩形波, 三角波, 鋸波の例をあげる.

In[9] := $y = \text{Piecewise}[\{\{x^2, x < 0\}, \{1 - x, x > 0\}\}]$

Out[9] :=
$$\begin{cases} x^2 & x < 0 \\ 1 - x & x > 0 \\ 0 & \text{True} \end{cases}$$

In[10] := $\text{Plot}[y, \{x, -1, 1\}]$

Out[10] :=



In[11] := $y = \text{UnitStep}[[\text{Sin}[x]]]$

Out[11] := $\text{UnitStep}[[\text{Sin}[x]]]$

In[12] := $\text{Plot}[y, \{x, 0, 30\}]$

Out[12] :=

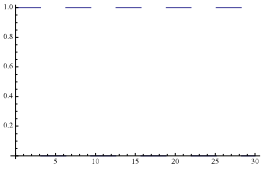
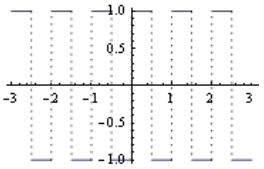


図３:区分関数

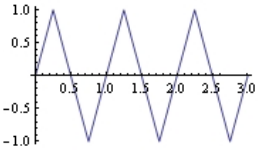
In[13] := $\text{Plot}[\text{SquareWave}[x], \{x, -3, 3\},$
$\text{ExclusionsStyle} -> \text{Dotted}]$

Out[13] :=



In[14] := $\text{Plot}[\text{TriangleWave}[x], \{x, 0, 3\}]$

Out[14] :=



In[15] := $\text{Plot}[\text{SawtoothWave}[x], \{x, -2, 2\}]$

Out[15] :=

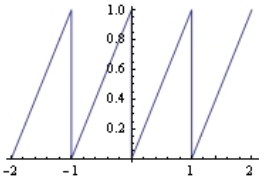


図４:矩形波, 三角波, 鋸波

図３の In[9] では $x < 0$ で x^2, $x > 0$ で $1 - x$ という区分関数を変数 y に定義した. この Piecewise[ ] 関数は区分ごとに, それぞれの区間での関数をすべての区間, コンマ”,”で区切って入力する. In[10] でこの関数 y の区間 $[-1, 1]$ のグラフを描かせた.

In[11] は $\sin x$ の階段関数を変数 y に定義した. In[12] で関数 y の区間 $[0, 30]$ でのグラフを描かせた.

図４は Mathematica で定義されている矩形波, 三角波, 鋸波をグラフで表示させたものである.

4. 他のフーリエ計算

今回の検証で数値計算的なイメージのある Mathematica でのフーリエ係数の計算も関数として計算できることが確認できた. 以前はフーリエ級数の次数を上げていってグラフを描かせ, もとの関数に近づいていく様子を見せるものが多くあったが, 普通にノートで計算するのと同じ計算ができるので, 問題集などの解と比較することで立式が正しかったか確認できる.

フーリエ変換などは初期のバージョンから基本関数として種々の定義形式による変換・逆変換が可能であった. フーリエ係数においては自分で関数を設定し, 積分区間を考慮して計算を実行して初めて解が分かる. このレベルの段階に達した利用者では基本関数として準備していなくても使用者が十分対応できるという作り手側の声も聞こえてきそうだ.

フーリエ変換のパッケージがカーネルに取り込まれたように, バージョンが上がるごとに機能が強化され使いやすくなる.

フーリエの収束定理を用いた級数の計算も問題なくこなすので, 他のフーリエ計算でも問題なく利用できることが検証できた.

5. まとめ

高専の 4 年の教科書「応用数学」を通して問題を解いた. 計算問題はほとんどの問題が Mathematica の基本関数で解ける. 低学年のときのように, 基本関数を入力してすぐ答えが得られるものと異なり, 定義にしたがって式をたて計算しなければならないものもあるが, どちらも正解を確認できる. そういう問題のほうが内容についての理解は深まる. 計算の入力では, それぞれの計算に応じて適切なオプションの設定が必要となるが, Mathematica の場合, 計算例を載せておくだけで, 必要な情報はヘルプメニューから引き出すことができる. 計算するための関数名や実際に使用するオプションが使用してある計算例があれば使いこなせるようになる. 低学年のときから Mathematica の利用になれておけば思考実験やシステムのプロトタイプの設計に利用できるようになる.

Web 上のインタラクティブな計算・結果の可視化を可能に webMathematica の話題のほうが賑やかになった観もあるが, Mathematica も区分関数や特殊関数が整備され, 偏微分方程式関連の機能向上も著しい. これからもますます使いやすくなっていくであろう.

数学問題の答え合わせをして欲しいという学生にも早くから数式処理ソフトのリテラシー教育を行っておけば自力で答え合わせができる. 学生は数式処理ソフトの使用法を体得すると同時に, いろいろな使い方を知ることになる. 数式処理ソフトは本来, 論文作成時の計算の検証に使用されてきたものであり, 技術者の基礎的な能力を向上させるために有用である. また, 情報をわかりやすく計画提案する能力も数式処理ソフトのリテラシーで向上するものと期待できる.

6. おわりに

最も商業的に成功しているといわれている数式処理ソフトは Mathematica であり, 現在の最新 Mathematica のバージョンは 8 である. パソコンの性能が向上するたびにソフトウェアのバージョンも向上し機能が強化される. 今回の調査で判明したように Mathematica は学生が問題を解くに当たっての補助機器として学生を助けることができる. バージョンがあがるにつれ使い易くなっており, web やネットワークの機能も取り込みつつある. また工学分野では, 設計, 開発, 生産の標準的ツールになりつつある.

本来, 解析学の分野では複素数を用いた計算が主流である. 電磁気学や量子力学でも複素関数を扱うのが普通である. 高専の学生が複素関数を十分に使いこなすレベルにあるかというと疑問を感じる. それは 2 次元空間から 2 次元空間への対応といった思考が必要で 3 次元空間図形認識の領域を超えることによって可能となる.

このような高度な概念を理解しようとするとき, 数式処理システムが提供する様々な機能が思考を助け, 新しい認識を生み出す力となる. 必要なときに計算を試したりアルゴリズムを確認するということがすぐにできる環境が手近にあれば, それは技術者の基礎的な能力を向上させ, みずから考えるという能力をはぐくむものと考えられる.

コンピュータの世界では, 携帯端末の登場やネット上のサーバを利用するという新しい潮流が起こっている. その流れの中で, 数式処理システムもますます変化していき, 研究・学習の中に溶け込んでいく. 今後とも数理科学分野で, 教育や研究に活動に活用される. 道具として電子機器を利用し, 人間の自然認識力を高め理解を深めるための提案をこれからもしていく.

参考文献

(1) S.Wolfram:「The Mathematica Book, Fifth Edition」,Wolfram Mdia, 2003.
(2) 田村直行:「神戸大学 Mathematica 入門ページ」, http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/mma/nyumon/. やシステムのヘルプの「Mathematica の第一歩」
(3) 八木善彦:「高専数学の学習と数式処理」, 神戸高専研究紀要, 第 48 号, pp.155-160, 2003.
(4) 高遠節夫, 斎藤斉,etc:「新訂　応用数学」, 大日本図書,2006.
(5) Wolfram Research:「Guide to Standard Mathematica Packages」,Wolfram Research, Inc.

神戸高専『研究紀要』 投稿規定（投稿の手引き）

１．まえがき

本誌は，神戸市立工業高等専門学校の研究紀要として毎年発行する．

２．編集委員会

『研究紀要』の編集，発行は，研究紀要編集委員会（以下，編集委員会と称する）がその任にあたる．編集委員会は，情報委員会により組織される．

３．投稿資格

原稿の内容は学術に関する未公開の論文，または，資料とする．投稿者は，神戸市立工業高等専門学校の教職員，前教職員，非常勤講師および在学生とする．共著論文または共著資料は，少なくとも前記１名を共著者として含まなければならない．

４．投稿方法

投稿者は，後述の「投稿上の注意」を熟読の上，本規定に適う形式で原稿を作成し，投稿すること．

最初，ワードプロセッサなどで作成したＡ４サイズの紙原稿１部を提出すること．紙原稿の裏面上部に，「論文タイトル」，「第一著者名」および「ページ番号／全ページ数」を記入すること．投稿原稿を封筒に入れ，その表に主たる連絡者名および論文名を記し，編集委員に提出すること．受理した原稿は全て編集委員会によって査読する．査読後，編集委員会によって採録または修正条件付採録と判定された原稿の著者は，ＰＤＦ形式で最終原稿を提出すること．

最終原稿の作成，提出にあたっては編集委員会の指示に従うこと．特に，ランニングヘッド，ページ番号および受理年月日は，編集時に一括処理するので原稿に記入しないこと．

著者には，抜き刷り（別刷）30 部を無償配布する．これを超える部数の抜き刷りは自己負担とする．

５．原稿の査読（校閲）

研究成果を発表する論文としての，また教育・研究に有用な資料としての体裁を整えるために，学内学識経験者による査読を行う．査読者は，編集委員会が選出，指名する．

査読結果に基づいて，編集委員会より，変更，削除など，原稿の修正再提出を求めることがある．著者による修正がなされない場合は，編集委員会の判断によって掲載を見送ることがある．また，編集委員会は，資料相当と判断した原稿の資料への，論文相当と判断した原稿の論文への変更を要求することもある．査読終了後の訂正は認められない．

査読者はいかなる理由であっても公表されない．

６．投稿上の注意

以下に示す投稿上の規定，注意は，指示や特記事項がない限り，論文，資料の両者に適用される統一規定となるので，投稿者は，原稿作成の前に必ず熟読すること．

＜6 - 1＞　フォーマット

ワードプロセッサなどを利用して投稿原稿を作成する際に，原稿の余白等は次のように設定する．また，フォーマットの種類は，論文の分野，内容に応じて，投稿者が表１の中から適当なものを選択すること．文字の大きさや文字数は，選択したフォーマットによって異なるので注意すること．

(a) 原稿は，Ａ４サイズで作成し，本投稿規定最終頁に示す形式を厳守すること．
(b) 余白：上 25㎜，下 24㎜，左右各 16㎜，段間 8㎜
(c) 文字の大きさ，片段の行数，文字数などは，下記の表１に従うこと．

表１　投稿原稿のフォーマット（論文，資料共通）

フォーマット	段組，文字・行数/１頁	文字の大きさ	制限枚数
１．和文（横書）	2 段組，24 文字×50 行	10 ポイント	原則として，６ページ以内でまとめること．超過の場合は10ページ以内とし，それを超えることは認められない．
２．英文	2 段組，48 文字×50 行	10 ポイント	
３．和文（縦書）	2 段組，33 文字×32 行	10 ポイント	
４．和文，英文(横書特例)	(和)1 段組，　50 文字×46 行 (英)1 段組，100 文字×46 行	10 ポイント	

＜6－2＞　表題ページ

(a) フォント・フォントサイズ

表題ページのフォント，フォントサイズについては，表２を参照すること．なお，表２では，フォントを明朝体，Times などに指定しているが，それに酷似した他のフォントを使用しても構わない．また，英語以外の外国語（独語，仏語など）を使用する場合は，表２の英文に準じるものとする．ただし，この場合，英語表題は必要となるので留意すること．

表２　表題ページに使用するフォント・フォントサイズ

フォーマット	表　題	著 者 名	英語表題	英語著者名	英文要旨	本　文
1. 和文(横書)	ゴシック体 18 ポイント	明朝体 12 ポイント	Times 14 ポイント	Times 12 ポイント	10 ポイント ・見出しの「**ABSTRACT**」はゴシック ・要旨本体は Times	明朝体 10 ポイント
2. 英　文	ゴシック体 18 ポイント	Times 12 ポイント				Times 10 ポイント
3. 和文(縦書)	ゴシック体 18 ポイント	明朝体 14 ポイント	Times 10 ポイント	Times 10 ポイント		明朝体 10 ポイント
4. 和文，英文 (横書特別)	上記の１(和文・横書)，２(英文)に準ずる					

(b) 表題・著者名

[1] 和文（横書）

- 表題は，原稿の２行目中央に記入し，２行にわたる場合は，原稿の２行目～４行目に適当な配置で記入すること．
- 著者名は，表題の後に１行あけて記入し，共著者名も同じ行に略さずに記入すること．
- 英語表題は，著者名の後に１行あけて記入し，２行以上にわたる場合は，適当な配置で記入すること．表題に使われる各単語の頭文字は，大文字とすること．ただし，冠詞・接続詞・前置詞は除く．
- 英語表記の著者名は，英語表題の後に１行あけて記入すること．名(First Name)は頭文字のみ大文字とし，姓(Family Name)は全て大文字とすること．
- 表題・著者名は，段組を行わずに中央揃えとすること．

[2] 英文（他の外国語の文）

- 表題は，原稿の２行目中央に記入し，２行にわたる場合は，原稿の２行目～４行目に適当な配置で記入すること．各単語の頭文字は大文字とすること．ただし，冠詞・接続詞・前置詞を除く．
- 著者名は，表題の後に１行あけて記入すること．名(First Name)は頭文字のみ大文字とし，姓(Family Name)は全て大文字とすること．
- 表題を英語以外の外国語で表記する場合，その表題の後に１行あけて，英語表記を記入すること．そして，さらに１行あけて，著者名を記入すること．
- 表題・著者名は，段組を行わずに中央揃えとすること．

［3］和文（縦書）

- 表題は，原稿の３行目から記入すること．このとき，表題の上部には，４字程度の余白をとること．
- 著者名は，８行目に略さずに記入すること．著者名の下部には，４字程度の余白をとること．
- 英語表題と英語著者名は，表題ページには記入せず，論末にアスタリスク記号を表示し，その下に
  “英語表題”：英語著者名
  の形式で記入すること．

(c) 著者の所属機関

著者の所属機関は，ページ左下に実線を引き，その下に記入すること．なお，連名の場合は，名前の後ろにアスタリスク記号を上付きで「*」，「**」のように付け，ページ左下に対応する所属機関を記入すること．

（注）著者の所属機関の表記法は，以下を参照すること．

○著者が本校に属する場合：学科，職名の順で記載．例）電気工学科准教授，機械工学科名誉教授
○本校以外の機関に属する場合：所属機関名を記載．例）××大学，△△株式会社，□□研究所
○本校に在籍する学生の場合：所属，学科・専攻を記載．例）本科都市工学科，専攻科応用化学専攻
○本校の卒業生の場合：所属・卒業年度を記載．例）△△株式会社（平成８年度卒）

(d) 英文要旨

論文として投稿する場合は，シングルスペースで 150 語程度の英文要旨を必要とする．ただし，和文（縦書）の論文，および，資料に関しては英文要旨は必要でない．また，英語以外の外国語（独語，仏語など）で本文を書く場合でも，論文であるならば英語による英文要旨は必要である．

- 英文要旨は，前述(b)の英語著者名の後に１行あけ，中央に「**ABSTRACT**」と表示すること．このとき，フォントはゴシック体で全て大文字とすること．
- 「**ABSTRACT**」から１行あけて，英文要旨の本文を記述すること．要旨を記述する際，左右に２文字程度の空白をとること．

(e) キーワード

- 英文要旨から１行あけて「*Keywords*:」と斜文字（イタリック）の文字スタイルで記述すること．
- 同じ行に続けて５つ以内の英文キーワードを記述すること．文字スタイルは標準体（Normal）を用いること．
- 各キーワードは，名詞形で記述し，それぞれをカンマ（,）により区切ること．また，特に意味がある場合を除き，全て小文字で示すこと．尚，文字の大きさは 10 ポイントとする．
- 英文キーワードが２行にわたる場合は，適切に配置し見やすいものにすること．本文が英語以外の外国語の場合，本文と同じ外国語を用いても構わない．
- 和文（縦書），資料に関しては，キーワードは必要としない．

(f) 本文

上述のキーワードから１行あけて２段組となる本文を書き出すこと．特例を除き，本文は２段組とする．

※ 英語表現，英文要旨，キーワード，および，英文論文など，外国語で記述する文章，単語は，それを読んだ国内外の読者が「正確明快に理解できる」ということに注意して執筆すること．

＜6‐3＞ 本文

本文は，章（チャプタ），節（セクション）に分け，それぞれに番号と適当な見出しを付け，読者が理解しやすいようにすること．このとき，章や節の見出しのフォントはゴシック体にすること．

(a) 章（チャプタ）について

本文中の各章の始めには，例えば，**「１．はじめに」，「２．実験操作」**，等々の章番号と適当な見出しを付け，改行してから文章を書くこと．また，各章の区切りは１行あけること．

(b) 節（セクション）について

一つの章をさらに細かい節（セクション）に分ける場合は，例えば，**「2. 1 分析条件」**や**「3. 2 温度変**

化の追跡」，等々の節番号と適当な見出しを付けること．文章は原則として改行せずに見出しから２文字あけて書き始めること．構成上，改行したほうが見やすくなる場合は改行しても構わない（例えば，見出しが長くなり，文章が若干しか欠けない場合など）．セクションの区切りは，行をあけないこと．

※ 節をさらに細かく分ける場合も，適当な見出しは必要となる．このとき，細節番号の決め方やフォントなどは著者の見識にゆだねることとする．例えば，「2. 2. 1」，「2. 1. 2」や「(a)」，「(b)」，「(c)」など．

＜6－4＞ 数式

数式には，「(1)」，「(2)」のように通し番号を付けること．また，長い数式等が存在し，一つの式が２行以上にわたる場合は，次行の冒頭に，「＝」，「＋」，「－」，「×」，「÷」などの記号がくるようにすること．

＜6－5＞ 図（写真を含む），表

ＰＤＦ原稿を印刷したとき，図表が鮮明に描かれるように作成すること．説明文（caption）は図表の中央にくるようにセンタリングし，文字サイズは，本文と同じか少し小さめであることが望ましい．

(a) 図（写真を含む）について

本文中の各図には，「図１」，「図２」，「Figure 1」，「Figure 2」のように通し番号を付け，１文字あけて図の説明文を書くこと．通し番号と説明文は，横書原稿の場合は図の下部に，縦書原稿の場合は図の右側に書くこと．図の大きさは，左右（または上下）どちらかの１段の中に納まることが望ましいが，図の性質上，２段にわたる必要がある場合は，２段使用しても構わない．

（b）表について

本文中の各表には，「表１」，「表２」，「Table 1」，「Table 2」のように通し番号を付け，１文字あけて表の説明文を書くこと．通し番号と説明文は，横書原稿の場合は表の上部に，縦書原稿の場合は表の右側に書くこと．表の大きさは，左右（または上下）どちらかの１段の中に納まることが望ましいが，表の性質上，２段にわたる必要がある場合は，２段使用しても構わない．

＜6－6＞ 謝辞

論文や資料に謝辞を必要とする場合は，最終節の文末の後に１行あけて，段の中央にゴシック体で「**謝辞**」，または「**Acknowledgement(s)**」という見出しを付け，次の行から本文中と同じフォントで記述すること．謝辞には節番号は付けないこと．助成金，装置の借用，資料の提供を受けた場合は，謝辞に記述すること．

＜6－7＞ 参考文献（引用文献）

(a) 参考文献の書き方

本文中で引用した参考文献は，最終節の文末の後（謝辞がある場合は，その後）に１行あけて，段の中央にゴシック体で「**参考文献**」，または「**REFERENCES**」という見出しを付け，次の行から本文中と同じフォントで記述すること．参考文献には節番号は付けないこと．なお，和文，英文以外の論文は，使用した言語で「参考文献」を意味する単語を見出しとして記載すること．

引用した参考文献には，本文中で現れる順番に通し番号を付け，左詰めで書くこと．参考文献の記述様式は，原則として，著者名，題目（表題），論文誌名（雑誌名または出版社），巻，号，ページ，発表年月（出版年月）の順に記述すること．

（参考文献の記述例）以下の例は全て架空のものである．

(1) 神戸太郎，高専次郎，その他：「高専教育に関する研究」，神戸高専研究紀要，第 55 号，pp.30-35，2000.
(2) 神戸太郎著：「高等専門学校の変遷」，コロナ社，第２章，1975.
(3) 調査専門委員会編集：「最近の科学の進歩について」，電気学会，1989.
(4) 神戸三郎，その他：「有機化合物の発光特性」，応物学会全国大会講演論文集[3]，pp.3-75，2000.
(5) 神戸花子：「SI デバイスの応用」，物理学会 SI デバイス研究会講演論文集，Vol.7，pp.23-28，1998.
(6) 高専史郎，高専五郎：「長良川河口堰の現状」，土木学会論文誌 A，Vol.116-7，pp.245-253，1997.
(7) Hanako Kosen, Taro Kobe, et al.：”A Novel Scheme for DSG System”，IEE-Transactions on Nuclear Science，Vol.30，pp.555-561，1999.
(8) Taro Kobe：”Design Considerations for New Circuit Topology”，Proceedings of IEEE-International Symposium on Power Electronics Circuit (SPEC98)，Vol.1，pp.23-28，1998.

英文の場合,「Conference」や「Symposium」,「International」等を「Conf.」,「Symp.」,「Int.」と略しても構わない. また,「Proceedings」や「Transactions」等も「Proc.」,「Trans.」と略しても構わない.

上記の文献(8)を略式で記述すると以下のようになる.

(8) Taro Kobe : ”Design Considerations for New Circuit Topology”, IEEE Proc. Int. Symp. on Power Electronics Circuit (SPEC98), Vol.1, pp.23-28, 1998.

（b）本文中での引用

本文中に引用する場合は,その文章や項目の終わりに,「(1)」,「(1),(3)」,「(4)-(8)」のように,文末に挙げた参考文献の文献番号を上付で記入すること. また,参考文献中の文章等をそのまま引用する場合は引用符,「 」や“ ”で括るか,横書の場合は左端に,縦書の場合は上端に,本文より２～３文字（４～６文字）多めに余白を取り,引用箇所が明確に識別できるようにすること.本文と引用箇所の間に１行空白を入れても構わない.

一般に公開されていない委員会報告等は参考文献としてあげないようにすること. また,掲載は決定しているが未発行の論文等は,巻,ページの代わりに「印刷中」もしくは「in press」と書くこと.

尚,ページのレイアウトに関する詳細は,本規定の末尾に添付した『神戸高専の紀要に関するフォーマット』を参照すること.

７．著作権

神戸高専研究要に掲載された論文,資料の著作権（著作財産権, Copyright）は神戸市立工業高等専門学校に帰属する.

尚, 本投稿規定は, 平成 22 年 12 月に改正され, 平成 22 年度から施行される.

（平成 18 年 3 月改訂）

（平成 21 年 3 月改訂）

（平成 22 年 12 月改訂）

25mm

(※1行あける)

神戸高専の紀要に関するフォーマット (18ポイント)

(※1行あける)

神戸太郎*　　高専次郎**　・・・(12ポイント)

(※1行あける)

Format for Memoirs of Kobe City College of Technology (14ポイント)

(※1行あける)

Taro KOBE*　　Jiro KOSEN**　・・・(12ポイント)

(※1行あける)

ABSTRACT　・・・(10ポイント、ゴシック体)

(※1行あける)

2文字の余白

150語程度の英文要旨を，10ポイント，Timesで書く．
この時，左右にはそれぞれ2文字程度の余白をとることを忘れないようにする．

2文字の余白

(※1行あける)

16mm

16mm

Keywords: format, memoirs, reference, section　・・・(※keywordsのみイタリック（斜文字)、)

(※1行あける)

1．はじめに

ここから，本文を書き始める．この時，章（チャプター）の見出しのみ，ゴシック体にする．本年度から，オフセット印刷となるため，執筆者はフォーマット等十分な注意を払うこと．

2．章（チャプター）の分け方

章と章の区切りには，上記のように改行し，必ず1行あける．また，本文は，章の見出しを記述した行から，改行して書き始めること．

2．1　節（セクション）について

セクションの見出しには、上記のように「.」を用いた節番号をつける．このとき，セクションの本文は，セクションの見出しを記述した行から改行せず，2文字あけて書き始めること．下記のように，見出しでその行のほとんどが埋る場合は，改行して本文を書き始めても構わない．

2．2　節（セクション）を更に細かく分ける場合

更に細かく分けられた節には，適当な見出しは必要であるが，その記述の方法や使用するフォントは，著者の見解に委ねることとする．例として，「2.2.1」、「2.2.2」や (a), (b), (c) など．

3．図や表について

右段のように，図や表を記載すること．通し番号と説明文は，図の場合は下部，表の場合は上部に記載．

*　一般科　教授
**専攻科　電気電子工学専攻

所属はここに記述する。

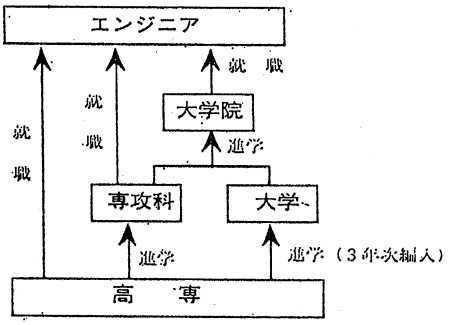


図1　高専卒業からエンジニアまでの経路

表1　投稿紀要のフォーマット

フォーマット	段組、文字・行数／1ページ	文字の大きさ	制限枚数
1．和文(横書)	2段組，24文字×50行	10ポイント	原則として，6ページ以内でまとめること．
2．英文	2段組，48文字×50行	10ポイント	
3．和文(縦書)	2段組，33文字×32行	10ポイント	超過の場合は10ページ以内，それ以上は認めない．
4．和文，英文(横書特例)	1段組，48文字×46行 1段組，96文字×46行	10ポイント	

4．まとめ

本年度より，オフセット印刷となるため投稿規定が変更されている．この印刷法では，投稿者が提出した原稿がそのまま写真製版用原稿として用いられるため，決められた規定には十分注意を払って原稿を作成して頂きたい．

神戸高専研究紀要を，より充実したものにするため，みなさまのご協力をお願い致します．

参考文献

(1) 研究振興委員：「神戸高専研究紀要　投稿規定」，神戸高専研究紀要，第37-2号，pp.75 - 78，1999

24mm

神戸高専研究紀要第 50 号　編集委員

笠井　正三郎（総合情報センター長）	小林　洋二　（副センター長）	戸崎　哲也　（副センター長）
児玉　宏児　（副センター長）	宮下　芳太郎（副センター長）	東　　義隆　（機械工学科）
中村　佳敬　（電気工学科）	長谷　芳樹　（電子工学科）	渡辺　昭敬　（応用化学科）
宇野　宏司　（都市工学科）	石塚　正洋　（一般科）	一瀬　昌嗣　（一般科）
福田　孝義　（総合情報センター）	横部　保美　（学生係）	乾　　あさ子（図書館）
萩庭　恵美　（図書館）		

研　究　紀　要　第 50 号　（非売品）

発　行　日　平成 24 年 3 月 1 日

発　行　者　神戸市立工業高等専門学校

神戸市西区学園東町 8 丁目 3 番地

TEL (078) 795－3311　(代)

FAX (078) 795－3314

神戸市広報印刷物登録

平成23年度　第356号　(広報印刷物規格 A-6 類)