目　　次

論　　文

繊維強化高分子材料のＸ線応力測定　渡邊　義隆，西田　真之，英　　崇夫 …… 1
予混合と拡散燃焼における火炎構造と安定限界に関する研究　正司　悠介，吉本　隆光 …… 7
水平管内におけるマイクロバブルによる摩擦圧力損失低減に関する研究
星野　　剛，青田　晃一，林　　公祐，赤対　秀明 …… 13
鉛直管内旋回気液二相流の流動様式とその判別法　高垣慎太郎，本間　直樹，林　　公祐，赤対　秀明 …… 19
大型柔軟宇宙構造物の最適分散サーボ系の設計法　河野　　佑，小林　洋二 …… 25
小中学生向け鋳造体験教室用小型鋳造装置の開発　堀　　賢史，早稲田一嘉，和田　明浩，西田　真之 …… 31
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
川邊　優大，早稲田一嘉，藤本　健司 …… 37
レスキューロボット用ドア開放システムについての研究
井上　卓茉，小林　　滋，小林　泰弘，山本　祥弘，大坪　義一，高森　　年 …… 43
GFRP貯槽の長期寿命評価に対する超音波検査の適用　瓜本　哲也，和田　明浩 …… 49
大気圧プラズマ生成のためのバイポーラパルス高電圧電源の試作　赤松　　浩，桐山隆太郎 …… 57
デルタ関数の不連続関数における有用性について　松田　忠重 …… 63
手書き風ワープロ文章のフォントメトリックによる印象の変化　才木　常正，林　　昭博 …… 69
ウェーブレット変換を用いた楽音の解析　木場　隼介，笠井正三郎 …… 75
複合光交照法を用いた分光視感度の推定　常深　義博，尾崎　　進 …… 83
オキソモリブデン複核ユニットを有する硫黄架橋異種多核錯体の合成と性質　宮下芳太郎，岡本　健一 …… 89
RNAi-毛状根形質転換法の評価　下村憲司朗 …… 93
西神ニュータウンの地理情報で見る経年変化　中尾　幸一 …… 99
都市河川「伊川」における水生生物の生息状況と水温の季節変動　宇野　宏司，中太　大智，田中　　梢 …… 105
集約型都市の形成と環境影響に関する研究　－地下鉄沿線の交通流動変化－　橋本　渉一，福西　佑紀 …… 111
授業アンケート結果から窺える学生気質　大多喜重明，長井　清香 …… 117
MEP.1 planの構成について　末次　武明 …… 123
高等数学修得のためのライセンスフリー教材の作成について　横山　卓司 …… 129
英語プレゼンテーション・スピーチコンテスト発表者のアイコンタクト解析　西山　正秋 …… 133
日本手話の連続動詞構文　今里　典子 …… 137
プレゼンテーションにおけるポーズの役割　上垣　宗明 …… 143
米国ブッシュ政権の安全保障戦略の形成過程　高橋　秀実 …… 149
米国ブッシュ政権の安全保障戦略と新保守主義　高橋　秀実 …… 159

資　　料

国際政治年表：2001～2008（ブッシュ政権時代）　高橋　秀実 …… 169
21世紀における外国語学習と文化学習　前田誠一郎 …… 173
数学教育におけるテクノロジー利用　八木　善彦 …… 177
２自由度PID制御系の近似微分を考慮した最適パラメータ調整指針　田口　秀文 …… 187

CONTENTS

PAPERS

X-ray Residual Stress Measurement of Fiber Reinforced Plastic Composite.
Yoshitaka WATANABE, Masayuki NISHIDA, Takao HANABUSA ····· 1
Research on Flame Structure and Stability Limit of Premixed and Diffusion Combustion
Yusuke SHOJI, Takamitsu YOSHIMOTO ····· 7
Reduction of Frictional Pressure Drop in Micro Bubble Flow in a Horizontal Pipe
Takeshi HOSHINO, Kouichi AOTA, Kosuke HAYASHI, Hideaki SHAKUTSUI ····· 13
Flow Pattern of Swirling Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Vertical Pipe and a Flow-Pattern Identification Method
Shintaro TAKAGAKI, Naoki HONMA, Kosuke HAYASHI, Hideaki SHAKUTSUI ····· 19
A Design Method of Optimal Decentralized Servo Control for Large Flexible Space Structures
Yu KAWANO, Yohji KOBAYASHI ····· 25
Development of a Small Casting Device for an Open Class to Students of Elementary School and Junior High School
Satoshi HORI, Kazuyoshi WASEDA, Akihiro WADA, Masayuki NISHIDA ····· 31
Development of an Interactive E-learning System Including Mobile Devices
Yudai KAWABE, Kazuyoshi WASEDA, Kenji FUJIMOTO ····· 37
Development of a Door Opening System for Rescue Robots
Takuma INOUE, Shigeru KOBAYASHI, Yasuhiro KOBAYASHI, Yoshihiro YAMAMOTO, Yoshikazu OHTUBO, Toshi TAKAMORI ····· 43
Application of Ultrasonic Testing to Long-term Life Estimation of GFRP Vessels
Tetsuya URIMOTO, Akihiro WADA ····· 49
Production of a High-Voltage Bipolar-Pulsed Power Supply for Atmospheric Pressure Plasma Jet
Hiroshi AKAMATSU, Ryutaro KIRIYAMA ····· 57
On Usefulness of the Delta Function Applied to Discontinuous Functions Tadashige MATSUDA ····· 63
Impression Changes by Font Metrics of Word-processed Sentences like Handwriting
Tsunemasa SAIKI, Akihiro HAYASHI ····· 69
Tone Analysis of Musical Instruments using Wavelet Transform
Shunsuke KOBA, Shozaburo KASAI ····· 75
The Calculate of Spectral Luminous Efficiency with Compound Light Flicker Photometry
Yoshihiro TSUNEMI, Susumu OZAKI ····· 83
Synthesis and Properties of S-Bridged Heteropolynuclear Complexes Involving Oxomolybdenum Dinuclear Unit Yoshitaro MIYASHITA, Ken-ichi OKAMOTO ····· 89
Evaluation of RNAi-Hairy Root Transformation Technique Kenshiro SHIMOMURA ····· 93
The Study of the Passing Year Change Which is Observed by the Geographic Information About the Seisin New Town Kouichi NAKAO ····· 99
Habitat Distribution of Aquatic Insects and Seasonal Change of Water Temperature in Ikawa River Kohji UNO, Daichi NAKATA, Kozue TANAKA ····· 105
Relation Between Compact City Formation and Environment Pollution
—Traffic Flow Shift along Kobe City Subway—
Shoichi HASHIMOTO, Yuuki FUKUNISHI ····· 111
Student Character Inferrend from The Result of Questionnaire about Class in KCCT Shigeaki OHTAKI, Kiyoko NAGAI ····· 117
Construction of Main Effect Plus one Plans Takeaki SUETSUGU ····· 123
Making Free Documents for Teaching and Learing Mathematics Takuji YOKOYAMA ····· 129
Analysis on the Eye Contact of Speakers in English Presentation & Speech Contest
Masaaki NISHIYAMA ····· 133
Serial Verb Constructions in JSL Noriko IMAZATO ····· 137
The Role of Pause Duration on the Presentation Muneaki UEGAKI ····· 143
The Process of Formation of the US Security Strategy of Bush Administration
Hidemi TAKAHASHI ····· 149
The US Security Strategy of Bush Administration and Neoconservatives Hidemi TAKAHASHI ····· 159

RESEARCHES AND FINDINGS

The Chronological Table of International Politics 2001～2008 (Bush-era) Hidemi TAKAHASHI ····· 169
Language Learning and Cultural Learning in the 21st Century Seiichiro MAEDA ····· 173
Mathematics Education with Technology Yoshihiko YAGI ····· 177
Optimal Parameter Tuning subject to Approximate Derivative in Two-Degree-of-Freedom PID Control Systems Hidefumi TAGUCHI ····· 187

繊維強化高分子材料のX線応力測定

渡邊義隆*　西田真之**　英崇夫***

X-ray Residual Stress Measurement of Fiber Reinforced Plastic Composite.

Yoshitaka WATANABE*　Masayuki NISHIDA**　Takao HANABUSA***

ABSTRACT

Recently, FRP are increasing by the explosion of applications in industrial fields. The stress estimation of FRP is expected and needs to establish the reliable stress measurement method under there background. In this study, the residual stresses in FRP samples were examined by X-ray stress measurement technique. There are few report of residual stress investigation in macromolecule materials by the X-ray stress measurement with typical reflection method. The two kinds of reason exist in these situations, one is the diffraction peaks from macromolecule appear on 2θ low angle region. Another is the problem of ψ angle width in $\sin^2\psi$ method. Transmission method was employed for residual stress measurement of HDPE composite as the new trial in this study. For actual experiment, the small tensile testing machine was mounted on the X-ray diffract meter. Alternation of peak positions were measured under the several applied stresses. From these results, 2θ-$\sin^2\psi$ diagram expressed the linearity on regression line of the measurement data of several long time, and gradients of regression line correspond to applied stress levels. The other hand, generated strain in HDPE was measured under the tensile stress condition. The microscopic strain and the macroscopic strain were measured respectively. At the moment when tensile load applied, the macroscopic strain was rapidly increased, after that, the extension was gradually-increased. In the case of the microscopic strain has a much lower than the macroscopic one.

Keywords: X-ray, Residual Stress Measurement, FRP

1. はじめに

航空・宇宙分野などを筆頭に様々な工業分野において複合材料の適用が急増し，その重要度もまた増加している．代表的な複合材料の一つとして繊維強化プラスチック（以下，FRP）が挙げられる．しかし複合材料には残留応力の問題が存在する．残留応力には主に外力に起因する機械的な残留応力と，複合材の熱膨張係数の相違に起因する熱的な残留応力とが存在する．残留応力は材料の疲労や強度などの機械的な性質に影響を与え，性能の低下につながることが知られている．そのためFRPに代表される複合材料に対して精度の高い残留応力の評価法の確立が期待されている．

多くのFRP材料の母材には高分子材料が使用されている．しかし，X線を高分子材料に適用する試みはいくつか報告されているが[1]，その数は非常に少ない．その理由は第一に高分子材料においてX線の回折線ピークが低角側に現れるためである．回折線ピークが低角側に現れることによって，ひずみ測定の精度が低下すること，低角に出現するピークを用いて従来の反射法を使用するには測定精度の高い装置が必要であるためである．

本研究においては，高密度ポリエチレン（HDPE）において透過法を用いたX線応力測定を行う．測定においてこれまでの反射法ではなく透過法を用いることで前述の問題点を克服し，高分子材料における精度の高い応力測定を可能とする試みについて報告する．

*　専攻科　機械システム工学専攻
**　機械工学科　教授
***　徳島大学　教授

2. 透過法を用いたX線応力測定

2.1 X線応力測定の基礎式　X線応力測定法は回折現象を用いて材料を構成する結晶を一種のゲージとして利用し，弾性理論より結晶格子面間隔の物理的変化から直接ひずみおよび応力を非破壊・非接触で測定する手法である．したがって回折現象が生じる材料については，X線応力測定法が適用できる可能性がある．

通常，金属に対するX線の進入深さが数μm程度であることから，反射回折法を用いて表面近傍の応力が評価される．しかしながら，本研究で目的としている高分子材料においては，X線の進入深さが深く，今回母材として用いるポリエチレンの場合は厚さ2mm程度までなら透過することが知られており，透過法を用いたX線回折ピークを利用することが可能となる．

また，低角に出現する高分子材料の回折線ピークを測定する場合，通常の反射法で並傾法を用いた場合は$\sin^2\psi$法に適用するψ角を十分確保できない問題があるが，透過法を用いればこの点も解決される．

逆に，ピークの出現位置が低角側であるほど ψ 角を広く設定できることになる．また，光学系としては透過の場合は集中ビーム法は逆に拡散してしまうので，平行スリットもしくはコリメータを用いた平行ビームを使用する必要がある．

Fig.1 は材料表面において反射回折線を用いた場合の座標系であり $\sin^2\psi$法の基礎式は次式で与えられる．

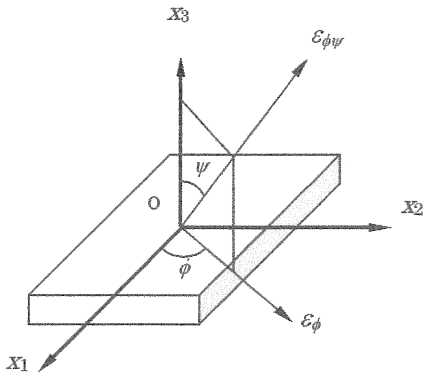


Fig. 1 Coordinate system and definition of the ψ and ϕ angles.

$$\varepsilon_{\phi\psi}=\frac{1+\nu}{E}(\sigma_{11}\cos^2\phi+\sigma_{12}\sin^2\phi+\sigma_{22}\sin^2\phi-\sigma_{33})\sin^2\psi+\frac{1+\nu}{E}\sigma_{33}-\frac{\nu}{E}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3) \quad (1)$$

透過 X 線回折を用いた場合もこの基礎式は同じものが適用でき，求める応力の方向が主軸 x_1 方向に一致する $\phi=0°$ の場合，回折線と試料のなす角 ψ の関係は Fig.2 のようになる． また，この場合，式(1)において $\phi=0°$ より式(2)となる（以下，応力記号の添え字は一文字で代表する）．

$$\varepsilon_{\phi=0,\psi}=\frac{1+\nu}{E}(\sigma_1-\sigma_3)\sin^2\psi+\frac{1+\nu}{E}\sigma_3-\frac{\nu}{E}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3) \quad (2)$$

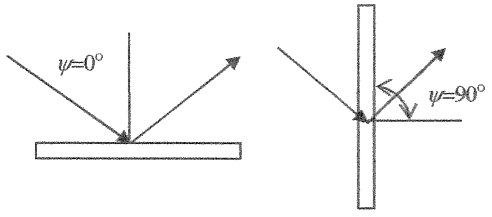


Fig.2 Relations of the sample setting and ψ angle.

ここで，反射回折線を利用した $\sin^2\psi$法の場合は X 線の進入深さがきわめて小さいことから平面応力状態が成立し，試料表面の法線方向応力 σ_3 を無視することができる．しかしながら，透過法においては試料内部を透過してきた回折線を利用するため，一般的には $\sigma_3=0$ と仮定することができない．本研究においてはサンプルの厚さを薄くすることで，試料表面法線方向の応力をゼロと仮定した．

ここで，$\sigma_3=0$ より式(2)は $\varepsilon_{\phi=0,\psi}$ を ε_ψ で表して式(3)となる．

$$\varepsilon_\psi=\frac{1+\nu}{E}\sigma_1\sin^2\psi-\frac{\nu}{E}(\sigma_1+\sigma_2) \quad (3)$$

この式(3)は，試料表面の法線方向応力 σ_3 を無視することができる仮定の元では反射回折線を用いた $\sin^2\psi$法とまったく同じ式を用いることができる．

また，本研究では応力測定標準に準じて，ひずみ ε_ψ を回折角 2θ で表記し，次式の応力式を用いた．

$$\sigma_1=-\frac{E}{2(1+\nu)}\cot\theta_0\frac{\partial(2\theta_\psi)}{\partial(\sin^2\psi)}\frac{\pi}{180} \quad (4)$$

2. 2 透過法における吸収補正　透過 X 線で応力測定を行う場合 ψ 角の傾きにより試料内部を通る X 線の経路長さも変化する，このため吸収に対する補正が必要である．Fig.3 に透過法における経路長さと照射部分の体積の関係を示す．

この図より入射 X 線と回折 X 線の強度比 R は以下の式で表される．

$$R=\frac{\cos\theta\left|e^{-\mu t/\cos(\theta-\psi)}-e^{-\mu t/\cos(\theta+\psi)}\right|}{\mu t e^{-\mu t/\cos\theta}\left\{\left[\cos(\theta-\psi)/\cos(\theta+\psi)\right]-1\right\}} \quad (5)$$

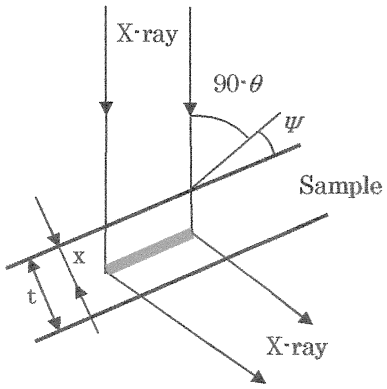


Fig.3 Path length and irradiated volume in the transmission method.

3. 試料の作製

本研究において用いた高密度ポリエチレンは二相からなる結晶構造をしている．一つは非晶質相であり，他方は結晶化相である．この結晶化相を今回はX線により測定することで高密度ポリエチレンの応力測定を行っている．

Fig. 4にポリエチレンの分子構造モデルを示す．ポリエチレンは斜方晶の結晶構造であり，異なる長さを持つ結晶軸がそれぞれ90°の角度を保っている．それらの値は $a = 0.740, b = 0.493, c = 0.253$ nm および $\alpha = \beta = \gamma = 90°$ である．また，作製にはヒートプレスを用いている．Fig. 5にヒートプレスによるポリエチレンシート作製の概略を示す．

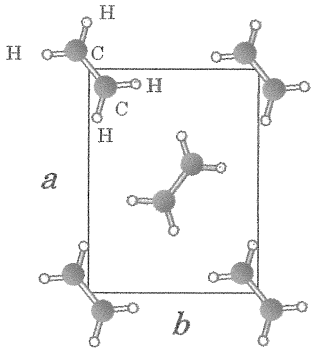


Fig. 4 Molecular crystal model of polyethylene.

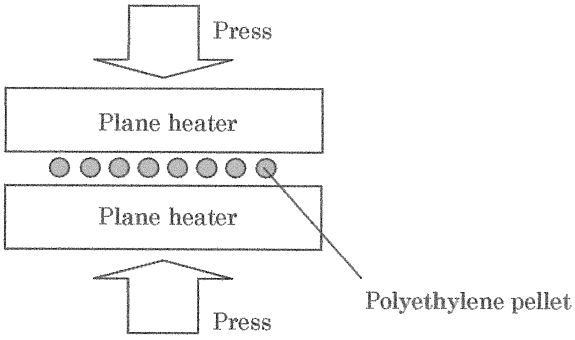


Fig. 5 Schematic diagram of heat press system.

試料の作製においてヒーターの温度は約110℃とし，ペレット状の高密度ポリエチレンをシート状に成型した．最終的な試料寸法は15mm×45mm，厚さ0.45mmとなった．

4. 測定方法

4.1 X線的弾性定数の測定　X線における応力測定は一定の hkl 回折面からの情報を元に格子ひずみを計算することで求められる．通常，材料の機械的特性，特に弾性定数は等方均質材料における巨視的な値が知られている．本研究におけるポリエチレンには結晶質相と非晶質相が混在しており，この全体の平均的な弾性定数が巨視的弾性定数として知られている．しかしながら，X線で測定するのは結晶質相のひずみであることから，微視的な弾性定数と巨視的な弾性定数は大きく異なることが考えられる．このため，本研究においては結晶質相に依存する微視的な弾性定数を X 線的弾性定数として測定した．

測定にはいくつかの負荷を試料に与え，その際の $\sin^2\psi$線図の傾きと負荷応力との関係から X 線的弾性定数を求めた．その際に用いた式は式(6)で表される．これは反射回折線を用いた場合の式と同様である．

$$\frac{E}{1+\nu} = -2\tan\theta_0 \frac{1}{\partial M/\partial\sigma}\frac{180}{\pi} \qquad (6)$$

Fig.6 に透過法による応力測定の様子を示す．小型の引張試験器をゴニオメータに取り付け，0N から 2N 毎に段階的に引張荷重を与えて $\sin^2\psi$法によって測定を行った．

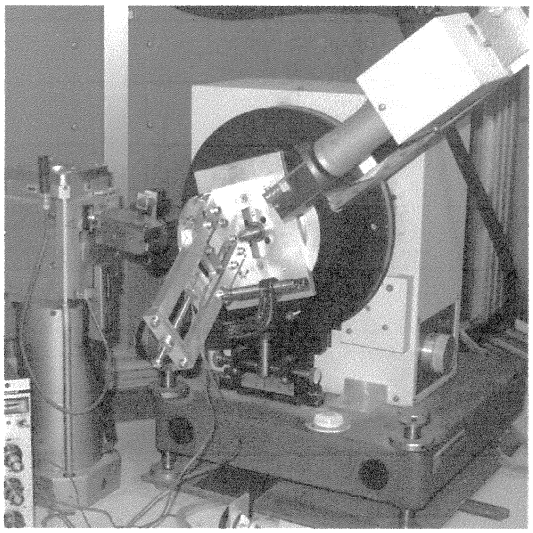


Fig. 6 Photograph of transmission measurement by tensile testing device and parallel beam system.

高密度ポリエチレンのピーク形状を Fig.7 示す．最も大きいピークが得られる 110 回折面 2θ=32.15° を使用することとした．前述のとおり，透過法を用いることで低角に現れる回折ピークに対して十分なオフセット角を確保することが可能となった．また，低角領域の測定においてはひずみ測定の精度が減少することが知られているが，高密度ポリエチレンなどの高分子材料の場合，ひずみ量が金属の約 100 倍程度と非常に大きくなるため，感度の低下にも問題なく測定することが可能である．

さらに，$\sin^2\psi$法は平面応力状態において成り立つ手法であるが，今回作製した試料の厚さは0.45mm と十分薄いことから，平面応力状態であると考えて差し支えない．

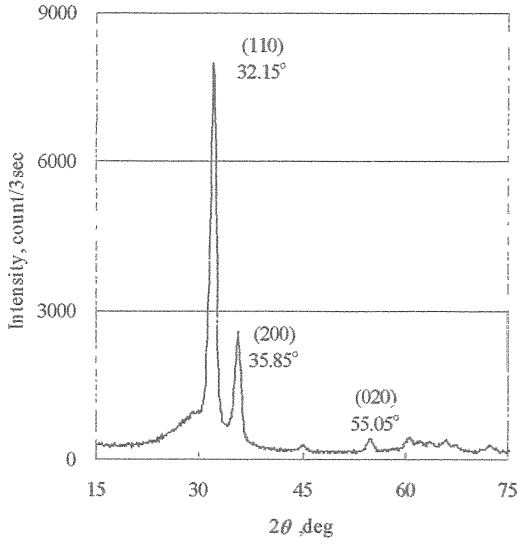


Fig.7 X-ray diffraction profile of polyethylene.

Table 1 に本研究における X 線応力測定の測定条件を示す．特性 X 線に CrKα線を使用し，測定法としては透過回折を用いた並傾法[(2)]を採用した．オフセット角の測定角範囲は $\sin^2\psi$=0.6～1.0 とし，回折面には 2θ= 32.15° に現れる 110 回折面を用いた．また，スリット系には平行スリットを用いている．さらに，ピーク位置の決定には吸収補正を行った後にガウスフィッティングにより算出した．回折線ピークは低角側に非晶質相からのハローが存在し，ピーク位置の算出に影響を与えた．このため，非晶質ピークの分離補正も行い精度の向上を図っている．

Table1 Condition of the X-ray stress measurement.

Characteristic X-rays	CrKα
X-ray optics	Parallel beam
Tube voltage	40 kV
Tube current	25 mA
$\sin^2\psi$	0.6～1.0, 0.1 step
hkl plane	110
Diffraction angle	2θ= 32.15°
Filter	Vanadium
Irradiated area	5 mm × 5 mm

4.2 ひずみの時間依存性の測定　次に，高密度ポリエチレンにおける変形の時間依存性，すなわちクリープの測定を行った．X線的弾性定数の測定において引張荷重を与えるが，測定に使用した引張試験器ではネジを用いて荷重を与えているためクリープによる応力の変動が発生していることが推測される．これを防ぐために測定試料への引張荷重は重りを吊り下げることによって与える．

測定は X 線による微視的なひずみ測定と，並行して位置出し顕微鏡による巨視的なひずみ測定を行った．微視的な変形は，X 線的弾性定数を測定したときとほぼ同様に，透過法を用いて 110 回折面における結晶格子ひずみの変化を測定する．試料に約 30N の吊り下げ式の引張荷重を加える．測定試料は 15×45mm，厚さ 0.45mm の物を用いた．またピーク位置の決定も X 線的弾性定数の測定と同様に，吸収補正を行った後にガウスフィッティングにより算出した．巨視的なひずみ測定は，測定試料に 2 つの評点を設定，その評点距離の変化を測定する．測定試料は 15×100mm，厚さは 0.45mm，標点距離は 65mm とした．負荷荷重は微視的な変形と同様に約 30N とした．Fig.8 に巨視的な変形の測定の様子を示す．

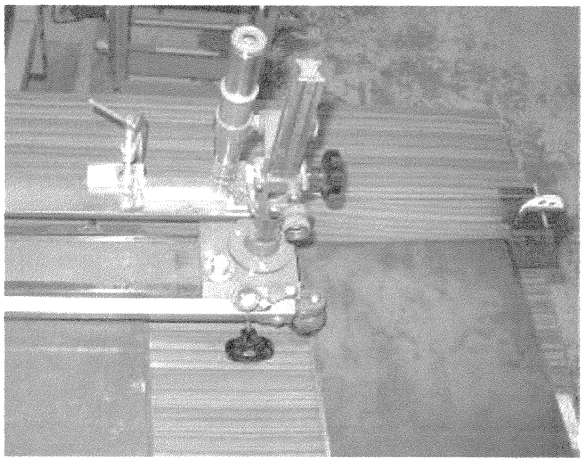


Fig.8 Photograph of macroscopic strain measurement.

5. 測定結果と考察

Fig.9 に負荷応力を段階的に加えていったときの 2θ-$\sin^2\psi$線図の一例を示す．いずれの負荷荷重に対しても直線性を示さない一例である．Fig.9 において，それぞれの負荷応力が測定中に一定であるならば，結晶格子面間隔 d は $\sin^2\psi$に対して直線関係を示すはずである．しかし，結果的にばらつきが発生したということは，測定中に格子面間隔 d に何らかの変化が生じたことが推察される．このような変動の原因はポリエチレン試料のクリープによる応力緩和や引張変形による配向などが考えられる．

そこで，次に一定負荷状態での高密度ポリエチレンの回折線ピーク位置と時間との関係を測定した．

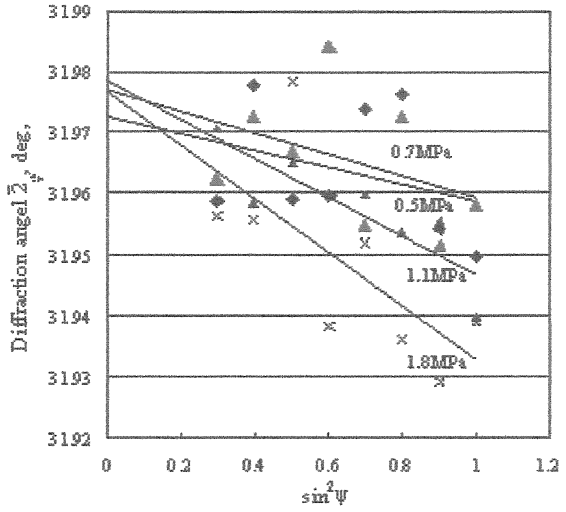


Fig.9 2θ-$\sin^2\psi$ diagram for the several applied stresses in 110 diffraction. (One example of the scattered date.)

Fig.10 にその結果を示す．ここで，$\sin^2\psi$=1 におけるポリエチレンの無負荷状態でのひずみを測定したのち，3.0MPa の負荷応力を与えた状態での回折角度の変化の測定を行った．Fig.9 の測定において一つの負荷応力に対してそれぞれ約 7～8 分程度の測定時間を要していることから，負荷応力は約 20 分維持してピーク角度の変化を測定し，その後，除荷して再度測定を行った．Fig.10 より，負荷応力を与えた瞬間に回折線ピークが 32.07° 付近へ移動した後，時間経過と共に徐々に高角側へと移行していることがわかる．これは結晶格子面間隔が時間に応じて小さくなっていることを示し，ことから結晶化相において応力緩和が生じているものと考えられる．その原因については後述の巨視的なひずみの測定にて調査を行った．

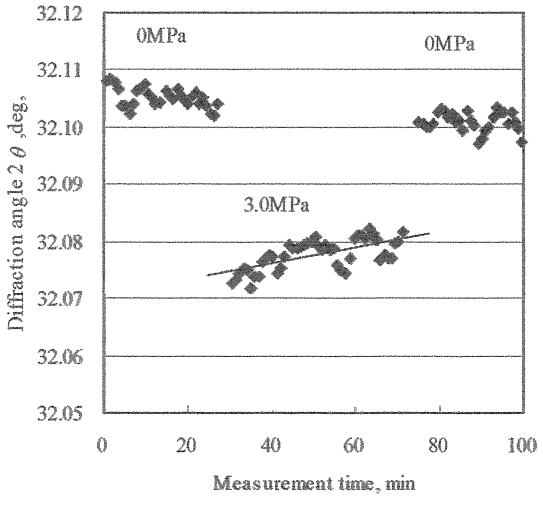


Fig.10 Strain alteration under constant tensile stress in 110 diffraction.

通常，測定時間を長くすることは測定精度を向上させることにつながることが多いが，高密度ポリエチレンに対してX線応力測定を用いる場合，逆に精度を悪化させる可能性があることが示唆される．

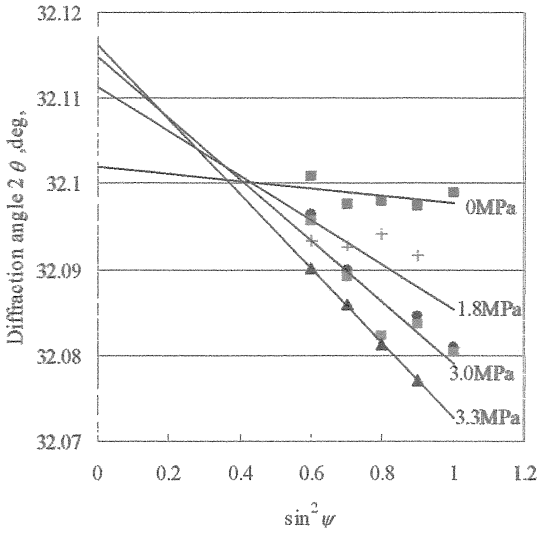


Fig.11 2θ-$\sin^2\psi$ diagram for the several applied stresses in 110 diffraction.(for a short time.)

この結果を踏まえて，測定時間を見直し再度測定を行った．具体的には $\sin^2\psi$の範囲を 0.4～1.0 までとしていたところを 0.6 から 1.0 までとした．また 2θは31.5～34.0° を走査範囲としていたのに対して，これを 31.7～33.0° の範囲に変更した．また，2θの範囲を小さくしたことによる，測定精度の低下を防ぐために，2θのステップ角を 0.1 から 0.05 に変更した．最終的に，$\sin^2\psi$=0.1 毎の測定時間は約 7 分から約 4 分間へと短縮することが可能となった．その測定結果を Fig.11 に示す．この結果を見ると，すべての負荷応力に対してばらつきが少なく，良好な直線性が得られたことがわかる．また，負荷応力の増加に対して 2θ -$\sin^2\psi$線図の傾きが順次大きくなっており，それぞれの直線は 2θ=約 32.1° の角度において，ほぼ 1 点で交差している．この点は理論上，ひずみゼロとなる角度を示している．ひずみゼロとなる角度は物理的に一つしか存在しないことから，各直線が 1 点で交差することは測定精度の高さを示している．

続いてFig.12にFig.11で得られた2θ-$\sin^2\psi$線図の傾きと，負荷応力との関係を示す．高密度ポリエチレンは，前述のように結晶化相と非晶質相で構成されており，また X 線によって測定できるのは結晶化相だけであることから，高密度ポリエチレンの結晶が 3.0 MPa までの負荷応力に対して，ほぼ弾性体としての性質を有していることが確認された．

さらに，X線的弾性定数はこのグラフの傾きより求めることができる．Fig.12 の結果および式(6)よりX線的弾性定数は式(7)となった．

$$\frac{E}{1+\nu} = 2.89\times10^{9} \qquad (7)$$

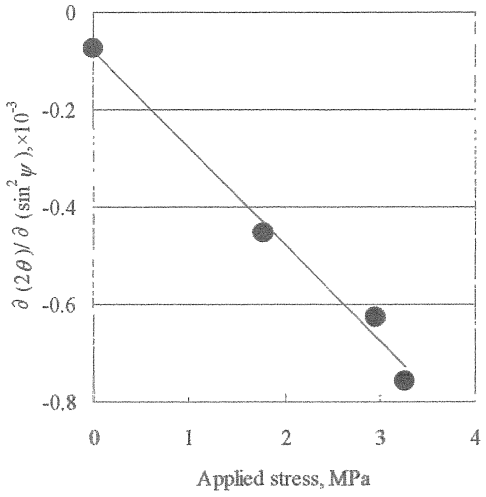


Fig.12 Slope of lines vs. the applied stresses.

この値は一般的に知られている高密度ポリエチレンの巨視的な弾性定数である約700MPaと比べてきわめて大きな値である．高密度ポリエチレンは結晶化相と非晶質相で形成されていることは前に述べた．X線は結晶化相のみから情報を得ていることから，巨視的な弾性定数は，結晶化相の弾性定数と非晶質相の弾性定数の体積平均となることが推察される．

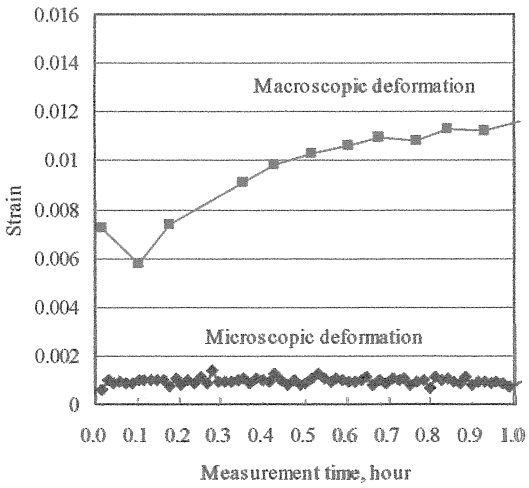


Fig.13 Alternation of microscopic strain and macroscopic strain.

さて Fig.10 において測定試料の結晶化相に応力緩和が生じていると前述した．次に，その応力緩和の原因を調べるため，ひずみの時間依存性の測定を行った．その結果を Fig.13 に示す．引張荷重を与えた瞬間をスタートとして，横軸に時間，縦軸にひずみを示している．巨視的なひずみは，負荷を与えた瞬間に約 0.007 までひずみが上昇，その後，一度 0.006 まで低下したのち，緩やかにひずみが増加していったことがわかる．一方，結晶格子ひずみは，負荷による瞬間的なひずみが生じたのちは，ほぼ一定のひずみを保っていることがわかる．結晶格子ひずみは巨視的なひずみと比較して 10 分の 1 と極端に小さい．これも X 線が結晶化相のみを評価の対象としていることから，巨視的な変形のほとんどは非晶質相の変形が受け持っていると推察できる．このことからも，式(7)の X 線的弾性定数の値が巨視的な弾性定数と比較して大きい値となっていることが裏づけられる．

また，応力緩和は非晶質相が主な原因であり，その相応力のバランスの結果，結晶化相の応力が低下すると考えられる．

6. 結論

1.透過法を用いることで，低角に回折ピークが現れる高密度ポリエチレンの X 線応力測定が可能であった．

2.高密度ポリエチレンはひずみ量が大きく，時間依存性を考慮した上で測定する必要がある．

3.巨視的なひずみの内，結晶化相のひずみ量が少ないことから，ひずみの多くは非晶質相が受け持っていることが判明した．

参考文献

(1) V.Hauk, A.Troost and D. Ley:「Evaluation of (Residual) Stresses in Semicrystalline Polymers by X-rays」, Advances in Polymer Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 389-396, 1987.

(2)日本材料学会 X 線材料強度部門委員会編集,「X 線応力測定法標準(2002 年度版)-鉄鋼編-」, 日本材料学会, JSMS-SD-5-02, pp. 37, 2002.

予混合と拡散燃焼における火炎構造と安定限界に関する研究

正司　悠介*　　吉本　隆光**

Research on Flame Structure and Stability Limit of Premixed and Diffusion Combustion

Yusuke SHOJI *　　Takamitsu YOSHIMOTO **

ABSTRACT

The flame stability limits essentially define the fundamental operation of the combustion system. The critical conditions at the stability limits are highly dependent on flow configurations and some species of fuels. Recently, the stability mechanism of the methane-air premixed flame for flame holding has been studied comparing with the diffusion flame. In this study, the transition behavior from the stable flame to lifting and blow-off is observed experimentally. When the fuel flow rate is constant, the premixed flame becomes thin and short with increasing the ratio of the air on methane-air premixed flame. However, the flame does not become short with increasing the ratio of the air on hydrogen-air premixed flame. The flame surface approaches the center axis of the flame as the equivalent ratio is lower. On the methane-air premixed flame, blow-off velocity becomes high by mixing hydrogen into the fuel.

Keywords: Premixed Flame, Flame Behavior, Flame Stability, Methane, Hydrogen

1. 緒　　言

エネルギー有効利用と燃料消費量低減の燃焼技術に関して，安定な燃焼形態の保持は重要である．しかし，その火炎基部の構造，消炎現象などの不明な点も多い．そこで，近年工業用バーナ燃焼において用いられる予混合火炎[1]について安定な火炎の挙動を観察し，火炎の安定限界などを調べる．

本研究では，メタン及び水素を主燃料として使用し，ノズル寸法や当量比などをパラメータとして，噴流予混合火炎を形成し，浮き上がり・吹き飛び現象に至る過程を観察及び測定する[2]．また，メタンに水素を添加することによる火炎安定に及ぼす効果や，火炎安定との関連について検討する．

2. 実 験 装 置

予混合火炎を形成するために燃料としてメタンおよび水素，酸化剤として空気を使用し，流量計を介して流量調整し混合させる．混合後，ノズルを通して大気中に噴出させ，火炎を形成する．なお，逆火を防止するため，燃料側には逆止弁を取り付ける．Fig.1 に実験装置全体図，Fig.2 にシュリーレン写真撮影装置の概略図を示す．

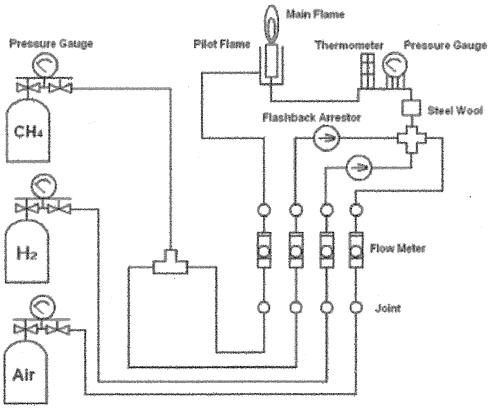


Fig.1 Experimental Equipments

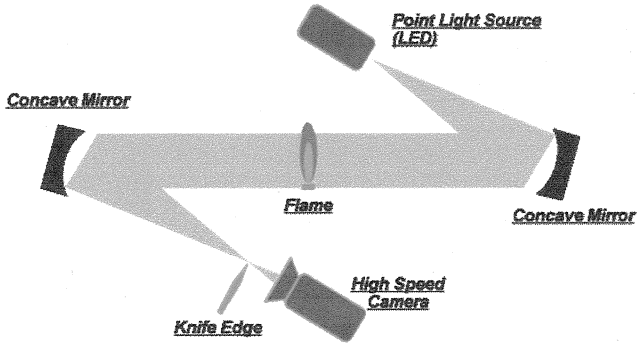


Fig.2 Schliere Photo Equipments

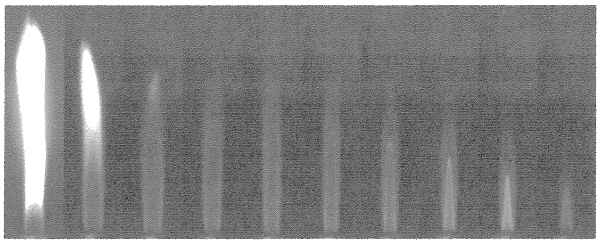
*　専攻科　機械システム工学専攻
**　機械工学科　教授

3. 実 験 結 果

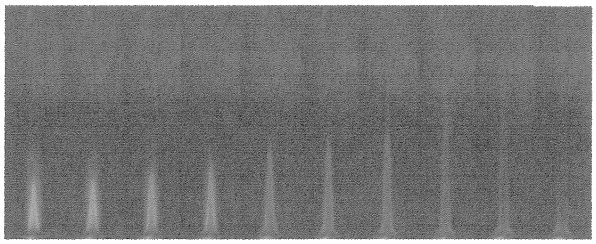
3.1 火炎の変遷

(1)メタン－空気予混合火炎

Fig.3 にノズル径 6.0mm，メタン（平均）流速 0.354m/s 一定とし，空気流速を増加させた場合の火炎の変遷を示す．



∞ ← Equivalent Ratio Φ → 1.27

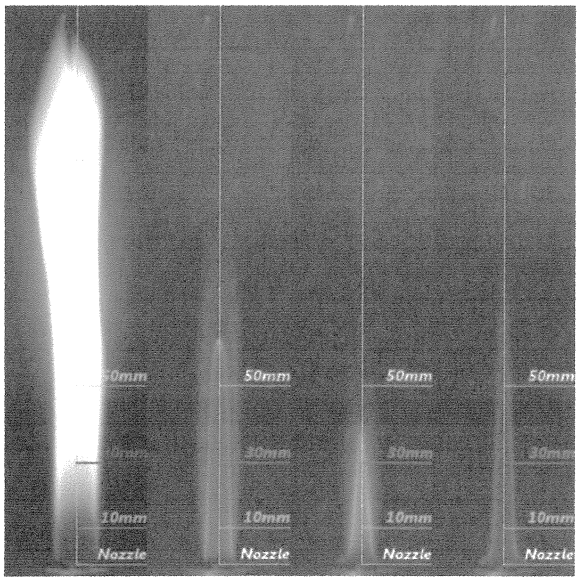


1.14 ← Equivalent Ratio Φ → 0.6

Fig.3 Flame Behavior from Diffusion Flame to Premixed Flame (Methane-Air Premixed Flame)

空気量を増加させていくと，火炎長さは短くなっていくが，さらに空気量を増加させると，当量比 1 付近を境に再び火炎長さは伸びていく．

Fig.4 は当量比ごとに火炎長さを比較したものである．



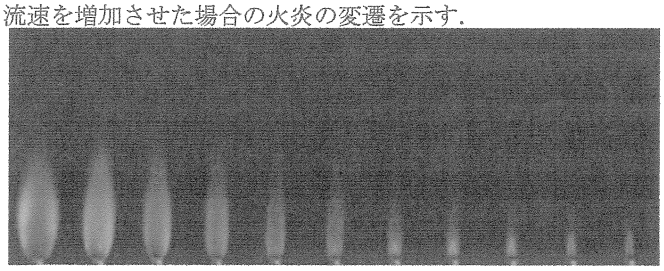
(a)Φ=∞ (b)Φ=2.0 (c)Φ=1.0 (d)Φ=0.7

Fig.4 Comparison of Flame Configuration

当量比Φ=1.0 の時に最も火炎長さが短くなる．また，当量比Φが小さくなるにつれて火炎は細くなる．

(2)水素－空気予混合火炎

Fig.5 にノズル径 1.9mm，水素流速 4.70m/s 一定とし，空気流速を増加させた場合の火炎の変遷を示す．



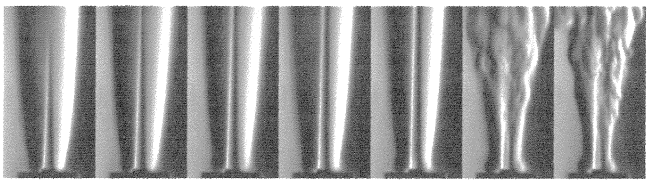
∞ ← Equivalent Ratio Φ → 0.95

Fig.5 Flame Behavior from Diffusion Flame to Premixed Flame (Hydrogen-Air Premixed Flame)

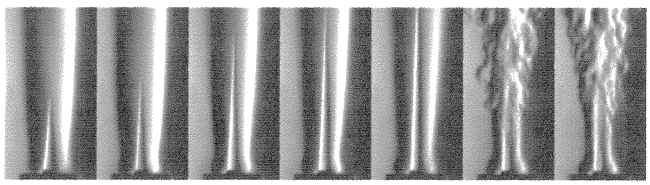
拡散火炎状態では赤色炎であるが，空気流速を増加させるにつれて，基部が青色炎となる．火炎形状は細長く薄炎となる．当量比Φ=2.0 付近になると，青色の内炎が形成される．

(3)シュリーレン写真の比較

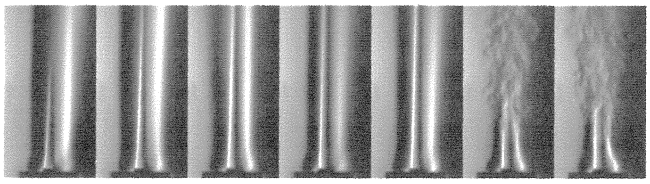
Fig.6 は混合気流速増加に伴うメタン予混合火炎の変遷をシュリーレン写真を用いて当量比ごとに比較したものである．



(a) ϕ =2.0



(b) ϕ =1.0



(c) ϕ =0.7

4.0 ← Mixture Velocity (m/s) → 16.0

Fig.6 Comparison of Schlire Photographs

当量比の小さい方が，火炎が細くなっていることがわかる．また，当量比 1.0 の時に最も内部の陰影が濃く，短く写っている．

3.2 火炎の吹き飛び

(1)メタン－空気予混合火炎の吹き飛び

Fig.7 は，メタンを燃料として使用した際における各当量比での吹き飛び流速とノズル径の関係を示している．

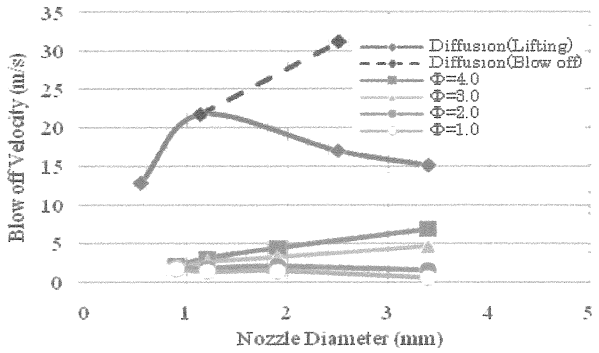


Fig.7 Blow off Velocity versus Nozzle Diameter
(Methane-Air Premixed Flame)

拡散火炎では，ノズル径約 1.0mm 以下では浮き上がりと同時に吹き飛ぶが，約 1.0mm 以上では浮き上がり火炎を形成した後に吹き飛ぶ．

予混合火炎ではノズル口径に関わらず当量比Φが小さいほど，吹き飛び流速が小さく吹き飛びやすくなり，拡散火炎と比較して吹き飛びやすい．

(2)水素を添加した場合の吹き飛びへの影響

Fig.8 にノズル径 6.0mm とした場合の純メタンおよびメタンに水素を添加した予混合火炎における当量比と火炎の吹き飛び流速の関係を示す．

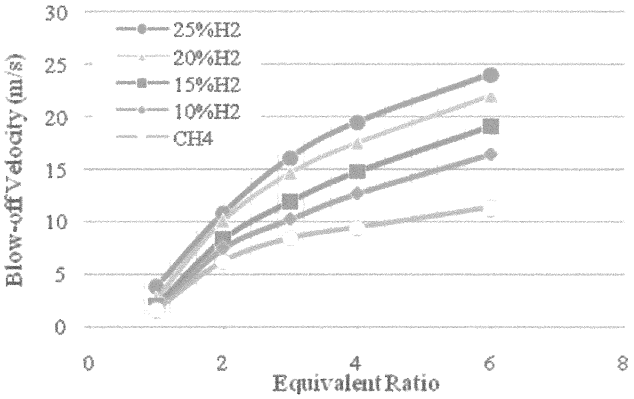


Fig.8 Blow-off Velocity versus Equivalent Ratio
(Methane mixed Hydrogen-Air Premixed Flame)

純メタンと比較して，水素の混合割合を増加させた方が吹き飛び流速が大きくなっている．

(3)水素－空気予混合火炎の吹き飛び

Fig.9 は，水素を燃料として使用した際における各当量比での吹き飛び流速とノズル径の関係を示している．

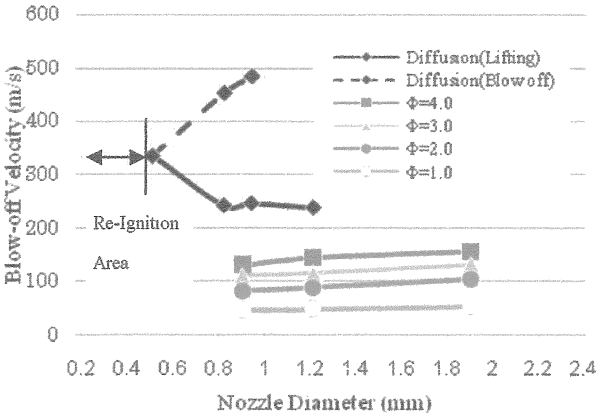
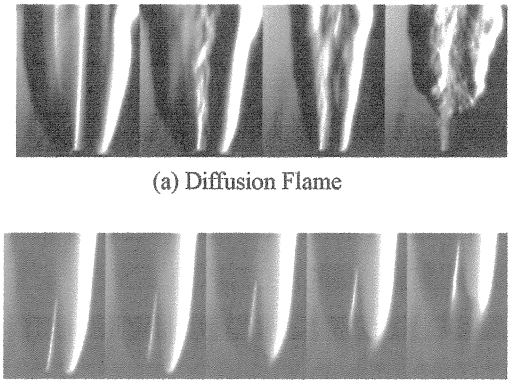


Fig.9 Blow off Velocity versus Nozzle Diameter
(Hydrogen-Air Premixed Flame)

水素拡散火炎においてノズル径約 0.50mm 以上では，メタン拡散火炎と同様，浮き上がり火炎が形成される．約 0.50mm 以下では，一旦吹き飛んでも,再着火したりする不安定な現象が起きる．水素－空気予混合火炎は，メタン－空気予混合火炎と比較して，吹き飛び流速がきわめて大きく,安定燃焼を持続する．またメタン－空気予混合火炎と同様に当量比Φが小さいほど，吹き飛び流速が小さくなる．ノズル径が大きい場合に空気量を増やしていくと，吹き飛ばずに逆火を起こす．

(4)シュリーレン写真で見る火炎の吹き飛び

Fig.10 にメタン拡散火炎および予混合火炎が吹き飛ぶ際のシュリーレン写真を示す．ノズル径は 6.0mm とする．(a)では燃料流速を増加させ，(b)では燃料流速を 3.54m/s 一定にして，空気流速を増加させた場合の吹き飛び時のシュリーレン写真である．なお，(a)での吹き飛び流速は 17.2m/s，(b)での吹き飛び流速は 8.75m/s である．



(a) Diffusion Flame

(b) Premixed Flame

Fig.10 Flame Behavior of blow off

シュリーレン写真からわかるように，拡散火炎では流れが乱流になった後，浮き上がり，吹き飛ぶのに対して，予混合火炎では，流れが乱流になることなく，浮き上がり火炎を形成せず吹き飛ぶ．

3.3　火炎内温度分布

(1)部分予混合火炎（Φ＝∞～6.38）

ノズル径 3.4mm とし，測定位置はノズルからの距離 L を，0.5mm，1mm，3mm，12mm とした．燃料としてメタンを使用し，燃料流速を 2.8m/s として拡散火炎（当量比Φ＝∞）を形成させた時の各断面での半径方向の火炎内温度分布を Fig.11 に示す．

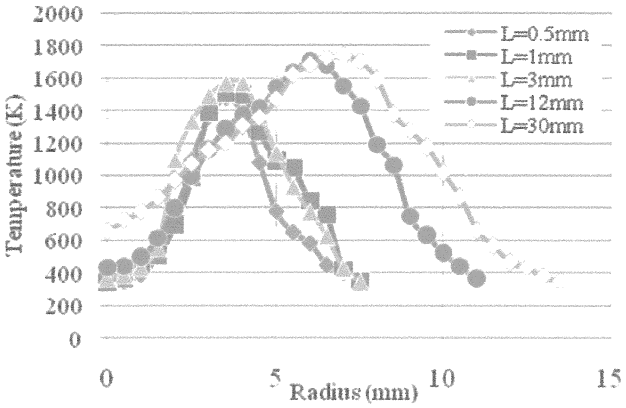


Fig.11 Flame Temperature (Diffusion Flame)

Fig.12,13,14 は，メタンを燃料として燃料流速を 2.8m/s 一定にして混合空気量を変えたときの各当量比での火炎内温度分布を示している．

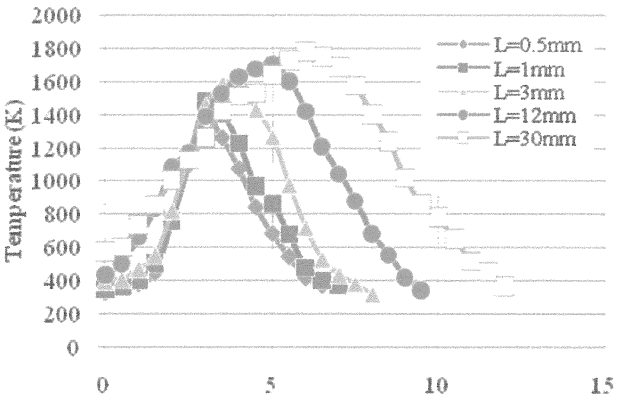


Fig.12 Flame Temperature (Φ=19.04)

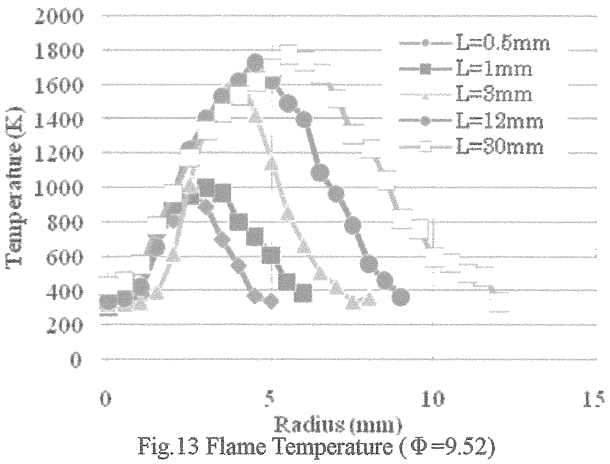


Fig.13 Flame Temperature (Φ=9.52)

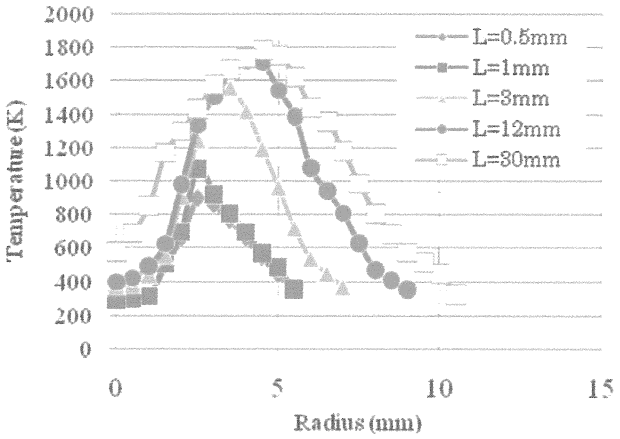


Fig.14 Flame Temperature (Φ=6.38)

当量比が小さくなるにつれて下流部の温度のピーク（火炎面）が火炎中心軸に近づいていることがわかる．火炎形状も細くなっている．これは Fig.3 の火炎の変遷からもわかる．

下流部（L=12mm，30mm）におけるピーク温度（火炎面温度）はほぼ同じであり，予混合割合にかかわらず当量比（Φ＝1）で火炎面が形成され，拡散火炎の火炎面温度と同じ温度であることがわかる．

Fig.15 では各当量比におけるピーク温度（火炎面温度）とノズルからの距離の関係を示す．

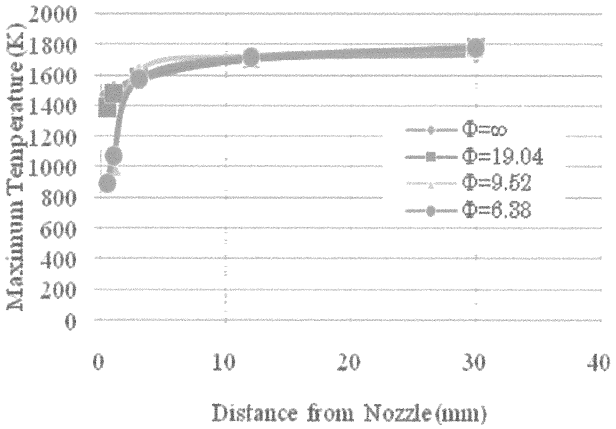


Fig.15 Maximum Temperature of Flame

当量比Φ=∞すなわち拡散火炎においても火炎基部とバーナノズルとの間で未燃予混合領域が存在し，火炎基部が形成されている．ノズル近傍での上流部の温度が，予混合火炎よりも高く，ノズル近傍ぶでの当量比（空気混入割合）が影響している．

一方，火炎中流部，下流部においては，予混合，拡散火炎ともに温度に大きな差はみられない．

(2)予混合火炎（Φ=2.0~0.7）

前述の火炎内温度分布では，当量比が比較的大きい場合（部分予混合火炎）を示したが，さらに当量比を下げた場合

（予混合火炎）の火炎内温度分布を Fig.16,17 に示す．なお，メタン－空気予混合火炎においては，当量比を下げると吹き飛びやすくなるので，パイロット炎により保炎を行っている．パイロット炎の影響を考え，測定位置はノズルからの距離 L を，10mm，30mm，50mm，70mm とする．ノズル径を 6.0mm，燃料流速は 3.54m/s とする．

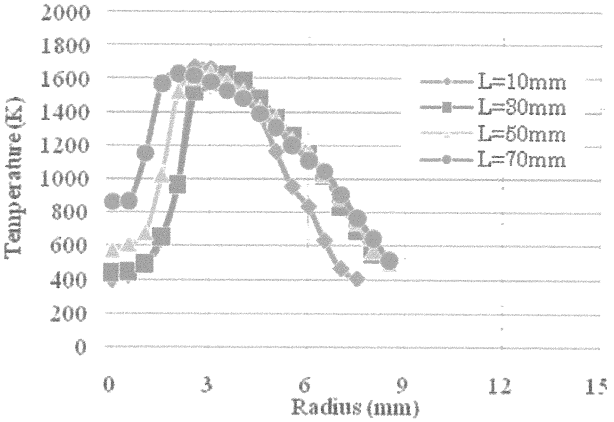


Fig.16 Flame Temperature (Φ=0.7)

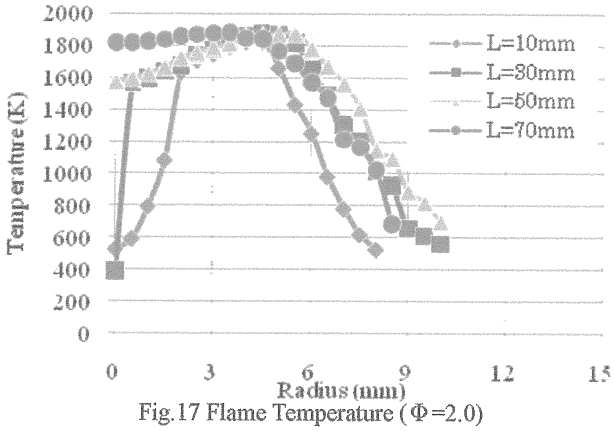


Fig.17 Flame Temperature (Φ=2.0)

当量比Φ=0.7 の場合，当量比 2.0 に比べて最高温度が低いことがわかる．

当量比Φ=2.0 の場合，下流部において温度分布が平坦となり，当量比Φ=0.7 の場合より早く燃え切ることがわかる．火炎の変遷（Fig.3）で当量比が 1 より小さくなるにつれ火炎長さが伸びていることとも符合している．

3.4 燃焼ガス

メタン拡散火炎および当量比Φ=2.0，1.0，0.7 のメタン－空気予混合火炎の燃焼ガス中 NO_X，O_2 濃度を示す．測定位置はノズルからの距離 L を 10mm，30mm，50mm とする．ノズル径を 6.0mm，燃料流速は 3.54m/s とする．

(1)当量比による NO_X，O_2 濃度の比較

各当量比における燃焼ガス測定値を Fig.18~21 に示す．

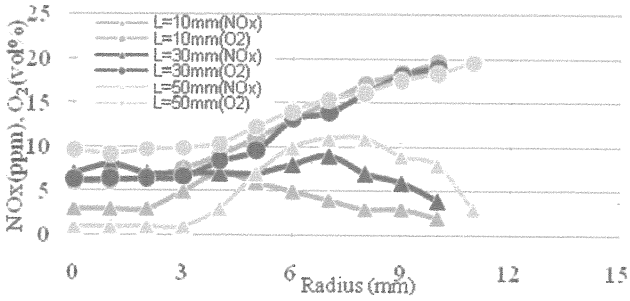


Fig.18 Concentration of Combustion Gas (Diffusion Flame)

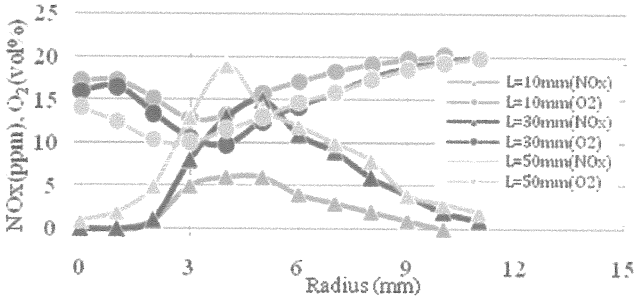


Fig.19 Concentration of Combustion Gas (Φ=2.0)

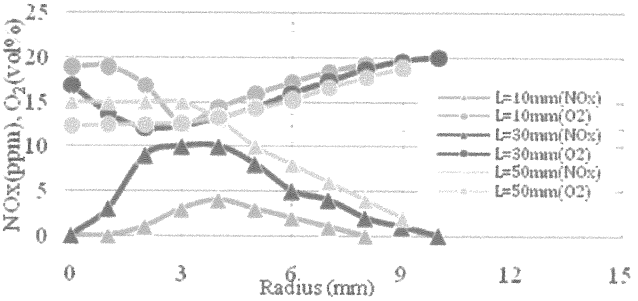


Fig.20 Concentration of Combustion Gas (Φ=1.0)

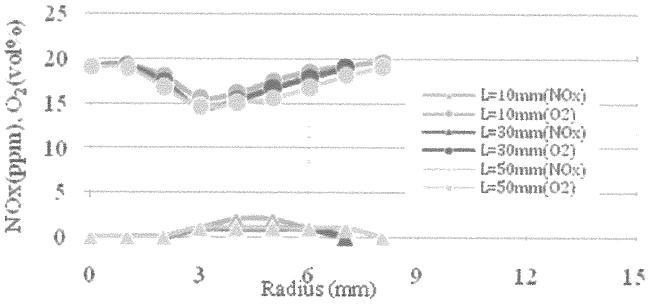


Fig.21 Concentration of Combustion Gas (Φ=0.7)

予混合火炎では，火炎面近傍で最も O_2 濃度が低くなる．一方で，NO_X 濃度は火炎面近傍で最も高くなる．

拡散火炎，当量比Φ=2.0，1.0，0.7 の時と比較して，当量比Φ=0.7 の時が最も NO_X 濃度が低くなる．これは理論空燃比よりも空気が過剰に供給されている状態であるので，火炎面温度が低くなって， NO_X 生成量が少なくなったと考えられる．Fig.16 と Fig.17 から，Φ=0.7 のピーク温度（火炎面）が低くなっていることからも推察できる．

(2)測定位置による NO_X 濃度の比較

Fig.22,23,24 に，各測定位置での NO_X 濃度の違いについてのグラフを示す．

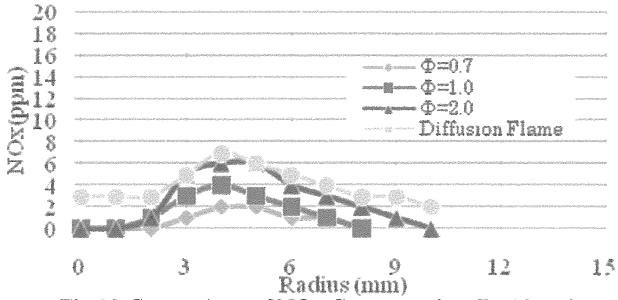


Fig.22 Comparison of NO_X Concentration (L=10mm)

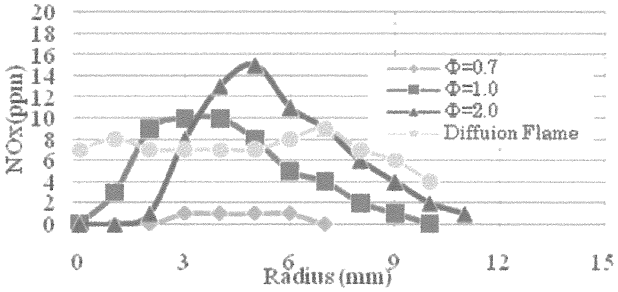


Fig.23 Comparison of NO_X Concentration (L=30mm)

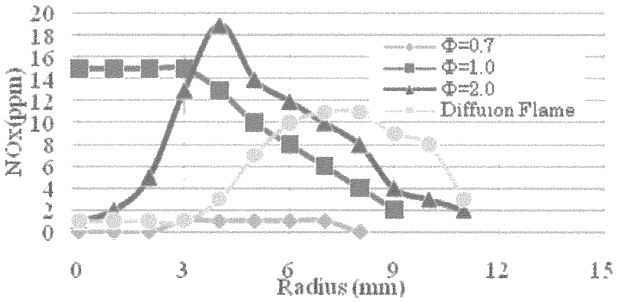


Fig.24 Comparison of NO_X Concentration (L=50mm)

L=10mm の時は，当量比が大きいほど NO_X 濃度が高くなっている．

当量比 Φ=0.7 の予混合火炎は，どの位置においても最も NO_X 濃度が低い．

当量比 Φ=∞すなわち拡散火炎では，下流ほど NO_X 濃度のピークがノズル外側に移動しているのに対して，予混合火炎（特に Φ=1.0）では，下流ほど NO_X 濃度のピークが火炎中心軸に近づいている．これは，Fig.4 からもわかるように，予混合火炎では，下流に行くと火炎が細くなっているので，火炎面が火炎中心軸に近づくことで，NO_X 生成位置も火炎中心軸に近づいていると考えられる．

(3)NO_X 濃度と火炎内温度分布の比較

Fig.25,26 は，当量比 Φ=2.0，0.7 での NO_X 濃度と火炎内温度分布を同じグラフ上にプロットしたものである．

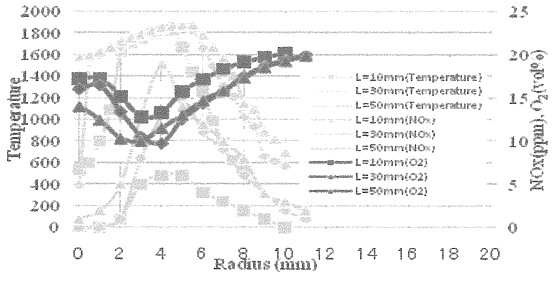


Fig.25 Flame Temperature and NO_X Concentration (Φ=2.0)

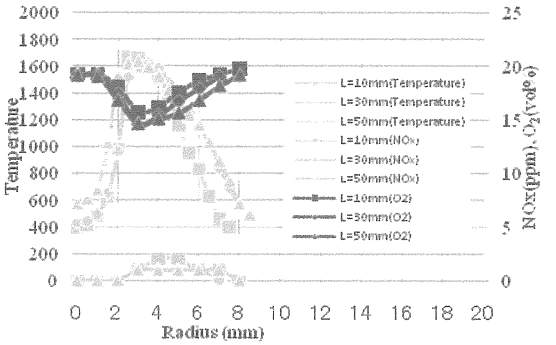


Fig.26 Flame Temperature and NO_X Concentration (Φ=0.7)

当量比 Φ=2.0 の時，火炎温度が最大の位置の内側で NO_X 濃度が最大値を示している．

当量比 Φ=0.7 の時，当量比 Φ=2.0 の時とは逆に，火炎温度が最大の位置の外側で NO_X 濃度が最大値を示している．

4. 結　　言

(1) メタン－空気予混合火炎において，燃料流速一定で空気流速を増加させると，火炎長さは短くなり，当量比 Φ=1.0 付近を境に再び長くなる．また，火炎形状は空気流量を増加させるほど細長くなる．

(2) 水素－空気予混合火炎において，燃料流速一定で空気流量を増加させても，メタン－空気予混合火炎のように火炎長さは短くならない．また，当量比 Φ=2.0 付近で青色の内炎が形成される．メタン－空気予混合火炎と比較して，吹き飛び流速が大きく，安定燃焼が維持できる．

(3) メタン－空気予混合火炎において，火炎基部付近では，当量比が小さいほど，NO_X 濃度が低くなる．特に当量比が 1 以下（Φ=0.7）の時，火炎面温度は低く，最も NO_X 濃度も低くなる．

(4) 当量比 Φ=2.0 において，火炎温度が最大での位置の内側に NO_X 濃度の最大値を示すが，当量比 Φ=0.7 においては，外側に NO_X 濃度最大値を示す．

参　考　文　献

(1) 燃焼工学ハンドブック，日本機械学会

(2) 正司・吉本・高城,日本燃焼学会,第４5回燃焼シンポジウム講演論文集,pp314-315（2007/12）

水平管内におけるマイクロバブルによる摩擦圧力損失低減に関する研究

星野剛* 青田晃一** 林公祐*** 赤対秀明****

Reduction of Frictional Pressure Drop in Micro Bubble Flow in a Horizontal Pipe

Takeshi HOSHINO* Kouichi AOTA** Kosuke HAYASHI*** Hideaki SHAKUTSUI****

ABSTRACT

The effects of the micro bubble on the frictional pressure drop and the turbulence distribution in horizontal pipe flows are investigated using a manometer and a one-dimensional laser-doppler velocimeter. The measurements are carried out under the conditions of the pipe diameter 14.4 mm and 8000 < Re < 23000, where Re is the Reynolds number. The mean bubble diameter is also measured using a high speed video camera to clarify the relation between the bubble diameter and the reduction of frictional pressure drop. As a result, we confirm that (1) the maximum value of reduction rate in frictional pressure drop is about 6 %, (2) the reduction rate of frictional pressure drop is low when the mean bubble diameter is large, (3) the distribution of mean velocity of micro bubble flow is similar to that of single phase flow, and (4) the micro bubble reduces the turbulence level in the direction of main flow.

Keywords : micro bubble, frictional pressure drop, horizontal pipe

1. 緒言

マイクロバブルとは，その発生時において，10～数10 μm の直径の気泡のことをいう(1)．マイクロバブルは気泡径が極めて小さいために，数 mm 程度の気泡では得られなかった特性を有している．そのため，近年では，牡蠣やホタテなどの水産養殖をはじめ，様々な分野で利用されはじめている．

さらに工業的利用として，マイクロバブルを用いた船舶推進時の摩擦圧力損失低減に関する研究がある(2)．これを輸送管や水道管に適用すれば，大きな消費エネルギの削減につながる．これまでに，管内流れにマイクロバブルを混入させることで，摩擦圧力損失低減効果が現れるか否か検討した例はいくつかある．乾ら(3)は，加圧溶解方式で鉛直円管内にマイクロバブルを発生させると，液単相の場合には乱流であるレイノルズ数 Re の範囲($2320 \leq Re \leq 20000$)でも摩擦圧力損失が層流の場合とほぼ一致するという，層流化現象を見出した．また，Madavan ら(4)は，水平に設置された矩形管の壁面に設けた細孔からマイクロバブルを発生させた場合，10～数 10 %の摩擦圧力損失低減率が得られ，また，低減率はマイクロバブルの供給量の増加に伴い増加することを確認した．さらに彼らは，摩擦圧力損失低減効果の持続性を調べたところ，気泡発生位置から下流に向かって効果が小さくなると報告している．松本ら(5)は，超高速旋回方式によってマイクロバブルを発生させ，鉛直円管内マイクロバブル流における摩擦圧力損失低減効果を調べているが，低減効果を示す明確な実験結果は得られていない．なお，これらの研究では，マイクロバブル流における重要なパラメータの1 つである発生気泡径および気泡径分布を詳細に調べていないため，発生気泡径と低減効果の関係を検討できていない．

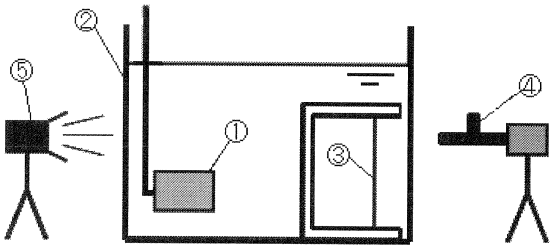
本研究では，水平管内マイクロバブル流について，大域的および局所的な摩擦圧力損失の特性，すなわちある区間における摩擦圧力損失低減割合とある管断面における液相平均速度分布および乱れ分布を測定することで，水平管に対する摩擦圧力損失低減効果の大きさとその発生メカニズムを明らかにすることを目的とする．摩擦圧力損失低減割合および液相速度分布は，各々マノメータおよびレーザードップラー流速計

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

(LDV)により測定する．また，摩擦圧力損失低減率の気泡径に対する依存性を調べるために，マイクロバブル発生装置への3つの異なる送気量について実験を行う．なお，それら送気量におけるマイクロバブルの平均直径および気泡径分布を高速度ビデオカメラによる撮影画像から測定し，気泡径と摩擦圧力損失低減効果の関係を検討する．

2. 実験装置および実験方法

2.1 気泡径分布　Fig. 1に実験装置の概略を示す．使用するマイクロバブル発生装置①は大成ら[6]によって開発されたナノプラネット製，形式 M2-LM である．ポンプによって水道水を発生装置①内に送り込み，マイクロバブルを発生させた．水道水を入れた水槽②内に，マイクロバブルとの比較基準として，直径 50 μm の放電加工機用電極ワイヤ③(㈱テクノス)を設置した．撮影には高速度ビデオカメラ④(PHOTRON 製 FASTCAM -NetC，フレーム速度 1000 frame/s)を用いた．カメラの反対側にハロゲンライト⑤(LPL 製，500 W)を設置し，透過光撮影とした．マイクロバブル発生装置に送り込む水流量 Q_L は 17.0 L/min で一定として，マイクロバブル発生装置に送り込む空気流量 Q_{G0} = 80，40，0 mL/min の 3 つの条件でマイクロバブルを発生させて撮影を行った．撮影した画像から，焦点のあった気泡のみ抽出し，その直径を測定した．なお，Q_{G0} = 0 mL/min の場合，供給空気量はゼロであるが，キャビテーションによってマイクロバブルが発生している．



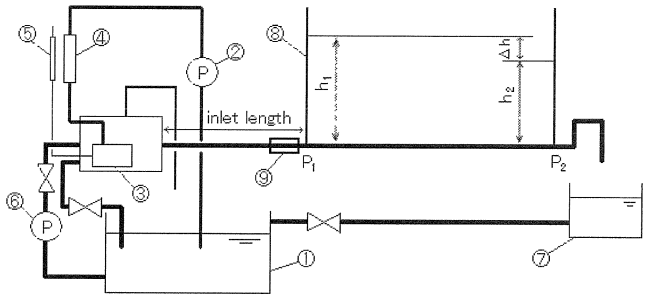
①Micro bubble generator ②Transparent water tank
③Wire ④High speed video camera ⑤Halogen light
Fig. 1 System of taking images

2.2 摩擦圧力損失測定

2.2.1 実験方法および実験条件　Fig. 2に実験装置の概略を示す．マイクロバブル流を流動させる管は全長 6 m，内径 14.4 mm のアクリル樹脂製水平円管である．給水タンク①に水道水を入れ，ポンプ②(三相電機㈱，形式 PMD-1521B6E)を用いて混合部内のマイクロバブル発生装置③に水道水を送り込み，空気を自給させてマイクロバブルを発生させた．マイクロバブル発生装置の水流量は水流量計④，空気流量は空気流量計⑤で測定しながら所定の値に調節した．水平管内に送り込む水道水の供給量は，ポンプ⑥(寺田ポンプ製作所，形式 HP-100)により調節した．管内を流れた水道水は水槽⑦に排水され，給水タンク①に循環するようにした．水平管出口において，受け止め法により水の重量流量を測定した．マノメータ⑧により静圧を測定した．なお，マイクロバブルを混入させず，水単相流とした場合の静圧も測定した．また，ウォータジャケット⑨は後述する LDV 測定のために取り付けた．実験条件を Table 1 に示す．表中の Re はレイノルズ数であり，次式で定義される．

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_m u d}{\mu_m} \tag{1}$$

ここで，ρ_m はマイクロバブル水の平均密度，u は流速，d は管直径，μ_m はマイクロバブル流の粘度である．



①Water tank ②Pump ③Micro bubble generator
④Water flow meter ⑤Air flow meter ⑥Pump
⑦Separator ⑧Manometer ⑨Water jacket
Fig. 2 Experimental equipment

Table 1 Experimental conditions
(Temperature 23.7~32.9 °C)

	Single phase flow (water)	Micro bubble flow
Mean velocity u [m/s]	0.511 - 1.22	0.445 - 1.24
Reynolds number Re	8060 - 19300	8150 - 23400
Air flow rate Q_{G0} [mL/min]	-	80, 40, 0

2.2.2 摩擦圧力損失の算出方法　摩擦圧力損失ΔP_f および管摩擦係数λは以下の諸式で与えられる．

$$\Delta P_f = P_1 - P_2 = \rho_L g \Delta h \tag{2}$$

$$\lambda = \frac{d}{l}\frac{2g}{u^2}\frac{\rho_L}{\rho_m}\Delta h \tag{3}$$

ここで，P_1 は上流の静圧，P_2 は下流の静圧，ρ_L は水の密度，g は重力加速度，Δh はマノメータの液面差，l は試験区間長である．気相体積率をα_G で表すと，ρ_m，μ_m は以下のように表される[7]．

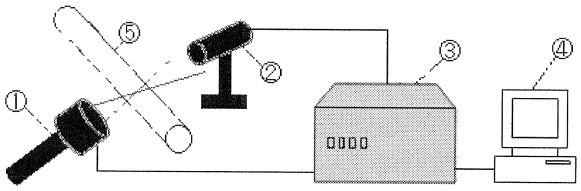
$$\rho_m = \rho_G \alpha_G + \rho_L (1 - \alpha_G) \tag{4}$$

$$\mu_m = \mu_G \alpha_G + \mu_L (1 - \alpha_G) \tag{5}$$

ここで，下付添字 G, L は各々気相，液相を意味する．一般には，気液二相流での摩擦圧力損失を求める際には式(4)，(5)を用いる必要がある．しかし，本研究の実験条件において，マイクロバブル水の気相体積率α_Gは 0.47 %以下の小さい値であった．この場合，$\alpha_G = 0$ と近似しても，測定結果にほとんど影響を及ぼさないため，本研究では，$\rho_m = \rho_L$，$\mu_m = \mu_L$ とした．

2.3 平均速度分布および乱れ分布

2.3.1 実験方法および実験条件　Fig. 3 に LDV 装置(DANTEC 社，形式 MODEL3230 H-PC)の概略を示す．まず，レーザー発振器①(適用レーザーHe-Ne，波長 632.8 nm，同軸形連続発振レーザー10 mW 直線偏光)と散乱光受光器②を測定区間に設置し，流速分析器③(FVA，形式 58N20 FVA SIGNAL PROCESSOR)，パーソナルコンピュータ④(PC，ソフトウェア BSA Flow Software)を起動させた．アクリル管⑤(内径 14.4mm)内に水単相流またはマイクロバブル流を流動させた後，レーザーの交差部を測定位置に移動させ，散乱光受光器の焦点を交差の中心と合わせ，焦点位置の速度を測定した．水単相流の平均速度分布を測定したところ，その分布はほぼ対称であったので，マイクロバブル流に対する測定範囲は$-0.31 < r/R < 1$ とした．また，マイクロバブルの摩擦圧力損失低減効果の持続性を調べるために，上流側のマノメータの手前(L = 2 m)と下流側のマノメータの手前(L = 5 m)の 2 点について測定を行った．ここで，L は混合部出口から測定点までの距離である．



①Laser ②Photo multiplier ③FVA ④PC ⑤Pipe
Fig. 3 System of LDV

2.3.2 円管内における乱流　LDV 測定によって得られたマイクロバブル流の速度分布から摩擦圧力損失低減率を検討する場合，水単相流の速度分布が基準となる．そこで，円管内における乱流の一般的な水単相流の速度分布[8]および乱れ度[9]とせん断応力についてまとめておく．

円管内乱流の速度分布は次の指数法則でよく近似できる：

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{6}$$

ここで，Fig. 4 に示すように，u は管壁から y の距離における速度，U は管の中心 y = R における速度である．n および U は次式より求められる．

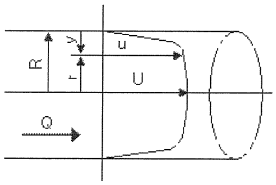


Fig. 4 Turbulence flow in a pipe

$$n = 3.45\mathrm{Re}^{0.07} \tag{7}$$

$$\frac{\overline{u}}{U} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \tag{8}$$

また，乱流おいて重要なパラメータである乱れ度(turbulence level：T.L.)は次式で定義される．

$$T.L. = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\overline{u}} \tag{9}$$

ここで，u' は $\overline{u}$ に対する変動速度である．

気液二相気泡流において，液相せん断による乱流成分と気泡に誘起される乱流成分を粘性応力に線形に付加できると仮定するモデル[10]では，全せん断応力τは次式で与えられる：

$$\tau = (1-\alpha_G)\left(\mu_L \frac{du}{dy} - \rho_L \overline{u'v'} - \rho_L \overline{u''v''}\right) \tag{10}$$

ここで，μ_L は水の粘度，du / dy は速度勾配，ρ_L は水の密度，u’，v’は気泡の存在に無関係な液相速度の変動成分，u”，v”は気泡のかく乱による変動成分である．数 mm オーダーのサイズの気泡はウェイクが広範囲に存在する．式(10)では，それが気泡誘起乱れによる応力$-\rho_L \overline{u''v''}$としてモデル化されている．そのため，一般的な気泡流では，式(10)における気泡誘起乱れによる応力$-\rho_L \overline{u''v''}$が大きくなり，摩擦圧力損失が液単相流の場合と比べて大きくなる．しかし，気泡の Re は 1 よりも非常に小さいため，マイクロバブルがストークスの法則に従うと考えると，ウェイクは形成されないと考えられる．そのため，$-\rho_L \overline{u''v''}$が生じることはないので，マイクロバブルが流れを乱すことはないと考えられる．

3. 実験結果および考察

3.1 気泡径分布　Fig. 5 に気泡径分布の実験結果を示す．Q_{G0} = 80，40，0 mL/min の平均気泡径はそれぞれ 52.9, 62.9, 47.1 μm であった．Q_{G0} = 80 mL/min の場合，直径 100 μm 以下の気泡が 95 %を占める．Q_{G0} = 40 mL/min の場合，最も平均気泡径が大きく，直径 100 μm 以下の気泡が 89 %と最も少ない．Q_{G0} =0 mL/min の場合，最も平均気泡径が小さく，直径 100 μm 以下の気泡が 98 %と最も多い．実験結果より，Q_{G0} = 80 および 0 mL/min の場合，直径 100 μm 以下の微小な気泡を多く発生させることができたため，多くのマイクロバブ

ルを供給できると考えられる．逆に，Q_{G0} = 40 mL/min の場合，他の 2 つの実験条件と比べて直径 100 μm 以下の気泡が少ないため，直径 100 μm 以上の大きな気泡が合体することによって大きくなり，流れを乱す可能性が高い．

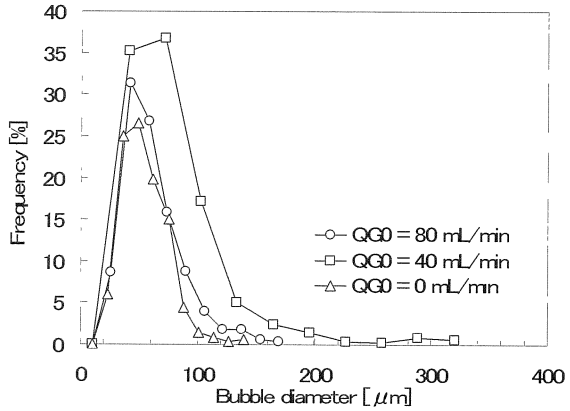


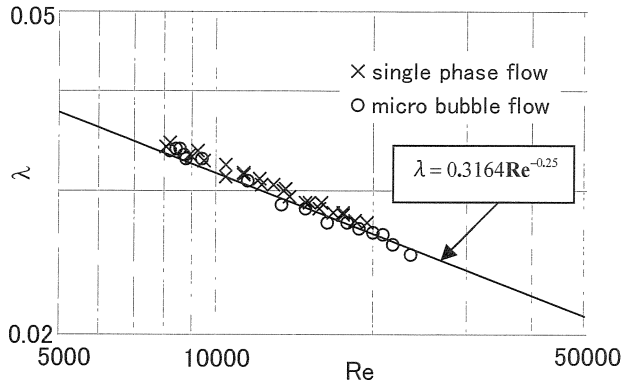
Fig. 5 Distribution of bubble diameter

3.2 摩擦圧力損失測定

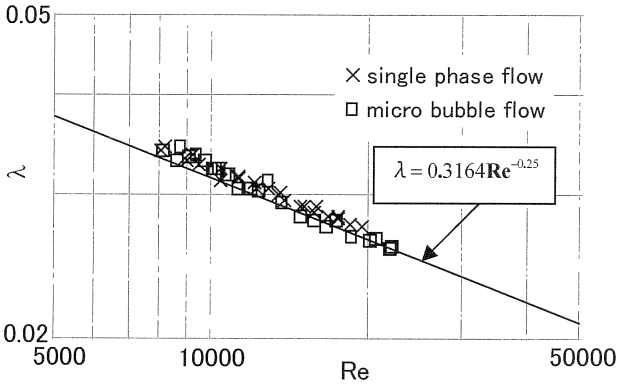
摩擦圧力損失の測定結果を Fig . 6 (a)-(c)に示す. 図中の実線はブラジウスの実験式である. いずれの条件も，Re < 10000 の範囲では単相流に比べてλが減少しているとは言い難いが，Re > 10000 の範囲では，明らかにλが減少している．λの低減率を Table 2 にまとめた．

一般に，気泡流では，気泡が液相乱れを誘起するため, 液単相流の場合に比べて摩擦圧力損失が増加する. しかし，マイクロバブルは非常に小さいために液相乱れを誘起するウェイクが形成されない．Q_{G0} = 0 mL/min における発生時の気泡の 98 %は直径 100 μm 以下の微小な気泡であるため，Q_{G0}= 80，40 mL/min の場合と比べて，直径 100 μm 以上の気泡をほとんど含むことなく，水平管内にマイクロバブルを供給させることができた．そのため，摩擦圧力損失低減が最も大きかったものと考えられる．逆に，Q_{G0} = 80，40 mL/min の場合，比較的大きな気泡も多く含まれるため，これらが合体することによって，式(10)における気泡誘起乱れによる応力 $-\rho_L \overline{u''v''}$ が大きくなり，摩擦圧力損失低減の効果が小さくなったと考えられる．

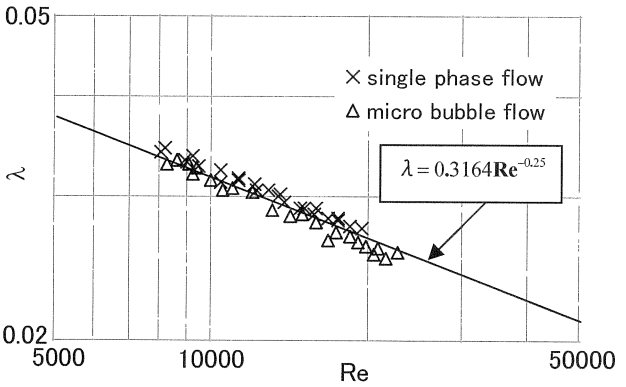
3.3 平均速度分布および乱れ分布　摩擦圧力損失測定実験において，10000 < Re < 23000 の範囲にマイクロバブルによる摩擦圧力損失低減効果がみられた．そこで，Re = 10000，20000 の 2 条件について LDV 測定を行った．平均速度分布の測定結果を Fig. 7(a)-(d)に，乱れ分布の測定結果を Q_{G0} ごとに Fig. 8(a)-(d)に示す. Fig. 7(a)-(d)中の実線は水単相流とマイクロバブル流(Q_{G0} = 80，40，0 mL/min)の 4 つの実験条件の指数法則(式(6))による値を平均化したもので，目安として示した．また，各測定点における時間平均速度 u は中心の速度 U で除して無次元化している．



(a) Q_L = 17.0 L/min, Q_{G0} = 80 mL/min



(b) Q_L = 17.0 L/min, Q_{G0} = 40 mL/min

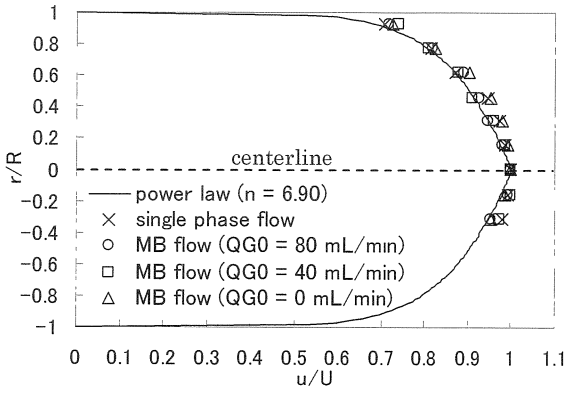


(c) Q_L = 17.0 L/min, Q_{G0} = 0 mL/min

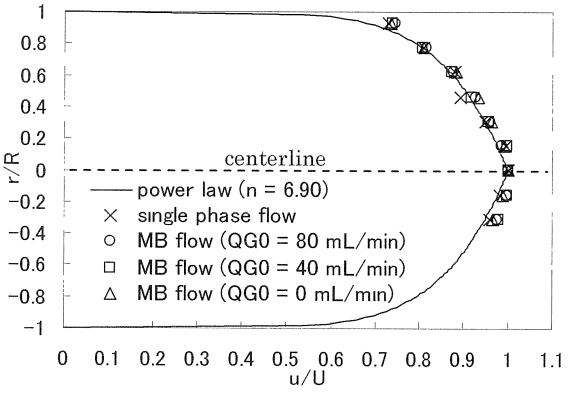
Fig. 6 Relation between λ and Re

Table 2 Reduction rate of frictional pressure drop

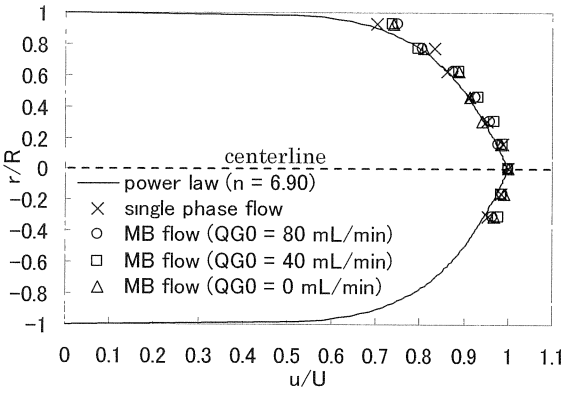
		Re < 10000	Re > 10000
Q_{G0} [mL/min]	80	≈ 0 %	1 – 4 %
	40	≈ 0 %	1 – 4 %
	0	≈ 0 %	2 – 6 %



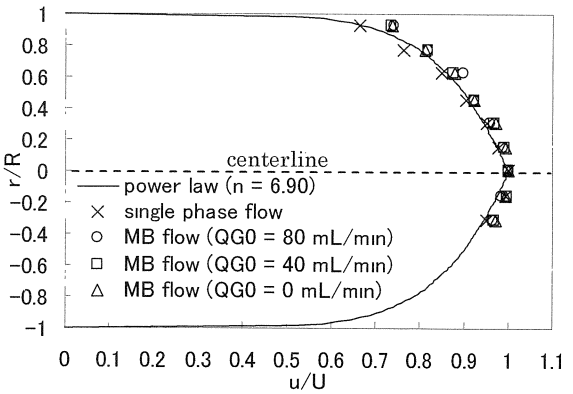
(a) Re = 20000, L = 2 m



(b) Re = 20000, L = 5 m



(c) Re = 10000, L = 2 m

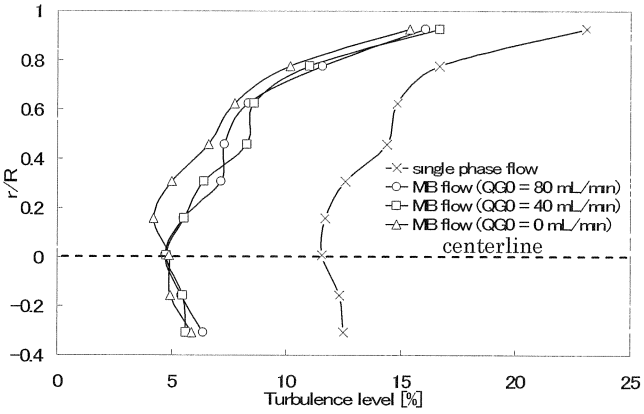


(d) Re = 10000, L = 5 m

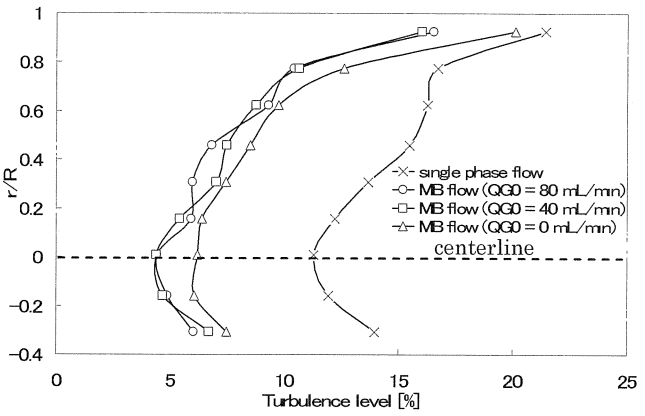
Fig. 7 Mean velocity distribution (MB : micro bubble)

Re = 20000 の場合，上流(L = 2 m)・下流(L = 5 m)のいずれにおいても，平均速度は Q_{G0} に対して変化しない．また，Re = 10000 の場合にも，上流側と下流側のどちらにおいても，平均速度に大きな変化はみられない．したがって，マイクロバブルが平均速度分布に与える影響はほとんどないと考えられる．

乱れ分布については，Re = 20000 の場合，水単相流の乱れ度と比べるとマイクロバブル流の乱れ度は 5～7 %小さくなっている．また，Re = 10000 の場合においても，水単相流の乱れ度と比べるとマイクロバブル流の乱れ度は Re = 20000 の場合ほどではないが，0.5～1.5 %小さくなっている．摩擦圧力損失の測定結果(Fig. 6)において，Re = 20000 と 10000 を比較すると，Re = 20000 の場合のほうが Re = 10000 の場合よりも摩擦圧力損失が低減したが，これは，Re = 20000 の場合のほうが Re = 10000 の場合よりもマイクロバブルによって乱れ度が減少している結果と一致する．気泡流の乱流における摩擦圧力損失の主な原因は式(10)で示したように $-\rho_L \overline{u'v'}$ と $-\rho_L \overline{u''v''}$ である．しかし，マイクロバブル流の場合，マイクロバブルによってウェイクは形成しないので，$-\rho_L \overline{u''v''} \approx 0$ と考えることができる．また，$\alpha_G \approx 0$ なので，式(10)における $(1-\alpha_G)$ は 1 と近似でき，$(1-\alpha_G)$ は摩擦圧力損失低減に大きく

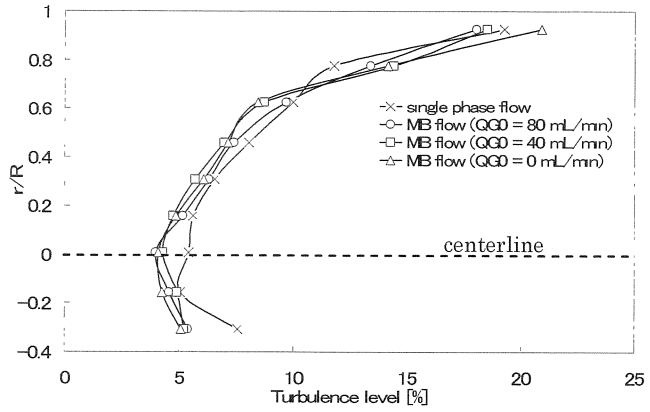


(a) Re = 20000, L = 2 m

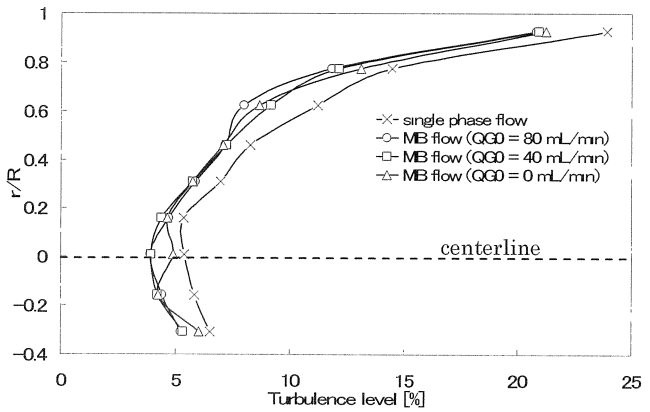


(b) Re = 20000, L = 5 m

Fig. 8 Distribution of turbulence level



(c) Re = 10000, L = 2 m



(d) Re = 10000, L = 5 m

Fig. 8 (Cont.)

寄与することはない. したがって, マイクロバブルは, その微細さのために$-\rho_L\overline{u''v''}$が現れないだけでなく, $-\rho_L\overline{u'v'}$を減少させる効果を有すると考えられる.

ところで, 村井ら[11]は水平チャネル内に混入させたマイクロバブルによる摩擦圧力損失低減のメカニズム解明を, PTV 測定により試みている. その報告によれば, マイクロバブルの垂直方向振動に起因した負の乱流せん断応力が生じることによって, 摩擦圧力損失が低減すると主張している. 本研究では, 主流方向速度成分のみ測定したため, 彼らの報告と対比した考察はできなかったが, 今後二次元測定を実施し, 各応力成分に対するマイクロバブルの影響を検討していく必要があると考えている.

4. 結言

本研究では, 超高速旋回式マイクロバブル発生装置を用いて発生させたマイクロバブルを内径 14.4 mm の水平円管内に流動させ, マイクロバブルによる摩擦圧力損失低減効果とそのメカニズムを, 次の 2 つの測定により調べた : (1)単相流の場合に対する摩擦圧力損失の低減率測定, (2)円管内液相平均速度分布および乱れ分布測定. (1), (2)は, 各々マノメータによる直接測定法およびレーザードップラー流速計による光学測定法により測定した. 摩擦圧力損失低減効果に対するマイクロバブル量の影響を確認するために, 発生装置に取り込む空気流量 80, 40, 0 mL/min の 3 条件についてこれらの測定を行った. これらの空気流量における発生気泡径を, 高速度ビデオカメラによる撮影画像から測定した. なお, 本実験条件では, 管内を流動するマイクロバブルの気相体積率α_Gは非常に小さく, ゼロと見なしてよい程度であった. 以上の測定の結果から, 本実験範囲において, 以下の結論を得た :

(1) レイノルズ数 Re > 10000 の条件において, 摩擦圧力損失が 1～6 %低減する.

(2) 100 μm 以下の微小な気泡が多いほど, 摩擦圧力損失の低減率が大きい.

(3) マイクロバブルは液相の平均速度分布にほとんど影響を与えない.

(4) マイクロバブル流では, 気泡に誘起された主流方向およびそれに垂直な方向の乱れ成分u'', v''による応力$-\rho_L\overline{u''v''}$が無視できるだけでなく, 液相主流方向およびそれに垂直な方向の乱れ成分u', v'による応力$-\rho_L\overline{u'v'}$が低減される.

参考文献

(1) 石井ら編, 泡のエンジニアリング, 第 6 章, pp. 423-429, 2005.

(2) 上入佐ら, マイクロバブルによる船舶抵抗軽減, 第 2 回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム, pp. 7-12, 2007.

(3) 乾ら, 超微細気泡を含むミルク状気泡流における擬層流化と流動特性, 日本混相流学会年会講演会, B305, 2005.

(4) N. K. Madavan et al., Measurements of local skin friction in a microbubble-modified turbulent boundary layer, Journal of Fluid Mech. , Vol.156, pp. 237-256 1985.

(5) 松本ら, マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果に関する研究, (社)日本機械学会関西学生会平成 19 年度卒業研究発表講演会, pp. 16-19, 2008.

(6) 大成, マイクロ・ナノバブル技術の到達点と今日的課題, 第 2 回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム, pp. 2-5, 47-48, 2007.

(7) 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社, 1989.

(8) 生井ら, 演習水力学, 森北出版㈱, pp. 117-136 , 2003.

(9) 生井ら, 粘性流体の力学, 理工学社, pp. 68-76 , 1978.

(10) 佐藤ら, 気ほう流の液速度分布に関する研究, 機論, 3215 巻 3223 号, pp. 41-351, 1975.

(11) 村井ら, マイクロバブルで乱流摩擦抵抗が極端に低減する理由, 混相流学会年会講演会, D133, 2007.

鉛直管内旋回気液二相流の流動様式とその判別法

高垣 慎太郎*　本間 直樹**　林 公祐***　赤対 秀明****

Flow Pattern of Swirling Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Vertical Pipe and a Flow-Pattern Identification Method

Shintaro TAKAGAKI*　Naoki HONMA**　Kosuke HAYASHI***　Hideaki SHAKUTSUI****

ABSTRACT

We have been investigating the flow pattern of the swirling gas-liquid two-phase flow. In our previous study, we proposed a flow regime map for swirling gas-liquid two-phase flows in a vertical pipe with a cone-shaped mixing section. However the boundary line in the map was not accurate because the number of measurements was insufficient. In this study, we, therefore, observe swirling gas-liquid two-phase flows in the vertical pipe under 240 experimental conditions. Then a flow-pattern identification method is developed. The method identifies the flow pattern based on the statistical characteristics of the void fraction. As a result, we confirm that (1) modified flow regime maps with accurate boundary lines are obtained, (2) the boundary line is independent of the cone angle of the mixing section, and (3) the identification method gives objective flow regime maps.

Keywords : gas-liquid two-phase flow, swirling flow, flow pattern, void fraction fluctuation, image processing

1. 緒論

旋回を伴う固気液三相流（以下，旋回固気液三相流）には，旋回を伴わない固気液三相流（以下，非旋回固気液三相流）にはない，以下の特性があると考えられる：(1)遠心分離効果により，管壁側では密度の大きい固液混合物が，管中心部では密度の小さい気相が流動する．よって固相が液体中に存在するため，非旋回固気液三相流の場合に比べて，局所的に浮力が増す．(2)旋回により固相は管壁に沿って螺旋状に上昇するため，固相が垂直方向に移動する非旋回固気液三相流の場合に比べて，固相上昇に要する力が小さくてすむ[1]．

既存の揚固用エアリフトポンプ[2]では非旋回気液二相流を用いて揚固するが，旋回気液二相流を用いれば，上記の特性を有する旋回固気液三相流となるため，揚固性能が向上し，従来よりも重い固体粒子の揚固が可能になると期待される．しかしながら，鉛直管内を流動する旋回固気液三相流に関する研究はほとんど行われておらず，その流動特性は明らかにされていない．また，その基礎となる旋回気液二相流に関する研究もほとんど行われていない．一般に，気液二相流の圧力損失や気相体積率は流動様式ごとにその特性が異なるので，まず広範囲の気液流量に対して流動様式を特定できる流動様式線図を整備する必要がある．

流動様式は目視観察により判別されることが多く，その判定基準に観測者の主観が介入するという欠点がある．そのため，流動様式の客観的な判別方法が望まれてきた．これまでに，客観的・定量的判別法の 1 つとして，気相変動の統計的特徴によって流動様式を推定する方法が提案されている．Jones and Zuber[3]は，X 線吸収法によって測定した気相体積率の確率密度関数の特性に基づき，気泡流，スラグ流および環状流を分類している．また，松井ら[4]は，差圧変動の統計的性質から，気泡流，スラグ流，チャーン流および環状流を判別した．

本研究では，テーパ角度（後述）の異なる 3 つの混合部を用いて広範囲の気液各相体積流束について旋回気液二相流の流動状況を観察し，詳細な流動様式線図を提示するとともに，テーパ角度が流動様式に与える影響を検討する．さらに，高速度ビデオカメラによる撮影画像から旋回気液二相流の気相体積率の時間変動を調べ，その統計的性質から旋回気液二相流の流動様式を客観的・定量的に判別する方法を検討する．

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略を示す．実験装置は，主に試験部，気液混合部，気液分離部，気相および液相の各供給部から構成される．試験部は，内径 D = 30 mm，高さ 5 m のアクリル樹脂製円管であり，その下端に円錐形状の気液混合部を設置した．本研究では，テーパ角度の異なる 3 つの混合部を使用した．以下，テーパ角度が小さい順に混合部 A, B, C とする．その概略を Fig. 2 に，底部の直径とテーパ角度を

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

Table 1 に示す．混合部底部には接線方向に内径 8 mm の 4 本の流入口を設け，このうち 3 本の流入口から液相を，残り 1 本の流入口から気相を強制流入させた．このように混合部内で気液両相に旋回力を付与することで，試験部内に旋回気液二相流を流動させた．試験部を流動する気液二相流は上昇するにつれて旋回力を失い，通常の気液二相流（非旋回気液二相流）の状態へと遷移する．その後，試験部上端にある気液分離部で気相は大気に開放され，液相は貯水タンクに戻る．なお，気液各相の使用流体は常温・常圧の空気および水である．

流動様式の観察区間は，気液流入口から管軸方向長さ L = 600～690 mm (L/D = 20～23) の箇所にある．円管表面での光の屈折による画像の歪みを低減させるため，

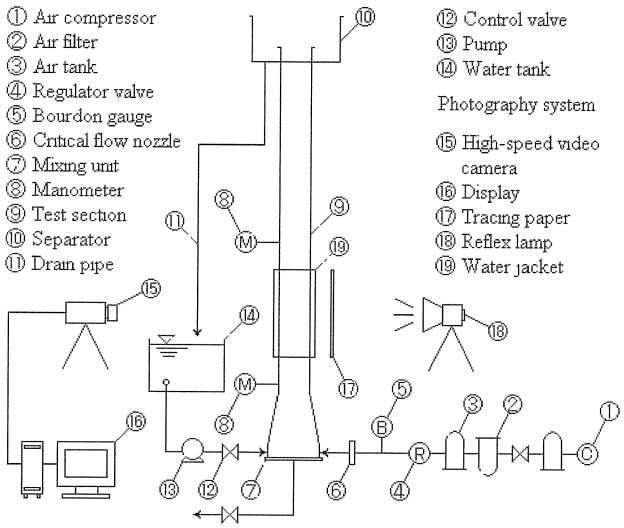


Fig. 1　Schematic diagram of experimental apparatus

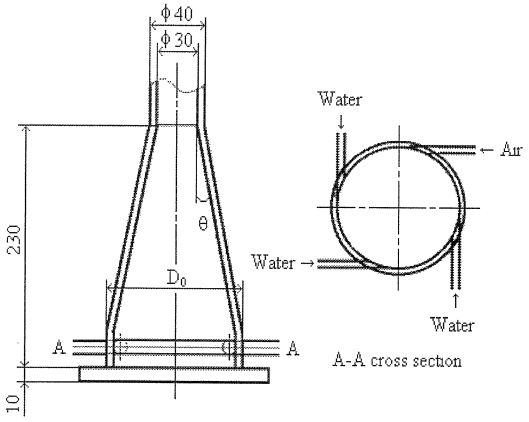


Fig. 2　Schematic diagram of mixing unit

Table 1　Dimensions of mixing units

	A	B	C
θ [°]	0	4	12
D_0 [mm]	30	58	120

アクリル樹脂製の矩形水槽を設置した．矩形水槽，トレース紙，レフランプおよび高速度ビデオカメラで構成される撮影系により，透過光で流れを撮影した．高速度ビデオカメラには PHOTRON 製 FASTCAM-NetC を使用し，レンズには CANON 製 TV ZOOM LENS PH6 ×8-1:1.0 MACRO を用いた．なお，管中心軸からレンズまでの距離は 750 mm，撮影速度は 1/500 s (500 FPS) であった．撮影画像は，大きさ 512×240 pixel，24 bit RGB カラーの BMP 形式の画像ファイルとして取り込んだ．

2.2　実験条件　　定常状態において高速度ビデオカメラで試験部を撮影し，その映像から流動様式の判別を行った．以前の研究[5),(6)]よりも詳細な流動様式線図を得るため，気液各相体積流束を各々$\langle J_G \rangle$ = 0.01～8.0 m/s, $\langle J_L \rangle$ = 0.10～0.90 m/s の範囲で 240 点について実験を行った．

2.3　画像処理　　通常の分散性気液二相流において，画像処理により管断面に分散する気泡の分布・形状を正確に測定するためには，ステレオ法により気泡画像を 2 方向から撮影する必要がある[7)]．しかしながら，旋回気液二相流は，遠心分離効果により管中心部に気相が集中するため，1 方向からの撮影だけでよく，画像処理が容易になるという特徴がある．

本研究では，連続する時系列画像から画像処理により旋回気液二相流の空間平均気相体積率$\langle \alpha_G \rangle$の時間変動を測定した．画像処理には，汎用の画像処理ソフトウェアである ImageJ を使用した．さらに，プログラミング言語として Visual C++を用い，二値化画像から気相体積率を算出するための画像処理プログラムを独自に作成した．Fig. 3 に，撮影された旋回気液二相流の流動状況の原画像とその画像処理の一例を示す．画像処理の具体的な手順を以下に示す：(1) 高速度ビデオカメラにより旋回気液二相流の流動状況を撮影し，その連続画像をパーソナルコンピュータに読み込む．(2) バッチ処理により管内の領域のみを切り抜く．(3) 画像を 8 bit のグレースケールに変換し，バックグラウンド補正およびノイズの除去を行う．(4) しきい値を一定として

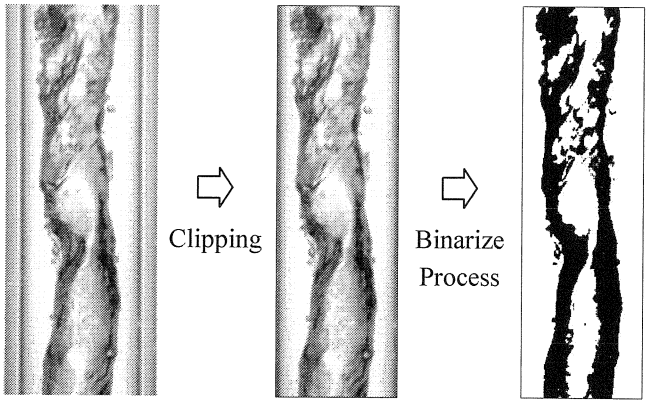


Fig. 3　Original image and image processing

二値化し，気相と液相を明確に区別する．(5)二値化画像を 24 bit に変換し，自作プログラムに読み込む．(6)任意の管断面内における気柱の断面形状を円に近似することで，次式により$\langle\alpha_G\rangle$を算出する．

$$\langle\alpha_G\rangle=\frac{\frac{\pi}{4}\sum_{J=1}^{H}d_J^{\,2}}{\frac{\pi}{4}W^2H}=\frac{1}{W^2H}\sum_{J=1}^{H}d_J^{\,2} \qquad (1)$$

ただし，大きさ W×H pixel の二値化画像を測定対象とし，d_j は画像の高さ H pixel のうち j 番目 (j = 1, 2, …, H) の画素列での気柱径に対するピクセル数である．Fig. 4 に示すように，直径 d_j，厚さ 1 pixel の黒色画素の円盤が管軸方向に積み上げられ，気柱を形成していると考える．なお，画像処理による気相体積率の測定は混合部 B のみについて行った．

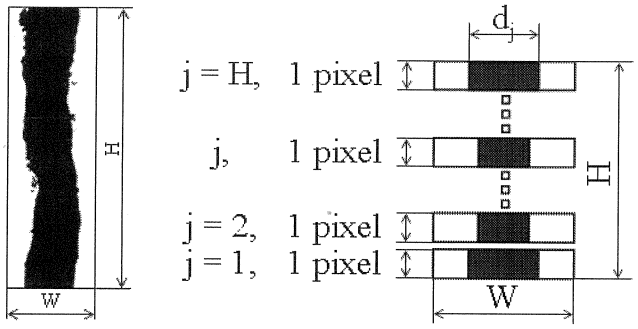


Fig. 4　Measurement of void fraction

3. 流動様式

3.1　旋回気液二相流の流動様式

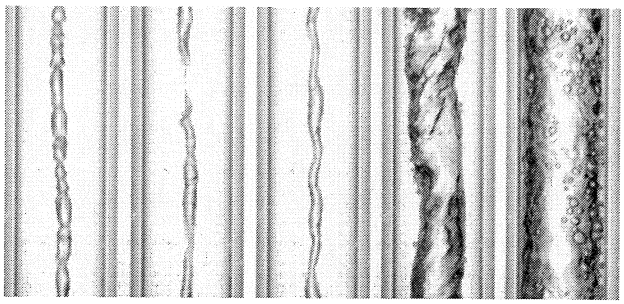
Fig. 5 に，液相体積流束$\langle J_L\rangle$ = 0.40 m/s のもとで，気相体積流束$\langle J_G\rangle$を 0.01～4.0 m/s の範囲で変化させた場合の，旋回気液二相流の流動様式を例示する．旋回気液二相流の流動様式は，従来の研究[1]に基づいて，主にチェーン流，カットツイスト流，ツイスト流，ツイストフロス流の 4 種類に大別した．以下，各流動様式の定義および特徴を示す．

3.1.1　チェーン流　Fig. 5 (a)は，本実験範囲において$\langle J_G\rangle$が最も小さい場合の流動様式であり，小気泡が鎖のように繋がって流動することから，チェーン流[1), (5), (6)]と呼んでいる．各々の小気泡の管軸方向長さは，多少のばらつきがあるが，ほぼ 3～8 mm であった．ただし，気泡の中には気泡同士の合体により 10～15 mm あるいはそれ以上になる場合も見られた．また，$\langle J_L\rangle$に対して$\langle J_G\rangle$が極端に小さい場合には，気泡の停滞および分裂が顕著に見られた．チェーン流は，非旋回流の領域で見られる気泡流が旋回力を与えられ，遠心分離効果によって管断面に分散していた小気泡が管中心部に集められたものであると考えられる．

3.1.2　カットツイスト流　Fig. 5 (a)よりも$\langle J_G\rangle$を増加させると，各々の小気泡が合体して大きくなり，管軸方向に長い気柱を形成する．Fig. 5 (b)の流動様式は，気柱表面にねじれ（ツイスト）が見られ，さらに一定の間隔をおいて分断されているので，カットツイスト流[1)]と呼んでいる．カットツイスト流は，非旋回流の領域で見られる気泡流とスラグ流の混合流が旋回力を与えられて遷移したものであると考えられる．

3.1.3　ツイスト流　Fig. 5 (b)よりも$\langle J_G\rangle$を増加させると，気柱の分断がなくなり，Fig. 5 (c-1)および(c-2)に示すように，全ての流動状態において気柱が繋がっている流動様式に遷移する．これをツイスト流[1), (5), (6)]と呼んでいる．Fig. 5 (c-1)は，ツイスト流の中でも$\langle J_G\rangle$が極端に小さく，カットツイスト流に近い流動様式であるため，気柱の直径は 3～8 mm 程度である．一方，Fig. 5 (c-2)の流動様式は，Fig. 5 (c-1)よりも$\langle J_G\rangle$が大きい場合であり，気相がほぼ管断面全域に広がっている．非旋回流に近いツイスト流では，気柱径の変化が大きいなど，スラグ流の特徴が見られることから，ツイスト流は，非旋回流の領域で見られるスラグ流が旋回力を与えられ，特徴的な砲弾形の気泡とその後流の小気泡群が遠心分離効果によって合体し，ねじれのある気柱を形成したものであると考えられる．また，旋回力が強いツイスト流では，気柱径の変化が比較的小さい．

3.1.4　ツイストフロス流　Fig. 5 (d)は，Fig. 5 (c-1)および(c-2)よりもさらに$\langle J_G\rangle$を増加させた場合であり，気相が管断面の全域に広がり，管壁付近に弱い旋回を伴った液膜が存在している．なお，断続的に多くの小気泡を含んだ液体スラグが発生し，その後流の液膜中には 1～2 mm 程度の小気泡が点在する．Fig. 5 (d)の流動様式は，非旋回流の領域で見られるフロス流（チャーン流）が旋回しているものと考えられ，気液界面にねじれが見られるので，ツイストフロス流[1), (5), (6)]と呼んでいる．



$\langle J_G\rangle$ [m/s]

0.01	0.08	0.2	0.8	4.0
(a)	(b)	(c-1)	(c-2)	(d)

(a) Chain flow (b) Cut twist flow (c-1), (c-2) Twist flow (d) Twist froth flow ($\langle J_L\rangle$ = 0.40 m/s)

Fig. 5　Flow patterns of swirling gas-liquid two-phase flow in a vertical pipe (Mixing unit C, θ = 12°)

3.2　流動様式線図　テーパ角度の異なる3つの混合部 A, B, C を用いて全実験条件について流動様式を判別し，世古口線図[8]にならって流動様式線図を作成した．Fig. 6 に，混合部 B の場合を例示する．以下，混合部 A, B, C の順に流動様式線図 A, B, C とする．図中の白抜きの記号は旋回力が非常に弱く，旋回を伴わない通常の気液二相流と同様の流動様式であり，黒塗りの記号は旋回気液二相流の流動様式を表す．また，図中の横棒は流動様式を明確に分類できない遷移状態を表している．流動様式が遷移すると考えられる付近に測定点を多く取ったため，既報[5), (6]よりも精緻な流動様式の境界線を得ることができた．

旋回流の領域では，第 3.1 節で示したチェーン流，カットツイスト流，ツイスト流，ツイストフロス流の4つの流動様式が観察された．また，非旋回流の領域では，主に気泡流，気泡流とスラグ流の混合流，スラグ流，フロス流の4つの流動様式が観察された．Fig.6 より，旋回流と非旋回流の境界線は，$\langle J_G \rangle$が 0.01～1.0 m/s のときは$\langle J_L \rangle$が 0.15～0.35 m/s の間に存在し，$\langle J_G \rangle$の増加とともに徐々に大きくなっていることがわかる．さらに，$\langle J_G \rangle$が 1.0 m/s 以上になれば，$\langle J_G \rangle$の増加とともに急激に小さくなっている．

混合部から分離部までの流動状況を観察すると，旋回気液二相流は上昇するにつれて旋回力を失い，通常の気液二相流の状態へと遷移した．すなわち，チェーン流は気泡流あるいは気泡流とスラグ流の混合流，カットツイスト流は気泡流とスラグ流の混合流あるいはスラグ流，ツイスト流はスラグ流あるいはフロス流，ツイストフロス流はフロス流へと遷移する．さらに，$\langle J_G \rangle$が 1.0 m/s 以上のツイスト流は，上昇するにつれてツイストフロス流へと遷移し，最終的にはフロス流へと遷移する．これらの特性は，混合部 A, C においても同様であった．

3.3　混合部テーパ角度の影響　Fig. 7 は，流動様式線図 A, B, C における各々の境界線を重ね合わせたものである．比較のために，図中の測定点は省き，さらに A の境界線を実線，B の境界線を破線，C の境界線を一点鎖線で表示した．流動様式線図 A, B, C の境界線を比較すると，各流動様式間にある程度の幅をもった遷移域が存在することを考慮すれば，A, B, C の境界線はカットツイスト流－ツイスト流間を除いてほぼ同じである．カットツイスト流－ツイスト流間の A, C と B の境界線に相違が見られる原因として，混合部のテーパ角度が気柱の分断に影響を及ぼすことや遷移域の幅が比較的広いことなどが考えられるが，今後さらに検討していく必要がある．

以上，カットツイスト流－ツイスト流間の境界近傍を除いて，旋回気液二相流の流動様式は混合部のテーパ角度に依存しない．

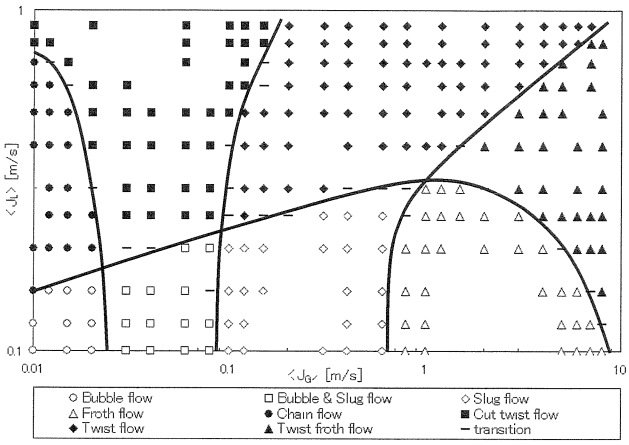


Fig. 6　Flow regime map B (Mixing unit B, θ = 4°)

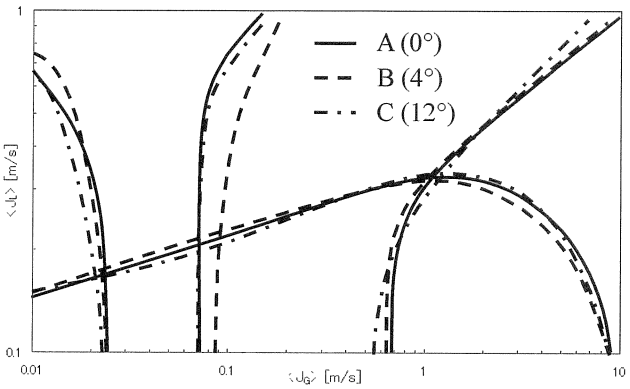
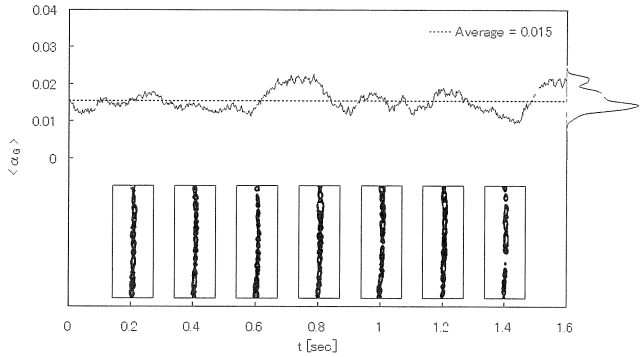


Fig. 7　Comparison of flow regime map

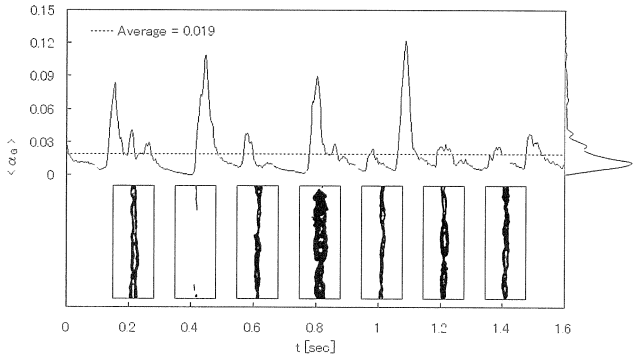
4. 流動様式判別

4.1　気相体積率変動と流動様式の関係　Fig. 8 に，混合部 B を用いて，$\langle J_L \rangle$ = 0.50 m/s のもとで$\langle J_G \rangle$を 0.015～1.5 m/s の範囲で変化させた場合の，空間平均気相体積率$\langle \alpha_G \rangle$の時間変動の測定結果を示す．図中に示した7枚の画像は，二値化処理を施した段階の画像であり，これらが撮影された時間は，撮影開始時間を t = 0 s として，各々t = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 s である．また，図右端には$\langle \alpha_G \rangle$の時間変動の確率密度関数（以下，PDF）を表示した．

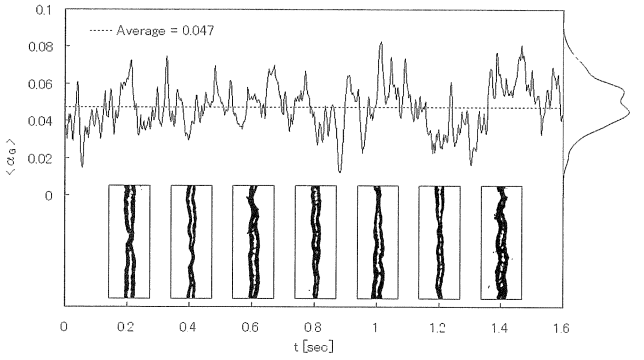
Fig. 8 (a)は，チェーン流流動時における$\langle \alpha_G \rangle$の変動波形である．ほぼ一定の大きさの小気泡が鎖のように繋がって流動しているため，$\langle \alpha_G \rangle$ が 0.01～0.02 の範囲で平均値付近を緩やかに変動している．その PDF は平均値付近に鋭いピークをもつ．Fig. 8 (b)は，カットツイスト流の流動状況における$\langle \alpha_G \rangle$の変動波形である．気柱には周期的な分断が見られ，その直後に比較的大きな気柱径の気体スラグが流動するため，変動波形は鋭い三角波と低気相体積率領域で変動する部分との組合せで構成される．その PDF は，チェーン流よりも$\langle \alpha_G \rangle$の変動波形の振幅が大きく，平均値より低い位置に単一ピークが存在している．Fig. 8 (c)は，$\langle J_G \rangle$が小さいツイスト流の流動状況における$\langle \alpha_G \rangle$の変動波形である．



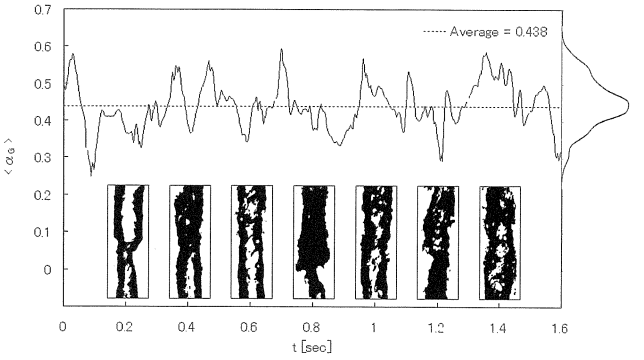
(a) Chain flow ($\langle J_L \rangle$ = 0.50 m/s, $\langle J_G \rangle$ = 0.015 m/s)



(b) Cut twist flow ($\langle J_L \rangle$ = 0.50 m/s, $\langle J_G \rangle$ = 0.06 m/s)



(c) Twist flow ($\langle J_L \rangle$ = 0.50 m/s, $\langle J_G \rangle$ = 0.3 m/s)



(d) Twist flow ($\langle J_L \rangle$ = 0.50 m/s, $\langle J_G \rangle$ = 1.5 m/s)

Fig. 8　Fluctuations of $\langle \alpha_G \rangle$ calculated from binary images, and its PDF characteristics

気柱径の変化が比較的小さく，全体的に多少のうねりはあるが，平均値を中心に$\langle \alpha_G \rangle$が小刻みに変動している．その PDF は，正規分布に近い確率分布ではあるが，顕著なピークは確認できない．Fig. 8 (d)は，$\langle J_G \rangle$が大きいツイストフロス流に近いツイスト流の流動時における$\langle \alpha_G \rangle$の変動波形である．全体的に平均値を中心に変動しているが，気柱径の変化が大きく，それに伴って$\langle \alpha_G \rangle$が 0.3～0.6 の範囲で急激に増加・減少している．その PDF は正規分布に近い．なお，$\langle \alpha_G \rangle$の時間平均値は$\langle J_G \rangle$の増加とともに大きくなっている．

4.2　気相体積率変動に基づく流動様式判別　チェーン流，カットツイスト流，ツイスト流における気相体積率変動の PDF を Fig. 9 に例示する．本研究では，これら PDF の流動様式ごとの特徴と，$\langle \alpha_G \rangle$の変動波形の最大値または最小値，標準偏差から，チェーン流，カットツイスト流，ツイスト流を判別した．以下，各流動様式の PDF の特徴および判定基準について説明する．

(a) チェーン流　チェーン流における気相体積率変動の PDF は，$\langle \alpha_G \rangle$ = 0～0.03 の低気相体積率領域において平均値付近に鋭いピークをもつ．Fig. 10 は，PDF の平均値 m と標準偏差σの統計パラメータ面における流動様式分布である．$\langle J_L \rangle$が一定のとき，σはほぼ一定であった．そこで，$\langle \alpha_G \rangle$の最大値が 0.03 未満で，かつσが 0.007 未満のとき，チェーン流と判定した．

(b) カットツイスト流　カットツイスト流における気相体積率変動の PDF は，高気相体積率側にすそをひいており，平均値よりも低い位置に顕著なピークが存在する．また，σはチェーン流や，いくつかの$\langle \alpha_G \rangle$の低いツイスト流よりも大きい．$\langle \alpha_G \rangle$の最大値が 0.03 以上で，かつσが 0.007 以上のとき，カットツイスト流と判定した．

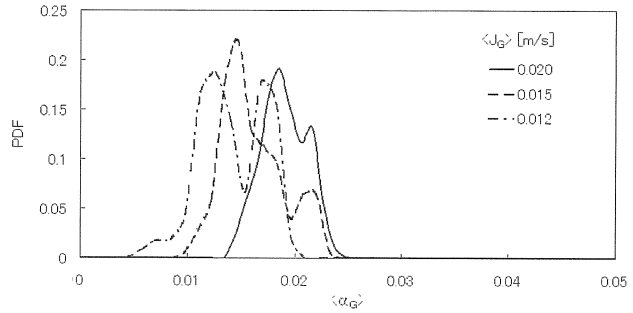
(c) ツイスト流　ツイスト流における気相体積率変動の PDF は，平均値付近に単一ピークをもつ正規分布に近い確率分布である．なお，$\langle J_G \rangle$の増加に伴って$\langle \alpha_G \rangle$の m およびσは大きくなっている．そこで，$\langle \alpha_G \rangle$の最小値が 0.05 以上の場合，ツイスト流と判定した．

Fig. 11 に，気相体積率変動の統計的性質を用いた旋回気液二相流の流動様式の判定結果を示す．比較のため，Fig. 6 の流動様式線図 B の境界線（実線）を重ね合わせている．各流動様式間にある程度の幅をもった遷移域が存在することを考慮すれば，チェーン流－カットツイスト流間およびカットツイスト流－ツイスト流間の境界線はほぼ一致している．

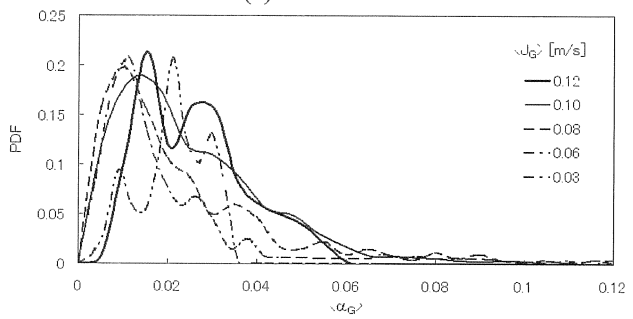
以上，提案した流動様式判別法によれば，チェーン流，カットツイスト流，ツイスト流を，目視と同様に，ただし定量的判定基準に基づいて判別することができる．

今後，上述の各流動様式の判定基準に加えて，ひずみ係数，とがり係数などの統計パラメータやパワース

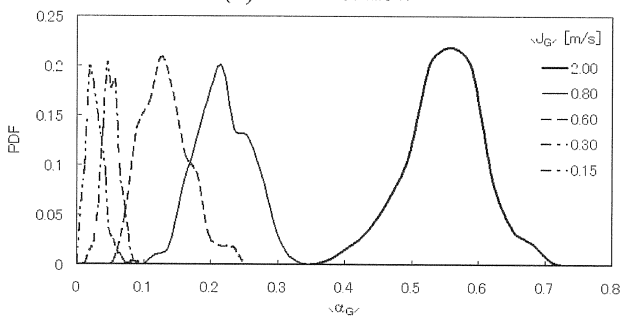
ペクトル密度（PSD）の特徴を調べ，より客観的・定量的な旋回気液二相流の流動様式判別法を検討する予定である．また，全ての流動様式を判定できるようにするため，ツイスト流－ツイストフロス流間の境界および旋回流－非旋回流間の境界についても定量的な判定基準の整備を進める．



(a) Chain flow



(b) Cut twist flow



(c) Twist flow

Fig. 9　PDF of void fraction fluctuation ($\langle J_L \rangle$ = 0.50 m/s)

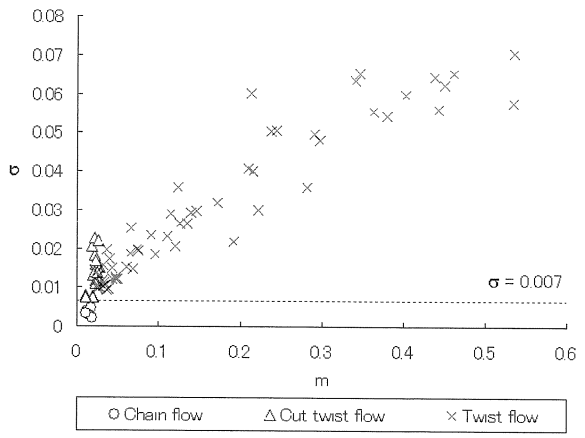


Fig. 10　Distribution of flow regime on the m–σ plane

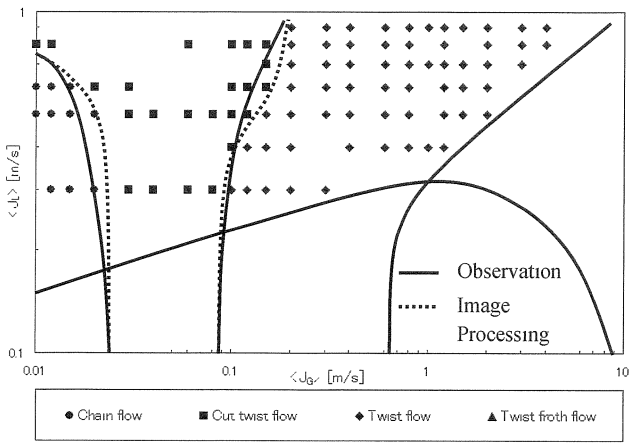


Fig. 11　Flow regime map B (Mixing unit B, θ = 4°)

5. 結論

内径 30 mm，高さ 5 m の鉛直円管において，テーパ角度の異なる 3 つの混合部（0°, 4°, 12°）を用いて流動させた旋回気液二相流の流動状況を観察し，流動様式の目視判定を行った．さらに，高速度ビデオカメラによる撮影画像から，画像処理により旋回気液二相流の空間平均気相体積率を算出する方法を提案するとともに，本手法を用いて各流動様式における気相体積率の時間変動を調べた．その結果，以下の結論を得た．

(1) 気液各相体積流束からチェーン流，カットツイスト流，ツイスト流，ツイストフロス流を特定できる詳細な流動様式線図を得た．

(2) カットツイスト流－ツイスト流間の境界を除いて，混合部のテーパ角度の違いは流動様式に影響しない．

(3) 気相体積率変動の統計的性質を用いて旋回気液二相流の流動様式を客観的・定量的に判別する方法の 1 つの方向性を示した．

参考文献

(1) 高垣慎太郎，その他，日本混相流学会年会講演会講演論文集, pp. 152-153, 2007.

(2) Gibson, A. H., Hydraulics and Its Application, 5th ed. Constable, London, 1961.

(3) O. C. Jones and N. Zuber, Int. J. Multiphase Flow, 2, pp. 273-306, 1975.

(4) 松井剛一，その他，計測自動制御学会論文集，17-1, pp. 85-91, 1981.

(5) H. Shakutsui, et al., Proc. of the JSME- KSME Thermal Engineering Conference, 3-69, 2000.

(6) 赤対秀明，その他，日本混相流学会年会講演会講演論文集, pp. 61-62, 2003.

(7) 賞雅寛而，三好直巳，機論，59-564, B, 2403-2409, 1993.

(8) 日本機械学会編：「改訂 気液二相流技術ハンドブック」，コロナ社, 2006.

大型柔軟宇宙構造物の最適分散サーボ系の設計法

河野　佑*　　小林　洋二**

A Design Method of Optimal Decentralized Servo Control for Large Flexible Space Structures

Yu KAWANO*　　Yohji KOBAYASHI**

ABSTRACT

This paper considers a decentralized servo control method for position and attitude of large flexible space structures under the assumption that sensors and actuators are collocated. To stabilize each closed-loop subsystem, the proper approximated DVDFB (Direct Velocity and Displacement Feedback) is employed as a local controller, and to make position and attitude of the closed-loop subsystems track desirable step reference signals, feedforward compensators are locally added to each subsystem. It is shown that the closed-loop subsystems minimize quadratic cost functions by choosing local controller gains appropriately. Furthermore, it is also shown that an overall closed-loop system connecting the closed-loop subsystems by flexible links becomes optimal for a quadratic cost function. Finally, we illustrate a numerical example which suggests us a way of calculating local controller gains.

Keywords: large flexible space structures, servo problem, decentralized control, optimization

1. はじめに

宇宙太陽発電衛星 (1) のような宇宙構造物は，打ち上げコスト削減のために構造物の計量化が図られ，その結果，構造物は剛性が低下した柔軟な構造物となる．このような柔軟宇宙構造物の位置と姿勢の制御則として，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，変位と速度の静的出力フィードバックを施すDVDFB(2) が有効であることが知られている．このDVDFBは閉ループシステムをロバスト安定化し，フィードバックゲインを適当に選ぶことによって閉ループシステムを最適レギュレータにすることができる．しかしながら，DVDFBを実装するためには速度センサと変位センサが必要であり，コスト面から速度センサを用いることは好ましくない．この問題に対して，鹿田らは構造物の変位出力のみを入力とするプロパーなコントローラでDVDFBの特性を近似する方法を考え，構造物の位置と姿勢を最適制御できることを示した (3)．一方，大型柔軟宇宙構造物は，その巨大さゆえ全体を一度に打ち上げることができず，サブシステムごとに宇宙空間へ打ち上げられ，宇宙空間で建造される．このような宇宙構造物に対する制御には，サブシステムごとに制御を行う分散制御が適している．このことを考慮して，文献 (2) のDVDFBと文献 (3) の制御手法は，分散制御則へ拡張されている (4), (5)．

文献 (2) ～ (5) の方法は，外乱に対して定値保持を行うレギュレータ問題を扱っているが，宇宙太陽発電衛星によって効率よく発電を行うためには，太陽電池パドルを意図する位置と姿勢で太陽に向けておくようにサーボ系を設計することが必要となる．この問題を解決するために，本稿では大型柔軟宇宙構造物の位置と姿勢（いいかえれば変位出力）をステップ関数の目標値に追従させる分散サーボ系を構成することを考える．まず，大型宇宙構造物をサブシステムに分け，サブシステムの運動方程式を記述する．つぎに，文献 (3) の変位出力のみを用いたプロパーなコントローラに，目標値追従性能を持たせるためのフィードフォワード要素を付加した局所コントローラを考える．そして，この局所コントローラによってサーボ系を構成し，得られた閉ループサブシステムがある2次形式評価関数を最小にする最適サーボ系となるために，局所コントローラのパラメータが満たすべき条件を導出する．さらに，閉ループサブシステムをダンパとバネで近似される柔軟なリンクで柔結合して得られる閉ループ全体システムを記述し，これが最適分散サーボ系となるために，局所コントローラのパラメータが満たすべき条件を導出する．最後に，提案法によって柔軟宇宙構造物の位置と姿勢を目標値に追従させる最適分散サー

*専攻科　機械システム工学専攻
**機械工学科　教授

ボ系が構成できることを数値例で示す．

2. 制御対象の記述

本稿では，ℓ 個のサブシステムから構成される大型柔軟宇宙構造物を考え，その第 i サブシステムのダイナミクスは平衡状態を基準として，つぎの 2 階微分方程式で記述されるものとする．

$$M_i\ddot{q}_i(t) + D_i\dot{q}_i(t) + K_i q_i(t) = L_i u_i(t) \qquad (1)$$
$$i = 1, 2, ..., \ell$$

ただし，$q_i(t) \in \Re^{n_i}$ は変位/角変位を表すベクトル，$u_i(t) \in \Re^{r_i}$ は力/トルクを表す操作入力ベクトルである．また，M_i，D_i，$K_i \in \Re^{n_i \times n_i}$ はそれぞれ構造物の質量/慣性モーメント，減衰，剛性を表す対称行列であり，M_i は正定行列，D_i，K_i は半正定行列である．D_i と K_i 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．行列 $L_i \in \Re^{n_i \times r_i}$ は構造物への入力の伝わり方を表し，アクチュエータの配置によって決まる列フルランクの行列である．ここで，D_i, K_i において次式が成り立つものとする．

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} D_i & K_i \end{bmatrix} = \mathrm{rank}\ K_i \qquad (2)$$

本稿では，すべてのサブシステムにおい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・コロケーションが実現されていると仮定する．このとき，変位出力 $y_i(t) \in \Re^{r_i}$ は次式で表される．

$$y_i(t) = L_i^T q_i(t) \qquad (3)$$

行列 L_i^T は出力の検出のされ方を表し，センサの配置によって決まる行列であり，入力の伝わり方を表す行列 L_i と転置の関係になる．ここで，つぎの仮定をおく

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} D_i & L_i \end{bmatrix} = n_i \qquad (4)$$

これと (2) 式の仮定より

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} K_i & L_i \end{bmatrix} = n_i \qquad (5)$$

が成り立つ．(4)，(5) 式は (1)，(3) 式の第 i サブシステムの剛体モードがすべて可制御かつ可観測であることを意味している．

3. 大型柔軟宇宙構造物の最適分散サーボ系

3.1 局所サーボコントローラの構成　閉ループサブシステムの内部安定化を図るフィードバック制御則に，フィードフォワード要素を付加することによって，(1)，(3) 式の第 i サブシステムの変位出力をステップ関数で与えられる目標値に追従させることを考える．

フィードバック制御則には，文献 (3) の変位出力を用いたプロパーなコントローラを使用する．この制御則は，つぎのようにして得られる．まず，(1) 式の制御対象への操作入力 $u_i(t)$ を次式の高域遮断フィルタの出力で与える．

$$\dot{z}_i(t) = -a_i z_i(t) + v_i(t) \qquad (6)$$
$$u_i(t) = z_i(t) \qquad (7)$$

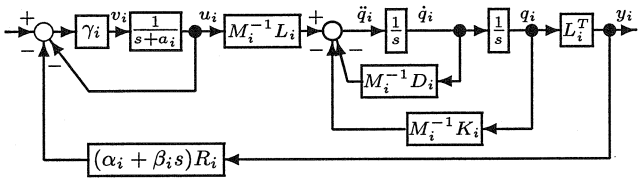


Fig. 1 Conceptional block diagram of the i-th closed-loop subsystem

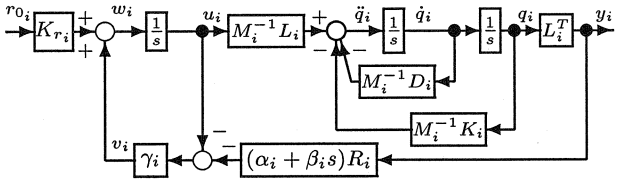


Fig. 2 Conceptional block diagram of the i-th servo subsystem

ここで，a_i はフィルタの折点周波数を表し，$v_i(t) \in \Re^{r_i}$ はフィルタへの入力，$z_i(t) \in \Re^{r_i}$ はフィルタの出力を表す．フィルタへの入力 $v_i(t)$ を $y_i(t)$，$z_i(t)$ と仮想的に $\dot{y}_i(t)$ を用いて次式で与える．

$$v_i(t) = -\gamma_i(\alpha_i R_i y_i(t) + \beta_i R_i \dot{y}_i(t) + z_i(t)) \qquad (8)$$

ただし，α_i，β_i，γ_i はいずれも正のスカラであり，行列 $R_i \in \Re^{r_i \times r_i}$ は任意の正定行列である．(1)，(3) 式のサブシステム，(6)，(7) 式のフィルタと (8) 式のフィードバックにより構成される閉ループサブシステムの概念的なブロック線図を **Fig.1** に示す．(6)，(7) 式のフィルタと (8) 式のフィードバックで構成されるコントローラの伝達関数を計算すると，

$$u_i(s) = -\frac{\gamma_i(\beta_i s + \alpha_i)}{s + (a_i + \gamma_i)} R_i y_i(s) \qquad (9)$$

となる．(9) 式から，このコントローラは，制御対象の変位出力 y_i のみを入力とするプロパーな一次のコントローラとして実装できることがわかる．

(9) 式の制御則はこのままでは目標値追従性能を持っていない．そこで，(1)，(3) 式の変位出力を目標値に追従させるために，(6)，(7) 式のフィルタへの入力を (8) 式の $v_i(t)$ に目標値 $r_{0_i}(t) \in \Re^{r_i}$ を $K_{r_i} \in \Re^{r_i \times r_i}$ 倍した信号を加えた $w_i(t) \in \Re^{r_i}$ で与える．

$$w_i(t) = v_i(t) + K_{r_i} r_{0_i}(t) \qquad (10)$$

(1)，(3) 式のサブシステム，(6)，(7) 式のフィルタと (8)，(10) 式の制御則より構成されるサーボ系の概念的なブロック線図を **Fig.2** に示す．なお，**Fig.2** において，構造物の変位出力をステップ関数の目標値へ追従させようとすると，内部モデル原理 [6] より，一巡伝達関数に積分器が存在することが必要となるため，高域遮断フィルタの折点周波数 a_i を $a_i = 0$ としている（以下では，$a_i = 0$ とする）．

3.2 サブシステムに対する最適サーボ系

(1), (3) 式のサブシステムと (6), (7) 式のフィルタからなる拡大系の状態方程式は

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i w_i(t) \tag{11}$$

$$x_i(t) = \begin{bmatrix} q_i^T(t) & \dot{q}_i^T(t) & z_i^T(t) \end{bmatrix}^T$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & I_{n_i} & 0 \\ -M_i^{-1}K_i & -M_i^{-1}D_i & M_i^{-1}L_i \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_{r_i} \end{bmatrix}^T$$

となる．以下では，目標値追従後の平衡状態における $x_i(t)$, $w_i(t)$, $y_i(t)$, $q_i(t)$, $u_i(t)$, $z_i(t)$ をそれぞれ x_{si}, w_{si}, y_{si}, q_{si}, u_{si}, z_{si} で表すことにする．このとき，平衡状態における構造物の変位出力 y_{si} を目標値 $r_{0_i}(t)$ に追従させるためには，

$$y_{si} = \begin{bmatrix} L_i^T & 0 & 0 \end{bmatrix} x_{si} = r_{0_i}(t) \tag{12}$$

が成り立つ必要がある．また，定常状態では $\dot{q}_{s_i} = 0$ より，

$$\begin{bmatrix} 0 & I_{n_i} & 0 \\ -M_i^{-1}K_i & -M_i^{-1}D_i & M_i^{-1}L_i \end{bmatrix} x_{si} = 0 \tag{13}$$

が成り立ち，(12), (13) 式より

$$\begin{bmatrix} 0 & I_{n_i} & 0 \\ -M_i^{-1}K_i & -M_i^{-1}D_i & M_i^{-1}L_i \\ L_i^T & 0 & 0 \end{bmatrix} x_{si} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_{r_i} \end{bmatrix}^T r_{0_i}(t) \tag{14}$$

となる．ここで，(4), (5) 式の剛体モードに関する仮定より，(14) 式の左辺にある行列は正則である．したがって，逆行列が存在し，

$$x_{si} = \begin{bmatrix} 0 & I_{n_i} & 0 \\ -M_i^{-1}K_i & -M_i^{-1}D_i & M_i^{-1}L_i \\ L_i^T & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_{r_i} \end{bmatrix}^T r_{0i}(t) \tag{15}$$

と計算することができる．

いま，サブシステムにおいて平衡状態からの偏差系

$$\dot{\tilde{x}}_i(t) = A_i \tilde{x}_i(t) + B_i \tilde{w}_i(t) \tag{16}$$

$$\tilde{x}_i(t) = x_i(t) - x_{si},\ \tilde{w}_i(t) = w_i(t) - w_{si}$$

を考える．このとき，つぎの定理が成り立つ．

[定理1] (16) 式の偏差系に対する局所フィードバックを次式で与える．

$$\tilde{w}_i(t) = -\gamma_i(\alpha_i R_i \tilde{y}_i(t) + \beta_i R_i \dot{\tilde{y}}_i(t) + \tilde{z}_i(t)) \tag{17}$$

$$\tilde{y}_i(t) = y_i(t) - y_{si},\ \tilde{z}_i(t) = z_i(t) - z_{si}$$

このとき，パラメータ α_i, β_i, γ_i を適当に選べば，(17) 式の局所フィードバックは，つぎの 2 次形式評価関数を最小にする最適フィードバックになり，閉ループサブシステムは最適レギュレータになる．

$$J_i = \int_0^\infty (\tilde{x}_i(t)^T Q_i \tilde{x}_i(t) + \tilde{w}_i(t)^T \tilde{R}_i \tilde{w}_i(t))dt \tag{18}$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} Q_{i11} & Q_{i12} & Q_{i13} \\ Q_{i12}^T & Q_{i22} & Q_{i23} \\ Q_{i13}^T & Q_{i23}^T & Q_{i33} \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$Q_{i11} = \frac{\alpha_i}{\beta_i}(2K_i + \alpha_i L_i R_i L_i^T)$$

$$Q_{i12} = 0,\ Q_{i13} = \frac{1}{\gamma_i} K_i M_i^{-1} L_i$$

$$Q_{i22} = 2(D_i - \frac{\alpha_i}{\beta_i} M_i) + \beta_i L_i R_i L_i^T$$

$$Q_{i23} = \frac{1}{\gamma_i}(D_i - \frac{\alpha_i}{\beta_i} M_i) M_i^{-1} L_i$$

$$Q_{i33} = \frac{1}{\beta_i} R_i^{-1} - \frac{2}{\gamma_i} L_i^T M_i^{-1} L_i$$

$$\tilde{R}_i = \frac{1}{\beta_i \gamma_i^2} R_i^{-1} \tag{20}$$

(証明) (18) 式の評価関数の重み行列 Q_i, $\tilde{R}_i$ に対する Riccati 方程式

$$P_i A_i + A_i^T P_i - P_i B_i \tilde{R}_i^{-1} B_i^T P_i = -Q_i \tag{21}$$

の解 P_i は，

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{i11} & \frac{\alpha_i}{\beta_i} M_i & \frac{\alpha_i}{\beta_i \gamma_i} L_i \\ \frac{\alpha_i}{\beta_i} M_i & M_i & \frac{1}{\gamma_i} L_i \\ \frac{\alpha_i}{\beta_i \gamma_i} L_i^T & \frac{1}{\gamma_i} L_i^T & \frac{1}{\beta_i \gamma_i} R_i^{-1} \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$P_{i11} = \frac{\alpha_i}{\beta_i} D_i + K_i + \alpha_i L_i R_i L_i^T$$

となる．ここで，(19) 式の Q_i と (22) 式の P_i を正定にするような，パラメータ α_i, β_i, γ_i が必ず存在することは付録 1, 2 のようにして示すことができる．

(22) 式の P_i を用いて最適制御則を計算すると，

$$\tilde{w}_i(t) = -\tilde{R}_i^{-1} B_i^T P_i \tilde{x}_i(t) = -\gamma_i(\alpha_i R_i \tilde{y}_i(t) + \beta_i R_i \dot{\tilde{y}}_i(t) + \tilde{z}_i(t)) \tag{23}$$

となる．これは (17) 式の局所フィードバックと一致する．したがって，(16) 式の偏差系に (17) 式の局所フィードバックを施して構成される閉ループサブシステムは，(18) 式の評価関数を最小にする最適レギュレータを構成することがわかる． **(証明終わり)**

定常状態において (16) 式を考えると，$\dot{z}_{s_i} = 0$ であることから $w_{si} = 0$ となり，これらと (23) 式の関係から

$$w_i(t) = v_i(t) + \gamma_i(\alpha_i R_i y_{s_i} + \beta_i R_i \dot{y}_{s_i} + z_{s_i}) \tag{24}$$

が成り立つ．上式に (15) 式を用いてまとめると，

$$w_i(t) = v_i(t) + K_{ri} r_{0_i}(t) \tag{25}$$

$$K_{ri} = \begin{bmatrix} \alpha_i \gamma_i R_i L_i^T & \beta_i \gamma_i R_i L_i^T & \gamma_i I_{r_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ -M_i^{-1}K_i & -M_i^{-1}D_i & M_i^{-1}L_i \\ L_i^T & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{r_i} \end{bmatrix}$$

となる．したがって，(11) 式の拡大系に (25) 式の制御則を施したとき，$y_{s_i} = r_{0_i}(t)$ となるサーボ系が構成でき，それは定理 1 より (18) 式の評価関数を最小にする最適サーボ系になっている．

3.3 最適分散サーボ系 (1)，(3) 式で表される第 i サブシステムとフィルタから構成される拡大系を，ダンパとバネで近似される柔軟なリンクによって他のサブシステムと柔結合したとき，開ループ全体システムの状態方程式は次式で与えられる．

$$\dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{B}\bar{w}(t) \tag{26}$$

$$\bar{x}(t) = \left[\begin{array}{cccc} \bar{q}^T(t) & \dot{\bar{q}}^T(t) & \bar{z}^T(t) \end{array}\right]^T$$

$$\bar{A} = \left[\begin{array}{ccc} 0 & I_{\bar{n}} & 0 \\ -\bar{M}^{-1}\bar{K} & -\bar{M}^{-1}\bar{D} & \bar{M}^{-1}\bar{L} \\ 0 & 0 & 0 \end{array}\right], \ \bar{B} = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ I_{\bar{r}} \end{array}\right]$$

ただし，ベクトルと行列は以下の通りである．

$$\bar{q}(t) = \left[\begin{array}{cccc} q_1^T(t) & q_2^T(t) & \cdots & q_\ell^T(t) \end{array}\right]^T$$

$$\bar{w}(t) = \left[\begin{array}{cccc} w_1^T(t) & w_2^T(t) & \cdots & w_\ell^T(t) \end{array}\right]^T$$

$$\bar{z}(t) = \left[\begin{array}{cccc} z_1^T(t) & z_2^T(t) & \cdots & z_\ell^T(t) \end{array}\right]^T$$

$$\bar{r}_0(t) = \left[\begin{array}{cccc} r_{0_1}^T(t) & r_{0_2}^T(t) & \cdots & r_{0_\ell}^T(t) \end{array}\right]^T$$

$$\bar{M} = \mathrm{diag}\{M_i\}_{i=1,2,\ldots,\ell}, \ \bar{L} = \mathrm{diag}\{L_i\}_{i=1,2,\ldots,\ell}$$

$$\bar{D} = \mathrm{diag}\{D_i\}_{i=1,2,\ldots,\ell} + \sum_{i=1}^{\ell-1}\sum_{j=i+1}^{\ell} \tilde{N}_{cij} D_{cij} \tilde{N}_{cij}^T$$

$$\bar{K} = \mathrm{diag}\{K_i\}_{i=1,2,\ldots,\ell} + \sum_{i=1}^{\ell-1}\sum_{j=i+1}^{\ell} \tilde{N}_{cij} K_{cij} \tilde{N}_{cij}^T$$

ここで，D_{cij}，K_{cij} は，サブシステムの結合に用いられる柔軟なリンクのダンパとバネの特性を表す正定行列であり，N_{cij} はサブシステムの柔軟なリンクによる結合を表す行列である．(26) 式から，開ループ全体システムについて定常値との差を求めた偏差系（以下では，これを拡大偏差系とよぶ）を計算すると，

$$\dot{\breve{x}}(t) = \bar{A}\breve{x}(t) + \bar{B}\breve{w}(t) \tag{27}$$

$$\breve{x}(t) = \bar{x}(t) - \bar{x}_{s_i}$$

$$\breve{w}(t) = \left[\begin{array}{cccc} \tilde{w}_1^T(t) & \tilde{w}_2^T(t) & \cdots & \tilde{w}_\ell^T(t) \end{array}\right]^T$$

となる．ただし，$\bar{x}_{s_i}$ は目標値追従後の平衡状態における $\bar{x}(t)$ の値である．一方，(27) 式の偏差系に施す (17) 式の局所フィードバックをまとめて表すと，

$$\breve{w}(t) = -\bar{\gamma}(\bar{\alpha}\bar{R}\breve{y}(t) + \bar{\beta}\bar{R}\dot{\breve{y}}(t) + \breve{z}(t)) \tag{28}$$

$$\breve{y}(t) = \left[\begin{array}{cccc} \tilde{y}_1^T(t) & \tilde{y}_2^T(t) & \cdots & \tilde{y}_\ell^T(t) \end{array}\right]^T$$

$$\breve{z}(t) = \left[\begin{array}{cccc} \tilde{z}_1^T(t) & \tilde{z}_2^T(t) & \cdots & \tilde{z}_\ell^T(t) \end{array}\right]^T$$

となる．ただし，

$$\bar{\alpha} = \mathrm{diag}\{\alpha_i I_{r_i}\}_{i=1,2,\ldots,\ell}, \ \bar{\beta} = \mathrm{diag}\{\beta_i I_{r_i}\}_{i=1,2,\ldots,\ell}$$

$$\bar{\gamma} = \mathrm{diag}\{\gamma_i I_{r_i}\}_{i=1,2,\ldots,\ell}, \ \bar{R} = \mathrm{diag}\{R_i\}_{i=1,2,\ldots,\ell}$$

である．このとき，つぎの定理が成り立つ．

[定理2] (27) 式の拡大偏差系に (28) 式の局所フィードバックを施して得られる閉ループ全体システムは，つぎの 2 次形式評価関数を最小にする最適レギュレータになる．

$$\bar{J} = \int_0^\infty (\breve{x}(t)^T \bar{Q} \breve{x}(t) + \breve{w}(t)^T \breve{R} \breve{w}(t)) dt \tag{29}$$

$$\bar{Q} = \left[\begin{array}{ccc} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{13} \\ \bar{Q}_{12}^T & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{23} \\ \bar{Q}_{13}^T & \bar{Q}_{23}^T & \bar{Q}_{33} \end{array}\right] \tag{30}$$

$$\bar{Q}_{11} = \bar{\alpha}\bar{\beta}^{-1}\bar{K} + \bar{K}\bar{\beta}^{-1}\bar{\alpha} + \bar{\alpha}^2\bar{\beta}^{-1}\bar{L}\bar{R}\bar{L}^T$$

$$\bar{Q}_{12} = \tfrac{1}{2}(\bar{\alpha}\bar{\beta}^{-1})^{\frac{1}{2}}\{(\bar{\alpha}\bar{\beta}^{-1})^{\frac{1}{2}}\bar{D} - \bar{D}(\bar{\beta}^{-1}\bar{\alpha})^{\frac{1}{2}}\}$$

$$\bar{Q}_{13} = \bar{K}\bar{\gamma}^{-1}\bar{M}^{-1}\bar{L}$$

$$\bar{Q}_{22} = 2(\bar{D} - \bar{\alpha}\bar{\beta}^{-1}\bar{M}) + \bar{\beta}\bar{L}\bar{R}\bar{L}^T$$

$$\bar{Q}_{23} = (\bar{D} - \bar{\alpha}\bar{\beta}^{-1}\bar{M})\bar{\gamma}^{-1}\bar{M}^{-1}\bar{L}$$

$$\bar{Q}_{33} = (\bar{\beta}\bar{R})^{-1} - 2\bar{\gamma}^{-1}\bar{L}^T\bar{M}^{-1}\bar{L}$$

$$\breve{R} = (\bar{\beta}\bar{\gamma}^2\bar{R})^{-1} \tag{31}$$

ただし，α_i，β_i，γ_i は行列 $\bar{Q}$ を正定にし，かつ，次式の行列 $\bar{P}$ を正定にするように選ばれるものとする．

$$\bar{P} = \left[\begin{array}{ccc} \bar{P}_{11} & \bar{\alpha}\bar{\beta}^{-1}\bar{M} & \bar{\alpha}(\bar{\beta}\bar{\gamma})^{-1}\bar{L} \\ \bar{\alpha}\bar{\beta}^{-1}\bar{M} & \bar{M} & \bar{\gamma}^{-1}\bar{L} \\ \bar{\alpha}(\bar{\beta}\bar{\gamma})^{-1}\bar{L}^T & \bar{\gamma}^{-1}\bar{L}^T & (\bar{\beta}\bar{\gamma}\bar{R})^{-1} \end{array}\right] \tag{32}$$

$$\bar{P}_{11} = (\bar{\alpha}\bar{\beta}^{-1})^{\frac{1}{2}}\bar{D}(\bar{\beta}^{-1}\bar{\alpha})^{\frac{1}{2}} + \bar{K} + \bar{\alpha}\bar{L}\bar{R}\bar{L}^T$$

(証明) 制御対象の持つ不安定極は，固有値 0 の剛体モードのみであり，これらの剛体モードは (4)，(5) 式より可制御であるから，制御対象は可安定である．一方，制御対象に直列に接続されている (6)，(7) 式のフィルタは有限の零点を持たないため，制御対象とフィルタの間で不安定な極と零点の相殺は起こらない．よって，制御対象とフィルタからなる (27) 式の拡大系偏差系 $(\bar{A},\ \bar{B})$ は可安定である．$(\bar{A},\ \bar{B})$ は可安定であれば，(29) 式の評価関数の重み行列 $\bar{Q}$，$\breve{R}$ に対する Riccati 方程式

$$\bar{P}\bar{A} + \bar{A}^T\bar{P} - \bar{P}\bar{B}\breve{R}^{-1}\bar{B}^T\bar{P} = -\bar{Q} \tag{33}$$

は (32) 式の一意解 $\bar{P}$ をもつ．ここで，定理 2 の仮定より (30) 式の $\bar{Q}$ と (32) 式の $\bar{P}$ が正定になるように，局所コントローラのパラメータ α_i，β_i，γ_i が選ばれているので，(32) 式の $\bar{P}$ は (33) 式の Riccati 方程式の正定一意解である．(32) 式の $\bar{P}$ を用いて最適制御則を計算すると，

$$\begin{aligned} \breve{w}(t) &= -\breve{R}^{-1}\bar{B}^T\bar{P}\breve{x}(t) \\ &= -\bar{\gamma}(\bar{\alpha}\bar{R}\breve{y}(t) + \bar{\beta}\bar{R}\dot{\breve{y}}(t) + \breve{z}(t)) \end{aligned} \tag{34}$$

となる．これは，(28) 式と一致する．したがって (27) 式の全体システムの拡大偏差系に (28) 式の局所フィードバックを施して得られる閉ループ全体システムは，(29) 式の評価関数を最小にする最適レギュレータとなる．

(証明終わり)

(25) 式を求めた手順と同様にして，$\breve{w}(t)$ から $\bar{w}(t)$ を計算すると，

$$\bar{w}(t) = \bar{v}(t) + \bar{K}_r \bar{r}_0(t) \tag{35}$$

$$\bar{K}_r = \begin{bmatrix} \bar{\alpha}\bar{\gamma}\bar{R}\bar{L}^T & \bar{\beta}\bar{\gamma}\bar{R}\bar{L}^T & \bar{\gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & I_{\bar{n}} & 0 \\ -\bar{M}^{-1}\bar{K} & -\bar{M}^{-1}\bar{D} & \bar{M}^{-1}\bar{L} \\ \bar{L}^T & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{\bar{r}} \end{bmatrix}$$

となり，(26) 式の開ループ全体システムに，(35) 式の制御則を施した閉ループ全体システムは (29) 式の評価関数を最小にする最適分散サーボ系となる．

任意のパラメータ α_i ($\alpha_i > 0$) が与えられたとき，定理 2 の条件を満たす β_i，γ_i が必ず存在することは，つぎのようにして示すことができる．いま，すべてのサブシステムにおいて，α_i と β_i の値が一定の値 δ となるように

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} = \delta,\ i = 1, 2, \cdots, \ell \tag{36}$$

と選ぶ．ここで，δ は正のスカラである．このとき，$\bar{Q}_{12} = 0$ となり (30) 式の $\bar{Q}$ は (19) 式の Q_i と，(32) 式の $\bar{P}$ は (22) 式の P_i と同じ形になる（ただし，次元は異なる）．Q_i，P_i を正定にする α_i，β_i，γ_i は付録 1, 2 の事実から必ず存在する．

4. 数値例

ここでは提案法で制御された最適分散サーボ系がステップ関数の目標値に追従することを，数値例によって確かめる．例として **Fig.3** のように矩形の剛体が，ダンパ・バネで近似される柔軟なリンクによって横方向に柔結合された宇宙構造物を考え，この構造物を第 3 章で述べた制御則で分散制御することを考える．なお，ここでは 1 つの剛体を 1 つのサブシステムとする．第 i 番目の剛体の質量を m_i，慣性モーメントを J_i で表す．各剛体は 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．また，剛体を結合するリンクのダンパ定数とバネ定数を d_{ck}, k_{ck} で表す．結合点 ij は，第 i 番目の剛体における j 番目の結合点を表すものとする．ℓ_{ij} は，剛体の質量中心から結合点 ij までの距離を表す．ψ_{ij} は，質量中心と結合点 ij を結ぶ線分と剛体の辺がなす角度を表し，ϕ_{ij} は，剛体の辺と斜めに取り付けられた柔軟なリンクが剛体の辺となす角度を表す．なお，センサとアクチュエータは，各剛体の質量中心に設置され，各剛体の変位 x_i，y_i と角変位 θ_i, ($i = 1, 2$) を計測し，操作入力として，x_i 方向，y_i 方向の力と質量中心 O_i 回りのトルクを加えるものとする．また，すべての剛体において $x_i = 0$，$y_i = 0$，$\theta_i = 0$ で静止しているとき，剛体間の柔軟なリンクのダンパとバネにより発生する力およびトルクは 0 であるとする．

Fig.3 の宇宙構造物の運動は，変位ベクトルを

$$q_i(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) & y_i(t) & \theta_i(t) \end{bmatrix}^T,\ i = 1, 2$$

と選ぶことにより，(1)，(3) 式の形に表すことができる．なお，(1) 式の係数行列は，次式で表される．

$$M_i = \mathrm{diag}\{m_i, m_i, J_i\},\ i = 1, 2$$

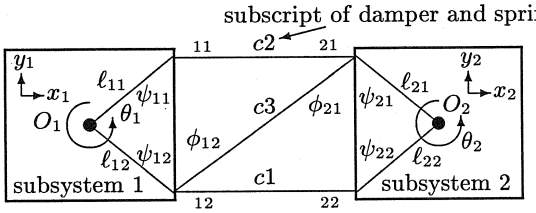


Fig. 3 A flexible space structure

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} N_{c12} \\ -N_{c21} \end{bmatrix} D_{c12} \begin{bmatrix} N_{c12}^T & -N_{c21}^T \end{bmatrix}$$

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} N_{c12} \\ -N_{c21} \end{bmatrix} K_{c12} \begin{bmatrix} N_{c12}^T & -N_{c21}^T \end{bmatrix}$$

$$N_{c12} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sin\phi_{12} \\ 0 & 0 & \cos\phi_{12} \\ \ell_{12}\cos\psi_{12} & -\ell_{11}\cos\psi_{11} & \ell_{12}\sin(\psi_{12}+\phi_{12}) \end{bmatrix}$$

$$N_{c21} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sin\phi_{21} \\ 0 & 0 & \cos\phi_{21} \\ \ell_{22}\cos\psi_{22} & -\ell_{21}\cos\psi_{21} & -\ell_{21}\sin(\psi_{21}+\phi_{21}) \end{bmatrix}$$

$$D_{c12} = \mathrm{diag}\{d_{c1}, d_{c2}, d_{c3}\}$$

$$K_{c12} = \mathrm{diag}\{k_{c1}, k_{c2}, k_{c3}\}$$

$$L_i = I_3,\ i = 1, 2$$

ここで，N_{c12}，N_{c21} は，サブシステムの結合の仕方を表し，K_{c12}，D_{c12} は，サブシステムを柔結合するリンクのダンパとバネの特性を表す行列である．

宇宙構造物の剛体の質量と慣性モーメント，結合に用いるリンクのダンパ定数とバネ定数をつぎのように与える．

$$m_i = 0.4,\ J_i = 2.5,\ i = 1, 2$$
$$d_{ck} = 0.025,\ k_{ck} = 0.06,\ k = 1, ..., 3$$

また，l_{ij}, ψ_{ij}, ϕ_{ij}(i, j=1, 2) を

$$l_{ij} = 1.0,\ \psi_{ij} = \pi/3[\mathrm{rad}],\ \phi_{ij} = \pi/3[\mathrm{rad}]$$

として与える．コントローラのパラメータは定理 2 の条件を満たすようにつぎのように選んだ．

$$\alpha_1 = 3.00,\ \beta_1 = 6.00,\ \gamma_1 = 31.0,\ R_1 = I_3$$
$$\alpha_2 = 1.00,\ \beta_2 = 3.00,\ \gamma_2 = 19.0,\ R_2 = I_3$$

ここで，各剛体の初期値がすべて 0 であるとき，目標値として各剛体の x_i 方向，y_i 方向，θ_i 方向にそれぞれ

$$x_1 = 0.02,\ y_1 = -0.03,\ \theta_1 = 0.004$$
$$x_2 = 0.02,\ y_2 = 0.04,\ \theta_2 = 0.004$$

を与えたときのシステムの目標値応答を **Fig.4** に示す．**Fig.4** において，左段は剛体 1 の目標値応答を右段は剛体 2 の目標値応答を表している．**Fig.4** より，定理 2 の条件を満たすように α_i，β_i，γ_i を選ぶことによって，最適分散サーボ系を構成することができ，その変位出力が目標値に追従していることがわかる．

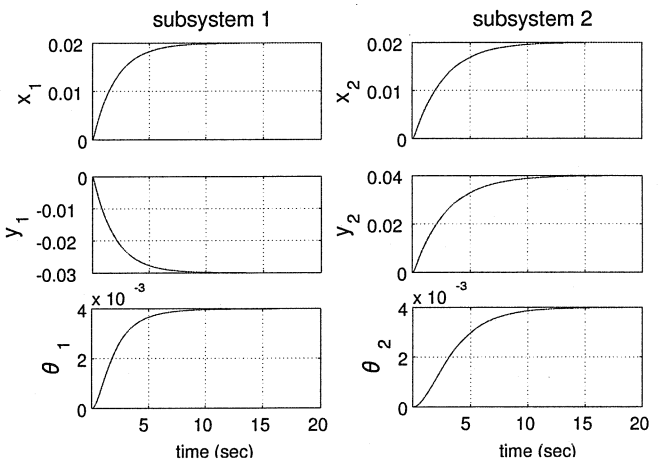


Fig. 4 Step responses of x_i, y_i, θ_i, $(i = 1, 2)$ of the flexible space structure in **Fig.3**

5. おわりに

本稿では，大型宇宙構造物の位置と姿勢の制御システムにおいて，センサ/アクチュエータ・コロケーションの前提のもとで，ステップ関数の目標値に追従する最適分散サーボ系を設計する方法を述べた．まず，各サブシステムの入力端にフィルタを直列結合し，サブシステムの変位出力とフィルタの出力，および仮想的に速度出力を施す形でフィードバックを構成した．つぎに，このフィードバックに目標値を入力に持つフィードフォワード要素を付加することによって局所コントローラを構成した．そして，サブシステムと局所コントローラからなるサーボ系を構成し，それが最適サーボ系になるために，局所コントローラのパラメータが満たすべき条件を導出した．さらに，ダンパとバネで近似される柔軟なリンクで閉ループサブシステムを柔結合して構成される大型柔軟宇宙構造物について分散サーボ系を記述し，それが最適分散サーボ系となるために，局所コントローラの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，柔軟宇宙構造物の位置と姿勢を目標値に追従させる最適分散サーボ系を構成できることを数値例で示した．

参考文献

(1) J. C. Mankins: The space solar power option, Aerospace America, Vol.35, pp.30-36, 1997.

(2) M.Ikeda, K.Koujitani, and T.Kida: Optimality of direct velocity and displacement feedback for large space structures with collocated sensors and actuators, Preprints of 12th IFAC World Congress, Vol.VI, pp.91-94, 1993.

(3) 鹿田，小林：変位出力を用いたプロパーなコントローラによる大型宇宙構造物の近似 DVDFB 制御，神戸高専研究紀要，第 43 号，pp.31-36，2005.

(4) 小林，池田，その他：大型宇宙構造物の分散 DVDFB 制御－耐故障性と最適性－，計測自動制御学会論文集，Vol.35-7，pp.919-925，1999.

(5) 鹿田，小林：変位出力を用いた近似 DVDFB による大型宇宙構造物の分散最適制御，第 48 回自動制御連合講演会予稿集，pp.303-304，2005.

(6) 志水，大森：線形制御理論入門，培風館，2003.

[付録1] Schur complement を用いて定理 1 の Q_i，P_i を正定にする α_i，β_i，γ_i を導く．Q_i が正定となるためには次式が成り立てばよい．

$$1)\quad Q_{i_{11}} = \frac{\alpha_i}{\beta_i}(2K_i + \alpha_i L_i R_i L_i^T) > 0 \tag{37}$$

$$2)\quad Q_{i_{22}} = 2(D_i - \frac{\alpha_i}{\beta_i}M_i) + \beta_i L_i R_i L_i^T > 0 \tag{38}$$

$$\begin{aligned} 3)\quad & Q_{i_{33}} - (Q_{i_{13}}^T Q_{i_{11}}^{-1} Q_{i_{13}} + Q_{i_{23}}^T Q_{i_{22}}^{-1} Q_{i_{23}}) \\ &= \frac{1}{\beta_i}R_i^{-1} - \frac{2}{\gamma_i}L_i^T M_i^{-1} L_i - \frac{\beta_i}{\alpha_i \gamma_i^2} L_i^T M_i^{-1} \\ &\quad \times \big[K_i(2K_i + \alpha_i L_i R_i L_i^T)^{-1} K_i + (D_i - \frac{\alpha_i}{\beta_i}M_i) \\ &\quad \times \{2(\frac{\beta_i}{\alpha_i}D_i - M_i) + \frac{\beta_i^2}{\alpha_i} L_i R_i L_i^T\}^{-1} \\ &\quad \times (D_i - \frac{\alpha_i}{\beta_i}M_i)\big] M_i^{-1} L_i > 0 \end{aligned} \tag{39}$$

(38) 式の条件は，α_i に比べて β_i を十分大きく選べば成り立ち，(39) 式の条件は，α_i，β_i に比べて γ_i を十分大きく選べば成り立つ．つぎに P_i が正定となるためには次式が成り立てばよい．

$$1)\quad P_{i_{22}} = M_i > 0 \tag{40}$$

$$\begin{aligned} 2)\quad & P_{i_{11}} - P_{i_{12}} P_{i_{22}}^{-1} P_{i_{12}}^T \\ &= \frac{\beta_i}{2\alpha_i} Q_{i_{11}} + \frac{\alpha_i}{2\beta_i} Q_{i_{22}} > 0 \end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned} 3)\quad & P_{i_{33}} - \begin{bmatrix} P_{i_{13}}^T & P_{i_{23}}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i_{11}} & P_{i_{12}} \\ P_{i_{12}}^T & P_{i_{22}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{i_{13}} \\ P_{i_{23}} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\gamma_i}(Q_{i_{33}} + \frac{1}{\gamma_i} L_i^T M_i L_i) > 0 \end{aligned} \tag{42}$$

(40)～(42) 式の条件は $M_i > 0$，$\alpha_i > 0$，$\beta_i > 0$，$\gamma_i > 0$ より，Q_i が正定となれば成り立つ．

なお，$\beta_i > 0$，$\gamma_i > 0$ の存在範囲を十分条件の形で求めると付録 2 のようになる．

[付録2] ここでは，(38)，(39) 式を満たすような，α_i，β_i，γ_i の範囲を十分条件として与える．まず，$\alpha_i > 0$ として任意の α_i を選ぶ．このとき，(38) 式の条件が成り立つためには，局所コントローラのパラメータ β_i が以下の式を満たせばよい．

$$\begin{cases} \beta_i > \lambda_{max}\left(2\alpha_i S_{i_1}^{-\frac{1}{2}} M_i S_{i_1}^{-\frac{1}{2}}\right), & \beta_i \geq 1 \\ \beta_i > \lambda_{max}\left(2\alpha_i S_{i_1}^{-\frac{1}{2}} M_i S_{i_1}^{-\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{2}}, & 0 < \beta_i < 1 \end{cases} \tag{43}$$

また，(39) 式の条件が成り立つためには，局所コントローラのパラメータ γ_i が以下の式を満たせばよい．

$$\gamma_i > s_{i_2} + (s_{i_2}^2 + s_{i_3})^{\frac{1}{2}} \tag{44}$$

ただし，S_{i_1}，s_{i_2}，s_{i_3} は以下の通りである．

$$S_{i_1} = 2D_i + L_i R_i L_i^T$$

$$s_{i_2} = \lambda_{max}(\beta_i R_i^{\frac{1}{2}} L_i^T M_i^{-1} L_i R_i^{\frac{1}{2}})$$

$$\begin{aligned} s_{i_3} = \lambda_{max}\Big(& \frac{\beta_i^2}{\alpha_i} R_i^{\frac{1}{2}} L_i^T M_i^{-1} \big[K_i(2K_i + \alpha_i L_i R_i L_i^T)^{-1} \\ & \times K_i + (D_i - \frac{\alpha_i}{\beta_i}M_i) \\ & \times \{2(\frac{\beta_i}{\alpha_i}D_i - M_i) + \frac{\beta_i^2}{\alpha_i} L_i R_i L_i^T\}^{-1} \\ & \times (D_i - \frac{\alpha_i}{\beta_i}M_i)\big] M_i^{-1} L_i R_i^{\frac{1}{2}}\Big) \end{aligned}$$

小中学生向け鋳造体験教室用小型鋳造装置の開発

堀　賢史*　早稲田　一嘉**　和田　明浩**　西田　真之***

Development of a Small Casting Device for an Open Class to Students of Elementary School and Junior High School

Satoshi HORI*　Kazuyoshi WASEDA**　Akihiro WADA**　Masayuki NISHIDA***

ABSTRACT

A social problem of "losing interest in science and engineering" has lately attracted considerable attention in Japanese elementary school and junior high school. We have planned and held open classes for students of elementary school and junior high school to get interested in science and engineering. The content of the open classes is casting which is one of the popular methods of metal processing. For preparation of the classes, we have developed a special casting device which achieves high-performance in safety and easy operation. In this paper, we report a design concept, features, and performance of the casting device for the open classes to students of elementary school and junior high school.

Keywords: casting, open seminar, safety, experience-based learning, industrial engineering education

1.　緒言

近年，子供たちの理科離れや工学離れが問題視されている(1)~(3)．この理科離れや工学離れに歯止めをかけるために，鋳造などの金属加工法を気軽に体験できる公開講座を開催し，小中学生がその活動に参加することによって，ものづくりの楽しさを実感し，ものづくりに興味や関心を持たせようと考えた．多くの金属加工法の中でも鋳造は，金属が溶融し，型に流し込まれ，硬化していくダイナミックな加工過程を目の前で見ることができ，視覚的に理解することができる．このことは，金属は硬くて加工が難しいと考えている小中学生に驚きを与え，鋳造の楽しさを実感することができる．さらに，身の回りにある多くの金属製品やプラスチック製品は，同様の加工法によって作られていることを理解すれば，小中学生のものづくりへの興味や関心は一層高まると思われる．

一方，鋳造を体験する公開講座や教室は様々な場所で開催されているが，その内容は，高校生や社会人を対象にして転炉を使って実施される本格的なものや，小中学生を対象にして錫や低融点合金を用いてコンロ，鍋，尺を使って実施されるものがほとんどである(4)~(6)．本校においてもコンロ，鍋，尺を使う鋳造体験を実施していたが，参加者の安全確保，操作性（使いやすさ）や運用性，及び実際の鋳造に近い形で鋳造を体験できる点などの教育性を重視して，小型鋳造装置の開発を行ってきた．本稿では，小中学生向けの鋳造体験教室で使用することを目的として開発した小型鋳造装置について，その設計思想，機器の特徴，及び性能について報告する．

*　機械工学科
**　機械工学科　准教授
***　機械工学科　教授

2.　小型鋳造装置の概要

2.1　仕様

過去の公開講座において実施していた尺を用いて鋳込む方法には溶融した錫に子どもたちが簡単に触れることができるなど安全性の問題があった．また，小型鋳造装置は約半日かけて実施する公開講座，校外で行う場合や数十分程度で実施する場合も考慮しなければならなかった．

Table 1 に公開講座用小型鋳造装置に要求される仕様を示す．

Table 1 Specifications of small casting device

要求される仕様	対策
・安全が確保されている	・安全性を高めるためアクリル製のカバーを設ける ・低融点であり人体への害が少ない鋳込み材料の選定
・鋳造という加工法がどのようなものであるかが伝わる外観である ・簡単な操作で鋳込むことが可能	・見た目に単純な構造 ・炉をハンドルにて傾動させ，溶融した材料を鋳型に流し込む方式（ただし，必ずしも上手に流し込めるとは限らない構造）
・火を使わずに材料の融点に達することが可能，かつ溶融状態を維持することが可能	・コストを考慮し，市販の電気コンロを使用．溶融した材料が電熱線部分に流入しないように覆う形
・運搬が簡単に出来るように可能な限り小型にする．	・軽さ，熱伝達率の高さなどから材料としてアルミニウムを使用した

2.2 特徴

鋳造という加工法を理解しやすくするために，本校の鋳造工場で鋼を溶かす炉に用いられている転炉を模擬して小型鋳造装置の設計を行った．転炉を模擬することによって，溶融した金属を動かす自由度をある程度制限することで安全性を確保しつつ，炉を傾けることによって簡単に溶融した金属を鋳型に流し込むことができると考えた．この形式を採用することによって子どもの手による鋳込みの際に操作が容易になり，かつ装置の製作にかかる時間と費用を最小限に抑えることができると考えた．Fig. 1 に炉の構造を示す．

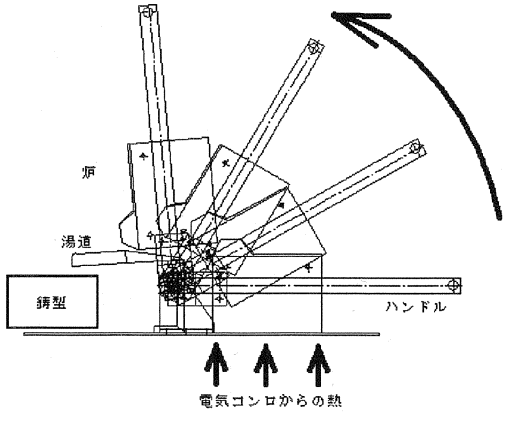


Fig. 1 Structure of a converter (revolving furnace) in a small casting device (side view)

熱源となる電気コンロを覆うカバーは，コンロの電熱線部分に材料の錫が溶け込むと除去が難しい，外観が産業機械のような金属を基調としたデザインや熱伝導性を考慮してアルミニウム板で全体を覆う形にした．

電気コンロを完全に覆ってしまうと熱が発散されずにアルミ板が高温になるため，それを軽減するためにφ12mm 程度の穴を天板の電熱線が接触する部分以外と側面に開けた．

Fig. 2 にアルミ板で覆った電熱部の図面を示す．

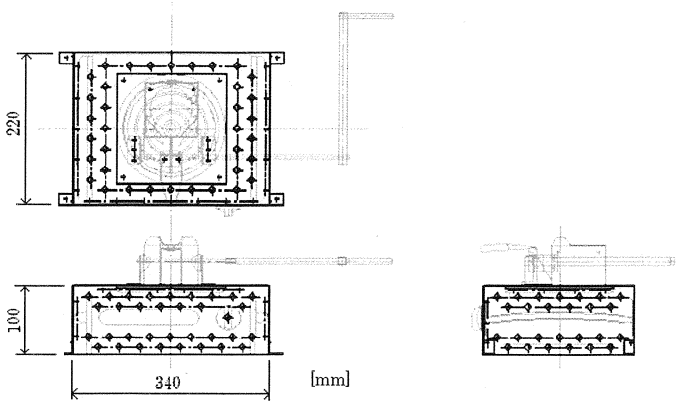


Fig. 2 Structure of a converter (revolving furnace) in a small casting device (overall view)

鋳込み時に誤って錫が飛び出るなどの火傷の原因となる事態が予想できるため，アクリル樹脂性のカバーを設けた．アクリル樹脂は透明である程度の強度を持ち，硝子に比べ安価で加工が容易，軽量という利点を持っている．Fig. 3 に炉を覆うアクリル樹脂製カバーを示す．Fig. 3 の左はアクリル製カバーが閉じたときの状態で，右はアクリル製カバーを開いているときの状態である．

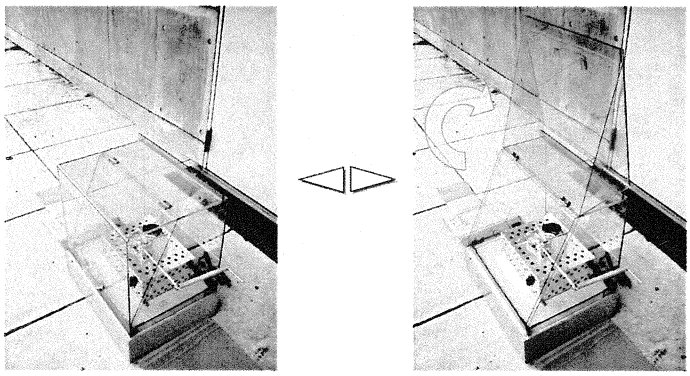


Fig. 3 Photograph of acrylic safety cover

Fig.4 に Table 1 に示した仕様を考慮し製作した小型鋳造装置の外観図を示す．本装置の名前は education, experience の頭文字"e"と「鋳造工場」の意味である foundry を掛け合わせ“eXfoundry”とした．

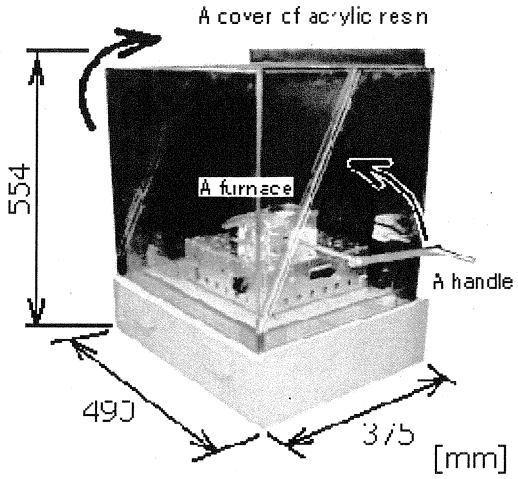


Fig. 4　Small casting device “eXfoundry”

3.　鋳込み材料及び鋳型

3.1　材料

鋳込む材料には低融点（約 230℃）であり人体への害が少ない粒状の錫を用いることにした（Fig. 5）．低融点合金であるはんだは，有害な鉛が入っているため，子供が口に含む可能性を考慮して安全面から不採用とした．また，他の低融点合金はビスマス等を含有し，錫と比べて高価であるため，子どもたちが完成品を持ち帰ることができなくなるというコスト面から採用しなかった．

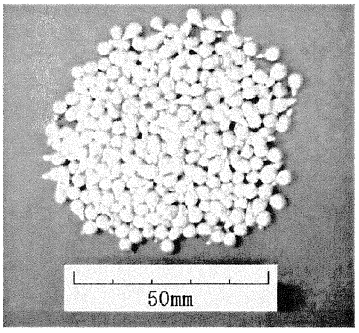


Fig. 5　Photograph of casting material（tin (Sn) ）

3.2　鋳型

半日程度の公開講座向けに本小型鋳造装置のための紙粘土及び厚紙を用いた鋳型を考案した．紙の発火温度は約 400℃であり，錫の鋳型として，取扱いやすさ，コストの面から採用した．

実際の鋳造に用いる生砂型に見られるわかれ砂，ガス穴，湯だまり・湯口・湯道などを，紙粘土を使用した型でも作ることができるようにし，実際の鋳造における鋳型づくりに似せた型作りの作業が可能となった．Fig. 6 に紙粘土と木版を用いた鋳型及び鋳込み後の様子を示す．

また，耐熱ガラス（最高安全使用温度 700℃，熱衝撃破壊温度差 800℃）を鋳型の一部に使用して鋳込みをすることによって鋳型の中での湯の動きが見え，鋳込みの様子や失敗の原因などが直感的にわかるようにした．Fig. 7 に耐熱ガラスの写真及び仕様を，Fig. 8 に耐熱ガラスを用いた鋳込みの様子を示す．

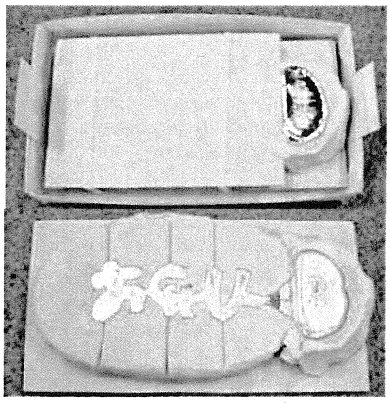
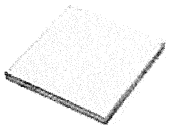


Fig. 6　Photograph of a paper clay mold



名称	耐熱ガラス[ネオセラム]
大きさ	100×150×5mm
外　　観	透明
比　　重	2.5
熱膨張係数　30-380℃	-4.0×10^{-7}～-6.0×10^{-7}℃
30-750℃	-2.0×10^{-7}～-4.0×10^{-7}℃
比熱　(cal/g)　25℃	0.18
最高安全使用温度	700℃
熱衝撃破壊温度差	800℃

Fig. 7　Photograph and characteristics of heat-resistant flat glass



Fig. 8　Photograph of casting using a paper clay mold with heat-resistant flat glass

イベント等，出先での数十分程度の公開講座向けに厚紙を用いた型を考案した．参加者予約制ではなく不特定多数の参加者向けであることを考慮し，鋳込み体験を重視し鋳型は予め準備する方式とした．また，イベントに関連するイラストを大量に鋳込むために，予め準備したイラスト等を厚紙に印刷し，1 枚のイラストを切り抜き，もう 1 枚のイラストと重ねることにより表面に凹凸を付けて模様とした．紙粘土型と比べ立体的なものを作ることは困難であるが，鋳型製作が容易で，同一の型を大量に作成可能であった．形状は直径が約 50mm の一般的な紙コップの底の大きさ程度とした．Fig. 9 に厚紙製鋳型及び成型品，Fig. 10 に鋳込みの様子を示す．

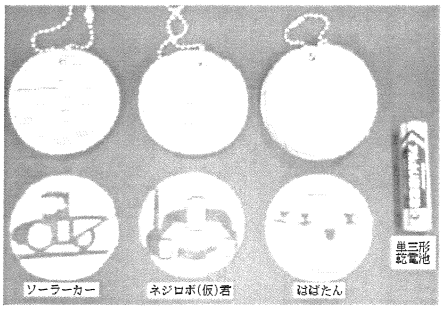


Fig. 9　Photograph of a cardboard mold and a molded material

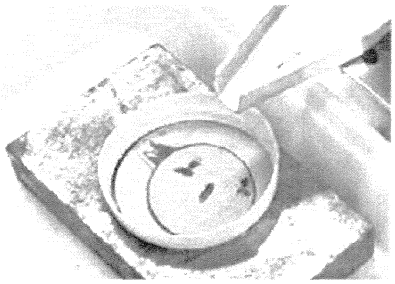


Fig. 10　Photograph of casting using a cardboard mold

3.3　過去の公開講座の問題点

以下に示す会場において小型鋳造装置を用いた 5 回の鋳造体験教室（公開講座）を実施した.

・2007/8/1－夏季公開講座ものづくり教室：
　神戸高専鋳造工場（屋内）※参加者予約制
・2007/8/12－夏季公開講座ものづくり教室：
　レスキューロボットコンテスト会場（屋内）
・2007/8/25－西神 Industrial Park (IP)フェア：
　神戸市営地下鉄西神中央駅前（屋外）
・2008/8/5－夏季公開講座ものづくり教室：
　神戸高専鋳造工場（屋内）※参加者予約制
・2008/8/10－夏季公開講座ものづくり教室：
　レスキューロボットコンテスト会場（屋内）

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 に公開講座の様子を示す.

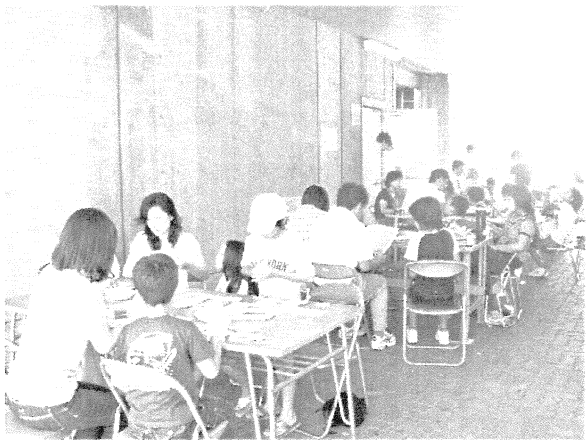


Fig. 11　Photograph of an open class at a foundry in Kobe City College of Technology

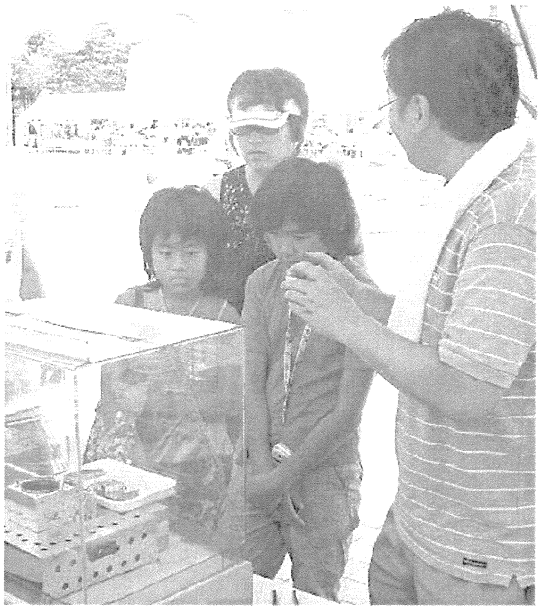


Fig. 12 Photograph of an open class at Seishin Industrial Park Fair

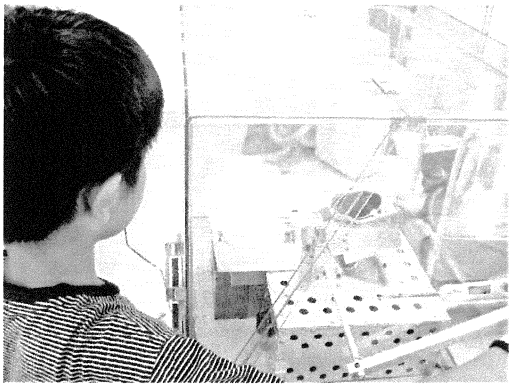


Fig. 13　Photograph of an open se class – An Elementary school student using “eXfoundry”

2007 年~2008 年に 5 回の公開講座を行ってきたが，装置の故障や参加者の怪我なども無く安全に鋳造を体験してもらうことが出来た．しかし，鋳込みをする際に装置のハンドルを勢い良く回したことが原因で炉の中の錫が飛び出し，鋳込みに失敗したことが全体を通して 3 件あった．これは，早く鋳込まないと錫が硬化してしまうという点に集中したため勢いよくハンドル操作を行った参加者や，想定していた対象年齢以下の参加者によって諸注意を理解しないまま操作したことが原因であったと考えられる．しかしながら，いずれも場合も Fig. 14 に示すように炉から飛び出した溶融した錫はアクリルカバーに付着するにとどまり，身体に付着することはなく火傷等の怪我人は出なかった．また，このアクリル製カバーは公開講座実施の際に長時間鋳造装置を使い続けることでコンロからの熱により，軟化し，歪みが生じた.

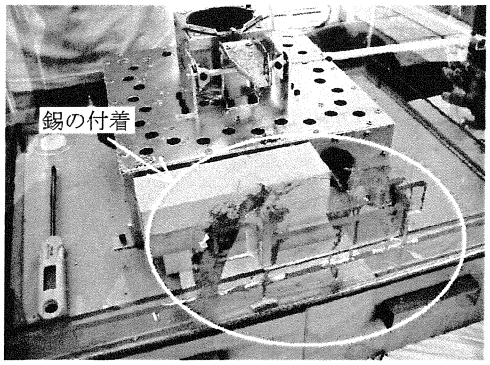


Fig. 14 Photograph of molten tin adhered to acrylic safety cover

鋳造体験後にアンケートを実施し，子どもたちに鋳造という加工技術を理解してもらえたか確認した．アンケートは各回の公開講座の結果が比較できるように，2007年，2008年ともに同じものを使用した．その内容は，主にものづくりに対する興味や鋳造体験の参加前と参加後の変化を調査するものとした．公開講座で実施したアンケート結果の一部をTable 2に示す．これらの結果より，参加前には鋳造について知らなかった子供たちが，鋳造についての説明を聞いて，実際に自分で行うことによって鋳造を理解し，ものづくりに興味を持ったということが確認できた．

Table 2 Results of questionnaire

・鋳造のことを知っていましたか？	
はい，まあまあ	：38.7%
いいえ，あんまり	：53.2%
・鋳造について理解できましたか？	
はい，まあまあ	：91.8%
いいえ，あんまり	：3.3%
・物を作ることに興味がわきましたか？	
はい，まあまあ	：93.5%
いいえ，あんまり	：4.5%

4. 装置の改良

公開講座を数回行った結果，鋳造装置の改善すべき新たな課題を発見し，一部改良を加えた．

4.1 安全装置（ハンドルロック機構）の試作

前述したように，公開講座中にハンドルを勢い良く回したため炉から錫が飛び出し，アクリル製カバーに付着する事態が生じた．アクリル製カバーが閉じた状態で安全が確保されていれば，溶融した錫は参加者にかかることはないが，現在の装置では，カバーが開いた状態でも鋳込みが行えるため，鋳造装置の前方，あるいは斜め前方にいる参加者へ錫がかかってしまい，やけどを負う可能性がある．このような事態を防ぐためには，カバーを閉じている状態では鋳込み作業が行えるが，カバーがあいている状態では炉についたハンドルがロックされて，鋳込み作業が行えないようにすればよい．そこで，この機能を実現するための安全装置の試作を行った．安全装置の構造図をFig. 15に示す．

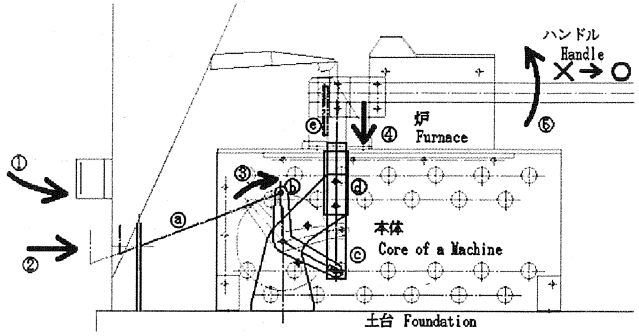


Fig. 15 Structure of safety lock of “eXfoundry” (side view)

アクリル製カバーが閉じた時にロックが解除される具体的な構造についてFig. 15の矢印の数字の順を追って以下に示す．

① アクリル製カバーを閉じる
② ⓐ部品がカバー内側に押される
③ ⓑ部品が右回転する
④ ⓒ部品がⓓ部品の内側をスライドし，下側に移動する
⑤ ④によって炉の回転軸と連結したハンドルの軸に取り付けたⓔ部品がⓒ部品の妨げが無くなりロックが解除される

実際に作成した安全装置の試作品をFig. 16に示す．Fig. 16の左はアクリル製カバーが開いているときの状態で，右はアクリル製カバーを閉じたときの状態である．

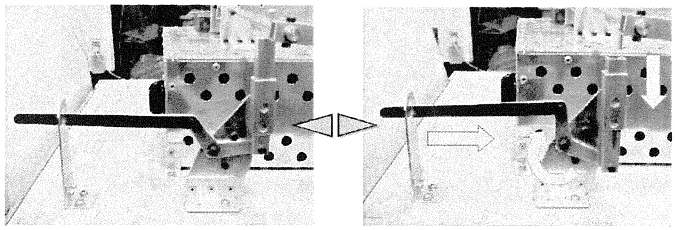


Fig. 16 Photograph of prototype safety lock mechanism

4.2 アクリル製カバーの放熱特性の改善

鋳造装置を使い続けるとコンロからの熱により，炉や電気コンロを覆うアクリル製カバーが軟化したため，アクリル製のカバーに歪みが生じた．これを改善するために，カバーに複数の穴をあけ，熱の排出を促すことを考えた．この穴は，子供の指が入らない程度の大きさとし，子供の手が届かない，また錫が飛散しない位置であるカバーの上部のみにあけた．改良後，カバーを閉じた状態で，カバー上部の穴の有無による装置内の温度の変化の違いを確認した．

Fig. 17 に穴あけ後のアクリル製カバーの写真を，Fig. 18 に穴あけ前後のアクリルカバー内の温度の測定結果を示す．Fig. 18 から分かるように，穴あけ後のカバー内の温度は 5 分を過ぎても 100℃を超えることはなかった．実際にこの装置を使用する際は何度もカバーを開閉するため，カバー内の温度はより低いと考えられる．アクリル樹脂は 80～100℃で軟化するため，熱によるアクリル製カバーへの影響は改善されたと言える．

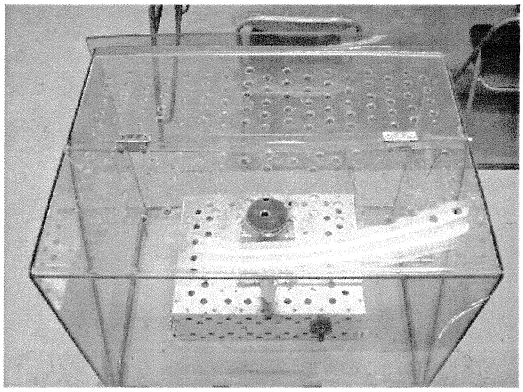


Fig. 17　Photograph of improved acrylic board safety cover with exhaust-hole

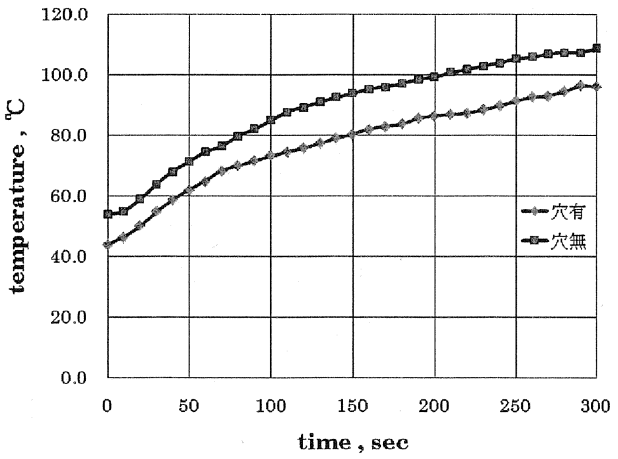


Fig. 18　Relationship between temperature of the inside of acrylic safety cover and time

5.　結言

本研究では小中学生向けの鋳造体験教室（公開講座）で使用することを想定した小型鋳造装置を開発した．

公開講座を実施した結果，装置の故障などやけが人を出すこと無く安全に運用することが出来た．そして，公開講座後のアンケート結果より，参加前には鋳造について知らなかった子供たちが，本装置を通じて実際に自分で鋳造を体験することで鋳造という加工方法を理解し，ものづくりに興味を持ってもらえたということがわかった．

本装置は公開講座での不具合を踏まえて，安全装置（ハンドルロック機構）の試作やアクリル保護カバーの熱対策等の改良は行ったが，改良後に実際の公開講座での使用は実現しておらず，長時間の繰り返し使用に耐えうるか確認が出来てはいない．今後その性能については実際の使用において証明する必要があるなど課題が一部残った．しかしながら，本装置開発の主な目的である“実際の鋳造に近い形で鋳造を体験が可能である”ことと“簡単な説明で安全に操作できる鋳造装置”という教育性と安全性の難しい両立を実現する設計思想に基いた装置を開発することができた．将来的に，本装置及び公開講座を小中学校での総合的学習の時間や技術の授業の一部として採り入れてもらえるような安全性，耐久性や汎用性などの技術レベル確立をするための基礎部分を開発できた．

参考文献

(1) 小川 博久：中学校理科授業における高等教育機関との連携の試み，工学教育, Vol.52, No.2, pp.38-43, 2004
(2) 鹿嶋 泰軌，奥山 拓雄：中学校技術・家庭科のものづくり教育の意義，工学教育, Vol.52, No.1, pp.15-17, 2004
(3) 南 明宏ほか：小中学生を対象にしたものづくり離れ防止策の試み，高専教育, Vol.27, pp.787-792, 2004
(4) 西田 真之，早稲田 一嘉，尾崎 元泰：金属材料を中心とした小中学生への公開講座，高専教育，Vol.29, pp.695-700, 2006
(5) 早稲田 一嘉，尾崎 元泰，西田 真之：夏休み・もの作り教室（金属材料を中心とした小中学生への公開講座），神戸市立工業高等専門学校研究紀要，Vol.44, pp.55-60, 2006
(6) 藤田 匠平：工学教育用小型鋳造装置の開発，神戸市立工業高等専門学校卒業論文, 2008

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

川邊　優大*　早稲田　一嘉**　藤本　健司***

Development of an Interactive E-learning System Including Mobile Devices

Yudai KAWABE*　Kazuyoshi WASEDA**　Kenji FUJIMOTO***

ABSTRACT

In recent years, importance of the self-education is increasing for technical college students. Because, they must study a specialized field in the early stage and a short term. However, an effort to study by themselves is decreasing. In addition , the most of students aren't able to spend time on self-education for commuting time to school.

In this reserch, we propose an e-learning system that it aimed at the improvement of the self-education of the students. First of all, we explain an outline of the system. In this system, students make questions of the content after the lecture. Educators up-load the questions on the web. After that, the students are able to review with personal computers or familiar portable devices.

Keywords: e-learning, interactive, mobile digital device

1.　はじめに

近年 “脳トレ”等の学習を目的としたゲームソフトが爆発的に普及している．日本国内で2007年に発売されたニンテンドーDS（以下 DS）用ソフトは，約 430 タイトル中“大人のための検定試験用ソフト”なども含めて約2割は，すでに「学習系ソフト」である．「東北大学未来科学技術共同研究センター川島隆太教授監修 脳を鍛える大人の DS トレーニング」は2008年第3四半期現在で全世界出荷本数 554 万本（内日本以外の市場での出荷数 491 万本）と，海外でも強く支持されている[(1)]．しかしながら，その分野は一般性のある教養的なものや資格試験対策が多い．これは DS 以外のゲーム機，パソコン用学習ソフトも同様の傾向である．一方，大学や高等専門学校(以下高専)等の専門分野は学ぶ人数が少なく必然的に e-learning 教材は少ない．商用ベースでのコンテンツ開発を考えると，コストがかかり，実質教材の価格に反映されるため，ゲームソフトウェアメーカーが専門分野の学習ソフトを開発する可能性もそれほど高くはない．ところが，例えば高等専門学校学生（以下高専生）は“早期に”，“短期間”に専門分野を学習することから，自己学習が重要となってくる．それにもかかわらず，近年学生の”（自学自習の）学生自身の取り組み状況”が非常に悪い[(2)]．また，経済状況にもよるが，近隣の大学・高専への通学であれば，数時間をかける学生が少なくなく，自習の時間確保が難しくなってきている．

ところで，e-learning は一般的に“場所”“時間”を選ばない等を特徴としているが主に PC を利用することが多く，“場所”も“時間”も制限されることが多かった．また，結局，提供される教材のコンテンツは学校（教員）→学習者の一方向であることがほとんどであった．

本研究では，現状の学習形態に加え，ノートや単語帳のように自ら問題を作成し，“時間”，“場所”を選ばず学習できる携帯型 e-learning 教材を開発し，学生が常に学習できる環境を提供し復習を促す“講義－web 教材－携帯デジタル機器”がクロスオーバーするシステムの構築を目的としている．

携帯機器を利用した e-learning の研究は多数存在し，既に実用されているが，本システムの最大の特徴は双方向（interactive）であることである．講義後に講義内容の問題を学生自らが作成し，その問題を web 上，携帯機器上において自己チェックすることで，学生参加型講義と e-learning がクロスオーバーするものである．また，このシステムのソースも公開し，この e-leaning 教材も自分好みに作り変えていくことも可能にしている．今回は，“材料工学の 4 択問題”の e-learning システムを試作した．

*　機械工学科
**　機械工学科　准教授
***　電子工学科　准教授

2. 本研究の基礎的背景

2.1 e-learning 1.0 及び e-learning 2.0[3]

Learning Management System（LMS）（学習管理システム：教材の配信設定や学習者の履歴などを管理）を使った e-learning を“e-learning 1.0”とした場合，1.0 はどちらかというと，トップダウン的な推進の仕方であったのに対して“e-learning 2.0”はボトムアップ的なものである．LMS は投資額が大きいため，導入には企業や大学のトップのサポートは不可欠な要因であった．これに対して“e-learning 2.0”で使うウィキ等の Web2.0 的なツールはほとんど無料に近い投資額で使うことができる．ウェブにアクセス可能であれば手軽に利用でき，大学関係で利用が広がっている．Table 1 に e-learning 1.0 と e-learning 2.0 の特徴の比較を示す．

Table 1 characteristics of e-learning 1.0 and e-learning 2.0

e-learning 1.0	e-learning 2.0
組織	パーソナル化
中央集権	ローカル化
プッシュ型	プル型
教師主導型ペダゴジー	参加型の学習者主導型
教師から学生	学生から学生，学生から教師，学生からコミュニティ
SME(subject matter expert)	集合知
コース，プログラム	学習分子,コネクション
知財	ソーシャル財
限られた自由度	拡大された自由度，オープン
WebCT ようなソフトウェア	Elgg のような SNS ウェブ・サービス
高い投資	低い投資

なお，今回開発したシステムは Table 1 の網掛け部分が該当することから，1.0 的とも 2.0 的とも当てはまらず．さしずめ e-learning 1.5 的なものといえる．Fig. 1 に本研究で構築するシステムの概念図を示す．

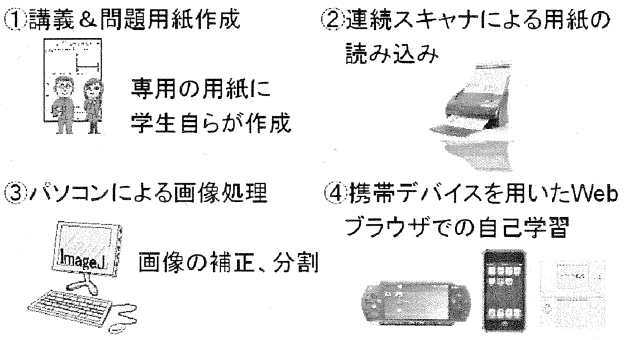


Fig. 1 Schematic illustration of e-learning system concept

3. 使用機器・ソフトウェア及び運用方法

3.1 連続スキャナ[4]

紙文書を電子化するツールとして，いわゆる連続スキャナである（株）PFU FI-5110EOX3（Sheet-Fed Scanner)を使用した(現在は後継機種の ScanSnapS510)．Fig. 2 に連続スキャナ ScanSnap の外観を示す.ScanSnap はノーマルモードにおいて A4 カラー 150 dpi，白黒 300 dpi：両面・片面 18 枚／分を電子データ（イメージ）に変換できる両面カラースキャナである．



Fig. 2 Photograph of Sheet-Fed Scanner(ScanSnap)

3.2 画像処理プログラム[5]

画像処理プログラムとして ImageJ を用いた.ImageJ は Java で作られた画像処理プログラムで，ソースコードは自由に入手可能であり，Windows, Mac OS, Mac OS X, Linux で稼働する.また，"stack（単一 window で共有する複数の画像）"をサポートしている．ImageJ は Java Plug-in を介しての拡張性を提供するために開かれた構造としてデザインされているため，分析や処理のカスタムプラグインを ImageJ のビルトインエディターや Java コンパイラを使用し作成することができる．

3.3 ImageJ の Plug-in

Plug-in とはアプリケーションソフトに追加機能を提供するための小さなプログラムのことであり,もとから搭載されている機能だけでは実現できない機能がプラグインを追加することによって実現することができる．

本研究においては以下の ImageJ 用 Plug-in を導入した．

(1) Stack Builder：本来 ImageJ には連番の画像を連続して読み込み 1 つの stack にする機能があるが，画像の大きさがそろっていないと機能しないため，連続スキャナにより読み込んだ微妙に大きさが異なる画像を読み込むために導入した．

(2) TurboReg(image registration)及び StackReg：TurboReg は 2 枚の画像を自動的に位置あわせ（見当合わせ）するアルゴリズムである.StackReg は stack に対して位置あわせをするアルゴリズムであり TuboReg とともに導入することで稼動する.連続スキャナにより読み込んだ画像は微妙に大きさ，傾きが異なるためマークの位置を補正するために導入した．

いずれのPlug-inもアルゴリズムの詳細はソースを閲覧することが可能である[5]

3.4 ImageJ のMacro言語

Macro（マクロ）はImageJの一連のコマンドを自動化する簡単なプログラムである.
今回は学生自らが作成した4択問題用紙の①画像の読み込み②画像の補正③画像の連番出力④マークの認識⑤データの出力等の自動化を上述したPlug-inも含め，マクロプログラムにより実現した.

3.5 双方向e-learningシステム開発用言語

本システムは，汎用性のため，html言語，Javascriptを用いたウェブアプリケーションとした．ウェブアプリケーションとすることでオペレーションシステムに依存せずにウェブブラウザが動作する機器で動作可能となるからである.

他のLMSソフトウェアのようにフリーでソース公開されているが，複雑で改良が難しいということや携帯デバイスへの移植の難しさを避けるために簡単な言語を用いたオープンなアーキテクチャとした．これは，本システム自体が“情報リテラシーの”教材となるというコンセプトであるからである．また，本システムはソースが見える状態で公開した.

プログラミング言語（C，Java，Fortran等）に精通しなければ，改良が難しいとなると，今後，普通高校の教員や学生(生徒)自らが改良していくということが難しくなってしまう．html言語は書籍が多くあり，理解にそれほどの労力と時間はかからないと考えられる．また，普通高校や大学教養での情報系科目で取り扱うことが多い.

ウェブアプリケーションの開発言語としてはAdobe社Flash，Microsoft社silverlightも選択肢として考えられるが，携帯型デバイスで対応していないものがある，対応していても実際の動作速度が緩慢である．また，開発環境にコストがかかるなどの点から採用をしなかった.

なお，携帯電話のソフトウェア開発の中心はJavaであるが，日本では3キャリアともJavaの仕様が若干異なり，それぞれに対応しなければならない状況である．しかしながら，近年フルブラウザ対応携帯（PC用webページ閲覧可能）が普及しており，携帯電話版は今後数年の携帯電話仕様の推移を見守りつつ開発することとした.

3.6 Webブラウザ（PC版）

PC上で本システムを開発・実現し，その後携帯型デバイスに移植をすることとした．Webブラウザは Microsoft Internet Explore7， Mozilla Firefox2.0を用いて動作確認した.携帯型デバイスのWebブラウザは"PSP"インターネットブラウザ[6],Opera for mobile[7]，mobile safari[8]にて動作確認した.

3.7 携帯型デバイス

携帯型ゲームであるプレイステーションポータブル（以下PSP：PSP-2000）[6]，ニンテンドーDS lite＋ニンテンドーDSブラウザ（以下DS）[7]及び携帯型音楽プレーヤーiPod touch（mobile safari）[8]を選択した.
これらは学生が所持していそうな携帯型デバイスである．Fig. 3に携帯型デバイスの外観を示す.

後述するが，携帯型デバイスの内で最も学生が所持していた携帯電話は，日本の3キャリアでJavaの仕様が違うこととフルブラウザ対応携帯電話であれば初期に開発するPC版の移植が容易であると想定し，開発は後回しにした.

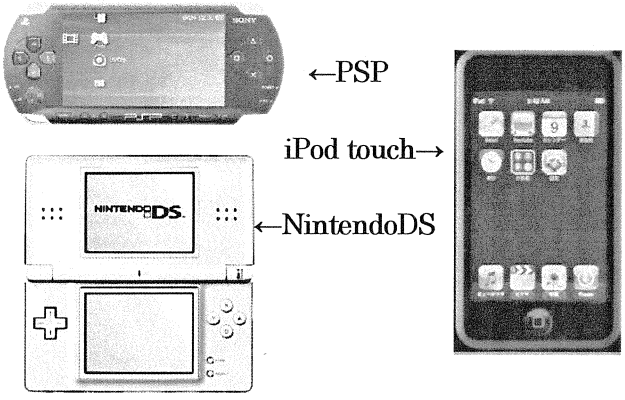


Fig. 3 Photograph of mobile-game console and multimedia devices

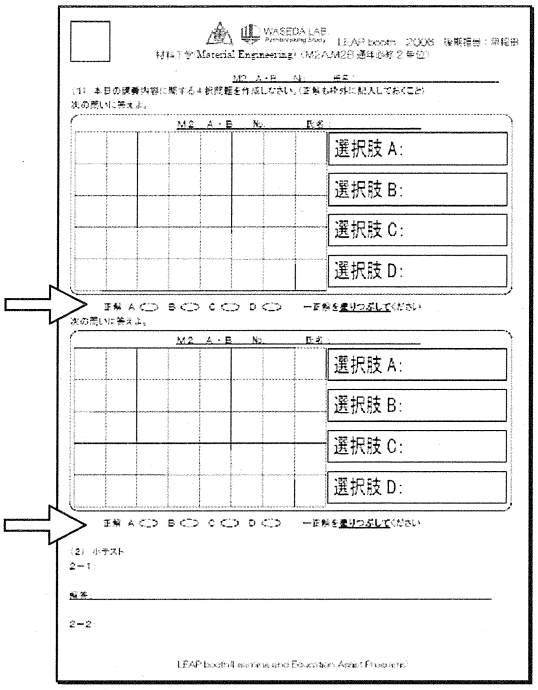
3.8 ユーザーの調査

本システム開発においてユーザーとなりうる神戸高専学生（神戸高専生）の調査を実施した．アンケートは機械工学科2年生80名に対して実施した.

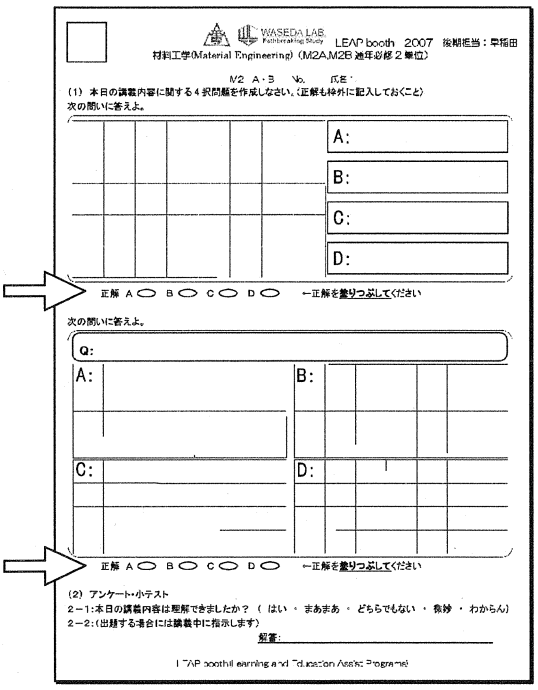
通学方法及び時間に関しては，学科，学年の違いはあまりないと考えられるため，この結果が神戸高専生の実態をある程度反映していると考えてよいと思われる.

3.9 問題作成用紙及び問題作成

Fig. 4に問題作成用紙を示す．Fig. 4に示すように，問題文と4択部分そして解答を示す欄を設けた．Fig. 4のような問題用紙（B6サイズ）を講義の最後に配布し，2問／1名を作成させた．現在，用紙はFig. 4(b)のような形となっている．また，当初は解答を読み，手作業でシステムへ入力していたが，画像処理により塗りつぶしマークを認識できるようにし，Fig. 4(a)，(b)のように正解を塗りつぶすマークを設置した.（マークはFig. 4 (a),(b)に矢印にて示す.）Fig. 4(a)のような形式では学生が作成する問題は“～は何か？”という“用語”を問う問題ばかりに偏ってしまった．そこで，Fig. 4(b)のように上段は従来通りのままで，下段は問題部分を小さくし，4択部分を大きくし，絵や図，“組み合わせで正しいものを選ぶ”問いを作成しやすいように改良した.



(a)third edition (previous edition)



(b)final edition

Fig. 4　Photograph of a question drawing up form

この問題作成の作業は“授業の課題”の一環として学生に課したため，問題作成をサボる学生はほとんどいなかった．開始当初は出題者側の立場という慣れない作業に手こずっていたようだが，徐々に慣れた様子であった．また，4 択の正解にのみ，マークシートに類似したマークを塗りつぶすように指示しておいた．

3. 10　連続スキャナによる問題用紙の読み込み

問題作成後，回収した用紙を連続スキャナによって読み込んだ．その後画像処理ソフトウェア ImageJ により“問題部分”，“4 択部分”を切り抜き問題番号ごとに画像として保存した．マーク部分を認識するために，画像の 8bit 化（グレースケール化）→2 値化→4 つのマーク部の面積測定（マークの認識）→数値データとして出力（テキスト）した．このデータは後に表計算ソフトウェアにおいて最も面積が大きい位置を“塗りつぶした選択肢”として判定した．このようにして得られた画像，正解のデータをもとに設定ファイルを書き換え，その後 web 上に 4 択問題の形式でアップロードした．

4.　実 験 結 果

4. 1　PC 用 Web ブラウザ版

Fig. 5 に PC 用 Web ブラウザ版を示す．

オンラインによる 4 択問題の出題であるが“解答選択”のデータ保存方法として，(a)URL に保存する (b)Cookie を用いる方法がある．解答データの改ざんの可能性を考えると，cookie による解答の保存が有効であると考えるが，セキュリティ上 cookie の保存を有効にしていないユーザーもいる可能性が高く，基本的に URL に保存する形式をとった．

問題を表示する Web ページには“問題の画像”及び“初期設定ファイル”から問題数，問題番号，解答等を読み込む形式であるため，画像と初期設定ファイルの所定の場所に差し替えたい問題のデータをコピーするだけで，問題を変更できるようにした．

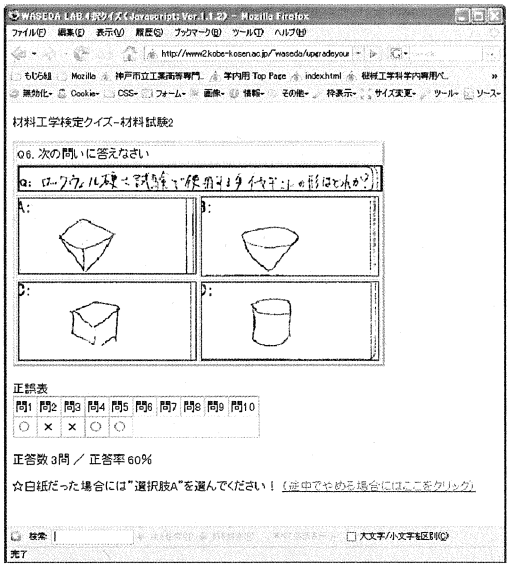


Fig. 5 View of runnning e-learning system on PC web browser

4. 2　不適切な問題，誤解答の問題及び問題レベル

本システムでは，Web2.0（特に WikiPedia 等大衆が自由に書き込める方式で問題視されている）において問題となっている“不適切な内容（問題，誤解答）の書き込み”が挙げられる．本システムにおいても問題の作成及び解答の作成を学生に課すことから，この問題は

避けられない．“問題”は毎回の講義後に学生一人が2問作成をしているため，毎講義ごとに約80問の問題が作成されることになる．簡単な“用語”を問うような形式であれば，教員が全問題内容をチェックすることも容易であるが，そうとも限らない．

そこで，完全な解決方法は無いが，予防策として(1)問題作成用紙は記名式 (2)問題作成を“課題”として課していることから，問題内容に不備があった場合には課題点からの減点，他人の問題の不備を発見，報告した場合の加点をアナウンスするという方策をした．これらの方法により悪ふざけやわざと誤解答を作成する等をある程度抑止する効果があったと思われる．

4 択問題に出題されている問題レベルに関しても，判断しかねるところである．悪ふざけはなくとも，学習レベルが低ければ本システムの意味は薄れる．

問題作成の事前に問題レベルが低かった場合には定期考査における出題数及び配点を減らす旨を伝えており，専門用語を理解するというレベルでは問題ない出題がほとんどであった．中には難しい問いを出題している学生もいた．ただし，実際には全問題に目を通せるとは限らず，定期考査に出題する問題のみをチェックした．問題レベルをチェックし，考査に反映するという教員の発言に対して，一部不履行となりかねないが，学生に対する心裡留保として扱った．

4.3 中間・期末考査における4択問題の正解率及びアンケート結果

“この問題，テストに出すよ”というのは教員の常套句であるが，それさえ覚えておけばよいというスタンスを取る学生が少なくない．本システムにおいても“定期考査にこれらの4択問題から出題する”旨をアナウンスしたが，4択問題は約560問（7週×80問）の中から，出題されるということであり，講義内容のポイントを示して考査での正解率を上げるというものではない．Fig. 6に中間考査の4択問題の正解率を示す．専門用語を問う問題が多かったが，本システム採用年以降では平均8割を超える正解率，最低正答率が高くなるなど一定の効果があったのではないかと考える．

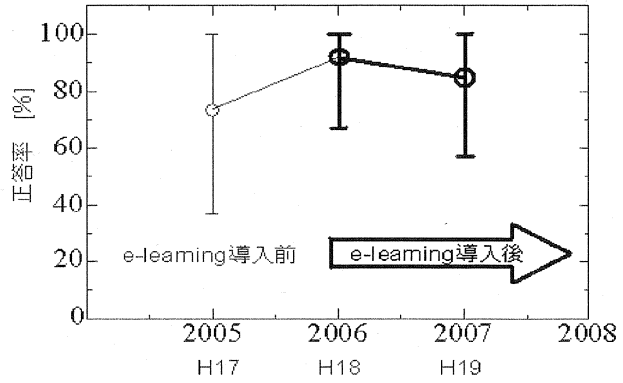


Fig. 6 Results of selection-problem correct answer percentage on an intermediate examination

アンケートにおいて“材料工学の4択問題（PC Web版）”は勉強（自学・自習）のサポートとして役立ちましたか？という問いに対して，はい：55%，どちらとも：36%となり使用した学生の評価は悪くなかった．

4.4 携帯型デバイス用e-learningシステムの製作及びアンケート結果

現在の日本ではまだ無線LAN（Wi-Fi）の環境が充実しているわけではない．学生の通学路を想定すると，無料の Wi-Fi は一部のファーストフード店等に限定される．また，電車，地下鉄やバス等通学や通勤の交通機関では今後，解決策として WiMAX が考えられるが，WiMAX が全国に導入されるまではまだ時間がかかりそうである．

そこで，携帯型ゲーム機であるPSP及びWebブラウザを搭載した音楽プレーヤーである iPod touch においてはオフライン版も作成することにした（iPod touch に関してはデータ保存するための無料のアプリケーションを導入した本体のみオフライン版の実現が可能）．

オフライン版の実現方法として，当初は必要な問題の画像等を全て携帯デバイスの専用の記録媒体に保存しておき，オンライン版と同様なシステムを運用するというものを作成した．しかし，携帯デバイスの画面に合わせて問題を1問ずつ表示するこのシステムでは問題1問毎に毎回画像を読み込むため，円滑な動作が難しかった．そこで，システムの起動時に，使用される画像等の情報を予め読み込む方法を用いた．その結果，円滑なシステムの動作が可能になった．記録媒体には，PSP では専用のメモリースティック，iPod touch では本体内蔵メモリを使用した．

NintendoDS 版においてはオンライン版において html の入力フォーム及び DS ブラウザの文字認識機能を利用し，簡単な手書き入力による方式を実現した．この場合，正解を予めテキストデータで保存しておかねばならず，Web へのアップロード前の準備での手入力が多く，まだ不完全である．

Fig. 7 に PSP 版画像の拡大図を，Fig. 8 に各携帯型デバイス用 e-learning システムの動作の様子を示す．

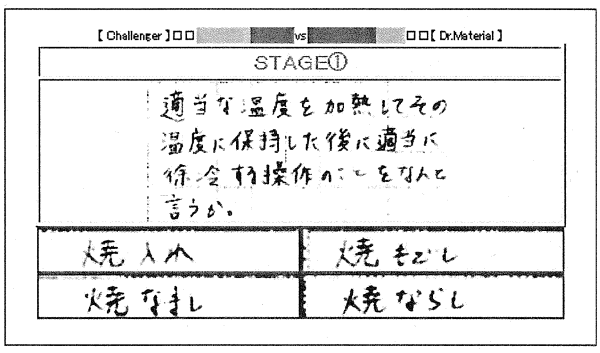


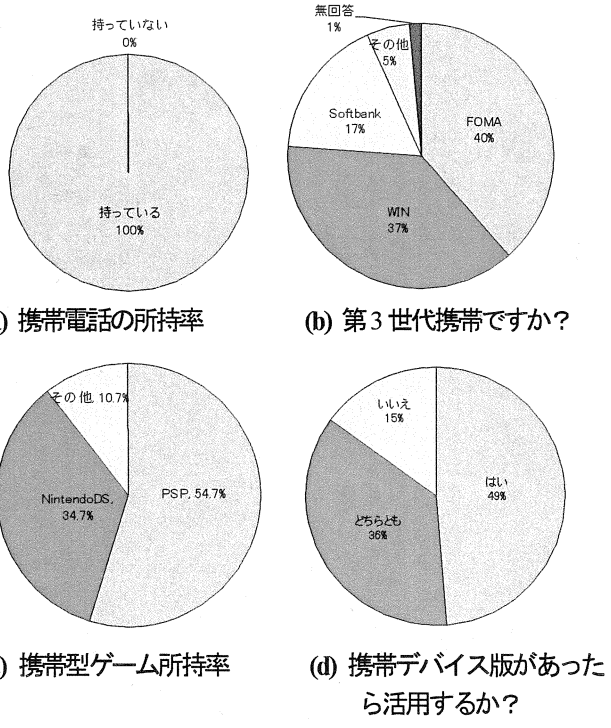
Fig. 7 View of runnning e-learning system on a PSP web browser



Fig. 8 Photograph of runnning e-learning system on mobile devices（画面はハメコミ合成）

携帯型デバイス用の開発にあたり参考のためにアンケートを実施した(有効回答数(項目により)72～75).

神戸高専生の平均通学時間は約 58 分（最小 15 分, 最大 110 分）であった．その内自転車のみでの通学の学生は 8%であり，残り 92%は電車・地下鉄・徒歩等両手あるいは片手を使い何かの作業を出来る状態，つまりこの e-learning システムが携帯型デバイスに移植された場合にユーザーとなりうる学生であった．Fig. 9 にアンケート結果の一部を示す.



(a) 携帯電話の所持率　(b) 第3世代携帯ですか？

(c) 携帯型ゲーム所持率　(d) 携帯デバイス版があったら活用するか？

Fig. 9 Results of questionnaire

神戸高専生の携帯電話所持率は 100%, その内 93.3%が第 3 世代携帯であった（Fig. 10(a),(b)）.

携帯型ゲーム所持率（複数回答のため 2 台/1 名も）は PSP : 54.7%, DS : 34.7%と学生はかなりの割合で所持していた．また，“材料工学の 4 択問題”が携帯電話や携帯型ゲーム機等で利用できることになった場合，活用すると思いますか？という問いに対して，はい：49%，どちらともいえない：36%となった．これらの結果から本研究で開発した.携帯型デバイス用の e-learning を公開した場合，実際の利用は見込めると考える.

5． 終わりに

本研究では，現状の学習形態に加え，専門分野の問題を学生自らが作成し，その問題を Web 上，携帯機器上において，“時間”，“場所”を選ばず学習できる携帯デジタルデバイスを組み込んだ双方向 e-learning システムの基本部分が完成した．現段階では，携帯デジタルデバイスを用いたシステムの利用見込みまでは把握できたが，実証実験までは出来なかった.

今後，日本における無料の公衆無線 LAN 普及率の低さから，携帯デジタルデバイス用のオフライン版のシステムを基本として，使いやすさ，単純作業の繰り返しを回避するためにゲーム性を持たせるなど，学生の学習意欲の向上につながるような Javascript の動的な表現力を生かしたシステムの充実を図るための基礎的システムを構築できた．また，本システムのソースの公開により，本システム自体の双方向による開発の進展を期待できる.

参考文献

(1) 野安ゆきお：海外で「脳トレ」「Nintendogs」は売れている？2008 年，ゲーム用コンテンツの「ごった煮」化は加速する，日経ビジネス online, 2008.2,
(2) 神戸高専総合情報センター：神戸高専授業アンケート,2006-2008
(3) Stephen Downes：E-learning 2.0, elearnmagazine, http://elearnmag.org/subpage.cfm?section=articles&article=29-1
(4) 宮内他：コンパクト両面カラースキャナ ScanSnapfi-5110EOX, PFU Tech.Rev.15, 1, pp.16-24（2004）
(5) ImageJ：http://rsb.info.nih.gov/ij/
(6) Sony Computer Entertainment Inc. : PSP® (PlayStation® Portable)インターネットブラウザ向けコンテンツ作成ガイドライン Version 2.80, 2006
(7) Nintendo of America Inc. : NINTENDODS BROWSER INSTRUCTION BOOKLET,
(8) Apple Inc. : Safari Web Content Guide for iPhone, 2007

レスキューロボット用ドア開放システムについての研究

井上卓茉* 小林滋** 小林泰弘*** 山本祥弘**** 大坪義一***** 高森年******

Development of a Door Opening System for Rescue Robots

Takuma INOUE* Shigeru KOBAYASHI** Yasuhiro KOBAYASHI*** Yoshihiro YAMAMOTO****
Yoshikazu OHTUBO***** Toshi TAKAMORI******

ABSTRACT

Great Hanshin-Awaji Earthquake reminded us the necessity of a rescue robot because there was no robot that helps rescue team even in Japan. Many type of rescue robots have been developed since then. The major task of rescue robot is to search the sufferer and gather the information in the area where rescue team cannot enter. To enter and run about this area, the robot has to overcome much variety of obstacles. One of the common obstacles for robot is the door. In this paper, the development of the door opening system installed for rescue robot is reported.

Keywords : rescue, robot, obstacle, door opening system, manipulator control

1．はじめに

劣悪な環境下で要救助者の発見や探査域の情報収集を行うレスキューロボットは，がれき上走行等の走破性と共にロボットの通行を妨げる障害物に対応する能力も必要とされる．ここではロボットの障害物としてドアに焦点を合わせ，搭載するマニピュレータによってドアを開放するロボットを開発する．そのためこのマニピュレータを用いてドア開放する方法と手順を検討すると共に必要となるハードウェアおよびソフトウェアを開発している．特に本報では，これらに加え，この作業をおこなうためマニピュレータを動かす制御において基礎となる運動学や逆運動学，および速度解析を行ったのでここに報告する．

2．基本仕様

ロボット本体（縦 798mm×横 468mm×高さ 235mm，重量 55kg）にドア開錠機能を持たせるべく，Table 1 の装備を本体に搭載する．

Table 1　ドア開放機構の主要構成要素とその働き

目的	装備	備考
ノブ開錠	マニピュレータ(カメラ)	X,Y,Z の 3 方向への動作と，掴み・回転が可能
ドア押	バンパー	クローラを保護する
ドア引	吸盤	コンプライアンス性を有する

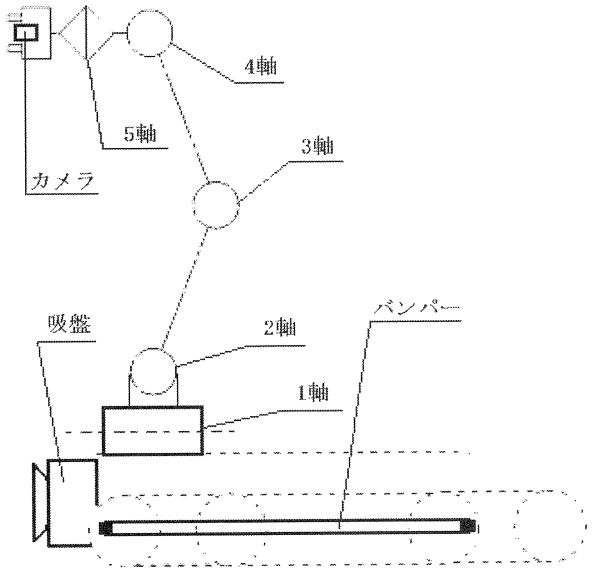


Fig. 1　ロボットの全体の構成

対象となるドアノブは丸ノブ型とレバー型で，左右両方，高さ最大 1050ｍｍに対応する．Fig. 1 に全体の構成を示す．なお，4 軸は 3 軸と機械的に連動しており，ハンド部分が水平を保つようになっている．

3．システムの構成

3．1　機構部

Fig. 2 にマニピュレータを含む

*専攻科　機械システム工学専攻 **機械工学科　教授 ***ビーエルオートテック(株) ****昭電テクノ
*****近畿大学　機械工学科 ******国際レスキューシステム研究機構

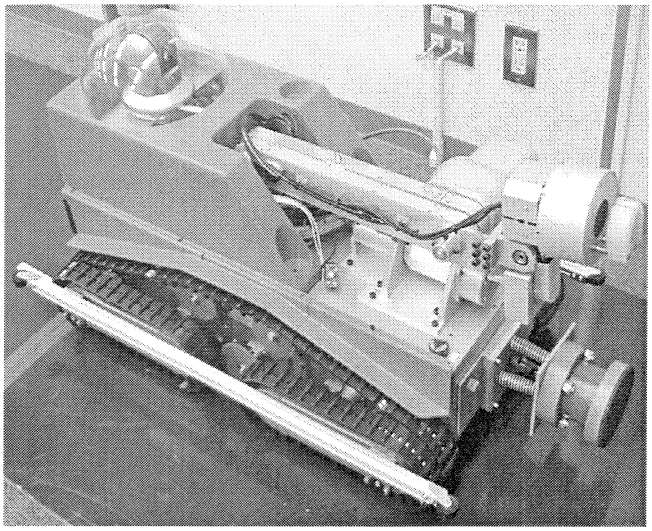


Fig. 2　ロボットの外観

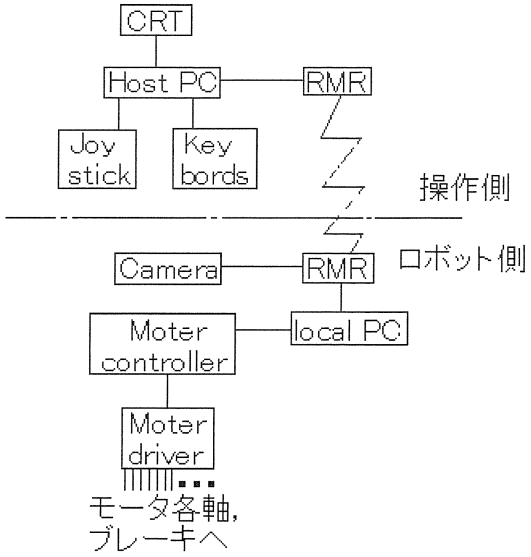


Fig. 3 システム構成図

全体の外観，Table 2 にマニピュレータの使用機器とその仕様の概略を示す．マニピュレータの動作部以外の主な機構としては，以下の 5 つがあげられる．

1）ハンド部の位置決め，及び把持動作確認のため小型ＣＣＤカメラをハンド先端に装備する．

2）ハンド部分とアーム部分の接続部分にはコンプライアンス部を設け，芯ズレ吸収量Ｘ，Ｙ，Ｚ各方向 10ｍｍ，調芯角度全方向 10°を可能とする．

3）ドアを押し開ける場合に，ドア自体からクローラ部を保護するため，車体側面にバンパーを装備する．

4）現在は吸着機構が未完成であるが，吸盤部分にもコンプライアンス部を設け，引き動作をスムーズに行えるようにしてある．

5)ブレーキは常時作動型で，通電時（マニピュレータ駆動時）のみ開放となる．

Table 2　使用機器とその仕様概略一覧

軸	稼動方向	ドライバ	アクチュエータの様式	コントローラ	ポテンショ
1 軸	左右	定格 7A の DC モータドライバ	DC モータ	デジタル I/0 コントローラ	各軸に使用
2 軸	上下				
3 軸					
4 軸	ハンド	3 軸と連動			未使用
5 軸	回転	超音波モータ用ドライバ	超音波モータ		―
6 軸	掴み				
7 軸	吸盤				
B1	ブレーキ 1		電磁メカニカルブレーキ		
B2	ブレーキ 2				
B3	ブレーキ 3				

３．２　制御部　制御対象は，1，2，3 軸のＤＣサーボモータと，5，6 軸の超音波モータ，現在未装着の吸盤用超音波モータ及び 1，2，3 軸のブレーキの 9 系統である．なお，マニピュレータの単体動作試験機能として，H8 マイコンにゲーム用コントローラを接続する事で，各軸の正転，逆転操作及びブレーキの開放が可能である．また，基板上のスイッチを操作することでも 1，2，3 軸のブレーキの解放は可能である．Fig. 3 は遠隔操作時のシステム図である．操作側のＰＣと車載ＰＣは無線ＬＡＮにて通信を行い，カメラ画像はカメラサーバーを介して認識する．

４．ドア開放システムの動作手順

作業時の基準位置は，吸盤装置がドアに触れている状態とする．以下に動作手順を記す．

４．１　ドア開放手順：押ドアの場合

① スタンバイ
② マニピュレータ 1，3 軸駆動
③ マニピュレータ 2 軸駆動
④ 手先効果器作動（掴み）
⑤ 手先効果器作動（回転）
⑥ ロボット本体前進（ドア開錠）
⑦ 手先効果器回転，ノブ開放
⑧ マニピュレータ基準位置へ
⑨ ロボット本体前進

４．２　ドア開放手順：引ドアの場合

① スタンバイ
② マニピュレータ 1，3 軸駆動
③ マニピュレータ 2 軸駆動
④ 手先効果器作動（掴み）
⑤ 手先効果器作動（回転）
⑥ ロボット本体後進（ドア開錠）
⑦ 手先効果器回転，ノブ開放
⑧ マニピュレータ基準位置へ
⑨ ロボット本体後進

５．制御方法

５．１　順運動学問題　操作後のハンドの位置を求めるために，順運動学問題[(1)]を解く．Fig. ４の様にマニピュレータの座標をとり，まずは座標変換行列及び姿勢変換行列を求める．

各軸の回転角を ϕ_k，$k=1,2,3,4$ と置くと，Σ_k 座標系表示の位置，

$$r^{(k)}=\left(x^{(k)},y^{(k)},z^{(k)}\right)^T$$

は回転角が０の時の座標系 Σ_{sk} において姿勢変換行列 C_k を用いて次式で表される．

$$r^{(sk)}=C_k r^{(k)} \tag{1}$$

ここで，姿勢変換行列 C_k は以下のように与えられる．

$k=1$のとき

$$C_1=\begin{bmatrix}\cos\phi_1 & 0 & -\sin\phi_1\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\phi_1 & 0 & \cos\phi_1\end{bmatrix}$$

$k=2,3,4$のとき

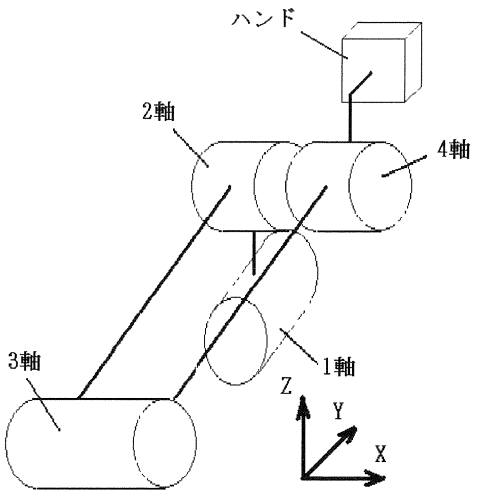


Fig. ４ マニピュレータにおける座標の定義

$$C_k=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\phi_k & -\sin\phi_k\\ 0 & \sin\phi_k & \cos\phi_k\end{bmatrix}$$

また，Σ_{sk} 座標系表示の位置

$$r^{(sk)}=\left(x^{(sk)},y^{(sk)},z^{(sk)}\right)^T$$

は，Σ_{k-1} から見た Σ_{sk} の原点の位置を

$$l^{(k\text{-}1)}=\left(l_{(k\text{-}1)x},\ l_{(k\text{-}1)y},\ l_{(k\text{-}1)z}\right)^T$$

と置くと，座標系 Σ_{k-1} において以下のように表される．

$$r^{(k-1)}=r^{(sk)}\ +\ l^{(k\text{-}1)} \tag{2}$$

以上より，Σ_k 座標系表示の位置 $r^{(k)}$ は Σ_{k-1} において以下のように表される．

$$r^{(k-1)}=C_k r^{(k)}\ +\ l^{(k\text{-}1)} \tag{3}$$

このときの座標変換行列は

$$A_k=\begin{bmatrix}C_k & l^{(k-1)}\\ 0\ \ 0\ \ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{4}$$

となる．

静止座標系 Σ_0 におけるハンドの位置ベクトル $r_w^{(0)}$ は，Σ_4 座標系表現のハンドの位置ベクトル $r_w^{(4)}$ 及び座標変換行列 A_k を用いて以下のように表される．

$$\begin{bmatrix}r_w^{(0)}\\ 1\end{bmatrix}=A_1A_2A_3A_4\begin{bmatrix}r_w^{(4)}\\ 1\end{bmatrix}=A\begin{bmatrix}r_w^{(4)}\\ 1\end{bmatrix} \tag{5}$$

ここで，座標変換行列 A は次式となる．

$$A=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14}\\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24}\\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34}\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$A_{11}=\cos\phi_1$$

$$A_{12}=-\sin\phi_1\sin\left(\phi_2+\phi_3+\phi_4\right)$$

$$A_{13}=-\sin\phi_1\cos\left(\phi_2+\phi_3+\phi_4\right)$$

$$A_{14}=\left(l_{3x}+l_{2x}+l_{1x}\right)\cos\phi_1+l_{0x}$$
$$-\left\{l_{3y}\sin\left(\phi_2+\phi_3\right)+l_{2y}\sin\phi_2\right\}\sin\phi_1$$
$$-\left\{l_{3z}\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)+l_{2z}\cos\phi_2+l_{1z}\right\}\sin\phi_1$$
$$A_{21}=0$$
$$A_{22}=\cos\left(\phi_2+\phi_3+\phi_4\right)$$
$$A_{23}=-\sin\left(\phi_2+\phi_3+\phi_4\right)$$
$$A_{24}=l_{3y}\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)+l_{2y}\cos\phi_2+l_{0y}$$
$$-l_{3z}\sin\phi_2-l_{2z}\sin\phi_2$$
$$A_{31}=\sin\phi_1$$
$$A_{32}=\cos\phi_1\sin\left(\phi_2+\phi_3+\phi_4\right)$$
$$A_{33}=\cos\phi_1\cos\left(\phi_2+\phi_3+\phi_4\right)$$
$$A_{34}=\left(l_{3x}+l_{2x}+l_{1x}\right)\sin\phi_1$$
$$+l\left\{l_{3y}\sin\left(\phi_2+\phi_3\right)+l_{2y}\sin\phi_2\right\}\cos\phi_1]$$
$$+\left\{l_{3z}\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)+l_{2z}\cos\phi_2+l_{1z}\right\}\cos\phi_1+l_{0z}$$

ここで，Fig. 5 より，静止座標原点をハンドの中心線上の点 A にとると，

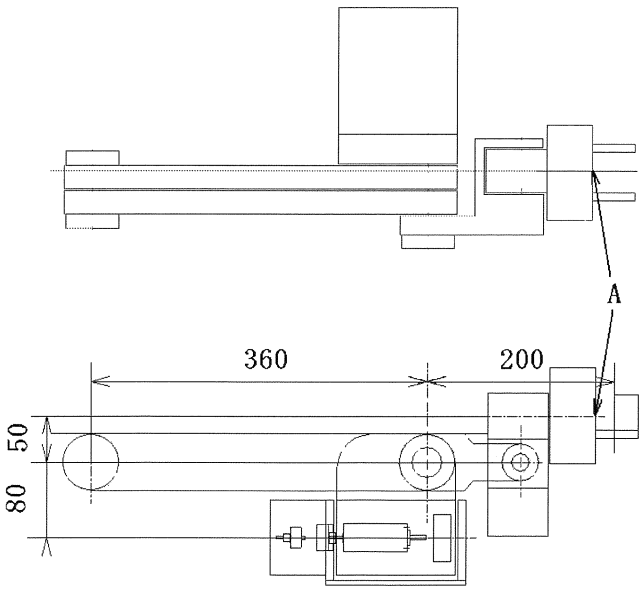


Fig. 5 マニピュレーター寸法図

$$l_{0x}=l_{1x}=l_{1y}=l_{2x}=l_{2z}=l_{3x}=l_{3z}=0$$
$$l_{0y}=-200,\ l_{0z}=-130$$
$$l_{1z}=80,\ l_{2y}=-360,\ l_{3y}=360$$

であるから，

$$A_{14}=-\left\{360\sin\left(\phi_2+\phi_3\right)-360\sin\phi_2\right\}\sin\phi_1-80\sin\phi_1$$
$$A_{24}=360\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)-360\cos\phi_2-200$$
$$A_{34}=\left\{360\sin\left(\phi_2+\phi_3\right)-360\sin\phi_2\right\}\cos\phi_1+80\cos\phi_1-130$$

となる．

また，機械的連動により $\phi_4=-\frac{1}{2}\phi_3$ であるから，

$$A_{12}=-\sin\phi_1\sin\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$A_{13}=-\sin\phi_1\cos\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$A_{22}=\cos\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$A_{23}=-\sin\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$A_{32}=\cos\phi_1\sin\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$A_{33}=\cos\phi_1\cos\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$

となる．

以上より，各関節の角度 ϕ_k，$k=1,2,3,4$ によるハンドの位置ベクトル $r_w^{(0)}$ は，(5)式より求まり，次式のようになる．

$$\begin{bmatrix} r_w^{(0)} \\ 1 \end{bmatrix}=A\begin{bmatrix} r_w^{(4)} \\ 1 \end{bmatrix}=A\begin{bmatrix} 0 \\ 200 \\ 50 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$x_w^{(0)}=-200\sin\phi_1\sin\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)-50\sin\phi_1\cos\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$-360\left\{\sin\left(\phi_2+\phi_3\right)-\sin\phi_2\right\}\sin\phi_1-80\sin\phi_1$$

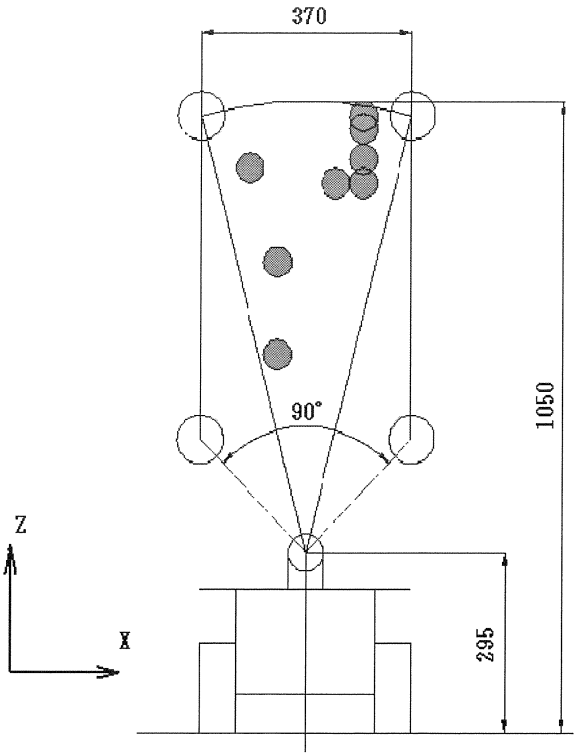


Fig. 6 可操作範囲図

$$y_w^{(0)} = 200\cos\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)-50\sin\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$+360\cos(\phi_2+\phi_3)-360\cos\phi_2-200$$
$$z_w^{(0)} = 200\cos\phi_1\sin\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)+50\cos\phi_1\cos\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$+360\{\sin(\phi_2+\phi_3)-\sin\phi_2\}\cos\phi_1+80\cos\phi_1-130$$

さらに機構的な条件を考慮することで，Fig. 6 の可操作範囲が求まる．図中の赤丸はロボット本体と戸枠との間に５０mm の余裕をとった場合のドアノブの位置サンプルであり，対象となったサンプル全てが可操作範囲内に収まっていることがわかる．

５．２　逆運動学問題　このマニピュレータにおいては，Fig. 7 に示すようにｙ方向の移動は考えなくてもよい．また，3-4 軸の連動により手先効果器の姿勢も考慮しなくてよい．

(6)式より，

$$x_w^{(0)} = -200\sin\phi_1\sin\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$-50\sin\phi_1\cos\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$-360\{\sin(\phi_2+\phi_3)-\sin\phi_2\}\sin\phi_1-80\sin\phi_1$$

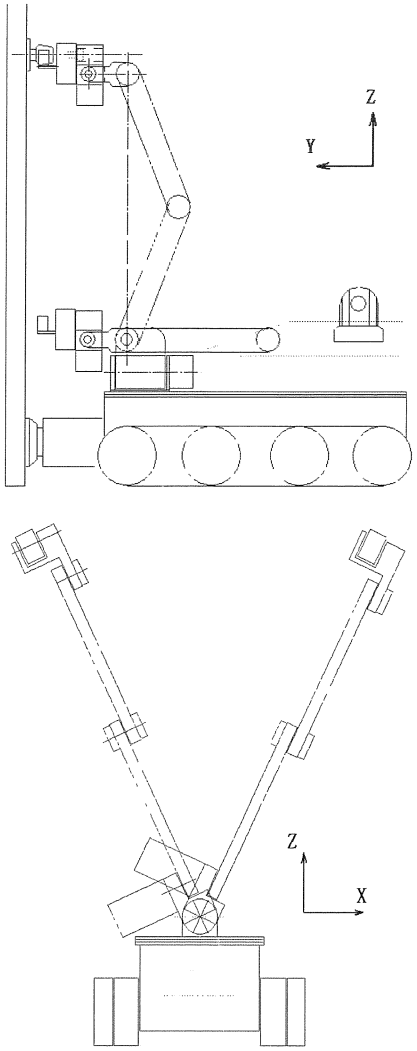


Fig. 7 マニピュレータの動作図

$$y_w^{(0)} = 200\cos\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)-50\sin\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$+360\cos(\phi_2+\phi_3)-360\cos\phi_2-200$$
$$z_w^{(0)} = 200\cos\phi_1\sin\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)+50\cos\phi_1\cos\left(\phi_2+\frac{1}{2}\phi_3\right)$$
$$+360\{\sin(\phi_2+\phi_3)-\sin\phi_2\}\cos\phi_1+80\cos\phi_1-130$$

ここで，動作範囲をｘ－ｚ平面に限定することで，

$$\phi_3 = -2\phi_2 \qquad (7)$$

が求まる．これにより，次式が求まる．

$$x_w^{(0)} = -130\sin\phi_1+720\sin\phi_2\sin\phi_1 \qquad (8)$$

$$y_w^{(0)} = 0 \qquad (9)$$

$$z_w^{(0)} = 130\cos\phi_1-720\sin\phi_2\cos\phi_1-130 \qquad (10)$$

(8)，(10)式を連立方程式として解くと，次式が求まる．

$$\phi_1 = \tan^{-1}\frac{-x_w^{(0)}}{z_w^{(0)}+130} \tag{11}$$

$$\phi_2 = \sin^{-1}\frac{130-\sqrt{x_w^{(0)2}+\left(z_w^{(0)}+130\right)^2}}{720} \tag{12}$$

6． 速度解析

第1リンク及びハンドの姿勢は考慮せず，第2リンクから求める．

各リンクの角速度は，関節の角速度ベクトルを$\dot{\phi}$とすると，駆動軸をX方向にとっているから

$$\dot{\phi}_k^{(k)} = \begin{pmatrix}\dot{\phi}_k & 0 & 0\end{pmatrix}^T \tag{13}$$

となる．よって，

第2リンクの角速度ω_2は

$$\omega_2^{(2)} = \dot{\phi}_2^{(2)} \tag{14}$$

第3リンクの角速度ω_3は

$$\omega_3^{(3)} = C_3^{-1}\omega_2^{(2)} + \dot{\phi}_3^{(3)} = \dot{\phi}_2^{(2)} + \dot{\phi}_3^{(3)} \tag{15}$$

となる．

次に，J_kから見たJ_{k+1}の位置ベクトルrを

$$r_{Jk+1}^{(k)} = l_k^{(k)} \tag{16}$$

とおくと，各関節点の速度v_{Jk}及び2軸から見た4軸の位置は

$$v_{Jk+1}^{(k)} = v_{Jk}^{(k)} + \omega_k^{(k)} \times r_{Jk+1}^{(k)} \tag{17}$$

$$v_{Jk+1}^{(k+1)} = C_{k+1}^{-1} v_{Jk+1}^{(k)} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} v_4^{(2)} &= C_2 C_3\left(v_{J3}^{(3)} + \omega_3^{(3)} \times r_{J4}^{(3)}\right) \\ &= \begin{bmatrix} \left\{-\sin\phi_2 l_{y2} - \sin\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\right\}\dot{\phi}_2 \\ -\sin\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\dot{\phi}_3 \\ \left\{\cos\phi_2 l_{y2} + \cos\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\right\}\dot{\phi}_2 \\ +\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\dot{\phi}_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{19}$$

このときのヤコビ行列[2] Jは$\dot{\phi} = \begin{pmatrix}\dot{\phi}_1 & \dot{\phi}_2\end{pmatrix}^T$となる．

ここで$\dot{R}_4 = \begin{pmatrix}\dot{x} & \dot{y}\end{pmatrix}^T$とおくと，

$$\dot{R}_4 = J\dot{\phi} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$J_{11} = -\sin\phi_2 l_{y2} - \sin\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}$$

$$J_{12} = -\sin\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}$$

$$J_{21} = \cos\phi_2 l_{y2} + \cos\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}$$

$$J_{22} = \cos\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}$$

となる．仮に関節を一様な速度として

$$\dot{\phi}^2 = \dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 = 1 \tag{21}$$

とおくと，

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= J^{-1}\dot{R}_4 = A\dot{x}^2 + B\dot{y}^2 - 2C\dot{x}\dot{y} \\ &= 1 \end{aligned} \tag{22}$$

$$A = \left(\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\right)^2 + \left(\cos\phi_2 l_{y2} + \cos\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\right)^2$$

$$B = \left(-\sin\phi_2 l_{y2} - \sin\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\right)^2 + \left(-\sin\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\right)^2$$

$$C = \cos\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\left\{-\sin\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\right\} + \left\{-\sin\phi_2 l_{y2} - \sin\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\right\}\left\{\cos\phi_2 l_{y2} + \cos\left(\phi_2+\phi_3\right)l_{y3}\right\}$$

となる．(22)式により，任意の関節角度において(21)式にのっとった関節速度にてハンドのとれる速度ベクトルが求まり，可操作性楕円を求めることができる．それにより，それぞれの方向への動かしやすさが判定できる．

7． おわりに

レスキューロボットに使われるドア開放機構につき，ハードウェアやソフトウェアの開発を行い，実証的に試作開発を進めており，マニピュレータを中心とするシステム構成やドア開放手順を考え実際に遠隔操作できるまでになりつつあるが，特にここでは，もう一度そのマニピュレータの順運動学，逆運動学，可操作度を明らかにすることで，理論上どのように操作するのがより確実で高効率な動きとなるかを考察する基礎を見直した．今後これらを発展させ，汎用性の高いマニピュレータ操作システムを開発し実用化を目指していきたい．

謝辞 本研究はNEDOの戦略的ロボット要素開発プロジェクトの一部としてなされた．

参考文献

(1) 高野，詳説ロボットの運動学，オーム社，(2004)
(2) 吉川，ロボット制御基礎論，コロナ社，(1988)

GFRP 貯槽の長期寿命評価に対する超音波検査の適用

瓜本 哲也*　　和田 明浩**

Application of Ultrasonic Testing to Long-term Life Estimation of GFRP Vessels

Tetsuya URIMOTO*　　Akihiro WADA**

ABSTRACT

In this research, for long-term life estimation of GFRP vessels actually used for dilution, the relations between damage state of GFRP and characteristics of ultrasonic wave propagation are investigated. Ultrasonic velocity is measured for the actual samples along with hoop and axial direction, respectively. Three point bending test is also conducted to evaluate residual strength of the samples. Finally, the correlation between ultrasonic velocity and bending properties is investigated. It is found that variation in ultrasonic velocity can be used as the measure of material degradation.

Key Words: GFRP vessels, life estimation, ultrasonic velocity, bending properties

1. 緒言

ガラス繊維強化プラスチック(Glass Fiber Reinforced Plastic,以後 GFRP)は，比較的安価でありながら各種環境に対して良好な耐食性を有し，かつ高い比強度を有する優れた工業用材料である．そのため，GFRP 製の貯槽や反応槽は高度経済成長期に多数製造され，様々な酸溶液およびアルカリ溶液を貯蔵する大型タンク等として多用されてきた．しかし，上述の劣化の起こりやすい環境下に在りながら，数十年もの長期に渡って常時稼動してきたタンクにおいては，老朽化が進行しているものがある．そこで，それらの安全性を保証し，また補修時期を的確に判断するために，劣化状況を診断できる適切な検査手法の確立が求められている．

GFRP 製貯槽の劣化診断は現状では目視や経験に基づいて行われており，これに加えて劣化過程や長期寿命に関する知見は充分に得られていないため，検査精度は作業者の熟練度に依存している[(1)]．そこで運転中に設計時の機械的性能がどれだけ低下したかを検証でき，現場の技術者が使用しやすい，利便性に優れた非破壊検査が必要とされている．

本研究では実際に希釈用の貯槽として使用されていた GFRP 構造材のサンプルについて，劣化状態と超音波伝播特性の変化の関係を調べるために，劣化の程度の異なる２種類において超音波の音速を測定した．さらに曲げ試験を行い実際の剛性の低下との関係を調べ，GFRP 構造材の長期寿命評価に対する超音波検査の有効性を検証した．

*　神戸高専専攻科　　機械システム工学専攻
**　神戸高専機械工学科　准教授

2. 供試材

本実験で使用する試料は，苛性ソーダを濃度 48%から 24%に希釈する目的で 1993 年から 2006 年の 13 年間に渡り屋外で使用された使用済 GFRP 貯槽より採取した．稼動温度は公称で 50℃であるが，苛性ソーダを希釈する際に希釈熱が発生するため，実際の内容液の温度は 60～80℃の間を変動していたと推測される[(2)]．試料は２種類あり両方とも貯槽側面部分のものであるが，No.1 は貯蔵液体に常時接触していた貯槽の下部から，No.2 は貯蔵液体に接していない上部からそれぞれ採取した(Fig.1 参照)．寸法は試料 No.1,2 とも約 200×200mm であり，板厚は No.1 が 12.5mm，No.2 が 8.6mm である．積層構造はいずれも Fig.2 に示す構造である．ここで，SM は surfacing mat，M は chopped strand mat，FW は filament winding である．板厚の相違は filament winding 層の積層枚数によるものであり，その他の部分の構成は No.1,2 で同じである．樹脂部については，貯槽内表面の耐食層がビニルエステルであり，耐食層より外側はイソフタル酸ポリエステルである．

No.1,2 の試料の内面の写真を Fig.3 に示す．表面を比較すると，No.1 の方が全体的に白化していて所々にクラックがあり劣化の様子が見受けられるが，No.2 では樹脂本来の色が残っており，目視で確認できる劣化は見られなかった．試料の断面写真（Fig.4）を見ると，No.1 は薬品に接していた内面のマット層の 1mm 程度が劣化により白化しているのが分かる．

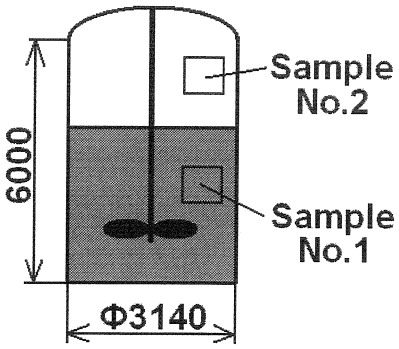


Fig.1 GFRP vessel and the position where the samples were obtained.

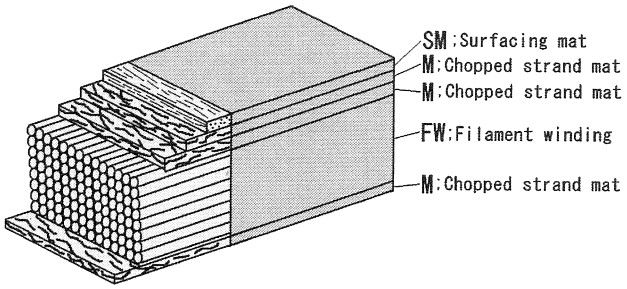


Fig.2 Laminate structure of the GFRP vessel.

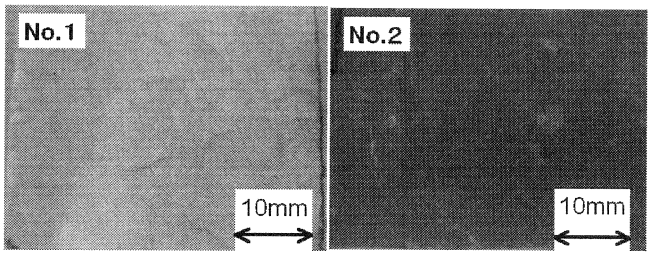


Fig.3 Photographs of the inner surface of the sample No.1 and No.2.

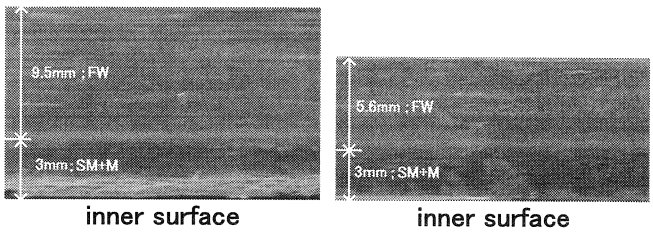


Fig.4 Photographs of the cross-section of the sample No.1 and No.2.

3. 超音波音速測定

3. 1 測定方法

Fig. 5 のように，探触子を局所的に水に浸す局所水浸法により一方の探触子から超音波を発信し，板面内に伝播させた透過波をもう一方の探触子で受信した．受信した波形をオシロスコープで表示し，しきい値を超えた波が時間軸と最初に交差する点を波の到着時間として測定した（Fig. 6 参照）．測定は探触子間の距離 x を変化させて複数回行い，Fig. 7 のような（伝播距離 x）－（伝播時間 t）のグラフの傾きより音速を算出した．超音波を入射する面については，実際の現場での適用を想定し，外壁面からの入射に限定した．

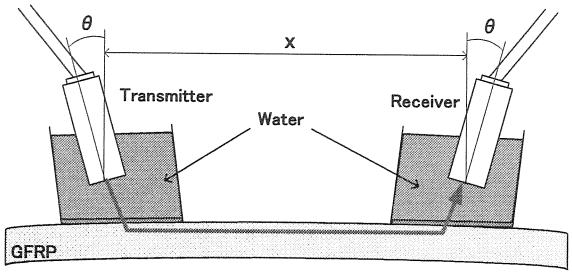


Fig.5 Experimental setup for ultrasonic measurement.

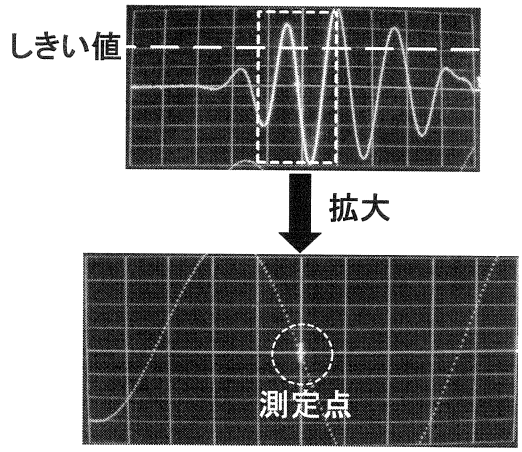


Fig.6 Example of the detected waveform.

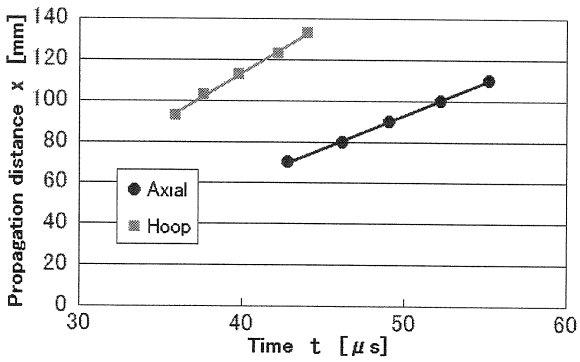


Fig.7 Variation of the traveling time with propagation distance.(Sample No.2)

超音波が水から試料に伝播する場合，超音波は屈折の法則（式（１））に従い伝播する．その原理をFig.8に示す．

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{V_1}{V_2} \qquad (1)$$

ここで，伝播媒質１での音速をV_1，入射角をθ_1，伝播媒質２での音速をV_2，屈折角をθ_2とする．水中から板面内に超音波を入射する場合，$\theta_2=90°$のとき入射効率が最大となる．よって，次式により最適入射角θ_1を決定できる．

$$\theta_1=\sin^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \qquad (2)$$

しかし，本実験では材料中の音速V_2が不明のため，入射強度が最大となる最適入射角度θ_1を実験により求めた．入射波は400Vの矩形波とし，周波数を1MHz，2.25MHzと変化させて測定を行った．なお，測定は円筒形貯槽の周方向，軸方向のそれぞれについて行った．

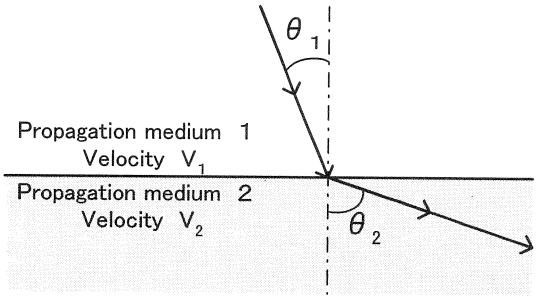


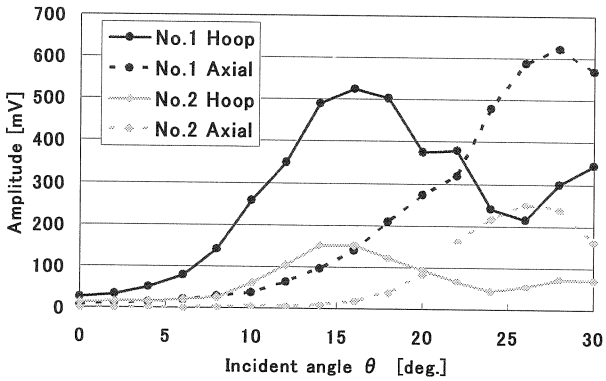
Fig.8 Refraction of waves at a interface.

3.2 測定結果と考察

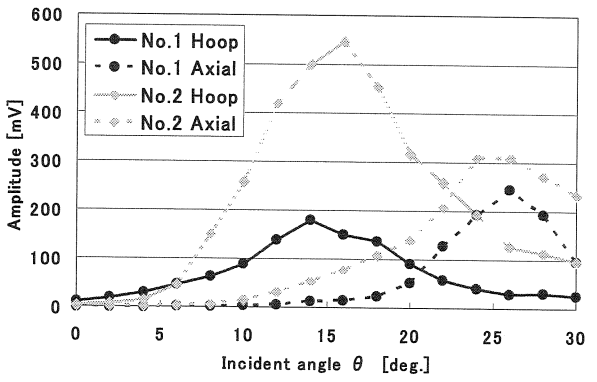
Fig.9は周波数1MHzと2.25MHzにおける入射角度θ_1と受信波強度の関係である．方向により強度（電圧値）が異なるのは，測定の際に波形を観測しやすくするために，ゲインを変化させたからである．Fig.9より周方向は軸方向よりも最適入射角が小さいことが分かる．最適入射角が小さいということは，式（１）によると，試料中の音速が大きいことを意味する．これは円筒状であるGFRP貯槽の構造上，内部のガラス繊維の多くが周方向に配向しているため，弾性率も周方向の方が高いことが影響していると考えられる．次に試料の劣化の有無に関してみると，No.1とNo.2ではあまり差は現れなかった．また，周波数の変化による最適入射角の差もあまり見られなかった．

次に，Fig.9より求めた最適入射角を用いて，伝播距離と伝播時間の関係を測定し，音速を算出した．結果をFig.10に示す．音速測定結果をみると，劣化の有無に関わらず，軸方向の音速よりも周方向の音速の方が大きくなっており，最適入射角の測定結果と対応する結果が得られた．また，No.1とNo.2ではNo.1の方が音速が低下しており，材料劣化を音速低下として検出できている．最適入射角でNo.1とNo.2で差があまり現れなかったのは，測定角度の分解能が２度刻みであったので，少量の音速低下を検出できなかったと考えられる．周波数による比較ではFig.9と同様に明確な違いは見られなかった．

以上では，No.1,No.2の板厚の違いを考慮せずに考察したが，実際にはNo.1,No.2の板厚の違いが音速測定に影響を与えている可能性がある．そこで，今回の供試材と音速が同程度である真鍮を用いて板厚と音速の関係を調べた．測定方法はFig.5のGFRPの場合と同様に周波数1MHzを用いて，大きさ155×305mm，板厚8mm，10mm，12mmの３種類の真鍮板を用いて行った．結果を，Table 1に示す．板厚が増加すると音速がわずかに増加する傾向が得られた．特に板厚12mmの音速は8mmの音速に対して0.7%の増加となった．一方，供試材では板厚12mmのNo.1の音速は板厚8mmのNo.2の音速に対して低下していたので，この音速低下は劣化によるものであると解釈できる．



(a)1MHz



(b)2.25MHz

Fig.9 Comparison of optimum incident angle.

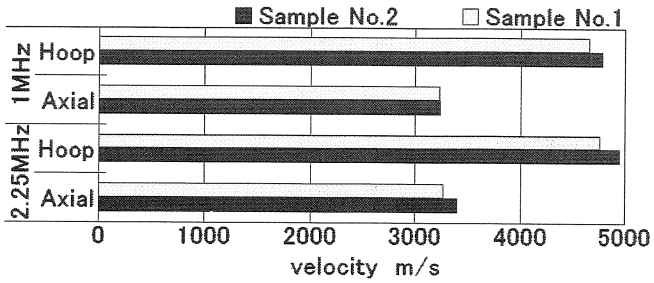


Fig.10 Comparison of wave velocity between different damage state.

Table 1 Result of wave velocity in brass.

Plate thickness [mm]	Velocity [m/s]
8	4561
10	4578
12	4592

4. 板厚方向の受信波強度の測定

本研究で使用した試料は厚板であるため，外表面から入射した波は表面波として試料内を伝播している可能性も考えられる．表面波の場合，波の浸透深さは波長程度であり[3]，試料の外表面の材料特性しか反映しないため，内面劣化層の影響を反映していない可能性もある．実際，Fig.10 より透過波の音速は約 3000～5000m/s なので，波の周波数と波長の関係式（3）を用いて計算すると，周波数 1MHz の場合の波長は約 3～5mm，周波数 2.25MHz の場合の波長は約 1～2mm となり，いずれの場合も板厚に比べて小さな値となる．そこで，以下では波の浸透深さの実測を行った．

$$\text{波長}\quad \lambda = \frac{\text{速度}\quad v}{\text{周波数}\quad f} \qquad (3)$$

4.1 測定方法

Fig.11 のように，試料に超音波を入射させて板面内に伝播させ，板の側面から受信波強度を測定した．この際，側面を局所的に測定するため，受信側の探触子にアクリルウェッジを装着し，z 軸ステージにより 1 mm 毎に移動させて測定を行った．試料と受信側探触子の接触圧を一定にするために，Fig.11 に示すように探触子をスプリングにより試料端面に押し当てる構造とした．

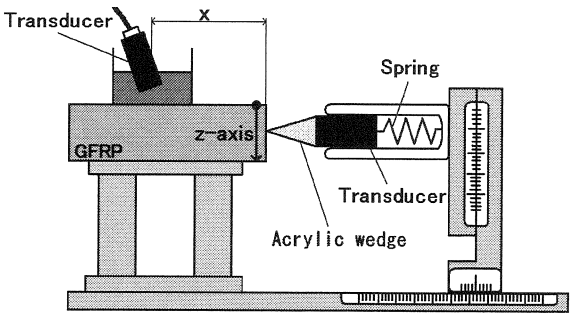
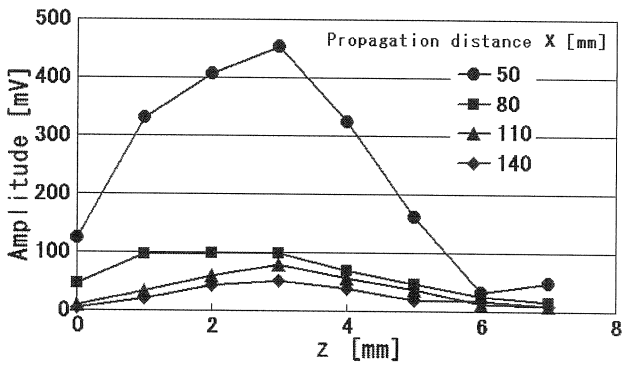


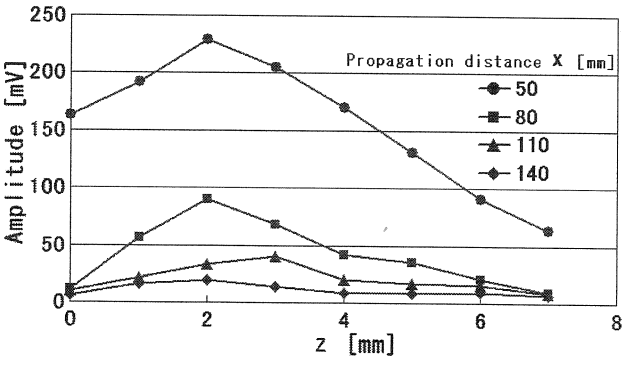
Fig.11 Experimental setup for measurement of penetration depth of ultrasonic wave.

4.2 測定結果と考察

周方向に伝播距離を変化させたときの受信波強度の測定結果を Fig.12 に示す．縦軸が受信波強度で横軸が板厚方向の受信位置 z（0 が入射面）である． 図より周波数 1MHz，2.25MHz ともに入射面近傍に強度のピークがあり，距離 x が大きくなるにつれて波が減衰する傾向がみられる．ここで伝播距離ごとに最大受信波強度を基準にしてグラフを引き伸ばし，波の浸透深さの変化をイメージ化したものを Fig.13 に示す．結果は 1MHz の場合は強度の大きい部分が表面から 3～4mm となり音速より算出した波長約 3～5mm と同程度となった．2.25MHz の浸透深さは 1MHz よりも若干浅くなっているが，波長 1～2mm に比べるとやや深く浸透している．いずれの場合も，板内面付近まで波が浸透していることが確認できたので，今回測定した波は表面波ではないといえる．Fig.10 の音速測定結果から考えると縦波に近い波が伝播していると考えられる．



(a) 1MHz



(b) 2.25MHz

Fig.12 Variation of receiving waves with propagation distance.

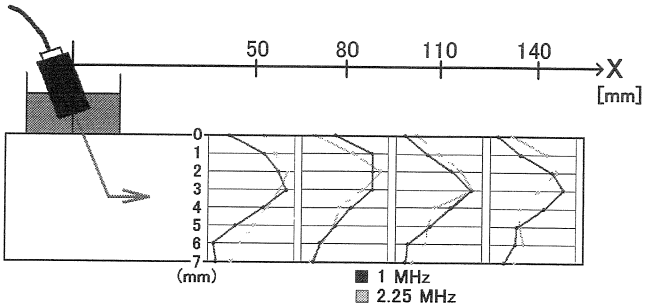


Fig.13 Variation in penetration depth of ultrasonic wave with propagation distance.

入力周波数による波の浸透深さの相違が小さかった原因を調べるために受信波の周波数解析を行った.その結果をFig.14に示す.公称周波数が1MHz, 2.25MHz の場合いずれにおいても, 1MHz 前後の周波数の波が伝播していることが判明した. これは, GFRP 中に伝播している超音波の高周波領域が強く減衰しているために実際に伝播している波は2.25MHz 以下の周波数となったためと考えられる.

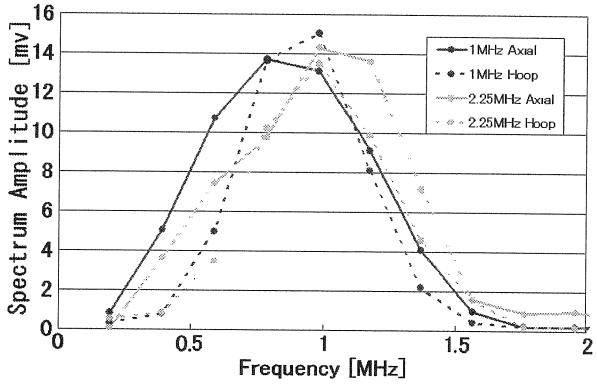


Fig.14 Frequency spectrum of the detected waves in GFRP.

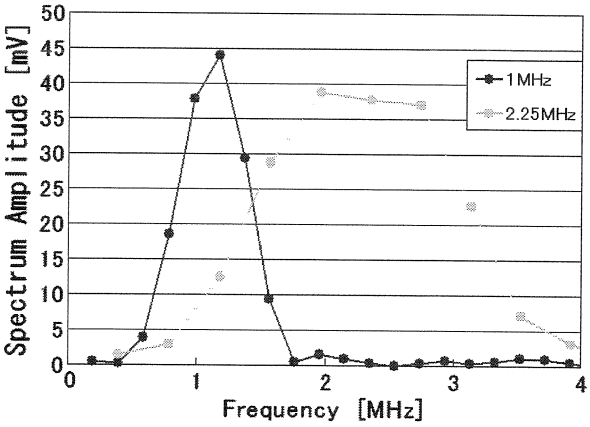


Fig.15 Fequency spectrum of the detected wave in brass.

次に 2.25MHz の高周波領域の減衰が, GFRP の材料特性によるものであることを確認するため,同じ測定条件で伝播媒質を均質な材料である真鍮(板厚10mm)に変えて同様に周波数解析を行った. その結果をFig.15に示す. 結果は1MHz, 2.25MHz 共に公称の周波数付近の値となった. この結果よりGFRP においては 2.25MHz の高周波領域が強く減衰していることが判明した.

以上より GFRP 構造材に対する超音波検査においては, 1MHz 以上の高周波は強く減衰するために適切ではないといえる. しかしFig.14では, 高周波領域が減衰させられてはいるが 2.25MHz の方が1MHz よりも高周波成分を多く含んでいる. これは, Fig.13において2.25MHz の方が1MHz より浸透深さが若干浅くなっていることと対応している. このことより, 波長によって波の浸透深さをコントロールできる可能性があることが分かった.

5. 曲げ試験

5.1 試験方法

前章までで示した試料 No.1,2 の音速の相違が, 実際の材料強度・剛性の低下とどの程度の相関があるのかを調べるために, 室温で三点曲げ試験を行なった. Fig.16 に示すように, 第 3 章で音速測定を行った供試材から短冊状の試験片 140×20mmを周方向と軸方向に各 6 本をダイヤモンドカッターで切り出して, No.1 と No.2 から合計で 24 本の試験片を採取した. 試験は一方の供試材から各方向に採取した 6 本の試験片に対して, 半数は試験片の外面から圧子により荷重を与え, もう半数は内面から荷重を与えた. 試験条件は負荷速度を 2mm/min, 支点間距離を 100mm とした.

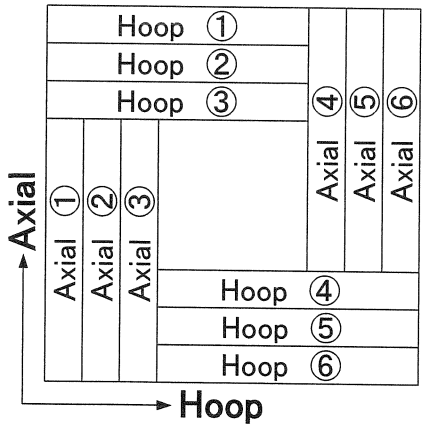


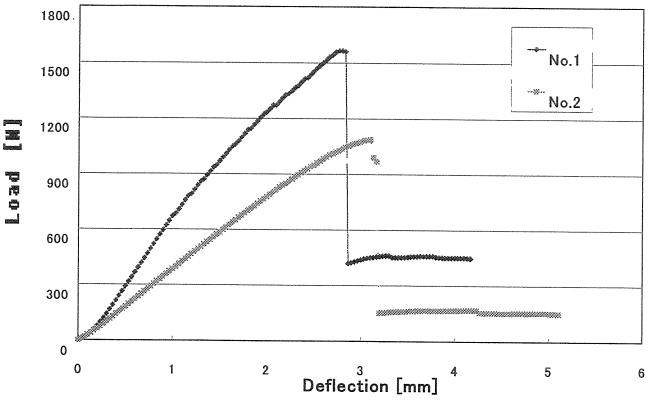
Fig.16 The cutting position where the specimens for bending test were obtained.

5.2 試験結果と考察

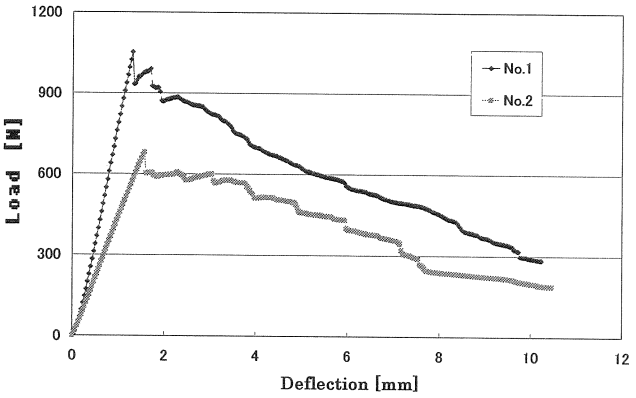
試験により得られた(荷重)-(たわみ)線図をFig.17に示す．図のInsideは内面から荷重を与えた場合で，Outsideは外面から荷重を与えた場合である．劣化の激しいNo.1の方が曲げ剛性が大きく弾性域の傾きが大きいのは，No.1の方が板厚が大きくFW層（filament winding層）の割合が多いためである．Fig.17(c)以外は，No.1,2の(荷重)－(たわみ)線図に大きな違いはみられなかった．(a)の場合ではどちらの試験片も最大荷重に達すると引張側のマット層が破断し，荷重が大幅に低下している．(b)の場合ではどちらの試験片も最大荷重に達すると引張側のFW層にき裂が発生し，試験が進行するにつれて繊維と母材間のはく離領域が徐々に拡大していき，荷重が低下していった．(c)については後に詳しく考察する．(d)の場合では，No.2は最大荷重に達すると引張側のFW層の表面にき裂が発生し荷重が低下するが，その後もFW層のガラス繊維の残存強度により再度荷重は増加する．その後も繊維の破断の度に荷重の減少と増加が繰り返される．このサイクルを数回繰り返しながら徐々に荷重が低下していく．

次にFig.17より曲げ強度と弾性率を算出した．その結果をFig.18，Fig.19に示す．結果より，周方向の外面から荷重を与えた場合を除けば，弾性率，曲げ強度は共に劣化していないNo.2に対して劣化しているNo.1の方が約20～30%低下しているので，劣化が弾性率や強度低下に影響していることが判明した．しかし，(c)の周方向の外面から荷重を与えた場合では，弾性率の低下はほとんど現れおらず，曲げ強度についてはNo.1の方が大きい値となった．以下この原因について考察する．

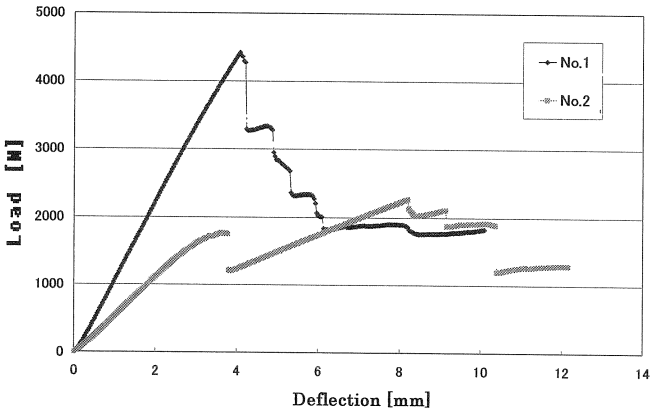
試験の様子(たわみが 10mm の時点)の写真をFig.20，Fig.21に示す．いずれの場合にも，最大曲げ応力が生じる最下面の破壊に先立ち，マット層/FW層の層間はく離が生じている．また，Fig.20のNo.1の場合とFig.21のNo.2の場合を比較すると，層間はく離の進行具合が異なっている．これは曲げにおけるせん断応力が寄与していると考えられる．ここで矩形断面の曲げにおけるせん断応力分布と試験片の積層構造をFig.22に示す．負荷されるせん断荷重がNo.1,2で同じとき，側面の断面高さが小さいNo.2の方がせん断応力の最大値は大きくなる．境界条件より内外表面でのせん断応力は0となるので，中立軸でせん断応力が最大の山型となる[4]．Fig.22よりNo.1とNo.2ではマット層が板厚に占める割合が異なり，マット層/FW層界面の板厚方向の存在位置が異なるので，マット層とFW層のはく離を引き起こすせん断応力の大きさがNo.2の方が大きくなる．このため，No.2において界面はく離損傷が早期に発生し，曲げ強度の低下に繋がったと考えられる．



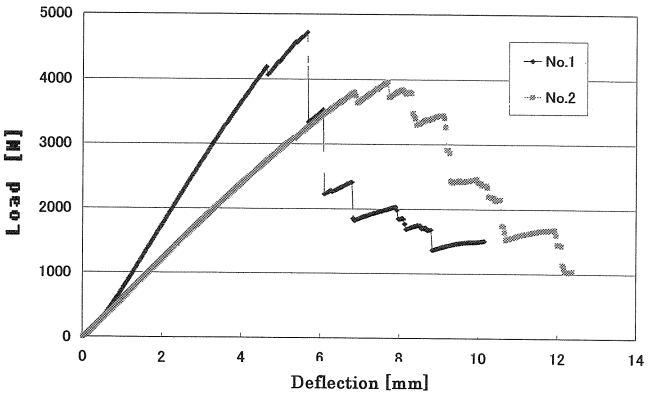
(a) Axial outside



(b) Axial inside



(c) Hoop outside



(d) Hoop inside

Fig.17 Load-deflection diagram of GFRP specimens.

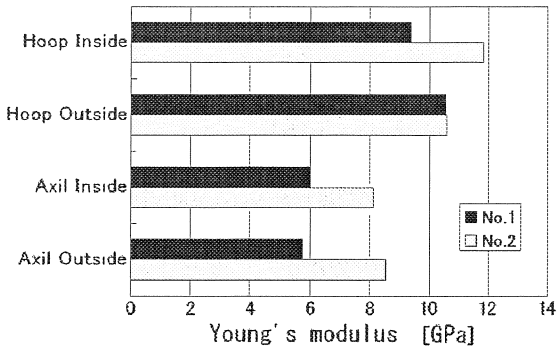


Fig.18 Comparison of Young's modulus of GFRP specimens.

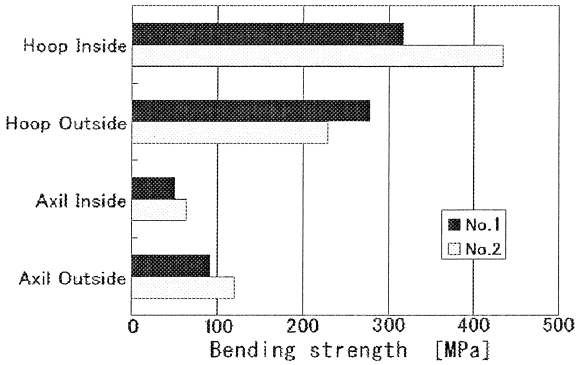


Fig.19 Comparison of maximum stress of GFRP specimens.

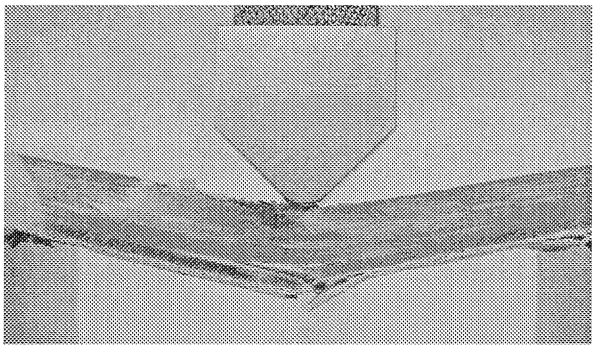


Fig.20 Photograph of the cross-section of No.1 specimen at fracture (hoop,outside).

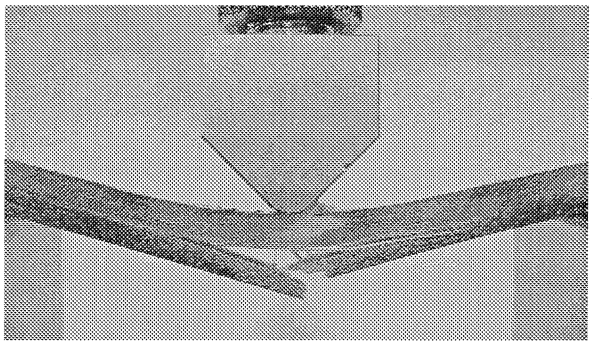


Fig.21 Photograph of the cross-section of No.2 pecimen at fracture (hoop,outside).

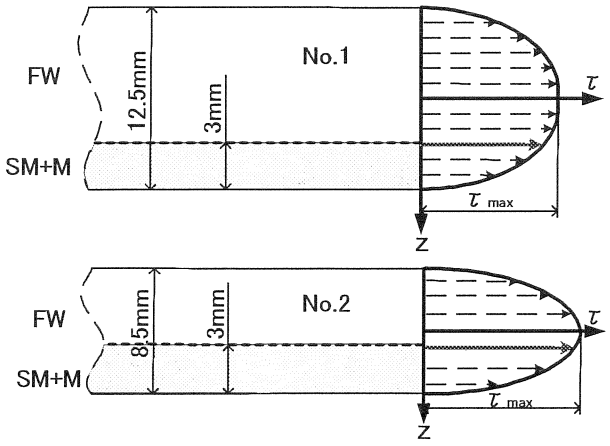


Fig.22 Distribution of shear stress on rectangular cross section in bending.

6. 結言

本研究では，GFRP 貯槽の長期寿命評価に対する超音波検査の有効性について検討し，以下の結論を得た．

1) 局所水浸による超音波斜角入射法を用いることで，GFRP 貯槽側壁面内を伝播する超音波の伝播速度が測定可能である．
2) 劣化の進行度合いの異なる試料の音速を比較したところ，劣化の激しい試料において音速低下が確認された．
3) 波の浸透深さを実測したところ，超音波は板内面まで浸透しており，板厚全体の特性を反映していることが確認できた．
4) GFRP 貯槽の検査においては，1MHz 以上の周波数は強く減衰するため，音速の測定には 1MHz 以下の周波数を用いると良い．
5) 超音波の音速低下とヤング率・曲げ強度の低下には相関があり，音速低下から GFRP 貯槽の劣化状態を評価できる．

参考文献

(1) 二木崇:「ラム波を用いた GFRP 貯槽の健全性評価」，非破壊検査第 54 巻 2 号，pp. 91-97, 2005.
(2) 竹中亮太，馬渕信太，森田辰郎，藤井善通:「アルカリ環境で長期間使用された GFRP 製タンクの損傷状態」，JCOM-37 講演論文集，pp. 88-92, 2008.
(3) 福岡秀和，戸田裕乙，平尾雅彦:「音弾性の基礎と応用」，オーム社，pp. 153-161, 1993.
(4) 深澤泰晴，山田伸志，水口義久，大内英俊，黒崎茂，小阪敏文，高上輝雄，大藤晃義:「材料力学入門」，パワー社，pp. 86-89, 1989.

大気圧プラズマ生成のためのバイポーラパルス高電圧電源の試作

赤松浩*　　桐山隆太郎**

Production of a High-Voltage Bipolar-Pulsed Power Supply for Atmospheric Pressure Plasma Jet

Hiroshi AKAMATSU*　Ryutaro KIRIYAMA**

ABSTRACT

A high-voltage bipolar-pulsed power supply was experimentally developed for generation of atmospheric pressure plasma jet. The pulsed power supply consisted of push-pull type DC-DC converter, full bridge type DC-AC inverter, and multiple pulse transformers. The full bridge type DC-AC inverter was composed of four power MOSFETs. The gate of the power MOSFET was controlled by control IC; IR2125 for high side gate and IR2121 for low side gate. The multiple pulse transformers had five ring cores. The number of primary and secondary windings was two and ten turns. The primary and secondary windings were parallel and series, respectively. In the multiple pulse transformers, voltage of 17 V in amplitude was transformed to 370 V.

Keywords: atmospheric pressure plasma jet, high-voltage bipolar-pulsed power supply, power MOSFET

1. はじめに

近年、プラズマプロセスにおいて大気圧プラズマが注目を集めている。これは、大気圧でプラズマを生成する場合、真空ポンプおよび真空容器などの高価な設備が不要なためであり、単純な電極構造で容易にプラズマを生成できることが大きな要因である。

大気圧プラズマを生成するにはいくつかの方法および応用がある。例えば、コロナ放電は電気集塵に利用される。また、誘電体バリヤ放電はオゾナイザーに応用されている。

大気圧プラズマの応用研究の中で、リモート型大気圧プラズマジェットがある。リモートとは、プラズマ生成部とプロセス部が離れていることを意味し、大気圧プラズマならではの特長である。2005 年、ドイツの Wuppertal 大の Engemann 等は、石英ガラス管と 2 電極系による非常に簡単なプラズマジェットを報告した[(1)]。このプラズマジェットは、一般的なアフターグロー方式のものとは異なる物理特性を有している。また、大阪大の北野等は、同様のプラズマジェットを単一電極のみで生成出来ることを報告し、液体滅菌への基礎研究を行っている[(2),(3)]。

このプラズマジェットは電極系が非常に簡単かつ低コストであるため、様々な応用へ利用できると予想される。しかし本方式は、一般的な誘電体バリヤ放電とは異なった特殊な放電形態を持ち、その詳細が明らかになっていない。また、生成したプラズマの電子密度および電子温度等の特性はこれまで調べられていない。この 2 点を明らかにすることは応用研究を行う上で非常に重要である。

そこで本研究では、図 1 に示すようなガラス管と銅ホイルで構成されるシンプルな構造および安価な電源で動作するリモート型大気圧プラズマジェットシステムの開発し、プラズマ生成形態およびプラズマ特性を調べることを目標とする。プラズマの状態は、電極に印加する電圧に強く影響を受ける。そこで、本報告ではプラズマ生成用の低周波バイポーラ高電圧パルス電源の試作と低電圧における性能評価を行ったので紹介する。

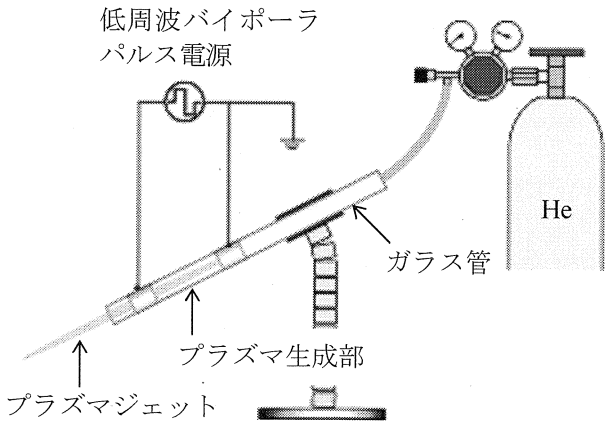


図 1 リモート型大気圧プラズマジェットシステム

* 電気工学科 准教授
** 専攻科電気電子工学専攻 1 年

2. 実験方法

2.1 回路の概要

本研究用に作製した低周波バイポーラ高電圧電源の回路図を図 2 に示す。試作する大気圧プラズマジェットは、波高値が～10 kV、周波数が数 kHz の低周波交流電圧で動作することを目指している。本回路は 3 つのパートから構成される。左側から、第一昇圧部としてプッシュプル DC-DC コンバータ回路、バイポーラ波形整形のためのフルブリッジ DC-AC インバータ回路、第二昇圧部として多重パルストランス回路である。以下にそれぞれの機能を示す。

2.2 プッシュプル DC-DC コンバータ

本回路のメイン電源には、安価な直流 10V 電源を使用する。試作回路では、最終で 10 kV を要求するため、第一昇圧としてプッシュプル形の DC-DC コンバータを採用し、パルストランス HVT123（日本パルス工業）により直流 500 V まで昇圧する。

メイン電源である直流 10 V のスイッチング素子には MOSFET を使用し、ゲート駆動用 IC として IR 社の IR4428 を使用した。IR4428 へのスイッチングパルスは PIC16F84A により与え、周波数は 1 kHz とした。

2.3 フルブリッジ DC-AC インバータ回路

前段で昇圧された直流 500 V を、H 字形のフルブリッジ DC-AC インバータ回路によりバイポーラ波形に整形する。スイッチングには、パワーMOSFET および IGBT が利用できる。一般的に、パワーMOSFET は IGBT に比べ耐圧が低いものの、スイッチングスピードが速い。今回は、試験的に表 1 に示す IR 社のパワーMOSFET を使用した。

表 1　使用したパワーMOSFET

	パワーMOSFET
型式	IRFPS40N50L
最大電圧[V]	(V_{DS}) 500
最大電流[A]	(I_D) 40
オン時間[ns]	63
オフ時間[ns]	68

H 字型に配列された半導体素子を駆動するとき、高電圧側であるハイサイドと接地側のローサイドには同一の回路および IC は使用できない。そこで、ハイサイド素子およびローサイド素子の駆動にはそれぞれ IR 社の IR2125 および同社 IR2121 を使用した。図 3(a)および(b)に、それぞれハイサイドおよびローサイド駆動回路を示す。

図 3(a)において、スイッチング素子に N 形チャネルのパワーMOSFET を用いた場合、負荷はソース側に接続される。このとき、パワーMOSFET を完全に ON 状態にさせるには、ゲート駆動として V_{DD} より 10 V 程度高い電圧を与える必要がある。本試作電源では、V_{DD} は 500 V であるが、ゲート駆動 IC 単体では 500 V を超える電圧を出力することは不可能である。そこで、ダイオード D およびコンデンサ C から構成されるブートストラップ回路を使用し、V_{CC} から絶縁されたフローティング電源として機能させた。

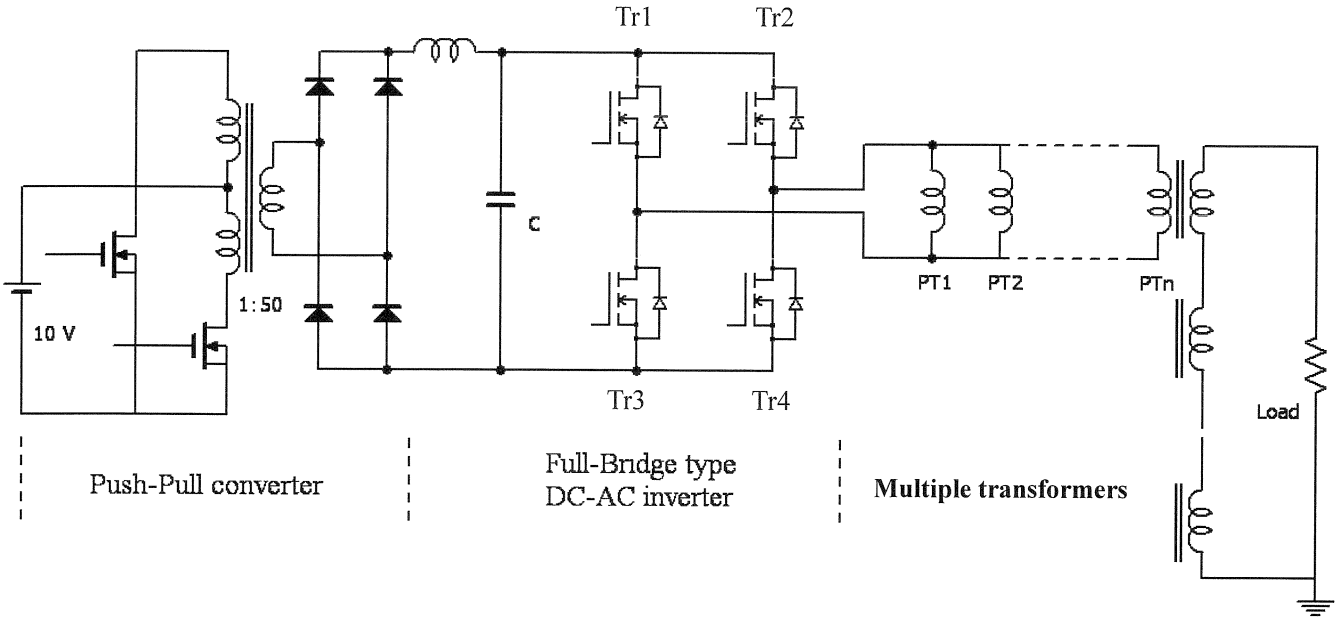


図 2 試作するバイポーラパルス電源回路

図 3(b)に示すローサイド駆動回路では、パワーMOSFET が ON 状態の時ドレインが接地電位に近づいているため、特別な絶縁電源回路は不要である。

また、IR2125 および IR2121 の両ゲート駆動 IC には、Cs 端子を利用した過電流検出機能があり、パワーMOSFET へ過剰な電流がながれると駆動信号をオフにすることが可能である。しかし、本試作回路では Cs 端子を接地し無効化している。

2.4 多重パルストランス回路

整形されたバイポーラパルスは、コートリングコア（B64290L82X830）で作製したパルストランスによって最終電圧まで昇圧する。このとき、それぞれのパルストランスの 1 次は並列、2 次は直列に接続されている[4]。トランスの 1 次および 2 次の電圧をそれぞれ V_1 および V_2 とすると、

$$V_1 = \frac{2}{D} B_m S N_1 f , \qquad (1)$$

$$V_2 = \frac{2}{D} B_m S N_2 f n \qquad (2)$$

である。ただし、D はデューティー比、B_m は磁束密度、S はトロイダルコアの断面積、f は周波数、N_1 は 1 次側巻き線数、および N_2 は二次側巻き線数、n はトロイダルコアの段数である。式(1)(2)の関係から次式が得られる。

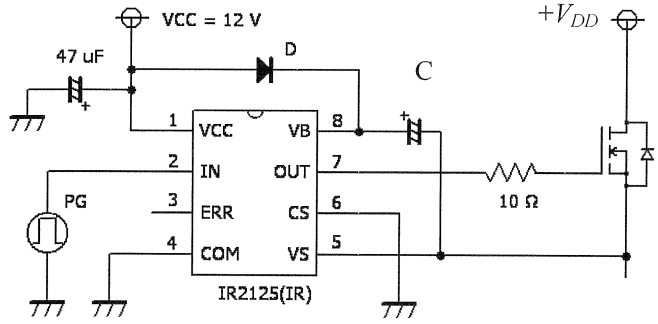
$$V_2 = n \frac{N_2}{N_1} V_1 \qquad (3)$$

つまり、2 次電圧は、段数×巻き数比倍に昇圧されることがわかる。また、1 次側を並列に接続しているため、インダクタンスを軽減する効果もある。

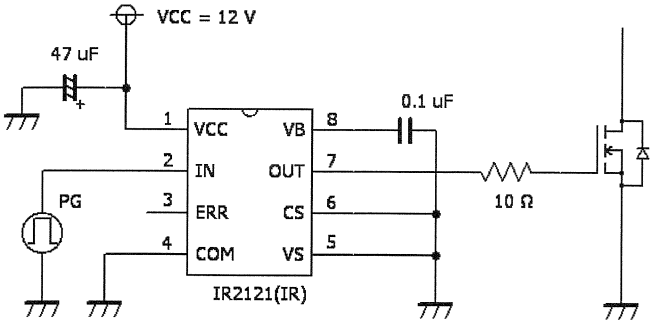
また、トランス 2 次側は、回路図通りに巻けば図 4(a)に示すように個々のコアを全て同様に巻き直列接続した形になるが、本研究では、(b)のように全コアを貫通して巻く形式とした。

2.5 回路の評価

作製した低周波バイポーラパルス電源の性能評価のため、低電圧における動作を調べた。作製した電源の評価は、模擬負荷に 10 kΩを接続した時の各部の電圧波形をディジタルオシロスコープ（GW Intex 社：GDS-2000）により計測して行った。

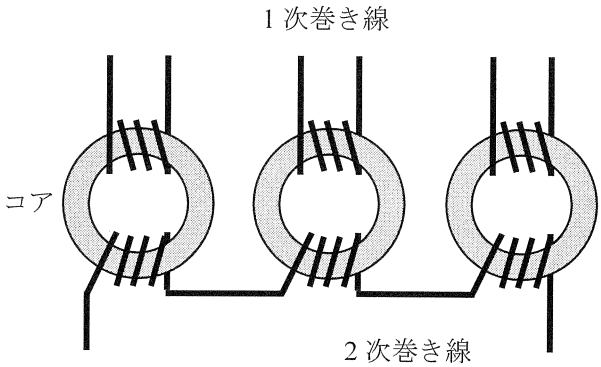


(a) ハイサイド駆動回路

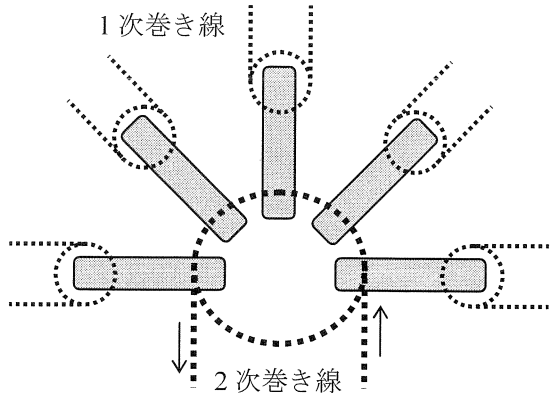


(b) ローサイド駆動回路

図 3 パワーMOSFET 駆動 IC の制御回路



(a) 2 次側直列タイプ



(b) 2 次側貫通タイプ

図 4 多重トランスの巻き方

3. 実験結果および考察

3.1 試作回路の外観

図 5 に、試作した低周波バイポーラパルス電源の外観を示す。PIC マイコン関連回路は、専用のマイコンボード（Sunhayato、MB-P01）に作製した。また、マイコンボード右側のスペースに、図 3 に示したパワーMOSFET 駆動専用 IC の回路を作製した。

写真右側の二階建て構造の 1 階には多重パルストランス回路、2 階にはフルブリッジ DC-AC インバータ回路を配置した。

3.2 ブートストラップ回路の動作

ブートストラップ回路による絶縁電源の動作テストを行った。ここでは、図 3(a)のパワーMOSFET のソースに負荷として 100 Ωの抵抗を接続し、V_{DD} を 10 V として評価を行った。

図 6 は、PIC マイコンで発生させた(a) ゲート駆動 IC への入力信号および(b) Tr1 のゲートーソース間電圧である。プログラミング時に、PIC 出力のパルス幅 10 μs とした。図 6(a)から PIC 出力時間幅は 11 μs 程度である。同図(b)において、PIC 出力の立ち上がりから約 300 ns 遅れてゲート駆動 IC の出力であるゲートーソース間電圧が立ち上がっている。

ブートストラップ回路では、パワーMOSFET が OFF 状態にあるとき、V_{CC} によってブートストラップコンデンサが 12 V に充電される。次に、MOSFET がオンしたとき、MOSFET のソース電位はほぼ V_{DD} となるため、ゲートーソース間電圧は V_{DD} より 10 数ボルト高くなっておく必要がある。ここでは、コンデンサに充電した電圧によりそれが可能になっている。同図(b)において、MOSFET の V_{DD} を 10 としたので、それに V_{CC} の 12 V を加えた 22 V 程度の電圧が得られている。

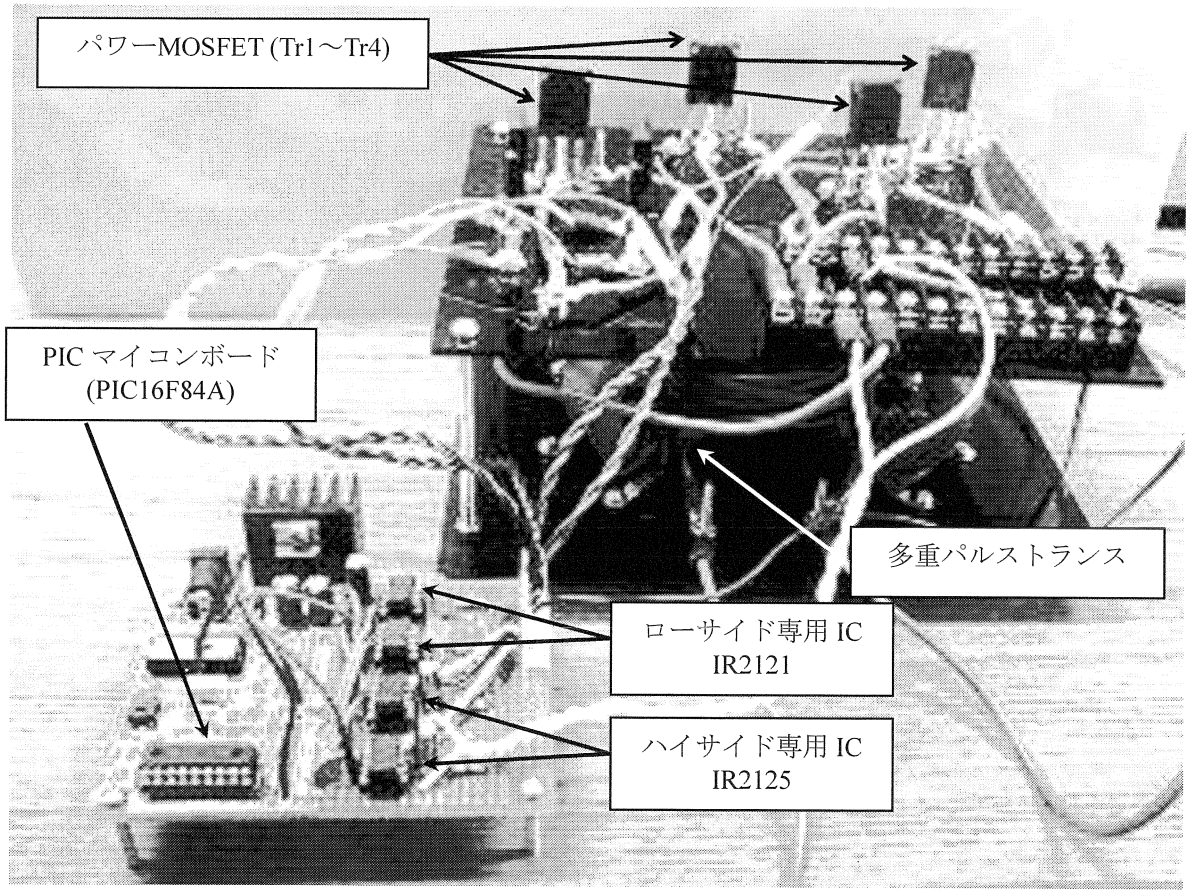


図 5 試作した低周波バイポーラパルス電源
(フルブリッジ DC-AC インバータ回路・多重パルストランス回路)

3.3 ハイサイド・ローサイド MOSFET の駆動

試作した電源回路では、フルブリッジ DC－AC インバータにより直流電圧をバイポーラ形電圧に整形する。この際、図 2 における Tr1－Tr4 ペアおよび Tr2－Tr3 ペアをそれぞれ同時に ON 状態にスイッチングしなければならない。図 7 に、(a) ハイサイド側パワーMOSFET ; Tr1 および(b) ローサイドパワーMOSFET ; Tr4 のゲート－ソース間電圧波形を示す。ただし、このとき V_{DD} を 0 V としている。また、PIC 出力のパルス幅を 1 μs とした。

図 7 において、まずローサイド側である Tr4 の V_{GS} が立ち上がり、それに 250 ns 程度遅れてハイサイド側の Tr1 の V_{GS} が立ち上がっている。立ち下がりも同様に、Tr1 と Tr4 には約 250 ns のずれが生じている。パルス時間はいずれも半値幅で約 2 μs であり、PIC 出力時間の倍程度である。

3.4 スイッチング周期

試作電源では、それぞれのパルス時間を 1 μs とし、50 μs ごとに交互に片極性のパルスが現れるようにプログラミングした。図 8 に、ハイサイド側パワーMOSFET ; Tr1 および Tr2 のゲート－ソース間電圧波形を示し、正極性と負極生パルスの時間的な位置関係を示す。同図から、Tr1 のゲート－ソース間電圧の立ち上がりから Tr2 のそれの立ち上がりまでの時間幅は 52 μs 程度であることがわかる。

3.5 多重パルストランスの昇圧特性

試作した電源回路の最も特徴的なパートである多重パルストランスの外観を図 9 に示す。コートリングコアを立て円状に配置した。1 次巻き線は各コアに巻き付け、アクリル板の下面にて配線している。2 次巻き線は各コアを貫通するかたちで巻き付けられている。今回は 1 次巻き線数を 2、2 次巻き線数を 10 とし、コア数を 5 とした。このとき式(3)の関係から、理論上は 1 次電圧が 25 倍に昇圧されて出力されることになる。

多重パルストランスの昇圧特性を調べるため、V_{DD} を 20 V としたときの低電圧における動作を調べた。負荷は 10 kΩとし、560 Ωのカーボン抵抗を 5 並列した抵抗分圧によりオシロスコープで電圧波形を調べた。なお、このときの分圧比は 90 倍である。

図 10 に、多重パルストランスの(a)入力電圧 V_1 および(b)出力電圧波形 V_2 を示す。同図(a)から、パルストランスの 1 次電圧は 17 V である。V_{DD} に対して 3 V 程度低くなった原因は、二つのパワーMOSFET のドレイン－ソース間電圧降下であると考えられる。

同図(b)から、出力電圧は約 400 ns で立ち上がり、保持電圧は約 370 V である。その後、逆極性に 400 V のスパイク電圧が見られた。このスパイクは、スイッチ ON 時にトランスのインダクタンスに蓄積されたエネルギーが、スイッチオフによって放出されたためである。これを抑制するには、スナバ回路を追加する必要がある。

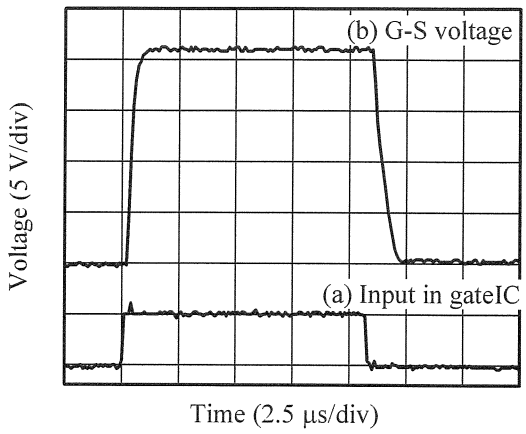


図 6 ブートストラップ回路の動作

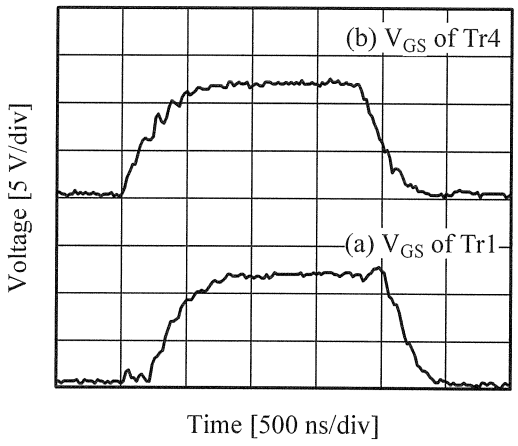


図 7 Tr1 および Tr4 の V_{GS} 波形

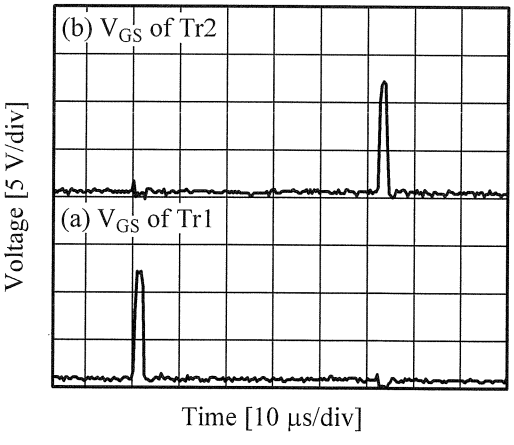


図 8 Tr1 および Tr2 の V_{GS} 波形

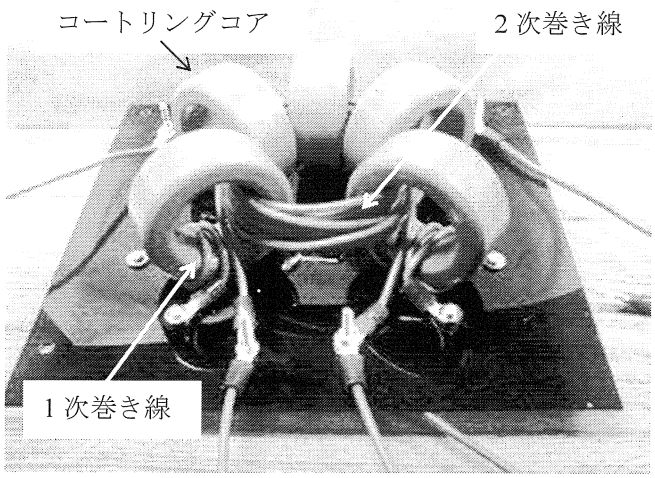


図 9 多重パルストランス

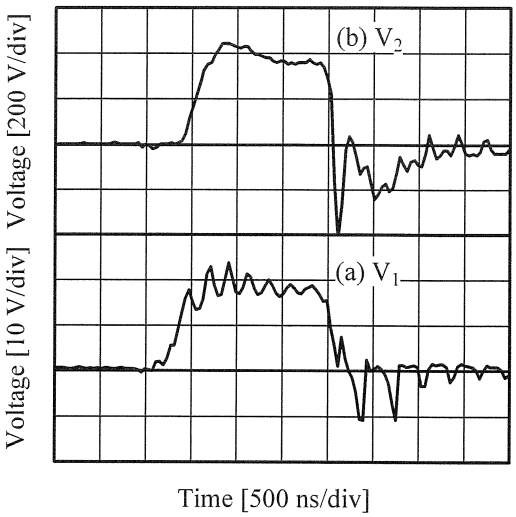


図 10 多重パルストランスの入出力

以上から、今回試作した 5 段多重パルストランスの昇圧比を見積もると約 22 となった。

4. まとめ

大気圧プラズマ発生用の低周波バイポーラパルス高電圧電源の試作を行った。本報告では、電源回路の後半 3 分の 2 におけるフルブリッジ DC－AC インバータ部および多重パルストランス部の紹介と動作を示した。低電圧における動作から、試作した多重パルストランス回路では、約 22 倍の昇圧を達成した。しかし、パルス終了時に大きなスパイク電圧が生じており、高電圧動作においてパワーMOSFET の故障の原因となりうるため、スナバ回路の追加によって抑制する必要がある。

また、今後は回路の初段であるプッシュプル DC－DC を作製し、電源回路を完成させる予定である。

参考文献

(1) M. Teschke, J. Kedzierski, E. G. Finatu-Dinu, D. Korzec, and J. Engemann: “Hing-Speed Photographs of a Dielectric Barrier Atmospheric Pressure PlasmaJet”, IEEE Trans. Plasma Sci. **33**, (2005) pp. 310-311.

(2) 北野勝久, 浜口智志：“ 低周波大気圧マイクロプラズマジェット” , 応用物理 77, (2008) pp. 383-389.

(3) 北野勝久, 谷口和成, 酒井道, 高木浩一, 浪平隆男, 服部邦彦 : ”大気圧プラズマを点けてみよう”, プラズマ核融合学会誌 84, (2008) pp. 19-28.

(4) 前岡宏信, 野口李彦：“ 新しい巻線方式に基づく多重トランスを用いた高電圧パルス電源の開発”, 電気学会自動車研究会資料, VT-05-7, (2005) pp. 37-42.

デルタ関数の不連続関数における有用性について

松田忠重*

On Usefulness of the Delta Function Applied to Discontinuous Functions

Tadashige MATSUDA*

ABSTRACT

The delta function is a useful function(formally a distribution) especially in the Fourier analysis as a sampling function from another function or as an unit impulse input for linear systems. It is usually used only for continuous functions. The author describes in this paper that the delta function is more useful when it is applied to discontinuous functions.

Keywords: distribution delta, discontinuity, sample, Fourier transform, convolution, Fourier series

1. 初めに

デルタ関数はディラックにより導入されその有用性から広く使われている．この関数は原点で無限大それ以外で0というところから0と不定な値しか持たない関数である．したがって積分もできないはずで，これより数学的に無意味とみなす人もいたが，シュワルツの超関数 (distribution) の理論[1]において超関数デルタとして認められるようになった．

超関数としてのデルタ関数 $\delta(t)$ は，有界な台を持つ微分可能な任意関数 $\phi(t)$ を入力として，出力 $\int \delta(t)\phi(t)dt$ が $\phi(0)$ として定まるような関数，と定義される．この性質はデルタ関数の抽出の性質とよばれ，$\phi(0)$ は原点における $\phi(t)$ の標本と呼ばれる．

このように積分で関数が定義されるところから，超関数としてのデルタ関数 $\delta(t)$ は distribution delta と呼ばれている．デルタ関数は，質量や電荷が点とみなされる場合のそれらの点における分布密度関数に相当していると言える．

正弦関数の入力 x に対する出力 $\sin(x)$ が，変数 x のべきの係数倍による無限級数でつくられるように，デルタ関数も点における分布密度関数にするためのある極限が使われる．これより，$\int \delta(t)\phi(t)dt$ は限りなく原点に近い領域における $\phi(t)$ の平均値である，とも言える．

したがって，$\phi(t)$ が，原点で不連続で，正負側からそれぞれ0に限りなく近づけるとき $\phi(+0)$，$\phi(-0)$ は有限値になり，0においては $\phi(0)$ は任意有限値になり，不連続点をのぞいて微分可能の場合，$\int \delta(t)\phi(t)dt$ は $(\phi(-0)) + \phi(+0))/2$ となることが容易に示され，この表現を使うことにより，デルタ関数の有用性がさらに増すことが示される．ところが，このことを述べている文献が筆者のみるところ見当たらないので，ここにそれらを示したいと思う．

以下で扱う不連続関数 $\phi(t)$ は，$t = a$ で不連続とするとき，$t = a$ 以外で微分可能で，a の正負側からそれぞれ a に限りなく近づけるとき $\phi(a + 0)$，$\phi(a - 0)$ が有限値で，a においては $\phi(a)$ は任意有限値である，とする．

2. 超関数デルタ

極限としての点での分布関数としてのデルタ関数は各種の極限でつくることができるが，簡単化のため以下に2つだけを示す．

$$\delta(t) = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{1}{\varepsilon} \mathrm{rect}\left(\frac{t}{\varepsilon}\right) \quad (\varepsilon > 0) \tag{1}$$

$$\delta(t) = \lim_{F \to \infty} \int_{-F/2}^{F/2} e^{2\pi i f t} df \tag{2}$$

ここで rect は矩形関数である．

(1) 式は原点で無限大それ以外では0となり，また (2) 式は

$$\lim_{F \to \infty} \begin{cases} \dfrac{\sin \pi F t}{\pi x} & (t \neq 0) \\ F & (t = 0) \end{cases} \tag{3}$$

* 電気工学科 教授

となり，これは原点で無限大それ以外では有限であるが不定となるのでこれら (1),(2) 式は一致しているとは言えない．しかし．これらはすべて，

$$\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)\phi(t)dt=\phi(0) \tag{4}$$

を満たす．

ただしこの左辺の積分は，例えばデルタ関数に (2) 式を使う場合これは極限ではあらゆる変数において不定で積分できないので，

$$\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)\phi(t)dt=\lim_{F\to\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left(\int_{-F}^{F}e^{2\pi ift}df\right)\phi(t)dt \tag{5}$$

の意味とする．このことは (1) 式でも同様である．つまり，極限値を求める以前で積分を行いその後に極限値を求める．これは正しいと言っているのではなく約束しているのである．

関数 $f(t),g(t)$ がある点で一致しないが，

$$\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\phi(t)dt=\int_{-\infty}^{\infty}g(t)\phi(t)dt \tag{6}$$

であるとき，関数 $f(t),g(t)$ は超関数として等しいといい，

$$f(t)\sim g(t) \tag{7}$$

と表すこととする．これを使うと，(1),(2) 式は超関数として等しいと言える．そこで，(1),(2) 式は超関数としてデルタ関数に等しいの意味でつぎに表す．

$$\begin{aligned}&\delta(t)\sim\lim_{\varepsilon\to0}\frac{1}{\varepsilon}\mathrm{rect}\left(\frac{t}{\varepsilon}\right)\quad(\varepsilon>0)\\&\delta(t)\sim\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}e^{2\pi ift}df\end{aligned} \tag{8}$$

$\phi(t)$ が原点で不連続で，不連続点をのぞいて微分可能で，t が負の側から限りなく 0 に近づくときの $\phi(t)$ の極限値が $\phi(-0)$ となり，t が正の側から限りなく 0 に近づくときの $\phi(t)$ の極限値が $\phi(+0)$ となり，0 では $\phi(0)$ になり，それぞれが有限値の場合，デルタ関数を用いると，

$$\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)\phi(t)dt=\frac{1}{2}\big(\phi(-0)+\phi(+0)\big) \tag{9}$$

になる．右辺は原点の極く近傍での $\phi(t)$ の平均値を意味するので，デルタ関数のこの性質を以下では極く近傍平均値の抽出と呼ぶこととする．以下では表記簡単化のためこの右辺を $\phi(\pm0)$ と表記する（また t における極く近傍平均値を $\phi(t\pm0)$ と表記する）．

3. フーリエ変換とデルタ関数

以下，極く近傍平均値抽出を行うデルタ関数としての有用性を示したい．

3.1 デルタ関数によるたたみこみと逆フーリエ変換

通常，不連続点での逆フーリエ変換の収束の説明は大変わかりにくい．しかし，以下のようにデルタ関数を全面的に使うことにより，これは大変分かり易くなると思われる．

関数 $g(t)$ のフーリエ変換 $G(f)$ を

$$G(f)=\int_{-\infty}^{\infty}g(t)e^{-2\pi ift}dt \tag{10}$$

で定義する．

このとき，$g(t)$ と $\delta(t)$ とのたたみこみは $\delta(t)$ として (8) 式 2 番目を用いると，

$$\begin{aligned}g(t)*\delta(t)&=\int_{-\infty}^{\infty}g(\tau)\delta(t-\tau)d\tau\\&=\lim_{F\to\infty}\int_{-\infty}^{\infty}g(\tau)\left(\int_{-F}^{F}e^{2\pi if(t-\tau)}df\right)d\tau\end{aligned} \tag{11}$$

となり，これは $g(t\pm0)$ になる．また有限値 F において，2 つの積分の順序を交換してよいので，

$$\begin{aligned}&=\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}e^{2\pi ift}\left(\int_{-\infty}^{\infty}g(\tau)e^{-2\pi if\tau}d\tau\right)df\\&=\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(f)e^{2\pi ift}df\end{aligned} \tag{12}$$

となる．これらより，

$$g(t\pm0)=\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(f)e^{2\pi ift}df \tag{13}$$

が成立することが容易にわかる．

ある点 t において $g(t)$ が不連続の場合，これは $g(t)$ に一致しない場合がある．したがって，

$$g(t)\sim\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(f)e^{2\pi ift}df \tag{14}$$

となる．これは $G(f)$ による逆フーリエ変換と呼ばれるものである．

また，$g(t)$ を有限領域 $A\sim B$ でフーリエ変換し，その結果を $G_{AB}(f)$ とおくとき，$G_{AB}(f)$ によって (14) 式で逆フーリエ変換すると，$A<t<B$ では $g(t)$，$t=A, t=B$ ではその点での極く近傍の平均値 $g(A+0)/2$, $g(B-0)/2$，$t<A, t>B$ では 0 となる．この性質は離散フーリエ変換の標本対象の信号の打ち切りにおいて大切である．

以下，$g(t)$ とそのフーリエ変換 $G(f)$ のフーリエ変換対を $g(t)\leftrightarrow G(f)$ で表す．

3.2 デルタ関数列によるたたみこみとフーリエ級数

最初にフーリエ級数を学ぶ教育現場においては，周期関数は定数，基本波，高調波に展開できるという前提で，つまりフーリエ級数になるという前提で進められ，もっぱらフーリエ係数を求めて級数展開したり，それを用いて合成することに重きを置いている．なぜ級数展開できるのか，という疑問には，せいぜい実際の楽器から発生する音などがそのようになっていることで類推のための説明をする程度で，その理由までは説明しない．それは初学者には仕方がないことと思われるが，

以下のようにデルタ関数列を用いることにより，周期関数が級数になることが容易に示される．

有界な台をもつ関数 $g(t)$ が周期 T で繰り返すことでできた周期関数を，

$$g_{P1}(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t-nT) \tag{15}$$

とする．また，$g(t)$ と周期 T のデルタ関数列とがたたみこみされてできた周期関数を，

$$g_{P2}(t)=g(t)*\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT) \tag{16}$$

とする．ここで，

$$g(t)*\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}g(t-nT)*\delta(t) \tag{17}$$

なので，

$$g_{P2}(t)=g_{P1}(t\pm 0) \tag{18}$$

である．

デルタ関数列は，

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT)\sim\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}e^{2\pi\imath mt/T} \tag{19}$$

と右辺級数で合成できることが証明できるので，

$$\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}e^{2\pi\imath mt/T}\leftrightarrow\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\delta\left(f-\frac{m}{T}\right) \tag{20}$$

の関係から，

$$g(t)*\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT)\leftrightarrow G(f)\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\delta\left(f-\frac{m}{T}\right) \tag{21}$$

となる．ここで，２つの関数のたたみこみのフーリエ変換はそれぞれの関数のフーリエ変換の積になることを用いている．これより，次になる．

$$g_{P2}(t)=\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}G\left(\frac{m}{T}\right)e^{2\pi\imath mt/T} \tag{22}$$

$g_{P1}(t)$ は不連続点で $g_{P2}(t)$ と異なる場合があるので，

$$g_{P1}(t)\sim\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}G\left(\frac{m}{T}\right)e^{2\pi\imath mt/T} \tag{23}$$

となる．これは $g_{P1}(t)$ の複素フーリエ級数である．

ところで，

$$\int_{-\infty}^{\infty}g(t)e^{-2\pi\imath mt/T}dt=\int_{(T)}g_{P1}(t)e^{-2\pi\imath mt/T}dt \tag{24}$$

が成立することがわかる（$g_{P1}(t)$ は $g(t)$ を周期 T で繰り返しそれらを加算したものである．これは $g_{P1}(t)$ を任意間隔 T で打ち切った関数を周期 T で繰り返しそれらを加算したものでもある．だから (24) 式が成立する）．ここで (T) は積分範囲が 1 周期 T の意味．したがって複素フーリエ係数は，

$$\frac{1}{T}G\left(\frac{m}{T}\right)=\frac{1}{T}\int_{(T)}g_{P1}(t)e^{-2\pi\imath mt/T}dt \tag{25}$$

となる．

(17) 式はインパルス応答 $g(t)$ の線形システムにインパルス列が入力したときの出力を表している．この関係は弦楽器，管楽器，母音発生システムなどのインパルス列入力に対する出力の関係と同じである．インパルス列の周期 T が $g(t)$ の台より小さいとき，$g(t)$ が繰り返すときに互いに重なりが生じ $g_{P1}(t)$ の 1 周期は $g(t)$ とはかなり異なった信号になる場合がある．しかし，$g_{P1}(t)$ の複素フーリエ係数の包絡線はそのような重なりの有る無しに関係なく $g(t)$ のフーリエ変換の $1/T$ 倍になっていることがわかる．

3.3 超関数としての関数とそのフーリエ変換

関数 $g(t)$, $\phi(t)$ のフーリエ変換を $G(f)$, $\Phi(f)$ とおく．このとき，$\int g(t)\phi(t)dt=\int G(f)\Phi(-f)df$ となる．この証明は $g(t)$ とデルタ関数とのたたみこみ：$g(t\pm0)$ を使うと容易である．

超関数として $g(t)$ と $g(t\pm0)$ は一致するので，

$$\int_{-\infty}^{\infty}g(t)\phi(t)dt=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(f)e^{2\pi ift}df\right)\phi(t)dt \tag{26}$$

となる．右辺 lim の付いた積分は $g(t\pm0)$ に収束するので，lim を変数 t の積分の外に出して，積分順序を逆にすることができ，そのとき，

$$\begin{aligned}&=\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(f)\left(\int_{-\infty}^{\infty}e^{2\pi ift}\phi(t)dt\right)df\\&=\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(f)\Phi(-f)df\end{aligned} \tag{27}$$

となることが容易にわかる．同様にして．

$$\int_{-\infty}^{\infty}g(t)\phi^{*}(t)dt=\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(f)\Phi^{*}(f)df \tag{28}$$

が得られる．ここで，$\phi^*(t)$, $\Phi^*(f)$ はそれぞれ $\phi(t)$, $\Phi(f)$ の共役複素である．また，同様にして以下の関係が得られることが容易にわかる．

$$\int_{-\infty}^{\infty}g(\tau)\phi(t-\tau)d\tau=\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(f)\Phi(f)e^{2\pi ift}df \tag{29}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty}g(\tau)\phi(t+\tau)d\tau=\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(-f)\Phi(f)e^{2\pi ift}df \tag{30}$$

(28) 式から，パーセバルの式：

$$\int_{-\infty}^{\infty}g(t)g^{*}(t)dt=\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}G(f)G^{*}(f)df \tag{31}$$

が得られる．(29) 式は，$g(t)$ と $\phi(t)$ のたたみこみのフーリエ変換が $G(f)\Phi(f)$ になることを表している．(30) 式は，$g(t)$

と $\phi(t)$ の相互相関のフーリエ変換が $G(-f)\Phi(f)$ になることを表している．

3.4 標本の和（ポアソンの和公式）

(26) 式左辺において，

$$g(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT) \tag{32}$$

とおくと，

$$\int_{-\infty}^{\infty}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT)\phi(t)dt=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\phi(nT\pm 0) \tag{33}$$

となり，また (27) 式は，

$$G(f)=\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\delta(f-m/T) \tag{34}$$

なので，これを代入すると，

$$\begin{aligned}&\lim_{F\to\infty}\int_{-F}^{F}\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\delta(-f-m/T)\Phi(f)df\\&=\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\Phi(-m/T)=\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\Phi(m/T)\end{aligned} \tag{35}$$

となり，したがって，

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}\phi(nT\pm 0)=\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\Phi(m/T) \tag{36}$$

となることが容易にわかる．ただし $\phi(t)$ は，有界な台をもち，不連続点をもつかもしれないとし，不連続点を除いて微分可能とする．また，このとき $\Phi(f)$ は連続関数であるとする（もしこれも不連続点をもつなら，$\phi(t)$ 同様 ± を付ければよい）．左辺の ± を除けばこれはポアソンの和公式[2]になる．それが，ここでは不連続点がある場合にも拡張されている．

＜(36) 式の例＞

$$\phi(t)=u(t)e^{-at}\quad(a>0) \tag{37}$$

とする．このとき，(25) 式左辺は，

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}\phi(nT\pm 0)=\frac{1}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}e^{-anT}=\frac{1}{2}\left(\frac{1+e^{-aT}}{1-e^{-aT}}\right) \tag{38}$$

となる．ここで，原点での標本 $\phi(t\pm0)$ が 1/2 になることに注意．

$$\Phi(f)=\frac{1}{a+2\pi if} \tag{39}$$

なので，(25) 式右辺は，

$$\begin{aligned}&\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\Phi(m/T)=\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\frac{1}{a+2\pi im/T}\\&=\lim_{M\to\infty}\frac{1}{2\pi}\sum_{m=-M}^{M}\frac{aT/2\pi}{(aT/2\pi)^2+m^2}\end{aligned} \tag{40}$$

となる．$b=aT/2\pi$ とおくと，

$$\pi\left(\frac{1+e^{-2\pi b}}{1-e^{-2\pi b}}\right)=\lim_{M\to\infty}\sum_{m=-M}^{M}\frac{b}{b^2+m^2} \tag{41}$$

となる．このような等式はいくらでも挙げることができる．

3.5 積分が標本の和になる場合

$$\int_{-\infty}^{\infty}\Phi(f)df=\phi(0\pm 0) \tag{42}$$

なので，(36) 式は，

$$\int_{-\infty}^{\infty}\Phi(f)df+\sum_{\substack{n=-\infty\\n\neq 0}}^{\infty}\phi(nT\pm 0)=\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\Phi(m/T) \tag{43}$$

となる．したがって，$\phi(t)$ の台が $-T$~T より小さくなるように T を選べば，左辺第２項は０となり，

$$\int_{-\infty}^{\infty}\Phi(f)df=\lim_{M\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{m=-M}^{M}\Phi(m/T) \tag{44}$$

となる．これは近似式ではないことに注意．

＜(44) 式の例＞

台 $-A/2$~$A/2$ であるような関数のフーリエ変換対：

$$\phi(t)=\begin{cases}1 & (|t|\le A/2)\\0 & (|t|>A/2)\end{cases}\leftrightarrow\Phi(f)=\begin{cases}\dfrac{\sin\pi Af}{\pi f} & (f\neq 0)\\A & (f=0)\end{cases} \tag{45}$$

において，(44) 式を用いると，

$$\begin{aligned}&\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin\pi Af}{\pi f}df\\&\quad=\beta+\lim_{M\to\infty}\sum_{\substack{m=-M\\m\neq 0}}^{M}\frac{\sin m\pi\beta}{\pi m}\quad(\beta=A/T<2)\end{aligned} \tag{46}$$

となり，これはまた以下になる．

$$\begin{aligned}&\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin x}{x}dx\\&\quad=\pi\beta+\lim_{M\to\infty}2\sum_{m=1}^{M}\frac{\sin m\pi\beta}{m}\quad(\beta=A/T<2)\end{aligned} \tag{47}$$

(45) 式で周波数原点を移動させて f を $f-\alpha$ にすると，(47) 式はまた次になる．

$$\begin{cases}\displaystyle\lim_{M\to\infty}\sum_{m=-M}^{M}\frac{\sin\pi\beta(m-\gamma)}{(m-\gamma)} & (\gamma=\alpha T\neq\text{integer})\\[2ex]\displaystyle\pi\beta+\lim_{M\to\infty}\sum_{\substack{m=-M\\m\neq\gamma}}^{M}\frac{\sin\pi\beta(m-\gamma)}{(m-\gamma)} & (\gamma=\alpha T=\text{integer})\end{cases} \tag{48}$$

(47) 式で β が特別に 1/2 の場合，よく知られた次の等式：

$$\frac{\pi}{4}=1-\frac{1}{3}+\frac{1}{5}-\frac{1}{6}+\frac{1}{7}-\ldots \tag{49}$$

が得られる．

3.6 標本化された関数

$$g_s(t)=g(t)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-n\Delta t)\Delta t \tag{50}$$

を $g(t)$ の標本化された関数（正確にはデルタ関数列によって標本化された関数）と呼ぶ．上式においてデルタ関数列に付いた係数 Δt がない場合を標本化された関数と呼ぶ場合もあるがここでは上式を使う．$g(n\Delta t\pm 0)$ または $g(n\Delta)$ は $n\Delta t$ における $g(t)$ の標本と呼ばれる．

(49) 式は超関数として，

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}g(n\Delta t\pm 0)\delta(t-n\Delta t)\Delta t \tag{51}$$

となるので，このフーリエ変換対は，

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}g(n\Delta t\pm 0)\delta(t-n\Delta t)\Delta t \quad\leftrightarrow$$

$$G(f)*\lim_{M\to\infty}\sum_{m=-M}^{M}\delta\left(f-\frac{m}{\Delta t}\right)=\lim_{M\to\infty}\sum_{m=-M}^{M}G\left(f-\frac{m}{\Delta t}\right) \tag{52}$$

となる．この関係において，$g(t)$ が連続関数なら $g(t)$ の標本に $g(n\Delta)$ を用いても同様に成立するが，そうでなければ標本には $g(n\Delta)$ ではなく $g(n\Delta t\pm 0)$ でなければならないことがわかる．ただし $G(f)$ は連続関数とする（もしこれも不連続点をもつなら，変数に ± を付ければよい）．

このように $g_s(t)$ は $g(t)$ の周波数成分を含んでいることがわかる．また，$g(t)$ を AD 変換する場合における AD 変換前のサンプル・アンド・ホールド回路出力信号（サンプル・アンド・ホールド回路で標本化された関数）は $g_s(t)$ とよく似た周波数特性を持つ近似関数であることがわかる．標本化定理はこの関係から容易に示されることになる．

$g(t)$ がある線形システムのインパルス応答で，$g(n\Delta t)$ と $g(n\Delta t\pm 0)$ が異なる場合（現実の時間信号と扱う装置のインパルス応答は連続関数なのでこれらは一致する），インパルス応答の標本でこのシステムの特性のデジタル・フィルタをかけるとき，標本は $g(n\Delta t)$ ではなく $g(n\Delta t\pm 0)$ でなければならないことがわかる．

離散フーリエ変換においては，時間軸上での標本も周波数軸上での標本も有限個である．そのため，離散フーリエ変換の対象となる関数 $g(t)$ はある間隔で打ち切られている．周波数解析のためには，打ち切り誤差を考慮した各種の打ち切り関数があり，矩形の打ち切り関数を除いてこれらの関数を打ち切りに使うと信号も変わり，打ち切りの両端の信号はほぼ 0 になる．この場合には，フーリエ変換，逆フーリエ変換で対象となる信号は打ち切り後の信号のままほとんど変化しない．しかし，信号を正確に標本化したい場合に矩形の打ち切り関数で打ち切らざるえないが，この場合，打ち切りの両端で不連続となることが起こる．そのような場合フーリエ変換，逆フーリエ変換で扱う打ち切り両端の値は打ち切りで取り入れた値ではなくその半分になる．

では次に $g(t)$ が $n\Delta t$ で不連続で，その点で標本 $g(n\Delta t\pm 0)$, $g(n\Delta t)$ が異なる場合フーリエ変換がどうなるか述べる．簡単化のため，原点だけで不連続であるとし，$g(0\pm 0)$ と $g(0)$ は異なるとする．

このとき，

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}g(n\Delta t)\delta(t-n\Delta t)\Delta t$$
$$=\sum_{n=-\infty}^{\infty}g(n\Delta t\pm 0)\delta(t-n\Delta t)\Delta t+\big(g(0)-g(0\pm 0)\big)\delta(t)\Delta t \tag{53}$$

なので，

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}g(n\Delta t)\delta(t-n\Delta t)\Delta t$$
$$\leftrightarrow\lim_{M\to\infty}\sum_{m=-M}^{M}G\left(f-\frac{m}{\Delta t}\right)+\big(g(0)-g(0\pm 0)\big)\Delta t \tag{54}$$

となる．

なお (52) 式，(54) 式から，それぞれの左辺のフーリエ変換は同じではない，ということがわかる．

4. 終わりに

ここではデルタ関数で抽出された標本を特に不連続点での抽出した値の特徴が明らかなように極く近傍平均値と呼んだ．デルタ関数を用いて，逆フーリエ変換，特に打ち切られた関数の場合の逆フーリエ変換，フーリエ級数，線形システムにインパルス列を入力した場合の出力，関数とそのフーリエ変換の超関数，標本化，などがいかに表現できるか，を示した．デルタ関数を用いることによって議論の進め方が大変容易になっていることがわかると思う．またフーリエ変換における不連続点の扱いをどうすればよいかも容易になったと思う．

参考文献

1) 物理数学の方法，L. シュワルツ，岩波書店，1966

2) オイラー博士の素敵な数式，ポール・J・ナーイン，日本評論社，2008

手書き風ワープロ文章のフォントメトリックによる印象の変化

才木 常正* 林 昭博**

Impression Changes by Font Metrics of Word-processed Sentences like Handwriting

Tsunemasa SAIKI* Akihiro HAYASHI**

ABSTRACT

Recently, word-processed sentences like handwriting can have been simply produced by commercially available software. On the other hand, reader's impressions for those sentences also depend on their character designs, e.g., size, shape, line width. For word-processed sentences like handwriting, we then investigated impression changes by font metrics which correspond to character sizes. Word-processed sentences with different font metrics for each character were compared to original ones using questionnaires. As a result, we found that impressions of "big", "male", "circular", "strong" and "bold" were changed by font metrics.

Keywords: character, sentence, word-processor, handwriting, impression

1．はじめに

近年のOA化に伴い，ワードプロセッサで印刷された文章（以下，ワープロ文章という）が多く使用されている．一般的にワープロ文章では文字が整っており読みやすい．それに対し，手書き文章では文字が不揃いで読みにくい場合もあるが味わいがある．このように，手書き文章とワープロ文章にそれぞれ良いところが存在する．

そこで，手書き文章の文字重心間隔のパワースペクトルが人に馴染む1/*f*揺らぎであること[1),(2)]から，我々は手書き文章の文字重心間隔揺らぎ特性をワープロ文章へ取り入れる方法について検討した．そして，漢字よりひらがなフォントサイズを若干小さくすることで，ワープロ文章の文字重心間隔のパワースペクトルも手書き文章のそれと同じ1/*f*揺らぎになることがわかった[(3)]．また，心理アンケートの結果より，この漢字よりひらがなフォントサイズが若干小さなワープロ文章の好感度は，通常用いられている漢字とひらがなフォントサイズが同じワープロ文章の好感度より高くなることがわかった[(4)]．このことより，ワープロ文字の外接四角形の大きさ（以後，フォントメトリックという）を変えて手書き文章の特徴を取り入れることで，ワープロ文章の印象が良くなることがわかった．

また，手書き文章の特徴をワープロ文章へ取り入れる別の方法として，ワープロ文字のデザイン（以後，タイプフェイスという）を手書き風にすることが考えられる．タイプフェイスを手書き風にするためには，多くの文字から構成される和文フォントを新たに制作しなければならず，今までは非常に多くの労力が必要であった．しかし，最近，少ない手書き文字から筆跡の癖を抽出し，多くの手書き文字を自動生成するプログラムが開発されており，このプログラムを用いて手書き風の和文フォントを比較的容易に作成することができる[(5)]．この手書き風の和文フォントを用いたワープロ文章を，以下，本論文では手書き風ワープロ文章という．このことから，近い将来，多くの人々が自分の和文フォントを用いて手書き風ワープロ文章を印刷できるようになると考えられる．

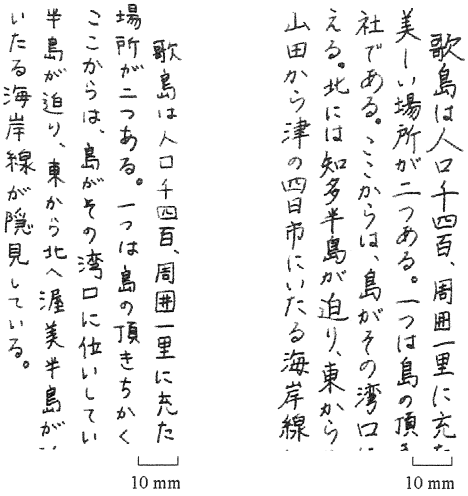
そこで本論文では，手書き風ワープロ文章の印象を変化させる機能をワードプロセッサに搭載するために，手書き風ワープロ文章のフォントメトリックを変えることによる印象の変化について検討する．

2．手書き文章における文字の外接四角形の大きさ

本節では，ワープロ文字のフォントメトリックに対応する手書き文字の外接四角形の大きさについて述べる．

手書き文章における文字の外接四角形の大きさを調べるために，縦書き文章のサンプルを用いた．その縦書き文章のサンプルの一部を図1に示す．ここでサンプルとして，6人の書き手A～Fの日本語の縦書き文章を用意した．サンプルの文章内容として，三島由紀夫著

* 兵庫県立工業技術センター（平成元年度卒）
** 電子工学科 教授



(a)書き手 E　　(b)書き手 F

図 1　縦書き手書き文章のサンプルの一部

の「潮騒」の冒頭部分165文字を引用した．ここでは，句読点も1文字とした．また，サンプル作成時には各書き手に「罫線に沿って書いてください」という指示以外は与えず，自然な状態でこの文章内容をA4判用紙に書いてもらった．この用紙には長手方向に罫線を10mm間隔で引いている．

このようにして作成した各書き手の手書き文章のサンプル165文字分を600dpi，256階調の画像データとしてコンピュータに取り込み，2値化処理を行う．そして，図2に示すように文字の外接四角形の側辺方向を罫線方向と一致させて各文字の外接四角形を描く．ここで，書き手αのi番目の文字の外接四角形の底辺の長さを文字幅$W_{\alpha i}$とし，側辺の長さを文字高さ$H_{\alpha i}$とする．そして，これら$W_{\alpha i}$, $H_{\alpha i}$から，文字縦横比$R_{\alpha i}$及び規格化面積$S_{\alpha i}$をそれぞれ式(1), (2)によって求める．

$$R_{\alpha i}=\frac{H_{\alpha i}}{W_{\alpha i}} \tag{1}$$

$$S_{\alpha i}=\frac{W_{\alpha i}\times H_{\alpha i}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(W_{\alpha i}\times H_{\alpha i})} \tag{2}$$

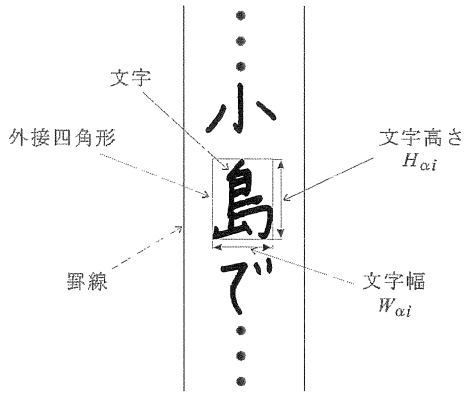


図2　文字幅と高さ

ここで，式(1)の文字縦横比は文字の細さを表し，式(2)の文字規格化面積は個々の文字面積を全体の平均で規格化したものである．ちなみに，nは文字数の165である．

そして，各書き手の手書き文章毎に$R_{\alpha i}$の平均値$\overline{R_\alpha}$と標準偏差$\sigma_{R\alpha}$，及び$S_{\alpha i}$の標準偏差$\sigma_{S\alpha}$を求める．$\overline{R_\alpha}$, $\sigma_{R\alpha}$, $\sigma_{S\alpha}$の3つの特性から，手書き文章の文字の外接四角形の大きさを評価する．

各書き手の手書き文章における文字縦横比を図3に示す．横軸は書き手αを表し，縦軸は文字縦横比の平均$\overline{R_\alpha}$及び標準偏差$\sigma_{R\alpha}$を表す．●及び○印は手書き文章の文字縦横比の平均値$\overline{R_\alpha}$及び標準偏差$\sigma_{R\alpha}$をそれぞれ表す．$\overline{R_\alpha}$は1.1から1.3でばらついており，$\sigma_{R\alpha}$は0.4から0.8でばらついている．このことから，$\overline{R_\alpha}$より$\sigma_{R\alpha}$の方が各書き手による差異があることがわかる．

次に，各書き手の手書き文章における規格化文字面積の標準偏差を図4に示す．横軸は書き手を表し，縦軸は規格化文字面積の標準偏差$\sigma_{S\alpha}$を表す．$\sigma_{S\alpha}$は0.6から0.7でばらついており，書き手による差異が殆どないことがわかる．

以上のことから，手書き文字の外接四角形の大きさにおいては，特に文字縦横比の標準偏差が各書き手によって大きく異なることがわかった．即ち，文字の外接四角形の大きさという面では，手書き文章の文字縦横比の標準偏差に各書き手の特徴が表れ易いと考えられる．

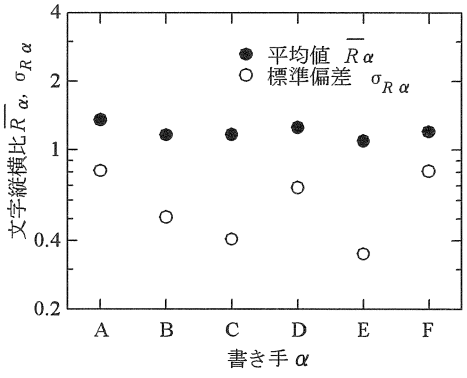


図 3　各書き手の手書き文章における文字縦横比

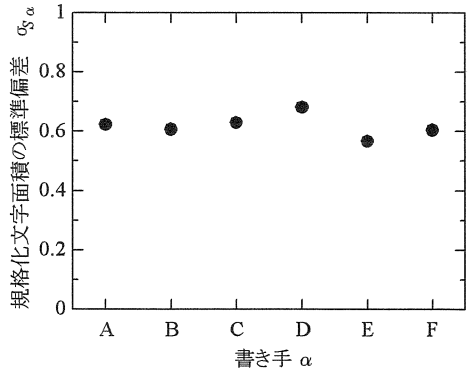


図 4　各書き手の手書き文章における規格化文字面積の標準偏差

3．手書き風ワープロ文章の作成方法

本節では，前節で用いた手書き文章のサンプルから，手書き風ワープロ文章を作成する方法について述べる．本作成方法では，手書き風ワープロ文章のタイプフェイスとフォントメトリックを別々に設定する．

まず，実際の手書き文章を基に，書き手毎の各文字種の文字画像を制作する．その制作方法は，書き手毎に手書き文章をコンピュータに600dpi，256階調の画像として取り込み，2値化処理を行う．そして，各書き手の手書き文章毎に，文章中で初めて出てくる文字種の文字を文字外接四角形の大きさで切り出し，文章中に含まれる全ての文字種の文字画像を制作する．

次に，手書き風ワープロ文章に用いるタイプフェイス及びフォントメトリックの書き手を選び，タイプフェイスとフォントメトリックの書き手が異なった新文字画像を制作する．例えば，図5に示すように，書き手1のタイプフェイス及び書き手2のフォントメトリックを選んだ場合には，書き手1の文字画像を縦横方向に伸縮させ，書き手2の文字画像の大きさに合わせる．このようにして，タイプフェイスが書き手1でフォントメトリックが書き手2の各文字種の新文字画像を制作する．

最後に，用意されたテキストデータの文字種に合わせて新文字画像を並べ，手書き風ワープロ文章を作成する．その並べ方は，図6に示すように，新文字画像の横方向の重心位置を合わせ，文字画像間の空白をl_cにして並べる．但し，句読点については文字画像の重心位置を右にl_sずらし，その後l_pの空白を開けて並べる．また，前の行の新文字画像の横方向の重心位置と後の行のそれとの距離はl_lにして並べる．ここでは，l_c, l_s, l_p, l_lはそれぞれ1.5, 5.5, 2.5, 14 mmである．

以上の方法で，タイプフェイスとフォントメトリックの書き手を別々に設定した手書き風ワープロ文章を模擬的に作成することが可能となる．また，本作成方法を実際のワードプロセッサに搭載するには，各文字種のタイプフェイスとフォントメトリックに対応するデータがフォントに存在するため，タイプフェイスとフォントメトリックに用いるフォントを別々に設定する機能をワードプロセッサに追加すれば良い．

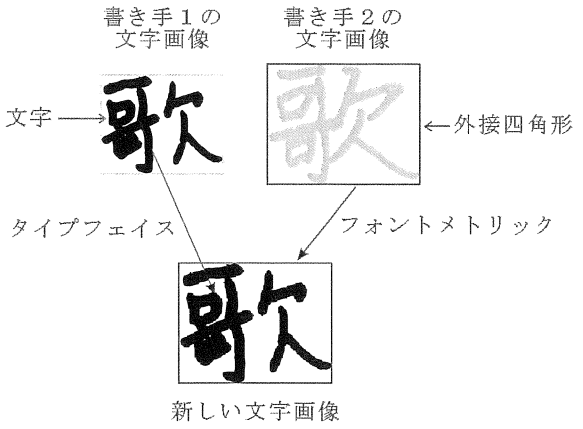


図5　新文字画像の制作方法

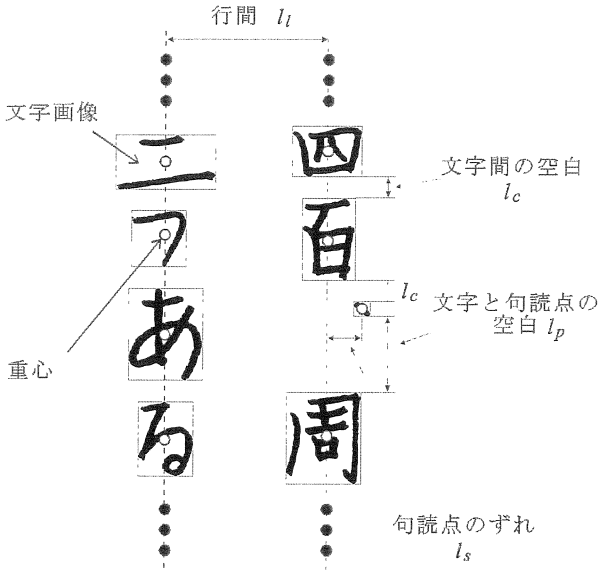


図6　文字画像の並べ方

4．手書き風ワープロ文章のフォントメトリックによる印象

本節では，前節の方法で作成した手書き風ワープロ文章のフォントメトリックによる印象の変化について述べる．

4.1 手書き文章に対して人が持つ印象

人が手書き文章に対して持つ印象を抽出するために，意味差異化法[6]を用いた．以下，その抽出方法について簡単に述べる．まず，2 節で用いた手書き文章の 6 つのサンプルから 3 つのサンプルをランダムに選び，被験者に提示する．そして，被験者に 2 つのグループ，即ち 2 つと 1 つに分けてもらい，2 つのサンプルに共通する印象を被験者に言葉（以後，印象語という）で表現してもらう．更に，その 2 つのサンプルに共通する反対の印象語も表現してもらう．この作業を繰り返し，新しい印象語が出てこなくなったら終了する．この調査を 26 から 53 才の男女 11 人の被験者に対して行った．

このようにして抽出された印象語を同意，類義に整理し，更に互いに反対の意味を持つ印象語を印象語対としてまとめた．その結果を表 1 に示す．このことから，人は手書き文章に対して「大きい-小さい」，「男性的-女性的」，「整っている-くずれている」等の 13 の印象語対で表される印象を持つと考えられる．また，これらの印象語は礒野らが手書き文字に対する読みやすさを調べたときに用いた印象語とほぼ同じものであった[7]．

表1　人が手書き文章に対して持つ印象

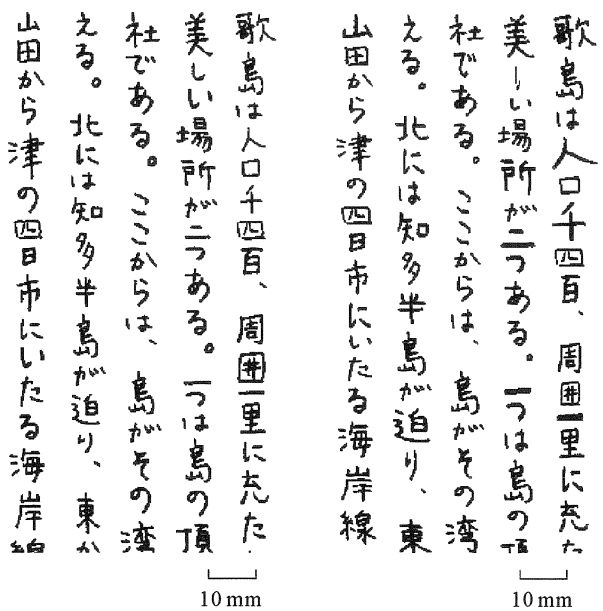
印象語対	
大きい	小さい
男性的	女性的
整っている	くずれている
丸みがある	角張っている
きれい	きたない
のびのびしている	こぢんまりしている
強い	弱い
読みやすい	読みにくい
大胆	繊細
丁寧	乱雑
温かい	冷たい
かわいい	かわいくない
大人っぽい	子供っぽい

4.2 文字縦横比の標準偏差を大きくすることによる印象の変化

次に，4.1で得られた印象を用いて，文字縦横比の標準偏差$\sigma_{R\alpha}$を大きくすることによる手書き風ワープロ文章の印象の変化をアンケートにより調べる．

$\sigma_{R\alpha}$を大きくすることによる印象の変化を調べるために用意した手書き風ワープロ文章の一部を図7に示す．(a)は$\sigma_{R\alpha}$が小さい書き手Eの手書き文章から作成したオリジナルの手書き風ワープロ文章である．一方，(b)は$\sigma_{R\alpha}$が大きい書き手Fのフォントメトリックを用いることで，(a)の文章の$\sigma_{R\alpha}$を大きくした手書き風ワープロ文章である．ここで，これら手書き風ワープロ文章の文字面積の合計は同じになるように制作している．

更に，これら書き手Eの手書き風ワープロ文章以外に，書き手Cについてもオリジナルと$\sigma_{R\alpha}$を大きくした手書き風ワープロ文章を用意した．ここでも，書き手Cの$\sigma_{R\alpha}$を大きくするために，書き手Fのフォントメトリックを用いている．また，オリジナルの手書き風ワープロ文章の$\sigma_{R\alpha}$は書き手C, E共に0.4であり，$\sigma_{R\alpha}$を大きくした手書き風ワープロ文章の$\sigma_{R\alpha}$は書き手C, E共に0.8である．



(a) オリジナルの手書き風ワープロ文章　(b) $\sigma_{R\alpha}$を大きくした手書き風ワープロ文章

図7　文字縦横比の標準偏差を大きくすることによる印象の変化を調べるために用いた手書き風ワープロ文章の一部

アンケートでは，書き手E，Cのオリジナルと$\sigma_{R\alpha}$を大きくした手書き風ワープロ文章を印刷した用紙を被験者に提示する．そして，同じ書き手のオリジナルと$\sigma_{R\alpha}$を大きくした手書き風ワープロ文章を比較し，表1を被験者に見せて，左列に書いている印象語（「大きい」，「男性的」，「丸みがある」等）の印象を強く感じる方を回答用紙に記入するように依頼した．

このようにして得られたアンケートの結果から，13の印象語毎に，$\sigma_{R\alpha}$を大きくした方がその印象語の印象が強いと回答した被験者の人数を求め，この人数の被験者全員に対する割合を計算した．そして，これらの割合から，$\sigma_{R\alpha}$を大きくした手書き風ワープロ文章の各印象の変化を評価した．

$\sigma_{R\alpha}$を大きくした手書き風ワープロ文章の印象の変化をまとめて表2に示す．○印は，書き手αの手書き風ワープロ文章の$\sigma_{R\alpha}$を大きくしたときに，左列に書かれた印象語の印象が強いと回答した被験者が半数以上いたこと表す．また，×印はそれが半数以下であったことを表す．また，括弧内の数字はそれぞれの印象語の印象が強いと回答した被験者の割合を表す．

書き手C,E両方の手書き風ワープロ文章において，○印が付いている印象語は「大きい」，「男性的」，「のびのびしている」，「強い」，「大胆」であり，逆に×印が付いている印象語は「整っている」，「丸みがある」，「きれい」，「温かい」，「かわいい」である．このことから，手書き風ワープロ文章の文字縦横比の標準偏差$\sigma_{R\alpha}$を大きくすることで，「大きい」，「男性的」，「のびのびしている」，「強い」，「大胆」の5つ印象を強める

表2　文字縦横比の標準偏差を大きくすることによる手書き風ワープロ文章の印象の変化

印象語対	手書き風ワープロ文章 書き手C	書き手E
大きい	○ (0.91)	○ (0.73)
男性的	○ (0.91)	○ (0.91)
整っている	× (0.45)	× (0.27)
丸みがある	× (0.27)	× (0.18)
きれい	× (0.27)	× (0.45)
のびのびしている	○ (0.64)	○ (0.73)
強い	○ (0.73)	○ (0.82)
読みやすい	○ (0.73)	× (0.27)
大胆	○ (0.83)	○ (1.00)
丁寧	○ (0.55)	× (0.09)
温かい	× (0.45)	× (0.27)
かわいい	× (0.09)	× (0.00)
大人っぽい	○ (0.64)	× (0.36)

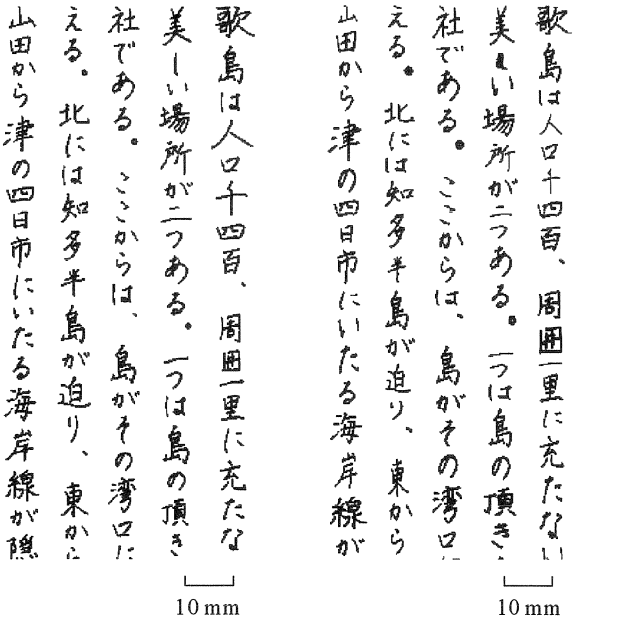
ことができ，また「整っている」，「丸みがある」，「きれい」，「温かい」，「かわいい」の5つの印象を弱めることができると考えられる．

このことを表1に示す反対の印象語も使ってまとめると，手書き風ワープロ文章の文字縦横比の標準偏差$\sigma_{R\alpha}$を0.4から0.8へ大きくすることで，「大きい」，「男性的」，「くずれている」，「角張っている」，「きたない」，「のびのびしている」，「強い」，「大胆」，「冷たい」，「かわいくない」と言った10の印象を強めることができると考えられる．

4.3 文字縦横比の標準偏差を小さくすることによる印象の変化

ここでは，4.2とは逆に文字縦横比の標準偏差$\sigma_{R\alpha}$を小さくすることによる手書き風ワープロ文章の印象の変化を調べる．

アンケートに用いた手書き風ワープロ文章のサンプル例の一部を図8に示す．(a)は$\sigma_{R\alpha}$が大きい書き手Fの手書き文章から作成したオリジナルの手書き風ワープロ文章である．一方，(b)は$\sigma_{R\alpha}$が小さい書き手Eのフォントメトリックを用いることで，(a)の文章の$\sigma_{R\alpha}$を小さくした手書き風ワープロ文章である．これら2つの手書き風ワープロ文章以外に，書き手Cのフォントメトリックを用いることで書き手Fの$\sigma_{R\alpha}$を小さくした手書き風ワープロ文章も用意した．また，オリジナルの手書き風ワープロ文章の$\sigma_{R\alpha}$は0.8である．一方，$\sigma_{R\alpha}$を小さくした手書き風ワープロ文章の$\sigma_{R\alpha}$は，書き手C, Eのどちらのフォントメトリックを用いた場合でも，0.4である．



(a) オリジナルの手書き風ワープロ文章　(b) $\sigma_{R\alpha}$を小さくした手書き風ワープロ文章

図8　文字縦横比の標準偏差を小さくすることによる印象の変化を調べるために用いた手書き風ワープロ文章の一部

アンケートでは，4.2と同様の方法で，オリジナルと$\sigma_{R\alpha}$を小さくした手書き風ワープロ文章を比較し，13の印象語の印象を強く感じる方を回答してもらった．そして，得られたアンケートの結果から，13の印象語毎に，$\sigma_{R\alpha}$を小さくした方がその印象語の印象が強いと回答した被験数の全員に対する割合を求めた．

$\sigma_{R\alpha}$を小さくすることによる手書き風ワープロ文章の印象の変化を表3に示す．○印は，各書き手のワープロ文章の$\sigma_{R\alpha}$を小さくしたときに，左列に書かれた印象語の印象が強くなったと感じた人が半数以上いたこと表す．また，×印はそれが半数以下であったことを表す．また，括弧内の数字はそれぞれの印象語の印象が強くなったと答えた人数の全員に対する割合を表す．

$\sigma_{R\alpha}$を小さくすることで，書き手CとEのフォントメトリックを用いた手書き風ワープロ文章の印象が共に強くなったと感じた人が半数以上であった印象語は，「丸みがある」であった．また，$\sigma_{R\alpha}$を小さくすることで，書き手CとEのフォントメトリックを用いた手書き風ワープロ文章の印象が共に強くなったと感じた人が半数以下であった印象語は，「大きい」「男性的」「整っている」「きれい」「のびのびしている」「強い」「読みやすい」「大胆」「丁寧」「大人っぽい」であった．

5．考察

ここでは，4.2及び4.3で得られた結果を比較し，文字縦横比の標準偏差$\sigma_{R\alpha}$を大きくした場合と小さくした場合の両方から，手書き風ワープロ文章のフォントメトリックによる印象について総合的に考察する．

4.2及び4.3から得られた結果をまとめて表4に示す．この表は手書き風ワープロ文章の文字縦横比の標準偏差$\sigma_{R\alpha}$を変化させたときに強まった印象をまとめたも

表3　文字縦横比の標準偏差を小さくすることによる手書き風ワープロ文章の印象の変化

印象語対	用いたフォントメトリック 書き手C	書き手E
大きい	× (0.18)	× (0.00)
男性的	× (0.27)	× (0.18)
整っている	× (0.27)	× (0.18)
丸みがある	○ (0.55)	○ (0.64)
きれい	× (0.09)	× (0.18)
のびのびしている	× (0.09)	× (0.09)
強い	× (0.27)	× (0.36)
読みやすい	× (0.00)	× (0.00)
大胆	× (0.27)	× (0.36)
丁寧	× (0.36)	× (0.18)
温かい	○ (0.64)	× (0.36)
かわいい	○ (0.55)	× (0.36)
大人っぽい	× (0.27)	× (0.18)

表4　手書き分ワープロ文章の文字縦横比の標準偏差$\sigma_{R\alpha}$を変化させたときに強まった印象

$\sigma_{R\alpha}$を大きく 0.4→0.8	$\sigma_{R\alpha}$を小さく 0.8→0.4	$\sigma_{R\alpha}$の影響
大きい(0.82)	小さい(0.91)	○
男性的(0.91)	女性的(0.77)	○
くずれている(0.64)	くずれている(0.77)	−
角張っている(0.77)	丸みがある(0.60)	○
きたない(0.64)	きたない(0.86)	×
のびのびしている(0.69)	こぢんまりしている(0.91)	○
強い(0.78)	弱い(0.68)	○
−	読みにくい(1.00)	−
大胆(0.92)	繊細(0.68)	○
−	乱雑(0.73)	−
冷たい(0.64)	−	−
かわいくない(0.95)	−	−
−	子供っぽい(0.77)	−

※括弧内は割合を示す

のであり，括弧内の数値はその印象が強まったと感じた人の割合である．手書き風ワープロ文章の$\sigma_{R\alpha}$を 0.4 から 0.8 へ大きくすると，「大きい」，「男性的」，「くずれている」等の 10 の印象語の印象が強まった．一方，手書き風ワープロ文章の$\sigma_{R\alpha}$を 0.8 から 0.4 へ小さくすると，「小さい」，「女性的」，「くずれている」等の 11 の印象語の印象が強まった．

これらを比較して見ると，$\sigma_{R\alpha}$を大きくする場合と小さくする場合で反対の印象になったものは，○印の付いている「大きい-小さい」，「男性的-女性的」，「角張っている-丸みがある」，「のびのびしている-こぢんまりしている」，「強い-弱い」，「大胆-繊細」といった 6 つの印象であった．このことから，これらの印象はフォントメトリックを変えることによって変化しているので，これらの印象がフォントメトリックに影響されていると推測される．特に，割合の高かった「大きい-小さい」，「男性的-女性的」はフォントメトリックに大きく影響していると考えられる．一方，$\sigma_{R\alpha}$を大きくする場合と小さくする場合で反対の印象にならなかった「きれい-きたない」という印象は，フォントメトリック以外のものに大きく影響されていると思われる．

6．まとめ

手書き風ワープロ文章のフォンメトリックによる影響を調べるために，まずワープロ文章のフォントメトリックに対応する手書き文章の文字の大きさについて調べた．ここでは，文字の大きさを文字縦横比の平均値及び標準偏差と規格化文字面積の標準偏差の 3 つの特性により評価した．その結果，特に文字縦横比の標準偏差が書き手によって大きくばらつくことがわかった．

そこで，文字縦横比の標準偏差の異なった手書き風ワープロ文章を作成した．そして，これらの手書き風ワープロ文章からフォントメトリックによる人への印象を調べた．その結果，手書き風ワープロ文章の文字縦横比の標準偏差を変えることで，「大きい」，「男性的」，「丸みがある」，「のびのびしている」，「強い」，「大胆」といった印象が変化することがわかった．

以上のことから，ワードプロセッサの機能の 1 つとして，文字縦横比の標準偏差の大きな書き手及び小さな書き手の手書き文章から得られた各文字種のフォントメトリックを予め用意しておき，フォントメトリックを自由に人が設定することによって，手書き風ワープロ文章の人へ与える印象を変えることができると考えられる．

参考文献

(1) 才木常正，北川洋一，金谷典武，熊澤由佳子，林昭博：「日本語横書き文章における文字重心間隔の揺らぎ」，電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J80-A, No. 9, pp. 1572-1573, 1997.

(2) Tsunemasa Saiki, Yoichi Kitagawa and Akihiro Hayashi, :「Fluctuations of character centroid intervals in laterally written Japanese sentences」, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E82-A, No. 3, pp.520-526, 1999.

(3) 才木常正，北川洋一，林 昭博：「手書き文章の幾何学的特性を持つワードプロセッサ印刷文章の漢字とひらがなのフォントサイズ」，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.5, No.2, pp.275-282, 2003.

(4) 才木常正，山下隆義，北川洋一，林 昭博：「漢字よりひらがなを小さく印刷するワードプロセッサ機能」，ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.3, No.1, pp.25-30, 2001.

(5) 例えば，ソースネクスト社製「まるで手書き TM」

(6) 道官克一郎：「意味差異化法 (Semantic Differentiation Method) 定性定量調査法の提案」，人間工学, Vol.36, pp.58-59, 2000.

(7) 礒野美佳，澤田恵理子，押木 秀樹：「手書き文字に対する読みやすさ等の感覚とその世代差に関する研究」，書写書道教育研究, Vol.14, pp.21-30, 2000.

ウェーブレット変換を用いた楽音の解析

木場隼介* 笠井正三郎†

Tone Analysis of Musical Instruments using Wavelet Transform

Shunsuke KOBA* Shozaburo KASAI†

ABSTRACT

In this paper, we discuss some results of tone analysis using wavelet transforms. Sound analysis of musical instruments has been well researched and an important theme in conducting sound analysis. To accomplish the research, customarily Fourier transform is mainly used. However, it is difficult for Fourier Transform to clarify the relation between frequency and time. Whereas this relation is important to research on sound. Wavelet transform enables us to clarify the relation between them. Wavelet transform is superior in this point. Results in this paper suggest that this method may make it possible to tell the types of musical instruments. To summarize, I proved that wavelet transform could clarify the characteristics of sounds, and that wavelet transform can visualize various characteristics of sound in one figure.

Keywords : wavelet transforms, tone analysis, musical instruments

1. はじめに

楽器の音色は, 古くからその物理的構造と音響の関係も含めて, 解析が盛んであり, 楽器の音色の特徴解析にとどまらず, 様々な音色の解析が行われている [1] [2] [3].

従来, 音色解析には主にフーリエ変換と呼ばれる手法が用いられ, すでに多くの成果が出ている. しかし, フーリエ変換によるスペクトル分析は, 周波数情報しか含んでおらず, 時間軸情報は失われている. 楽音の情報は時間軸に対して, 周期情報だけでなく非周期な情報もある. そのため, スペクトルの時間的変化を求めるためには, 信号の一部を窓関数として切り出し, この窓を移動させながらその区間の信号のスペクトルを次々に解析する短時間フーリエ変換で解析を行っていた.

この短時間フーリエ変換は, 分割時間と分割周波数が一定である. それに対して, ウェーブレット変換はそれぞれが反比例の関係にある. そのため, 短時間フーリエ変換では不可能である「周波数が高い領域では時間間隔を小さくしてより細かく解析し, 周波数が低い領域では時間間隔を大きくしてより広く解析する」という柔軟な作業がウェーブレット変換では可能である. ウェーブレット変換は, 信号解析ツールとしての必然から誕生したことや, 電気工学者もその進展に寄与したこと, さらに数学的土台も早い段階で整えられたことなどがあり, 誕生してからすぐに応用研究が増えていき, 多方面での応用が盛んに議論されている [4] [5] [6].

本研究では, このウェーブレット変換を用いて楽音の解析を進めていき, 楽器の音色について, ウェーブレット変換を用いて解析・比較を行い, ウェーブレット変換の楽音解析への適用の可能性および有用性を検証した. ここでは, その結果について報告する.

*神戸大学工学部電気電子工学科（平成 19 年度電子工学科卒業）
†電子工学科 教授

2. 研究の構成

本研究の構成について説明する. まず, 音源を PC に取り込む. 取り込む音源は, 今回は主に CD からの音源を使用した. CDex というフリーソフトを使用して音源を wave ファイル (サンプリング周波数 44.1kHz) に変換し, ウェーブレット変換を行う前に必要部分の切り出し, 音量補正などを行った. この作業には, Windows に付属のサウンドレコーダーを用いた. その後, 編集後のファイルをウェーブレット変換する. ここでは, Matlab のウェーブレットツールボックスを使用した.

3. ウェーブレット変換

3.1 ウェーブレットの概要 ウェーブレット (Wavelet) の語源は, 「波 (wave)」と「小さな (let)」の複合語であり, 「小さなさざなみ」を意味する. ウェーブレットの一例として, メキシカン・ハットを図 1 に示す.

このようなウェーブレットを拡大縮小, および平行移動したものを用いて, 観測パターンの時間周波数特性の解析を行うものを, ウェーブレット解析と呼ぶ.

3.2 連続ウェーブレット変換 連続ウェーブレット変換 (continuous wavelet transform) は, 2 乗可積分区間の空間 $L^2(R)$ に属する関数 $\psi(t)$ を基底として, $L^2(R)$ に属する任意の信号を表現する手段である. このとき ψ を 平均値が 0 で原点 $t = 0$ の周りに局在する関数とす

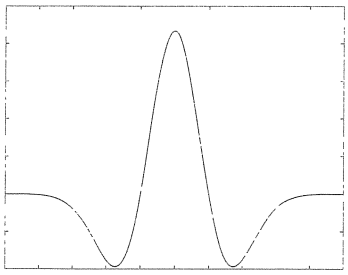


図1 ウェーブレット (メキシカンハット)

る. この関数 $\psi(t)$ をマザーウェーブレット, あるいは単にウェーブレットと呼ぶ. これを拡大縮小, およびシフトすることにより, 次式のように基底 $\psi_{a,b}(t)$ を生成する.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \qquad (1)$$

ここで, a は拡大縮小, b はシフトのためのパラメータであり, さらに, $1/\sqrt{a}$ は正規化のための係数である.

図2に, ウェーブレットを b だけシフトし, $1/a$ に縮小している様子を示す.

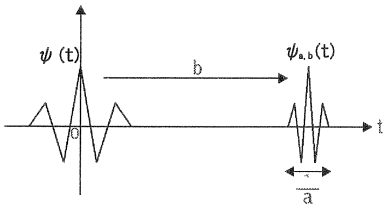


図2 スケールとシフト

さらに, この $\psi_{a,b}(t)$ と信号 $f(t)$ との内積がウェーブレット変換であり, 次式で定義される.

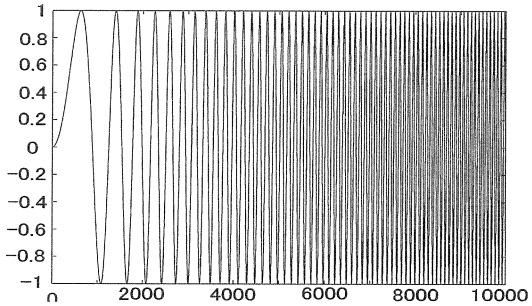
$$(W_\psi f)(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}}\int_R f(t)\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}dt \qquad (2)$$

ここで, $\overline{\psi(x)}$ は, $\psi(x)$ の複素共役である. 式 (2) は $f(t)$ に関する変換で, パラメータ a, b が連続的な値をとる. これを連続ウェーブレット変換という. ウェーブレット変換では, 基底に多くの種類があり, 条件を満たす関数ならば, 新しい基底を定義することも可能である. そのため, 解析目的, 解析対象に応じて, 最良な基底を複数の中から選ぶことができ, 音色の識別に適した基底関数が存在することが期待できる.

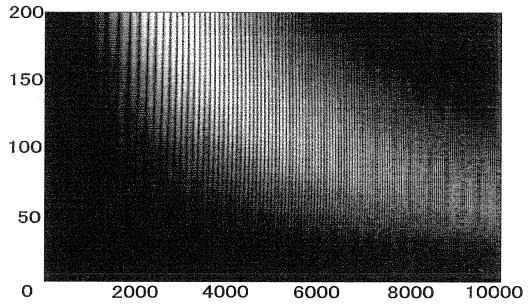
今回は, 信号の特徴抽出という点を考慮し, 5 次の Daubechies ウェーブレット (以下, db5 と略す) と呼ばれる基底を使用することにした.

3.3 連続ウェーブレット変換の例 実際に連続ウェーブレット変換の例を挙げて説明する. ここで, 解析する信号は, $f(x) = \sin x^2$ である. 図3(a) がこの関数のグラフで, 徐々に周期が短くなっていく信号である. 図3(b) がそのウェーブレット解析の結果である.

ここで, ウェーブレット変換の結果の見方について説明する. 横軸は時間軸で, 時間の経過を表す. 縦軸はスケールの値であり, 周波数と反比例に近い関係にある. 色の明るさはウェーブレットの大きさを表しており, 明るいところの成分は大きい. この図3(b) では図3(a) の波形の周波数が高くなるにつれて, 解析結果のスケール値が低い部分で大きくなっていることが分かり, 関数の特徴である周波数の時間的変化が容易に確認できる.



(a) $f(x) = \sin x^2$ の波形



(b) $f(x) = \sin x^2$ のウェーブレット変換結果

図3 ウェーブレット変換の例

4. 音の解析方法

4.1 音色・音高の取り扱い 本研究において, 音楽に関連する事項については以下のように取り扱う.

4.1.1 音色 音色は, 周波数の重ね合わせにより決定されるが, 知覚的に良い音色, 悪い音色というものは, 人間の主観によるため, 本研究では音色の相違にのみ焦点を当てた.

4.1.2 音高 音高は, 周波数スペクトルの一番大きいものが人間の耳に聞こえる音高であると認識されることがあるが, そうではない. 例えば 880Hz のスペクトルが最大だが, 人間の知覚する音程が 440Hz である, といったことも発生する.

音高表記に関しては種々存在するが, 本研究では, 電子音楽機器などで一般的に用いられており, 半音, オクターブ表記の簡便さから, A4, C#5 などといった表記に統一する. A4 が 440Hz のラの音を表しており, CD...B の順にドレミ... シを, 後ろの数字がオクターブを表している.

4.2　基本事項　スペクトルの大きさ (図においては各部の明るさ) は, 振幅をあらわしており, 明るくなっているところほど係数が大きい.

縦軸がスケール値を表し, 周波数が上がると, それに応じて減少する. つまり, スケール値が低いところでスペクトルが大きいのは, 高周波成分を多く含むと判断される. 横軸はシフト値を表し, 時間軸である.

以下, 特性の比較において図中の目盛りは省略する.

4.3　相関係数　音色の類似性の判断を定量的に比較するため, 解析結果については相関係数を用いて検証を行った. 相関係数とは, 2 つの配列の類似性の検証などに用いられる手法であり, 次式で定義される.

$$R = \frac{\sum_{s=1}^{m}\sum_{t=1}^{n}\{f(s,t)-\overline{f}\}\{g(s,t)-\overline{g}\}}{\sqrt{\sum_{s=1}^{m}\sum_{t=1}^{n}\{f(s,t)-\overline{f}\}^2}\sqrt{\sum_{s=1}^{m}\sum_{t=1}^{n}\{g(s,t)-\overline{g}\}^2}} \tag{3}$$

この式において, f, g はそれぞれ 2 つの 2 次元配列を表しており, $f(s,t), g(s,t)$ はそれぞれの配列の個別の要素を示す. $\overline{f}, \overline{g}$ は, すべての要素の平均値を表す. m, n は配列の要素の個数である. この場合, 対象がまったく同一であったときは, 計算結果は 1 になり, 2 つの対象の類似性が少なくなっていけばなっていくほど計算結果は 0 に近くなる. ウェーブレット変換した結果に対して相関係数を計算することにより, 音色の感覚的な類似性と, ウェーブレット変換結果の類似性がどの程度一致するかどうか検証した.

5.　研究結果

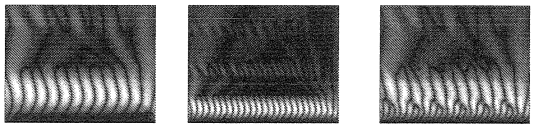
研究にあたり, ウェーブレット変換では, まず基底の選択を行う. 本研究では, db5 が最良の基底と判断されたため, これを解析に用いた.

まず正弦波波形や正弦波の合成波形を用いて, 波形の解析結果の特徴がどのように現れるのか調べ, 次に, 減衰音の代表例としてピアノ音, 持続音の代表例としてフルート音を解析し, 楽器の音の特徴をどの程度表せているのか考察した. 引き続いて, 楽器や音程をさまざまに選び, 2 つ以上の音について比較を行った.

5.1　楽器毎の特徴解析の正当性検証

5.1.1　正弦波・正弦波の重ね合わせ　周波数が異なる (2 倍) の 2 つの正弦波波形, およびそれらの正弦波波形を重ね合わせた波形のウェーブレット変換解析結果を, 図 4 に示す.

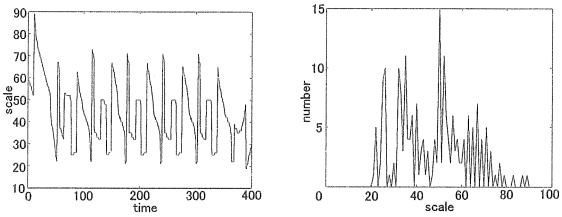
これらの結果から, 周波数が高いとスケール値での表示は低くなることが分かる. また, 同図 (c) は, 同図 (a) と (b) を重複させたような形で表現されており, 2 つの信号を混合しても結果は正しく得られる. ただし, フーリエ変換と違い, 元の音の周波数が正確に何 Hz であるか, という情報を得るのには向かない. たとえば, 上の信号の最大スケール値の変遷をグラフにしたものを図 5(a) に示す. これより, かなり不安定な結果となっているのが分かり, 正確な周波数をこの情報だけから定めるのは難しい. また, 同図 (b) に最大周波数の出現頻度を表したグラフを示す. こちらでも, 第 1 ピークがスケール値 50 付近にあることが分かるが, 25 付近に存在するピークが 2 つに分かれてしまっている. これらの結果から, (数値的に) 正確な周波数を得ることは難しいと考える.



(a)$\sin x$　(b)$\sin 2x$　(c)$\sin x + \sin 2x$

図 4　正弦波のウェーブレット変換 (1)

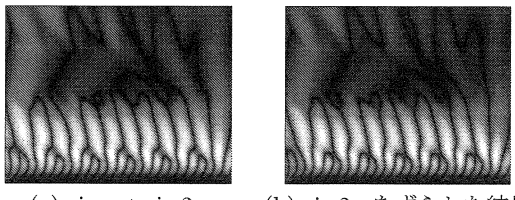
ただし, 過去の研究 [7] で, 音高の特定において優れた特性を持つ基底も存在することが分かっているので, 音高を特定する際は, そちらを利用すれば良い. このように, ウェーブレットでは, 必要に応じて基底を選べる.



(a) 最大スケール値の変遷　(b) 最大となる回数

図 5　$\sin x + \sin 2x$ におけるスケール値ごとの出現頻度

次に, 図 4(c) から, $\sin 2x$ の位相のみをずらした波形を用意し, 位相差による解析結果の変化の確認を試みた. その結果を図 6 に示す. 同図 (a) の波形は, 図 4(c) の再掲である. 位相が違うことで, 解析結果も異なったものになっていることがわかる. 簡単な関数の解析での比較ではあるが, これにより, ウェーブレット変換では位相についても, 周波数・時間と同時かつ容易に判定できることが分かる.



(a) $\sin x + \sin 2x$　(b) $\sin 2x$ をずらした結果

図 6　正弦波のウェーブレット変換 (2)

5.1.2　ピアノ音の解析結果　ピアノ音を, db5 基底を用いて解析した結果を示す. まずは, ピアノ音を, 発音前から少し長め (約 0.5 秒) に見た結果を図 7 に示す.

前述の通り, 音量的変化は明るさ＝振幅の大きさであるから, 音が出た瞬間がはっきりと分かり, 時間が経過

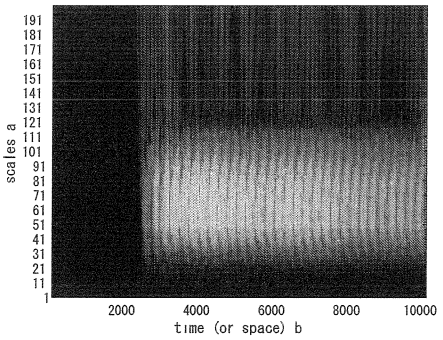
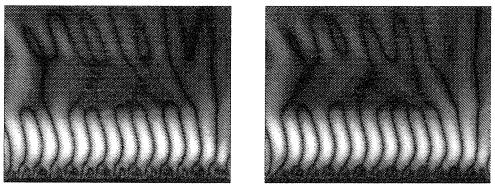


図 7　ピアノ音のウェーブレット変換

するにつれて暗くなっていることから, 音が徐々に減衰していく様子がわかる. また, 一番明るい部分の動きで, 音の出始めからの周波数変化の特徴がわかる. 次に, 解析時間幅を狭くして, 部分ごとに分けて音の特徴を見てみる.



(a) 前半　　(b) 後半

図 8　ピアノ音の部分的なウェーブレット変換

図 8(a) は, 音の伸びている前半部での結果である. 同図 (b) は, 同図 (a) より時間的に少し後, つまり音としては減衰している部分の結果である. これらを比較すると, (b) では, スケール 1〜20 ぐらいまでの部分が暗い表示となっているのが分かる. この図から, 高音成分の減衰のほうが速いことがわかる.

これらの波形のスケールごとの振幅の絶対値を, 時間軸に対して総和を取ったものを図 9 に示す. 同図より, 低スケールのほうが減衰が速い, つまり高音の減衰が低音に比べて速いということが伺い知れる.

5.1.3　フルート音の解析結果　フルート音の解析結果を図 10 に示す. 一つの音について, 同図 (a) は音の出た直後, 同図 (b) は中心付近, 同図 (c) は後半を解析している. なお, この音は A4 の音であり, フルートにとってはかなり低い音域であり, 一般的に倍音成分を含みやすくなるのが特徴である.

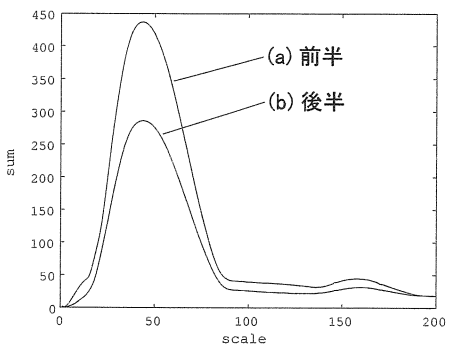
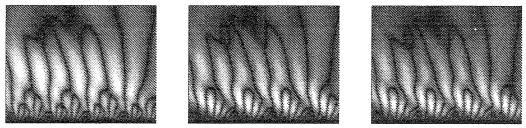


図 9　スケール軸の総和



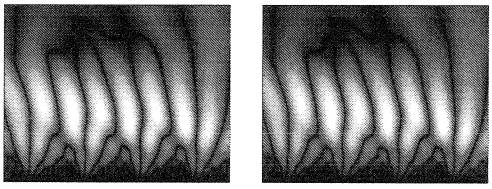
(a) 前半　　(b) 中　　(c) 後半

図 10　フルート音の部分的なウェーブレット変換

これらを見ると, 前半部分の結果では, 最も明るい部分は図の縦軸の中心付近に集まっている. これは, この部分の周波数が最も高い事を表している. それに対し, 中心部分, 後半部分の結果を見ると, 最も明るい部分が下に移っているのが分かる. これは, 最大振幅の周波数がこの音域に移っている事を表しており, 倍音成分が非常に多いと見ることができる. これは上記に示したフルートの低周波音域での特徴を見事に表している.

5.2　2 つ以上の音の比較　ここからは, 2 つ以上の音について比較を行っていき, それらについて, 具体的に相関係数を用いて比較を行えるかどうかを見ていく.

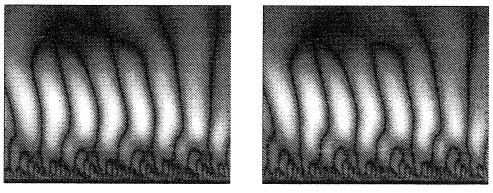
5.2.1　同一楽器, 同一音程での比較　最初に, まったく同じ楽器で, 同じ音高であり, 時間軸のみ異なる信号を解析した. その結果をいくつかの楽器について示す. まず, ホルンの音をウェーブレット変換した結果を図 11 に示す. 同図 (a),(b) のどちらも音高は A4 である. 見た段階でほとんど違いがないことがわかるが, この 2 波形の相関係数を求めると, その値は, 0.9938 となり, かなり高い値が出ており, 相関係数からもその結果は明白となった. このことから, 同じ楽器, 同じ音高での音の一致度は容易に測定できると言える.



(a) A4(1)　　(b) A4(2)

図 11　同一音高での解析結果 (ホルン)

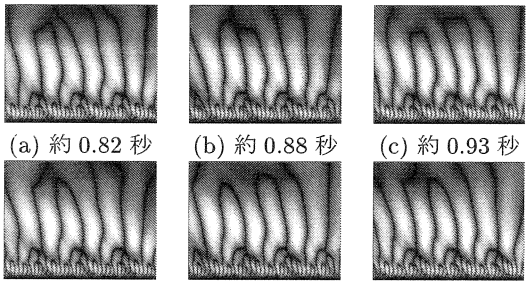
次に図 12 は, ヴィオラでまったく同じ解析を行った結果である. この結果でも同じように, 見ただけで違いがほとんどないことが分かる. この 2 つの相関係数は, 0.9832 となり, こちらも非常に近い値となっている.



(a) A4(1)　　(b) A4(2)

図 12　同一音高での解析結果 (ヴィオラ)

次は, ヴァイオリンの音の解析結果について説明する. ヴァイオリンについても他の楽器と同じように解析したが, ヴァイオリンの音色は他の楽器に比べ, かなり高周波成分の形状が安定せず, 同じ音にもかかわらず, 解析結果がかなり異なる部分があった. ほかの楽器とは少し違う例となるが, ヴァイオリンの音源では, 音色が管楽器・ヴィオラの音源と比較すると不安定である. その結果, 時間軸を移動させてウェーブレット変換すると, 大きく見て同様の波形を繰り返しているが, 短く見ると違うように見えるという例があった. 短時間で区切った解析結果を図 13 に示す. それぞれ, 示している時間から約 0.1 秒の波形である.



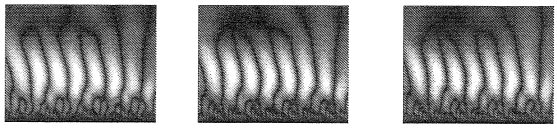
(a) 約 0.82 秒　(b) 約 0.88 秒　(c) 約 0.93 秒

(d) 約 1.13 秒　(e) 約 1.16 秒　(f) 約 1.36 秒

図 13　ヴァイオリンにおける解析結果

これらの結果は, (a)〜(e) の順で時系列で並べてある. ここではそれぞれ, (a) と (d), (b) と (e), (c) と (f) が, 高周波部分の構造で似た形になっている. しかし, (a) と (b) や, (b) と (c) といった比較的近い時間での解析結果は高周波部分でかなり異なった形になっている. このように, 一定の形を繰り返しながら変化していくのは, ほかの楽器にはあまり見られなかった特徴である. この原因として考えられるのはボウイングの変化で音質, 音色が変わっているということである. なお, ボウイングとはヴァイオリンの弓の動かし方のことであるが, ヴァイオリンの発音は, 弓の毛と弦との摩擦で起こっているため, ごくわずかな手の震えやスピードの違いが音に反映される. そのために, このような形で類似した波形が無作為に繰り返し出てきたと考えられる.

5.2.2　音の出だしと持続部分の違い　楽器の演奏においては, 音の出だしとなる部分と音の持続部分においては音色が違うことが多い. ひとつには出だしは音が不安定であるが, 安定して持続音になると音量, 音色ともに安定するという理由もある. この違いをウェーブレット変換で解析した. ヴィオラについて解析を行った結果が図 14 である. 同図 (a) の画像と同図 (b),(c) の画像では形状が異なることが分かる. (b), (c) はどちらも音が安定してからの波形で, それに対して (a) は, 音が安定する前の波形である. また, (b) は時間的には (a) の直後, (c) はまったく別の時間の安定状態での波形である. この 2 つから, 安定状態では, 同じ楽器では位相を含めてほぼ同じ結果となっていることが分かる.

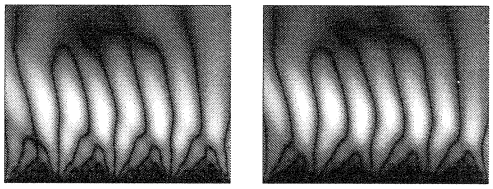


(a) 出だし　(b) 持続部分 (1)　(c) 持続部分 (2)

図 14　ヴィオラの安定・不安定波形

なお, 形状に関する裏づけとして, (a), (b) の相関係数は 0.9170 となり, (b), (c) の相関係数は先ほど示したように 0.9832 となった.

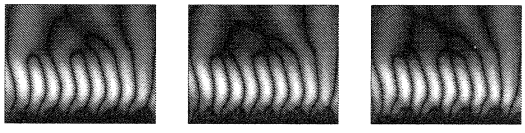
5.2.3　同一楽器, 異なる音高における結果　次に, 同じ楽器の, 違う音高について処理した場合の結果を, 図 15 に示す. これらは, まずはホルンの解析結果である. 同図 (b) は軸を同図 (a) に合わせるように拡大してある. 見たところ, 僅かに高周波部分の形状が異なるものの, ほぼ同じ結果となっていることが分かる. この 2 つの相関係数は 0.9545 となった. 先ほどの, 図 11 における相関係数に比べると値が少し低くなっている. これは, 視覚的に確認できる違いと同じであるが, 音高が離れているため, 同音の比較に比べると, 若干特徴が異なるのは当然であり, その結果が非常に容易に確認できることが分かる.



(a) A4　(b) C5

図 15　音高を変えた場合の解析結果 (ホルン)

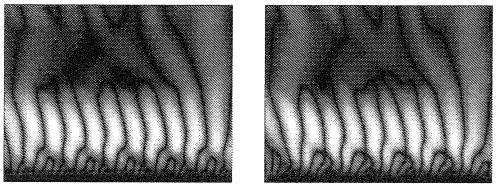
図 16 は, ピアノの音の解析結果である. 同図 (a) が C#4, 同図 (b) が G5, 同図 (c) が C6 の音の解析結果となっている. (b), (c) は, (a) に合うように拡大している. この場合, それぞれ非常に類似した波形が観測される. (a) と (b) の相関係数は 0.9712 となり, かなり近い値となった. (b) と (c) の相関係数は 0.9472 となり, (a) と (b) の相関係数に比べて少し値が小さい. (a) と (c) の相関係数は 0.9379 となり, 音の差が広がると相関係数も小さな値になっていると考えられる. これについては他の楽器についても検証する.



(a) C#5　(b) G5　(c) C6

図 16　ピアノ音の解析結果

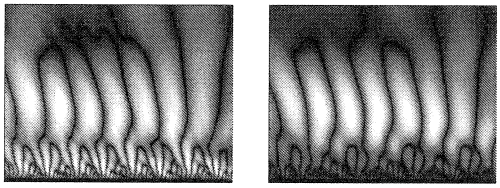
図 17 は, フルートの音の解析結果である. 音は, 同図 (a) が D#5, 同図 (b) が G#5 である. (b) は (a) に合うように拡大している. 音の幅の開きは, 先程のホルンの解析結果より広くなっており, 相関係数は 0.8517 となっている. ホルン, ピアノに比べて見ると, 相関係数がかなり小さい. これは木管楽器に共通する特徴であるが, 近い音でも, 運指が大きく変わるところではかなり音色に差が出ることがあるためと考えられる.



(a) D#5　　(b) G#5

図 17　フルート音の解析結果

5.3　同属楽器で, 同一音程での解析結果　次に, 図 18 では, 同属の楽器だが同じ楽器ではなく, 音高は同音の場合の解析結果を示す. この音は, 両方弦楽器族で, 同図 (a) はヴァイオリン, 同図 (b) はヴィオラの解析結果である. ここでは, 更に相関係数は小さくなり, 0.7047 となった. 6.3 節の各音の相関係数に比べると, 明らかに相関係数が低い値となっていることから, 同じ楽器で音高が違う場合と, 違う楽器で音高が同じ場合では, 前者のほうが似た音色となると考えられる.



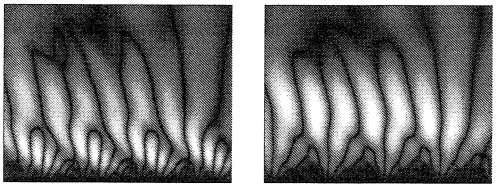
(a) ヴァイオリン (A4)　　(b) ヴィオラ (A4)

図 18　同属で異なる楽器の場合の解析結果

6.　異なる族の楽器で同じ音程での解析結果

最後に, 種類の異なる楽器同士の音を比較した結果を図 19 に示す. 木管と金管について, ホルンとフルートを代表例にとって比較した. 波形にかなり隔たりがあることが容易に視認できる.

相関係数を求めると, その値は 0.6882 となり, ここまでの結果の中では最も低くなった. 相関係数の値としては前節のヴァイオリンとヴィオラの比較と大差ないが, 実際の形状を見ると, ヴァイオリンとヴィオラの比較と比べると, こちらのほうが類似性は低いように感じる.

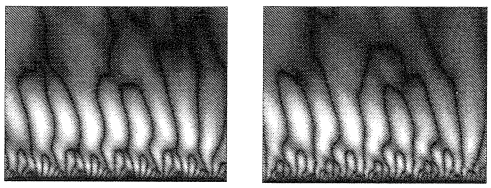


(a) フルート　　(b) ホルン

図 19　異なる楽器同士での解析結果

6.1　特殊なケースの解析結果　最後に, 少し特殊なケースについての解析結果を示す. ヴァイオリンなど弦楽器の場合, 左手の指で押さえて鳴らす音と, 開放弦と呼ばれる音があり, 演奏においては楽譜上にはっきり書かれて区別されることもある. この 2 つの音の違いについて考察する.

まずこの 2 つを並べた結果が図 20 である.

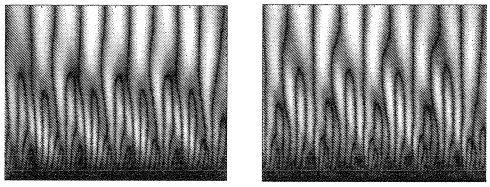


(a) 指で押さえた音　　(b) 開放弦の音

図 20　ヴァイオリンの開放弦と押さえた音の解析結果

一見かなり似ているようであるが, 原画像で実際に高周波部分を比較すると, かなり形状は異なっている. 相関係数を求めた結果は 0.7700 となり, 通常の同楽器・同音での結果 (平均して 0.85〜0.95 程度の値が出る) に比べて非常に小さな値になっていることが分かる.

この違いは, 低スケール部分, つまり高周波部分のみを抜き出すとより顕著となる. 図 21 を見ると分かるように, 開放弦の音では, 高周波の要素が多く含まれる. これがヴァイオリンの E 線の開放弦特有の音を発すると考えられる. 実際, 高周波部分が多いことが E 線の開放弦の特徴であるから, この結果は正しいと言える.



(a) 指で押さえた音　　(b) 開放弦の音

図 21　高周波部分の解析結果

7.　今後の課題

現段階では, 音源に関する処理 (音量調整やステレオ・モノラルの変換, 拡大縮小, 位相の調整など) が手作業で行われており, これらの作業をプログラムで行えるようにする必要があると思われる. また, 今回は Matlab を用いて研究を行ったが, Matlab はインタプリタ言語であるため, 処理速度がそれほど速くなく, 長い音を処理するためには, コンパイラ言語によりウェーブレット変換のプログラムを作成する必要があると考えられる. また, 解析した楽器の種類はまだ少ないので, 更に解析を進める余地がある.

8. 結論

本研究では，連続ウェーブレット変換において，Daubechies 基底 ($N = 5$) を用いて楽音の解析を行っていった．最初に，2 種類の正弦波の重ね合わせを行い，周波数，位相，時間軸などの特徴が，それぞれ正しく扱われていることを確認した．次に，単音に限定して，楽器の特徴解析を行った．ピアノ，ヴィオラ，ホルン，フルートなどについて，同音の持続部分や，音の出だしからの変化などについて調べていった．その結果として，従来からいわれているような音の特徴がウェーブレット変換でも確認でき，その認識が非常に容易であることが分かった．

その後，「同じ楽器，同じ音高で異なる時間」，「同じ楽器の異なる音高」など，さまざまな条件を設定した音について，それぞれ特徴の違いがどの程度表せているのか検討した．これにより，似た音色であればあるほど似た解析結果を与え，異なる音では異なった結果となることが分かり，相関係数でも検証した．

検証の結果，似た音色ならば相関が強く，音色が離れていると相関も弱くなり，解析の結果は音色の特徴を十分に表しており，音色の特徴を見つけ出すために有用であると判断した．

さらに，同じ楽器，同じ音高から出た音であれば，特に，持続音の部分では位相も含めてほぼ等しい解析結果となることがわかった．また，ヴァイオリンの音の解析において，不安定に聞こえる音を解析すると，周波数的にはほとんど違いがないが，位相が異なっていたことより，位相の違いによる音色への影響についても，今後の研究に利用できると考えられる．

参考文献

(1) 安藤由典: “楽器の音響学”, 音楽之友社, 1971

(2) N.H. フレッチャー, T.D. ロッシング: “楽器の物理学”, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2003

(3) 吉川茂, 鈴木秀男: “音楽と楽器の音響測定”, コロナ社, 2007

(4) 中野宏毅, 山本鎧男, 吉田靖夫： “ウェーブレットによる信号処理と画像処理”, 共立出版, 1999

(5) システム制御情報学会編 前田肇他著：“ウェーブレット変換とその応用”, 朝倉書店, 2001

(6) 電気学会 ウェーブレット解析の産業応用に関する共同研究委員会, “ウェーブレット解析の産業応用”, 朝倉書店, 2005

(7) 宮本真由美：“ウェーブレット変換を用いた採譜システムの構築”, 神戸高専電子工学科平成 15 年度卒業研究報告書, 2003

複合光交照法を用いた分光視感度の推定

常深義博*　　尾崎進**

The Calculate of Spectral Luminous Efficiency with Compound Light Flicker Photometry

Yoshihiro TSUNEMI*　Susumu OZAKI**

ABSTRACT

In recent years the technology of the semiconductor is progressing, and the light source technology is advancing too. Whereas it has not been proved that the new light source affects us. This study quantitatively searched changing spectral luminous efficiency in various light source environment. The goal of this study is to calculate how the light source affects us. The experiment method is 'compound light flicker photometry brightness matching'. The strict search of luminous efficiency is difficult. So this study used a model of luminous efficiency to some extent. The result shows that this experiment method can effectively estimate the change of luminous efficiency in various light quantitatively.

Keywords: spectral luminous efficiency, flicker photometry, compound light

1. はじめに

我々は様々な照明環境のもとで暮らしている．蛍光灯などに照らされ生活を送り，太陽光の中を通勤，通学する．夜道を歩いて帰宅し，テレビなどを見て疲れを癒す．1 日を過ごすだけでも多くの照明環境に無意識に適応し，何の問題もなく生活している．

ここで，過去を振り返ってみると，人類が誕生し今まで暮らしてきた時間は，人工照明が登場してからの時間に比べると非常に長い．生物は長い期間をかけて徐々に進化していくものである．しかし，人類が歩んできた文明の進歩は非常に速い．この文明の進歩に我々が追従できているのかが問題である．人類が生きてきた環境の光は，たいてい太陽光のもとである．太陽光は短波長から長波長までの成分を含んだ光である．一方，蛍光灯は 3 波長のピークがある光である．このように異なった成分を持つ光に対応できているのだろうか．実際，数年前にテレビを見ていた子供たちがひきつけを起こす事件が大きく報じられた．このように，我々の目と光の関係は大きいものがあると考える．

そこで，本研究ではどのような光が目に入射した場合に，我々の明るさの感じ方を波長ごとに示した分光視感効率の変化を推定した．分光視感効率とは，我々の目の感度と表現でき，その感度は入射光によって刻々と変化している．例えば，赤色の光が入射すると，脳は元の見えを保とうとし，赤色の感度を低下させる．このように，分光視感効率は変化する事は多くの文献に掲載されている．しかし，それらが定量的に示されているケースは少ない．よって，本研究の目的として，分光視感効率の変化を定量的に推定することを挙げる．この変化が激しく，長く続くような場合は，人体への負担が大きくなり悪影響を及ぼすと予想する．言い換えると，この研究を通して照明環境の優劣を表す指標に応用できると考えている．

分光視感効率の変化は，複合的な要素で変化していると考えられる．例えば，目に入射する光の量や，色，周囲の環境などである．これらを全て考慮した実験を行い，被験者の分光視感度を決定することは難しい．よって，本研究では，ある単純なモデルに従い，分光

*専攻科　電気電子工学専攻
** 電子工学科　教授

視感効率の変化を推定した．その結果が，理論どおりの結果を示したので，モデルを有効と判断した．

本研究は，交照法明るさマッチングの実験を行い，分光視感効率を推定した．交照法に使用する光をPCで出力できる複合光にする事で，持ち運びに便利な装置になっている．交照法明るさマッチングの説明は次章に譲る．

2. 分光視感効率と複合光交照法明るさマッチング(1)

分光視感効率は，国際照明委員会CIEが定めたものである．分光視感効率は数学的に与えられる関数ではなく，実験的に測定された点を結んでできた曲線である．その形状を図1に示す．380nmから780nmの範囲で示されており，黄緑の波長の555nmをピークとし，相対的にその他の波長に対する感度を示している．

交照法による明るさマッチングとは，交照法を用いて2色間の明るさを等しくすることである．これを行うことで，その照明下における分光視感度が分かる．

交照法とは，ひとつの刺激視野に2つの光を時間的に交互に呈示し，ちらつき感覚が最小となるように光の強度比を調整する方法である．一方を参照光，もう一方を試験光と設定し，参照光の強度を固定した状態で被験者が試験光の強度を調整する．通常は参照光には色みのない白色光が用いられ，試験光には単色光を用いる．

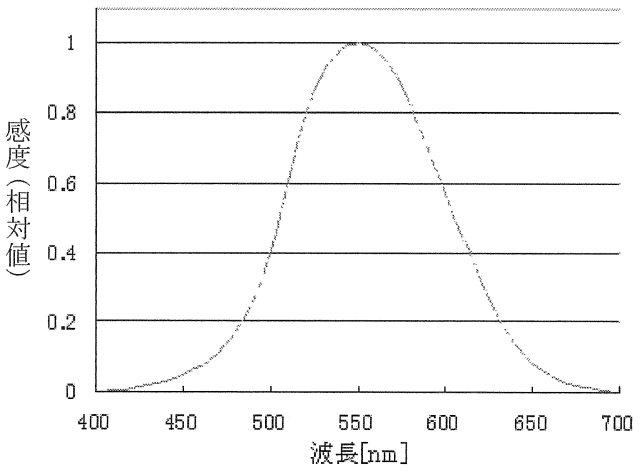


図1　分光視感効率曲線

しかし，本研究はシステムを持ち運び，あらゆる照明シーンで指標に用いることを目標とすることから，システムの簡素化性を求めるため，試験光には単色光を用いず，液晶ディスプレイ：LCD（Liquid Crystal Display）で容易に実現できる複合光を用いた．

3. 光束比ratioの導入

交照法の実験を行った後，結果を評価する式が必要である．それを，光束比ratio式(1)として導入する．

$$\mathrm{ratio}=\frac{\int_{380\mathrm{nm}}^{780\mathrm{nm}}P_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380\mathrm{nm}}^{780\mathrm{nm}}P_r(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

分母が参照光の光束，分子が試験光の光束であり，それらの比がratioである．$V(\lambda)$はCIEが定める分光視感効率，$P_t(\lambda)$、$P_r(\lambda)$はそれぞれ試験光，参照光のマッチング後の分光分布である．積分は可視範囲で行う．このratioから照明環境の変化に伴う分光感度の変化を推測できる．

本来，明るさマッチングを行い，式(1)で計算を行うと，必ず，ratio=1になる．しかし，本研究では必ずしもratio=1とはならない．ratio=1になるための条件は，実験条件下で被験者の分光視感度が式(1)の$V(\lambda)$，つまり，分光視感効率に一致した場合である．しかし,式(1)の$V(\lambda)$は明所視の分光視感効率であり，被験者の分光視感度がそれと同様とは限らない．その結果，ratio≠1となる．

ratio=1になるような分光視感度を見つけることができたら，それは実験条件下で変化した被験者の分光視感度に他ならない．

この変化した分光視感度を求めるためにモデルを構築したので詳細は後述する．

4. 分光視感度曲線変化モデル

前述のとおり，ある照明環境で変化した分光視感度を厳密に定めることは難しい．よって，分光視感度がある規則によって変化すると仮定し，形状の変化を推定した．それらは以下の3つの条件である．

ⅰ．目に入射する光量の変化に伴い，分光視感度が形状をそのままに短波長側へシフトする．

ⅱ．赤色の光が入射した場合，分光視感度曲線の長波長側の傾きが変化する．

ⅲ．青色の光が入射した場合，分光視感度曲線の短波長側の傾きが変化する．

以上のような条件とする（図2参照）．これらⅰ～ⅲは同時には起こらず，単独で生じるとする．つまり，赤色光が入射した場合は，明るさによる感度変化，青色光による感度変化は起こらないとする．

ⅰは入射光量が減少したとき，視覚が錐体視から杆体視へ移行する明るさ順応が生じたときを考慮している．ⅱ，ⅲは視覚が入射光色に対して同じ見えを保とうとする色順応の場合である．

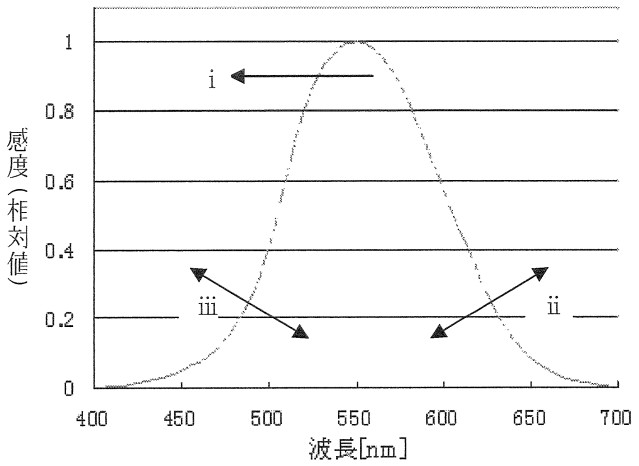


図２　分光視感度曲線変化モデル

条件ｉは分光視感度曲線の形状は変化しないため，プログラム中の配列の操作で計算を行うことで実現可能である．しかし，条件ⅱ，ⅲは曲線の形状が変化する．元々，分光視感効率は関数では表現されておらず，波長ごとの点でのデータしか存在しない．よって，分光視感効率曲線を指数関数で近似することで，式(2)に示すように数学的に表した．

$$V(\lambda)=\begin{cases}\exp\left(-A(\lambda-555)^2\right) & \lambda\le 555\mathrm{nm}\\ \exp\left(-B(\lambda-555)^2\right) & \lambda>555\mathrm{nm}\end{cases} \quad (2)$$

555nm を境に短波長側を青色光入射の場合，長波長側を赤色光入射の場合とする．式(2)の A，B の値を変えることで，分光視感度曲線の傾きが変化する．

このように，分光視感度曲線を変化させながら式(1)の計算を行い，ratio=1 になる V(λ)を算出する．そのときの V(λ)が被験者の分光視感度である．

このモデルは，条件ｉ～ⅲは独立して起こるとしているので，例えば，青色光入射の実験を行う場合は，555nm より短波長側は式(2)に従うが，長波長側は CIE が定める分光視感効率の値を使用する．また，555nm を境に二分しているため，緑色光入射の実験は行えないという欠点を含んだモデルである．

5. 実験

照明環境が変化したときの被験者の分光視感度を知るために，交照法明るさマッチングの実験を行った．実験は，目に入射する光量が変化した場合と，入射する光色が変化した場合を行った．

5.1　実験手順　　今回は 2 つの実験を行ったので報告する．両実験は実験環境は異なるが実験手順は同様である．実験は以下の手順で行った．

① 照明環境を設定する．
② 基準となる参照光，参照光に明るさを合わす試験光を設定する．
③ 目を順応させるため，30 分被験者を実験環境下に置く．
④ 交照法を開始し，被験者が明るさマッチングを行う．このとき，被験者は LCD から 50cm 離れたところで実験を行う．
⑤ 参照光，試験光の分光分布を分光器で測定する．
⑥ 同条件の実験を 3 回繰り返す．

以上の手順で実験を行った．実験ごとに変化させるのは，手順①の明るさ変化のための照明の変更と，手順②の入射光色変化のための LCD 画面の変更である．

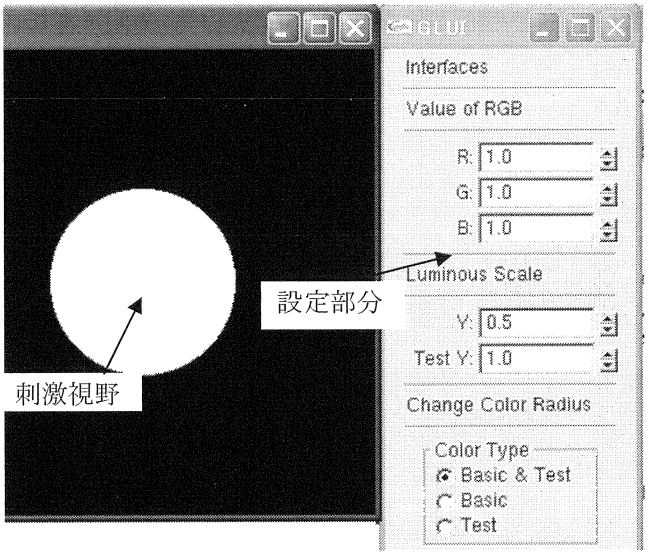


図３　明るさマッチングインターフェイス

図 3 は実験時に被験者が見る画面の抜粋である．被験者は手順②で設定された図 3 中の刺激視野に呈示される 2 色の明るさを合わす．このインターフェイスは OpenGL で構築されたものである[(2)]．刺激視野の設定は図 3 の右側で行う．

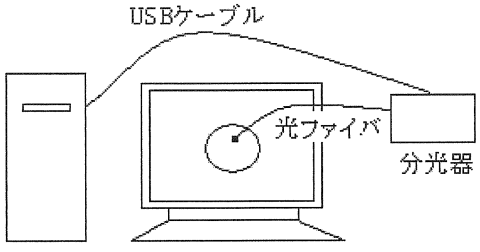


図４　分光分布の測定系

手順⑤で行う分光分布の測定は図 4 の様に行う．PC に USB ケーブルでつないだ分光器から光ファイバを介して分光分布を測定し，式(1)に使用する．

5.2　明るさ変化による分光視感度変化推定実験

被験者の目に入る光量を変化させたときに被験者の

分光視感度がどの程度変化したかを前述したモデルiに当てはめ推定した．

5.2.1　実験方法　被験者の目に入射する光は，照明からの光と，LCDからの光が考えられる．図5に示すようにLCDの輝度の名前を定義する．図3に示したインターフェイスの刺激視野の部分の輝度を参照光輝度とし，それ以外のLCDの輝度を背景輝度とする．実空間で証明環境を評価する際は，背景輝度は不必要なものであることならびに，照明光成分は反射光であることから刺激視野以外のLCD部分には幕を貼り付けて遮光してある．よって，背景輝度は照明光の反射成分のみである．

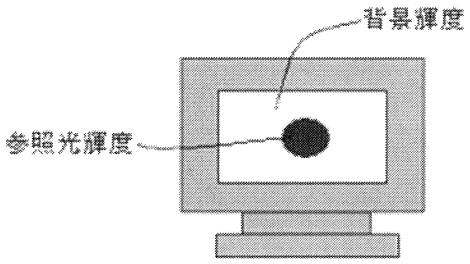


図5　背景輝度と参照色輝度

今回，参照光には青色(x, y)=(0.129, 0.064)，試験色には赤色(x, y)=(0.636, 0.344)を採用した．参照光である青色の輝度と背景輝度を表1に示す．事前の実験から，背景輝度の1/2倍の参照光輝度にすると精度よく実験できることが確かめられているので，表1のように値を設定した．参照光輝度の値は，実験で使用したPCの最大出力の輝度から，経験的に実験が行えると判断した最低輝度までを等分割した．

被験者は3人である．

表1　参照光輝度

参照光輝度[cd/m²]	背景輝度[cd/m²]
2.8	1.4
5.4	2.7
10.9	5.5
21.8	10.9

5.2.2　実験結果及び考察　明るさを変化させた実験なので，モデルの条件iに適用した．マッチング終了後の分光分布を測定し，式(1)のratioの式で計算を行う．その結果ratio=1になるまで式(1)中のV(λ)を短波長側へシフトさせながら計算を繰り返す．そして，ratio=1になった分光視感度が実験条件下における被験者の分光視感度である．その結果を1人分（実験3回の平均）図6に，算出されたピークシフト量（波長555nmを0nmとする）を表2に示す．

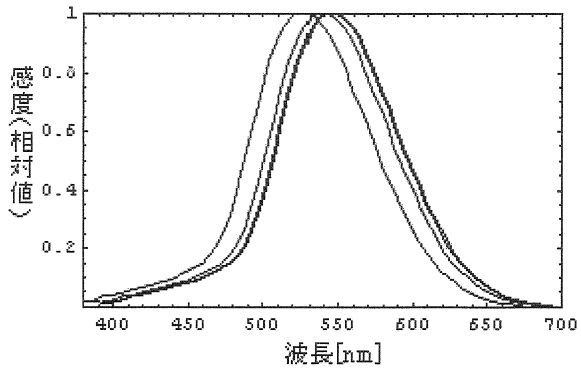


図6　明るさ変化による分光視感度変化

表2　ピークシフト量

	参照光輝度[cd/m²]	平均シフト量[nm]
1	2.8	25.7
2	5.4	12.7
3	10.9	7.7
4	21.8	6.3

また，図6の波長555nm付近を拡大した図を図7に示す．左側のピークから表2中の1，2，3，4である．

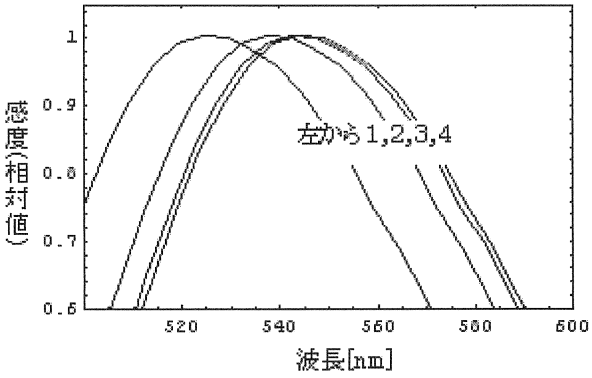


図7　図6の拡大図

結果より，被験者の目に入射する光量が少なくなるほど，ピークが短波長側へシフトしている．このことより，モデルの条件iに適用することで，分光視感度の変化を定量的に推定できた．

今回の実験条件は，映画館のような状況と似ている．つまり，暗い部屋の中で明るいものを見ている状況である．そのような場合，我々の分光視感度は通常の位置から大きくずれていることがこの結果より分かる．

5.3　光色変化による分光視感度変化推定実験

被験者の目に入射する光色を変化させたときに分光視感度がどのように変化するかをモデルのii及びiiiに当てはめて推定した．

5.3.1　実験方法　参照光には色みのない灰色((x, y)=(0.330, 0.343))を使用し，試験色に青色と赤色を

使用した．それぞれの色みを変化させて明るさマッチングの実験を行った．その色度座標を表 3 に，それをプロットしたものを図 8 に示す．図 8 の三角形は使用した PC で出力できる色の範囲である．

表 3　実験に使用した試験光色度座標

	赤(x, y)		青(x, y)
1	(0.615, 0.386)	4	(0.161, 0.090)
2	(0.579, 0.349)	5	(0.167, 0.094)
3	(0.530, 0.317)	6	(0.177, 0.099)

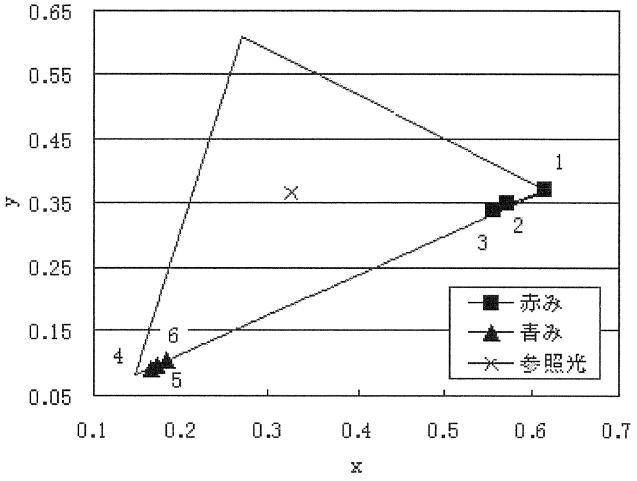


図 8　色度座標

試験光が赤に関して，1 は純粋な赤に近く，3 は青色や緑色成分が多く含まれている．また，試験光が青の場合は 4 は純粋な青に近く，6 は赤色や緑色成分が多い．ここで，試験光が赤の場合の青色や緑色は’雑音’として扱う．試験光が青色のときも同様である．

室内は，明るさ変化がないように暗室にして実験を行った．被験者は 2 人である．

5.3.2　実験結果及び考察　試験光が赤色の場合はモデルの ii を，青色の場合はモデルの iii に適用して分光視感度の推定を行った．モデル ii は 555nm より長波長側は式(2)に従うが，短波長側は図 1 の分光視感効率の値を使用している．モデル iii はその逆で，短波長側は式(2)を適用し，長波長側は変化させずに描画した．

図 9 に試験光の赤みを変化させたときの分光視感度変化を示す．また，図 10 は図 9 の拡大図である．

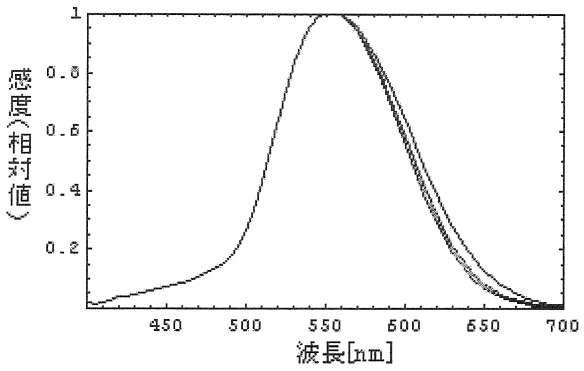


図 9　赤み変化に伴う分光視感度変化

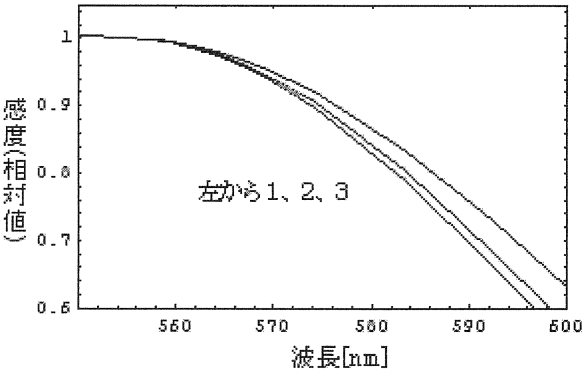


図 10　図 9 の拡大図

結果より，雑音が多いほど傾きが緩やかになっている．つまり，純粋な赤い光が入射するほど色順応により，赤色に対応する感度が低下している事を示している．次に試験光を青色にしたときの結果を図 11 に示す．また，図 12 は図 11 の拡大図である．

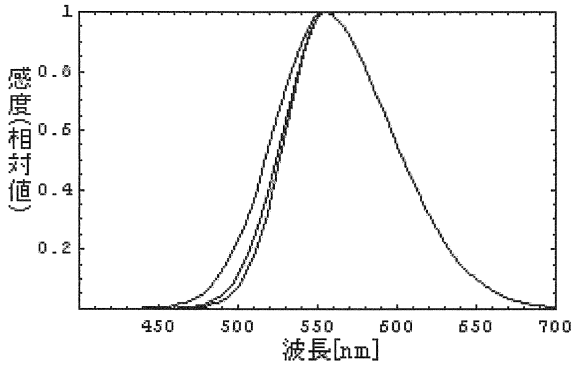


図 11　青み変化に伴う分光視感度変化

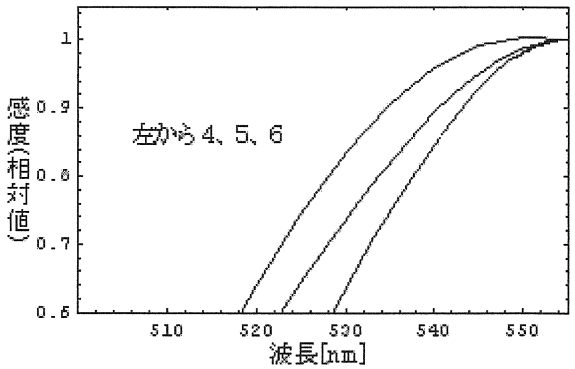


図 12　図 11 の拡大図

青みを変化させた実験結果も赤みを変化させた実験結果と同様に雑音が多いほど，傾きが緩やかになっている．この結果も青い光が多く入ってきたために，より感度が低下したことを示している．表 4 に実験で得られた式(2)中の係数 A,B の値を掲載する．

以上，目に入射する光色変化の実験を行ってきた結果，それらを定量的に推定する事が出来た．

表 4　光色変化実験の結果数値

	赤み変化（係数 B）		青み変化(係数 A)
1	0.525	4	0.247
2	0.498	5	0.226
3	0.386	6	0.217

6. まとめ

交照法を用いた明るさマッチングの実験を行い，光環境の変化に伴う分光視感度の変化を推定した．具体的には，目に入射する光量変化（交照法で使用する参照光の輝度を変化させる実験），光色変化（参照光の色を灰色，試験光の色を赤及び青にする実験）の実験を行った．その結果を分光視感度曲線変化モデルに当てはめて定量的に分光視感度の変化を推定した．これらを通じて分かったことは以下のとおりである．

- 目に入射する光量が少なくなるほど，分光視感度曲線は短波長側へシフトする．つまり，暗い場所において，我々の視覚は青の感度が高くなり，赤の感度が低くなることが分かった（図 6 参照）．
- 目に入射する光の色みの変化によって分光視感度が変化した．その分光視感度の変化は雑音が少なくなるほど大きくなる．ここで雑音とは，例えば，赤みを変化させる実験では青と緑の成分を雑音と取り扱った．より純度の高い光が入射すると，それに対応する感度が低下することが分かった．つまり，我々は無意識のうちに，赤っぽい部屋に置かれると赤の感度を下げ，青っぽい部屋に置かれると青の感度を下げていることを示す．この結果は見えを保とうとするホワイトバランス作用を確認できたといえる．(図 9 から図 12 参照)
- 明るさ，色みの変化によって変化した被験者の分光視感度曲線を描くことができた．つまり，今回採用した，分光視感度曲線変化モデルで，定量的に被験者の視感度を推定できると考える．

実験結果より，映画館で映画を見た後に疲れを感じる一因として，分光視感度が長時間変化し続けているからではないかと考える．

しかし，明るさ変化によって分光視感度がシフトすること，ならびに，光色変化によって分光視感度の短波長側及び長波長側の傾きが変化するというのは，単純なモデルに基づくもので，被験者の本当の分光視感度を表すものではない．このモデルは，明るさ，赤み，青みによる変化が独立して起こり，それらは同時には起こらないという仮定のもと成り立っている．明るさによる変化と色による変化が同時に起こっていることは当然ありうることであり，それらが独立に起こっている状況の方が少ないだろう．しかし，この単純なモデルでも極端な光環境の場合には適用できると考える．

参考文献

(1) 日本色彩学会：「色彩用語辞典」，　東京大学出版，pp. 180-181，2003.
(2) 極樂地大樹　その他：「交照法による 2 色間の明るさマッチングに関する研究」，平成 18 年度照明学会全国大会講演論文集，p. 172，2006.

オキソモリブデン複核ユニットを有する硫黄架橋異種多核錯体の合成と性質

宮下芳太郎*　　岡本健一**

Synthesis and Properties of S-Bridged Heteropolynuclear Complexes Involving Oxomolybdenum Dinuclear Unit

Yoshitaro MIYASHITA*　　Ken-ichi OKAMOTO**

ABSTRACT

The reaction of the metalloligand *fac*(*S*)-[Co(aet)$_3$] (aet = 2-aminoethanethiolate) with an equimolar of $MoCl_5$ gave a novel boat-type S-bridged $Co^{III}_2Mo^{V}_2$ tetranuclear complex, $[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2\{Co(aet)_3\}_2]^{2+}$ (**1**). This is the first example of polynuclear complexes that consist of *fac*(*S*)-[Co(aet)$_3$] units and early transition metal ions. The structure of **1** was characterized by IR, Raman, UV-Vis absorption, diffuse reflectance, and ^{13}C NMR spectra. The racemic ($\Delta\Delta/\Lambda\Lambda$) isomer was selectively formed. **1** was optically resolved by using $Na_2[Sb_2(R,R\text{-tartrato})_2]\cdot 5H_2O$ and characterized on the basis of CD spectra. $(-)^{CD}_{520}$-**1** was assigned to the $\Delta\Delta$ isomer. From the corresponding reaction using *fac*(*S*)-[Rh(aet)$_3$], the known $Rh^{III}_3Mo^{V}_2$ pentanuclear complex, $[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)\{Rh(aet)_3\}_3]^{4+}$ (**2**), was formed. It was elucidated that the formation of the S-bridged polynuclear structures, involving an oxomolybdenum(V) dinuclear unit, are depended upon the metalloligands.

Keywords: molybdenum(V) complex, cobalt(III) complex, stereoselective reactivity, spectrochemical properties, optical resolution

1．緒言

チオラト型硫黄原子を有する単核錯体*fac*(*S*)-[M(aet)$_3$] (M = Co^{III}, Rh^{III}, Ir^{III}; aet = 2-aminoethanethiolate)は、配位した硫黄原子のさらなる求核性により他の金属イオンと反応して、硫黄原子で架橋配位した多核錯体を形成することから錯体配位子と呼ばれている(Fig. 1)。これまでに、反応させる金属イオンの幾何構造に依存した多種多様な硫黄架橋多核錯体が合成され、構造決定が成されてきた[1]。後周期(8～12族)遷移金属イオンは比較的硫黄原子との親和性が強く、特定の酸化数や幾何構造を取る傾向があるため、硫黄架橋多核錯体の立体化学的研究は、長年主に後周期遷移金属イオンを用いて発展してきた。

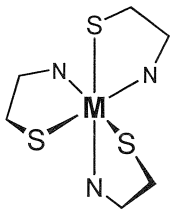


Fig. 1. Structure of the metalloligands *fac*(*S*)-[M(aet)$_3$] (M = Co^{III}, Rh^{III}, Ir^{III}; aet = 2-aminoethanethiolate).

一方、前周期(3～7族)遷移金属イオンは比較的硫黄原子との親和性が弱く、金属イオンの性質を反映した多種多様な酸化数や幾何構造を取り得る。我々は、反応条件を制御することで、錯体配位子*fac*(*S*)-[M(aet)$_3$] (M = Rh^{III}, Ir^{III})が後周期遷移金属イオンだけでなく前遷移金属イオンとも反応して硫黄架橋異種多核錯体を形成することを報告した[2),3)]。このとき、錯体の相対的な不安定さに基づく種々の興味深い反応性が観測された。特に、錯体配位子と反応させる金属イオンとして6族のモリブデン(III)イオンを用いた場合、単架橋$Mo_2O_2(\mu\text{-}O)^{4+}$コアを有する$Rh^{III}_3Mo^{V}_2$五核錯体$[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)\{Rh(aet)_3\}_3]^{4+}$ (**2**)が直線型$Rh^{III}_2Mo^{III}$三核錯体$[Mo\{Rh(aet)_3\}_2]^{3+}$の自然酸化により得られた(Fig. 2)[2)]。錯体**2**は、一部のチオラト型硫黄原子が架橋せずに残っているなどきわめて複雑な構造を有していた。しかしながら、そのような複雑な五核構造が三核錯体の構造変換によるものなのか、錯体配位子の性質によるものなのか不明であった。今回、この選択的生成反応を明らかにすることを目的として、*fac*(*S*)-[M(aet)$_3$] (M = Co^{III}, Rh^{III})とモリブデン(V)イオンとの直接反応を試みたところ、錯体配位子中の金属イオンによって異なる反応性が観測された。本論文では、*fac*(*S*)-[Co(aet)$_3$]から新規に得られた二重架橋$Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2^{2+}$コアを取り込んだ$Co^{III}_2Mo^{V}_2$四核錯体$[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2\{Co(aet)_3\}_2]^{2+}$ (**1**)の分光化学的性質を報告する。この錯体**1**は、*fac*(*S*)-

* 応用化学科准教授
** 筑波大学名誉教授

[Co(aet)$_3$]を構成単位とする硫黄架橋多核構造中に前周期遷移金属イオンが取り込まれた初の例である。

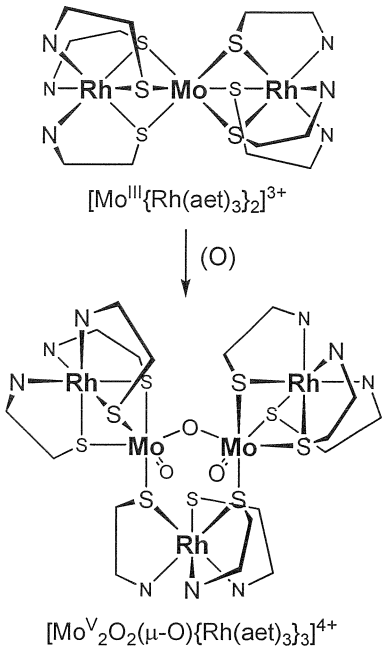


Fig. 2. Formation of the polynuclear complex with a oxomolybdenum dinuclear unit.

2．実験

2.1 試薬 *fac*(*S*)-[Co(aet)$_3$][4]は文献に従って合成した。Na$_2$[Sb$_2$(*R*,*R*-tartrato)$_2$]·5H$_2$Oは一般的な方法で、三酸化アンチモンおよび*R*,*R*-酒石酸水素ナトリウムを用いて合成した。すべての試薬は購入したものをそのまま用いた。

2.2 [Mo$_2$O$_2$(μ-O)$_2${Co(aet)$_3$}$_3$]$^{2+}$ (1) の合成 *fac*(*S*)-[Co(aet)$_3$] (1.00 g, 3.48 mmol)を20 cm^{3}の水に懸濁させ、MoCl$_5$ (1.00 g, 3.66 mmol)を20 cm^{3}の水に溶解した溶液を加えた。こげ茶色の混合物を室温で15分撹拌すると、茶色の沈殿(1.33 g)が生じた。この粉末(0.50 g)を100 cm^{3}の水に溶解し、不溶物をろ過で除いた。ろ液に5 cm^{3}の飽和NaNO$_3$水溶液を加えることにより茶色の微結晶(**1**(NO$_3$)$_2$·3H$_2$O)が析出した。収量:0.23 g (35%)。元素分析値：C, 14.32; H, 4.18; N, 11.13; Mo, 18.18; Co, 11.04% ([Mo$_2$O$_4${Co(NH$_2$CH$_2$CH$_2$S)$_3$}$_2$](NO$_3$)$_2$·3H$_2$Oの計算値：C, 14.29; H, 4.20; N, 11.11; Mo, 19.02; Co, 11.69%)。赤外吸収ピーク値(cm^{-1})：3528w, 3452br, 3278w, 3230s, 3119m, 2929w, 1638w, 1594m, 1573m, 1449w, 1385vs, 1300w, 1265m, 1121m, 1091m, 1034m, 973m, 930s, 915w, 839w, 720m, 668w, 527w, 454w。ラマンピーク値(cm^{-1})：1836br, 1656w, 1579w, 1557w, 1456w, 1432w, 1306w, 1271w, 1130w, 1113w, 1054m, 978w, 934vs, 919w, 843w, 711m, 674m, 528w, 449m, 429w, 377vs, 361s, 328s, 301m, 286vs, 249vs, 207m, 160w, 134m。vsは非常に強い、sは強い、mは中程度の、wは弱い、brはブロードなピークであることを示す。紫外可視吸収ピーク値とモル吸光係数[σ, 10^3 cm^{-1} (logε, mol^{-1} dm^3 cm^{-1})]：19.0 (3.0sh), 23.6 (3.0sh), 27.2 (3.8sh), 31.5 (4.2sh), 35.64 (4.49), 38.9 (4.4sh), 51.02 (4.71)。拡散反射ピーク値(10^3 cm^{-1})：18.6, 23.4sh, 27.0sh, 32.3sh。shはショルダーピークであることを示す。

2.3 [Mo$_2$O$_2$(μ-O)$_2${Co(aet)$_3$}$_3$]$^{2+}$ (1) の光学分割 **1**(NO$_3$)$_2$·3H$_2$O (0.05 g, 0.05 mmol)を10 cm^{3}の水に溶解した茶色溶液にNa$_2$[Sb$_2$(*R*,*R*-tartrato)$_2$]·5H$_2$O (0.03 g, 0.04 mmol)を含む水溶液(1 cm^3)を加えると、ただちに赤茶色の粉末((−)$^{CD}_{520}$-**1**[Sb$_2$(*R*,*R*-tartrato)$_2$]·5H$_2$O)が沈殿した。収量：0.02 g (27%)。元素分析値：C, 16.77; H, 3.51; N, 5.78% ([Mo$_2$O$_4${Co(NH$_2$CH$_2$CH$_2$S)$_3$}$_2$][Sb$_2$(C$_4$H$_2$O$_6$)$_2$]-·5H$_2$Oの計算値：C, 16.50; H, 3.46; N, 5.77%)。CDピーク値と強度[σ, 10^3 cm^{-1} (Δε, mol^{-1} dm^3 cm^{-1})]：19.07 (−0.77), 23.87 (+0.63), 26.64 (−0.28), 32.57 (+0.55), 35.46 (−0.49), 38.40 (+1.17)。Δε値は**1**(NO$_3$)$_2$·3H$_2$Oの紫外可視吸収スペクトルデータに基づいて見積もった。

2.4 測定 元素分析(C, H, N)は筑波大学研究基盤総合センター分析部門にて行った。Mo, Co, Rhの濃度は日本ジャーレルアッシュ社製ICPA-575分光分析装置を用いて決定した。赤外吸収スペクトルは日本分光社製FT/IR-550分光光度計を用い、KBr錠剤法で測定した。ラマンスペクトルは日本分光社製RFT-200分光光度計を用い、YAGレーザー(波長1064 nm)で励起して測定した。^{13}C NMRスペクトルはブルカー社製AM-500核磁気共鳴装置を用いてD$_2$O溶液を測定した。内部標準としてDSS (sodium 4,4-dimethyl-4-silapentane-1-sulfonate)を用いた。紫外可視吸収およびCDスペクトルはそれぞれ日本分光社製V-560分光光度計およびJ-600円二色性分散計を用いて水溶液を測定した。拡散反射スペクトルは日本分光社製V-570分光光度計に積分球(ISN-470)を取り付けて測定した。水溶液中の電気伝導度は堀場製作所社製導電率計DS-14を用いて測定した。すべての測定は室温で行った。

3．結果と考察

錯体配位子である単核錯体*fac*(*S*)-[Co(aet)$_3$]と等量のMo(V)イオンとの反応から、錯体**1**を茶色の微結晶として得た。プラズマ発光分光分析から、コバルト原子とモリブデン原子との比は1:1であることが示された。錯体**1**の赤外吸収スペクトルでは、Mo=O二重結合の伸縮モードに由来する特徴的な吸収帯[5),6)]が930 cm^{-1}、Mo−O単結合の吸収帯[5),6)]が720および454 cm^{-1}に観測された。ラマンスペクトルでもそれらに対応するバンドが934、711および449 cm^{-1}に観測された。また、錯体**1**は、二重架橋Mo$_2$O$_2$(μ-O)$_2^{2+}$コアを含む多くの錯体の場合[6),7)]に見られるように、室温で反磁性であった。これらは、錯体**1**中に対応する錯体と似た構造のMo$_2$O$_2$(μ-O)$_2^{2+}$コア[5)−7)]が存在することを示唆している。

赤外吸収スペクトルにおける1385 cm^{-1}の強いバンドとラマンスペクトルにおける300 cm^{-1}付近の複数の強いバンドは、それぞれ硝酸イオンと金属－配位原子間結合に由来すると考えられる。

Fig. 3に示したように、水溶液中における錯体**1**の紫外可視吸収帯は、固体状態における拡散反射測定と似た位置に現れており、錯体**1**が固体状態と溶液内で同様の構造を保持していることを示している。これは、錯体**1**の水溶液中におけるモル電気伝導度(234 S cm^2 mol^{-1})が、aet配位子を含む2価の既知錯体の値(208–227 S cm^2 mol^{-1})[8]と近いという事実によっても支持される。過去に報告された硫黄架橋五核錯体$[M'_3\{Co(aet)_3\}_2]^{n+}$ ($M' = Ag^I, Hg^{II}$)は、取り込まれた銀(I)イオンや水銀(II)イオンがd^{10}電子配置を持つため、可視紫外吸収スペクトルパターンはほとんど*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$ユニットに支配されている[9]。錯体**1**の吸収スペクトルパターンは、二重架橋$Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2^{2+}$コアに由来する特徴的なバンド[5]が20–32 × 10^3 cm^{-1}に若干観測されているものの、$[M'_3\{Co(aet)_3\}_2]^{n+}$ ($M' = Ag^I, Hg^{II}$)のもの[9]に類似している(Fig. 3)。これは、反応を通して*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$の幾何構造が保持されていることを示している。さらに、^{13}C NMRスペクトルでは、$[M'_3\{Co(aet)_3\}_2]^{n+}$ ($M' = Ag^I, Hg^{II}$)が6つのaet配位子の2種類のメチレン炭素原子による2本のみのシグナルを示した[7]のに対し、錯体**1**は鋭い6本のシグナルを示した(Table 1)。高磁場側(< 40 ppm)の硫黄隣接メチレン炭素に関して、39.20 ppmのシグナルは他の2つのシグナルよりも約4 ppmシフトしている。このシグナルはMo=O二重結合のトランス影響[6],[10]によるものと考えられ、Mo=O二重結合のトランス位置を占めるCH_2Sに由来すると帰属できる。その結果、錯体**1**は、2つの八面体型*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$ユニットのそれぞれが二重架橋$Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2^{2+}$コアに対し三重に硫黄架橋した、ボート型の硫黄架橋$Co^{III}{}_2Mo^{V}{}_2$四核錯体$[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2\{Co(aet)_3\}_2]^{2+}$(Fig. 4)であると帰属できる。この構造は、後述するように、CDスペクトル挙動からも支持される。*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$は*fac*(*S*)-$[M(aet)_3]$ (M = Rh^{III}, Ir^{III})と比較すると不安定である。そのため、*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$を前周期遷移金属イオンと反応させた場合、一部分解を伴い、同種多核錯体である$[Co\{Co(aet)_3\}_2]^{3+}$が生成する[11]。Mo(III)イオンを用いた場合も、異種多核錯体を得ることはできなかった。Mo(V)イオンを有する錯体**1**は、*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$を構成単位とする硫黄架橋多核構造中に前周期遷移金属イオンが取り込まれた初の例である。

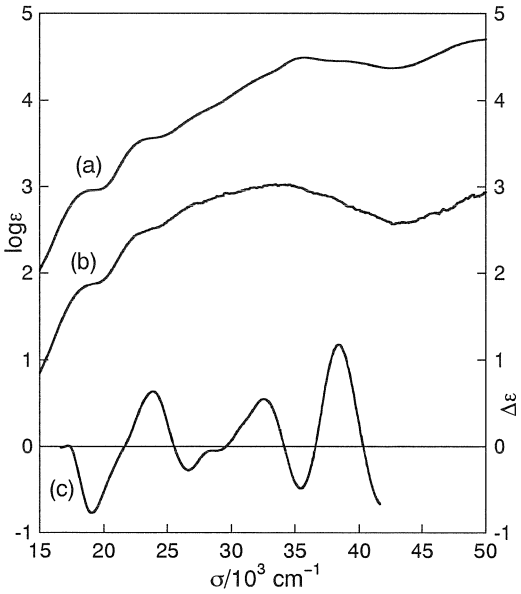


Fig. 3. (a) UV-Vis absorption (logε, mol^{-1} dm^3 cm^{-1}) and (b) diffuse reflectance (absorbance, arbitrary scale) spectra for **1** and (c) CD (Δε, mol^{-1} dm^3 cm^{-1}) spectrum for $(-)^{CD}_{520}$-**1**.

Table 1. ^{13}C NMR Chemical Shifts (ppm from DSS in D_2O)

錯体	CH_2S	CH_2NH_2
$[Ag_3\{Co(aet)_3\}_2]^{3+}$	36.64	51.41
$[Hg_3\{Co(aet)_3\}_2]^{6+}$	39.69	51.99
錯体**1**	35.34, 35.57, 39.20	50.20, 50.39, 50.64

2つの末端*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$ユニット中のキレート環の絶対配置(Δ, Λ)を考慮すると、$[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2\{Co(aet)_3\}_2]^{2+}$にはメソ体(ΔΛ)およびラセミ体(ΔΔ/ΛΛ)の異性体が可能である。メソ体は2つの架橋酸素原子を含む鏡面を有し、ラセミ体はMo_2O_2四員環の中心を貫く2回回転軸を有する。^{13}C NMRスペクトル挙動は、どちらか一方のみの異性体が選択的に形成していることを示している。また、分子モデルのMo=O二重結合のトランス位置を占める2つのCH_2S基間の立体障害を考慮すると、ラセミ体のほうがメソ体よりも立体障害が小さい(Fig. 4)。さらに、2つの*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$ユニットが$Co_2(\mu\text{-S-aet})_2^{4+}$部位に結合したボート型四核錯体$[\{Co_2(aet)_2\}\{Co(aet)_3\}_2]^{4+}$は、2種類のラセミ体として得られている[12]。実際、錯体**1**を分割剤である$[Sb_2(R,R\text{-tartrato})_2]^{2-}$で処理すると、520 nm(約19 × 10^3 cm^{-1})に負のCD帯を示す$(-)^{CD}_{520}$ジアステレオ異性体が得られた(Fig. 3)。この異性体をろ別したろ液は520 nmに正のCD帯を示し、$(+)^{CD}_{520}$ジアステレオ異性体を含んでいると考えられる。従って、錯体**1**はラセミ体であると帰属した。さらに、$(-)^{CD}_{520}$-**1**のCDスペクトルパターン(Fig. 3)は、可視領域においてΔΔ-$[M'_3\{Co(aet)_3\}_2]^{n+}$ ($M' = Ag^I, Hg^{II}$)のもの[9]とよく一致している。従って、$(-)^{CD}_{520}$-**1**と$(+)^{CD}_{520}$-**1**はそれぞれΔΔ-およびΛΛ-$[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2\{Co(aet)_3\}_2]^{2+}$であると帰属できる(Fig. 4)。しかしなが

ら、観測された$(-)_{520}^{CD}$-**1**のCD強度はΔΔ-$[M'_3\{Co(aet)_3\}_2]^{n+}$ (M' = Ag^I, Hg^{II})のもの[9]よりも著しく弱い。錯体**1**の場合、陰イオン交換を含む時間をかけた操作がCD強度の減少や消失を引き起こすので、ラセミ化反応が容易に起こっていると考えられる。

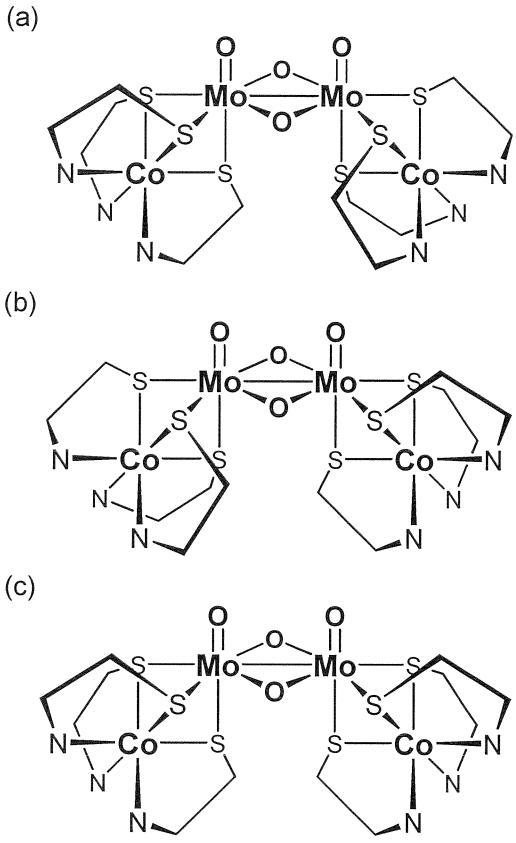


Fig. 4. Structures of (a) ΔΔ-, (b) ΛΛ-, and (c) ΔΛ-$[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2\{Co(aet)_3\}_2]^{2+}$.

fac(*S*)-$[Co(aet)_3]$の代わりに*fac*(*S*)-$[Rh(aet)_3]$を用いた同様の反応からはワインレッド色の粉末が得られた。この生成物は紫外可視吸収スペクトル挙動およびプラズマ発光分光分析より既知$Rh^{III}_3Mo^V_2$五核錯体$[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)\{Rh(aet)_3\}_3]^{4+}$ (**2**)[2]と帰属された。さらに、錯体**1**と*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$との反応を試みたが、対応する$Co^{III}_3Mo^V_2$五核錯体の生成は認められなかった。錯体**1**の紫外可視吸収、赤外吸収およびラマンスペクトルは単架橋$Mo_2O_2(\mu\text{-}O)^{4+}$コアを有する錯体**2**のもの[2]と似ておらず、これは錯体**1**と錯体**2**との構造の違いを示唆している。従って、オキソモリブデン複核ユニットを取り込んだ硫黄架橋多核錯体の形成は、錯体配位子*fac*(*S*)-$[M(aet)_3]$ (M = Co^{III}, Rh^{III})の種類に依存することが明らかとなった。

4．結論

錯体配位子*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$とMo(V)イオンとの反応から二重架橋$Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2^{2+}$コアを取り込んだ新規$Co^{III}_2Mo^V_2$四核錯体$[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)_2\{Co(aet)_3\}_2]^{2+}$ (**1**)が得られ、分光化学的手法により立体化学を考察した。前周期遷移金属イオンが初めて*fac*(*S*)-$[Co(aet)_3]$ユニットを含む硫黄架橋多核構造中に取り込まれた。*fac*(*S*)-$[Rh(aet)_3]$を用いた同様の反応からは既知$Rh^{III}_3Mo^V_2$五核錯体$[Mo_2O_2(\mu\text{-}O)\{Rh(aet)_3\}_3]^{4+}$ (**2**)が得られたため、オキソモリブデン複核ユニットを取り込んだ硫黄架橋多核錯体の形成は、錯体配位子の種類に依存することが明らかとなった。

謝辞

ラマンスペクトル測定に関してお世話になった富山大学の金森寛教授に感謝いたします。

参考文献

(1) T. Konno, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2004**, *77*, 627.
(2) Y. Miyashita, Y. Yamada, K. Fujisawa, T. Konno, K. Kanamori, K. Okamoto, *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* **2000**, 981.
(3) Y. Miyashita, N. Sakagami, Y. Yamada, T. Konno, J. Hidaka, K. Okamoto, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1998**, *71*, 661; Y. Miyashita, M. Hamajima, Y. Yamada, K. Fujisawa, K. Okamoto, *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* **2001**, 2089; Y. Miyashita, N. Mahboob, S. Tsuboi, Y. Yamada, K. Fujisawa, K. Okamoto, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2001**, *74*, 1295; N. Mahboob, Y. Miyashita, Y. Yamada, K. Fujisawa, K. Okamoto, *Polyhedron* **2002**, *21*, 1809.
(4) D. H. Busch, D. C. Jicha, *Inorg. Chem.* **1962**, *1*, 884.
(5) V. R. Ott, D. S. Swieter, F. A. Schultz, *Inorg. Chem.* **1977**, *16*, 2538.
(6) R. Xi, B. Wang, M. Abe, Y. Ozawa, I. Kinoshita, K. Isobe, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1999**, *72*, 1985.
(7) J. F. Johnson, W. R. Scheidt, *Inorg. Chem.* **1978**, *17*, 1280; R. Lozano, J. Román, F. de Jesús, E. Alarcón, *Transition. Met. Chem.* **1990**, *15*, 141.
(8) Y. Miyashita, N. Sakagami, Y. Yamada, T. Konno, K. Okamoto, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1998**, *71*, 2153.
(9) T. Konno, K. Tokuda, T. Suzuki, K. Okamoto, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1998**, *71*, 1049; K. Okamoto, Y. Kageyama, T. Konno, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **1995**, *68*, 2573.
(10) J. R. Knox, C. K. Prout, *Acta Crystallogr., Sect. B* **1969**, *25*, 2281; J. A. Zubieta, G. B. Maniloff, *Inorg. Nucl. Chem. Lett.* **1976**, *12*, 121.
(11) E. L. Blinn, P. Butler, K. M. Chapman, S. Harris, *Inorg. Chim. Acta* **1977**, *24*, 139.
(12) T. Konno, K. Okamoto, *Chem. Lett.* **1995**, 675; T. Konno, Y. Gotoh, K. Okamoto, *Inorg. Chem.* **1997**, *36*, 4992.

RNAi-毛状根形質転換法の評価

下村　憲司朗*

Evaluation of RNAi-Hairy Root Transformation Technique

Kenshiro SHIMOMURA*

ABSTRACT

We have previously made such analysis by means of a cDNA array composed of ESTs collected from various organs of *Lotus japonicus* and identified a large number of nodule-specific genes. We have initiated systematic analysis of function of nodule specific genes by means of RNAi-technique with hairy root transformation. To evaluate whether RNAi-hairy root transformation (RNAi-HRT) method is effective to the analysis of the gene of various types that relate to the nodule formation, RNAi-HRT method has been tested to four genes (Leghemoglobin gene, nin, sst1, pepc1) to which it is already known to relate to the symbiosis. The hairy root transformed for the expression of each gene to be decreased showed phenotype the same as the expectation to the nodule formation, the symbiotic nitrogen fixation, and the symbiosis maintenance. These results suggest that RNAi-HRT method be effective to the functional analysis of the nodule specific gene of all types.

Keywords: RNAi, hairy root transformation, nodule-specific gene, Lotus japonicus

1．緒言

マメ科植物は根粒菌との共生により根粒という特異的な組織を新たに形成することで，根粒菌に窒素固定活性を誘導し，大気窒素を利用することができる．この共生窒素固定は重要な農業形質であるため，宿主であるマメ科植物と共生相手である根粒菌の双方から，分子レベルの解析が進められている．最近の二つのマメ科モデル植物，*Lotus japonicus*（ミヤコグサ）と*Medicago trancatula* を用いた分子遺伝学的研究の進行に伴い，根粒菌との共生確立に必須ないくつかの宿主植物遺伝子が明らかにされている[1]．これらの単離された遺伝子群のほとんどが根粒菌感染や根粒組織形成よりも先に起こる，共生相互作用の非常に初期のステップに関係している．根粒菌感染以降の根粒形成，共生窒素固定のステップについては，ミヤコグサの様々な組織から集めた，重複のない 18,144 の EST クローンからなる cDNA array を用いた大規模遺伝子発現解析が行われた[2]（http://www.kazusa.or.jp/en/plant/lotus/EST/cDNA.html）．この結果，根粒形成過程で有意に発現が増幅する 1,076 遺伝子，有意に減少する 277 遺伝子が明らかになった．このうち 66%は機能が予測できる遺伝子であったが，根粒形成や共生窒素固定との関連が明らかになっているものは極めて少ない．

RNAi 法などの逆遺伝学的研究手法は根粒特異的遺伝子の機能解析において強力なツールとなる．しかし，ミヤコグサではシロイヌナズナのような in planta 形質転換法が確立していないため，多数の共生関連候補遺伝子の機能解析を遂行するためには膨大な労力と時間を必要とする．一方，*Agrobacterium rhizogenes* を介した毛状根形質転換法は短期間に形質転換根を誘導できることから，共生関連遺伝子の機能解析に用いられている[3][4]．

本研究では，RNAi と毛状根形質転換法を組み合わせた手法（RNAi-HRT 法）が根粒形成や共生窒素固定に関連する様々なタイプの遺伝子の解析にも有効であるかを機能既知の遺伝子を用いて検討した．

2．材料

ミヤコグサには ”gifu” と “miyakojima” と呼ばれるエコタイプがあり，これらはゲノム解析や EST 解析が完了していることから研究材料として，よく利用されている．本研究ではミヤコグサの中で最も使用されている“gifu”を研究材料とした．アグロバクテリウムは

*応用化学科　助教

A.rhizogenes LBA1334 を用いた．

３．方法

3.1 RNAi コンストラクトの作成

RNAi コンストラクトは以前に発表した方法で作成した[4]．各遺伝子に特徴的な領域（約 250-500bp）を pBH の pdk intron の両側に sense, anti-sense の向きに挿入した後，RNAi カセットをバイナリーベクターpCAMBIA 1300::GFP Asc I のマルチクローニングサイトにサブクローニングした（図１）．その後，*A.rhizogenes* LBA1334 に導入し，毛状根形質転換に使用した．コントロールには pCAMBIA 1300::GFP のみを導入したアグロバクテリウムを使用した．

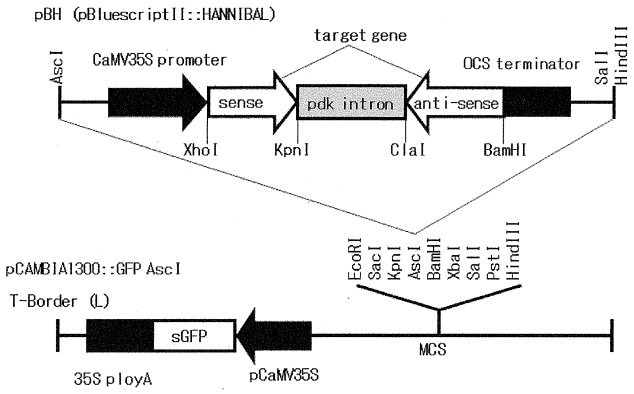


図１．RNAi コンストラクトの作成

3.2 形質転換毛状根の表現型解析

毛状根形質転換は以前に発表した方法を用いた[4]．毛状根の誘導後，バーミキュライトを入れたプラスチックポットに移植し，水耕液で 1 週間栽培することで馴化させた．その後，YEM 培地（K_2HPO_4 0.5 g/L, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.2 g/L, NaCl 0.1 g/L, Mannitol 5.0 g/L, Na-Gluconate 5.0 g/L, Yeast Extract 0.5 g/L, pH6.9, オートクレーブ後に 16% $CaCl_2$ を 1μl/ml で加える）で 4 日間培養したミヤコグサ根粒菌（*Mesorhizobium loti*'Tono'）を集菌し（5,000rpm, 4℃, 20min），滅菌水に再懸濁後，ミヤコグサに感染させた．

RNAi コンストラクト中にはレポーター遺伝子として GFP 遺伝子を組み込んである．形質転換根の選抜は蛍光実体顕微鏡を用い，GFP シグナルの有無によって行なった．根粒形成への影響の判断は根粒形成頻度，根粒の状態について行なった．

４．結果

4.1 nin（nodule inception）遺伝子

nin 遺伝子は転写因子をコードしており，この遺伝子の変異体は根粒を形成することが出来ないことが Schauser らによって報告されている[5]．nin 遺伝子は根において非常に低い発現を示すが，根粒菌接種後，数時間で発現誘導が起こり，その後，根粒形成に伴って発現量は増加することが知られている．

RNAi のコンストラクトには C 末端側で終止コドンの直前までの 440nt を PCR で増幅して用いた．形質転換毛状根を誘導し，根粒菌接種後 21 日目に観察を行ったところ，RNAi-nin 形質転換毛状根では根粒形成頻度の低下が見られた．毛状根誘導を行った植物 1 個体あたりの GFP ポジティブ（形質転換毛状根）の根粒と GFP ネガティブ（非形質転換不定根）の根粒数を測定した（図 2）．コントロールにおいては GFP ポジティブの根とネガティブの根の間に根粒形成数の差は無かった．一方，RNAi-nin 形質転換では GFP ネガティブの根にはコントロールと大差なく根粒が形成されていたものの，GFP ポジティブの根に形成された根粒数は 1 植物体あたり約 0.3 個まで減少しており，nin 変異体と同様に根粒形成頻度の低下が確認された．

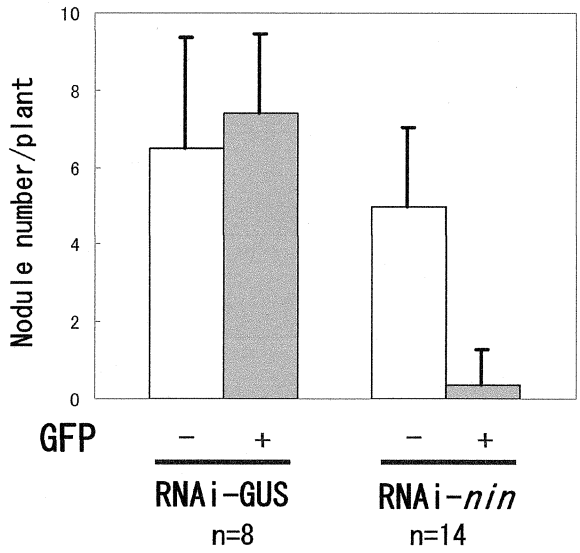


図２．RNAi-nin 形質転換毛状根の根粒形成数測定

4.2 共生特異的レグヘモグロビン遺伝子

ヘモグロビン遺伝子は植物界にも広く保存されているが，特に根粒内で共生窒素固定に特異的に働くヘモグロビンは共生レグヘモグロビンと呼ばれ，ミヤコグサでは少なくとも 3 つ同定されている．レグヘモグロビンは根粒内のタンパク質の中で最も多く蓄積することが知られている．共生窒素固定の鍵となる，窒素をアンモニアに還元する反応を触媒するニトロゲナーゼは酵素によって不可逆的に変性する．そのため，根粒内部の酸素分圧は低く保たれなければならない．レグヘモグロビンは酸素と結合することで，根粒内の酸素分圧を維持している．更に，根粒組織の根粒菌感染細胞では，根粒菌に呼吸のために必要な酸素を運搬している．

RNAi のコンストラクトには共生型レグヘモグロビン Ljlb2 の 3'非翻訳領域を含む 210nt を PCR で増幅して用いた．前述した方法と同様に形質転換毛状根を誘導し，根粒菌を感染させて観察を行った．根粒内にレグヘモグロビンが蓄積すると根粒は赤くなる．根粒菌感染後 21 日目には，コントロール毛状根には通常どおり赤い根粒が形成された．一方，RNAi-Ljlb2 形質転換毛状根ではコントロールの根粒と同程度の大きさの根粒が形成されているものの，その色は白色のままで，レグヘモグロビンタンパク質が蓄積していないように見えた（図 3）．

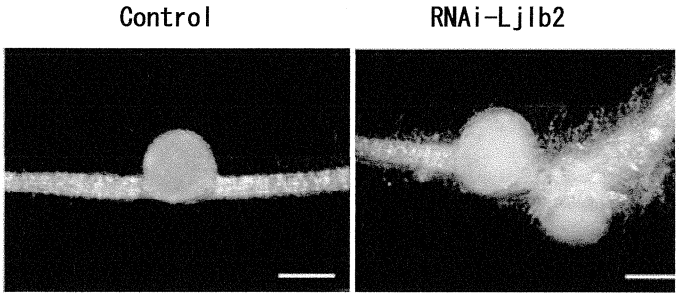


図 3．RNAi-Ljlb2 形質転換毛状根の顕微鏡観察

4.3 SST1（symbiotic sulfate transporter）遺伝子

SST1 遺伝子は植物細胞から感染細胞内の根粒菌が分化した，バクテロイドへの硫酸塩の輸送に関わることが示唆されている[6]．バクテロイドでは共生窒素固定活性の発現に伴って，ニトロゲナーゼを含む窒素固定に関わるタンパク質の合成が行われるため，タンパク質や補因子の合成に必須な硫酸塩の輸送は重要であると考えられている．この遺伝子に変異があるミュータントでは，根粒は形成できるが窒素固定活性はほとんど検出されない．加えて，このミュータントに形成された根粒は野生株の根粒よりも早いステージから老化が起こる．SST1 遺伝子は根粒においてほぼ独占的に発現を示す．

RNAi のコンストラクトには sst1 の 3'非翻訳領域を含む 512nt を根粒の cDNA ライブラリーより PCR で増幅して使用した．前記した方法で同様に毛状根形質転換，根粒菌の接種を行い，24 日後に地下部の観察を行った．RNAi-sst1 形質転換毛状根では，根粒菌感染後 24 日目に sst1 変異体と同様に早期老化を示す，緑色になった根粒が観察された（図 4 矢印）．根粒菌感染後，18 日目には老化根粒は 1 本の根に 1 個あるかないかの頻度であったが，24 日目の毛状根においては同じ形質転換根に 2-3 個の老化根粒が観察された．一方，コントロールや非形質転換根では，少なくとも 24 日目の時点で，老化根粒はまったく観察されなかった．

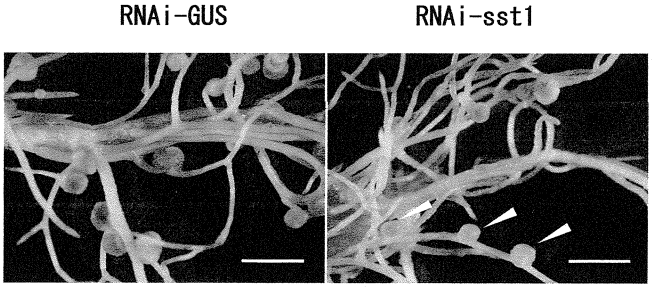


図 4．RNAi-sst1 形質転換毛状根の顕微鏡観察

4.4 PEPC1（phosphoenolpyruvate carboxylase）遺伝子

PEPC は phosphoenolpyruvate（PEP）を脱炭酸し、オキサロ酢酸を生じる反応を触媒する酵素で、オキサロ酢酸はその後 malate dehydrogenase によってリンゴ酸となる。マメ科植物と根粒菌との共生において，PEPC は根粒菌へ供給されるエネルギー（リンゴ酸）および，固定窒素の同化のための炭素骨格としての有機酸の生成に重要な役割を担っていると考えられている．ミヤコグサ PEPC は 2 種類同定されている[7]．Ljpepc1 は根や花，莢，胚軸，子葉，頂点分裂組織でも弱く発現するが，根粒において最も強く発現する．そして，その発現増幅は 14 日目以降の根粒で確認されている．Ljpepc2 はほぼ全ての組織で発現しており，花，莢で最も強く発現している．根粒においては感染後 14 日目からむしろ発現量が減少し，28 日目には検出できないレベルまで低下する[8]．ミヤコグサ PEPC 遺伝子のアンチセンス形質転換体では，根粒の早期老化が起こることが報告されている[9]．

RNAi のコンストラクトには pepc1 の 3'非翻訳領域を含む 370nt を PCR で増幅して使用した．前記した方法と同様に毛状根形質転換，根粒菌の接種を行い，18 日後に地下部の観察を行った（図 5）．

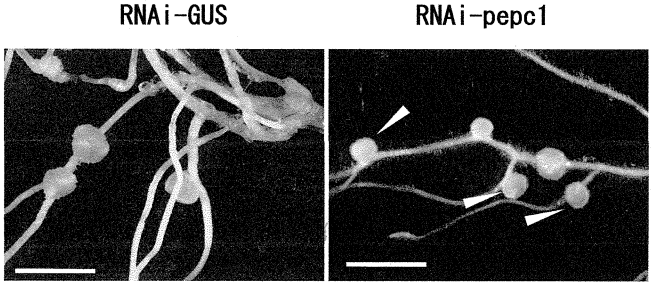


図 5．RNAi-Ljpepc1 形質転換毛状根の顕微鏡観察

RNAi-pepc1 形質転換毛状根では図 5 の矢印に示したように，18 日目にして緑色になった根粒が確認された．ミヤコグサの根粒は通常，5-6 週間はレグヘモグロビンに由来する赤い色の根粒をつけるが，老化が進むとレ

グヘモグロビンの変性に伴って，緑色へと変色する．根粒菌感染後，18 日目には老化根粒は 1 つの根に 1 個あるかないかの頻度であったが，25 日目の毛状根においては同じ形質転換根に 2-3 つの緑色根粒が観察された．なお，コントロールや非形質転換根では少なくとも 25 日目まで，老化根粒はまったく観察されなかった．

RNAi-pepc1 コンストラクトを導入した根粒組織を観察するために，根粒菌接種後 25 日目の根粒のテクノビット樹脂切片を作成した．ウルトラミクロトームを使用し，1.5μm の厚さで切片を作成後，トルイジンブルーで染色し，観察を行った（図 6）．コントロールでは，野生株の植物で見られるような正常な感染領域が確認された．一方，RNAi-pepc1 形質転換毛状根の緑色根粒では，感染領域は維持されているものの，コントロールと比べて感染細胞が減少しているように思われた．また，老化植物細胞に特徴的な液胞の肥大（図 6 矢印）や細胞質の凝集が見られた細胞も確認された．

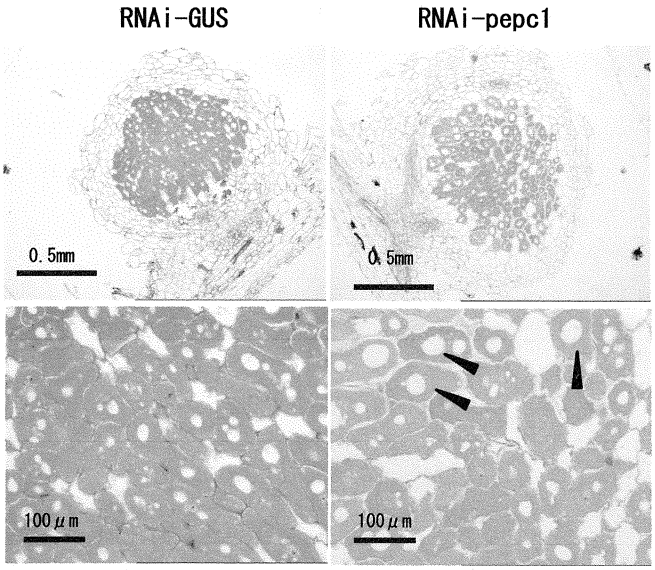


図６．RNAi- Ljpepc1 形質転換根粒切片の顕微鏡観察

５．考察

我々は以前に，ミヤコグサマクロアレイによるミヤコグサ－根粒菌共生に関わる遺伝子の大規模な発現解析を実施し，根粒で発現が増幅する多くの遺伝子情報を得た．これらの遺伝子の高効率な遺伝子機能解析系として，RNAi と毛状根形質転換法を組み合わせた方法を提唱し，その実験系の構築を試みた．

RNAi による遺伝子機能解析は様々な生物において行われているが，植物の地下部における RNAi の適用は Kumagai らによるものだけであり，しかも外部から導入した GUS 遺伝子に対するものであった．そこで，まず機能が比較的よく研究されている，nin 遺伝子，レグヘモグロビン遺伝子，SST1 遺伝子，PEPC1 遺伝子について RNAi 形質転換毛状根を作成し，既知の現象や予測された現象が観察されるのかを確認することにした．形質転換毛状根に根粒菌を感染させたところ，いずれの場合においても予測される表現型が観察された．

nin 遺伝子は根粒形成に重要な遺伝子群を発現させるための転写因子をコードしていると考えられており，その遺伝子発現は根粒菌感染初期に誘導されるものの，成熟根粒における発現量と比べると微量である．nin 変異体や RNAi-nin 形質転換毛状根では根粒形成がほとんど観察されなかった．つまり，RNAi-RHT 法は低い発現量で働くような遺伝子に関しても有効であると考えられる．

レグヘモグロビン遺伝子は共生に関わる後期ノジュリン遺伝子としてミヤコグサでは 3 種類同定されており，その転写産物量は根粒内で非常に高いことが知られている．共生ヘモグロビンの Ljlb2 に対する RNAi 形質転換毛状根を誘導し，根粒菌を感染させたところ，感染後 21 日目にも関わらず，形成された根粒は白色であった．この結果は，レグヘモグロビンが蓄積されていないことを示しており，RNAi-Ljlb2 によって配列の類似した Ljlb1,2,3 すべてで RNA サイレンシングが引き起こされたことを示す．以上の結果より，RNAi-RHT 法は根粒形成の時期やターゲット遺伝子の発現量に左右されることなく有効に機能することが明らかになった．また，レグヘモグロビン（Ljlb1,2,3）のように類似タンパク質が存在する場合でも，保存された領域を用いることで，その遺伝子ファミリーに対するサイレンシングを誘導することが可能であることを示した．

SST1, PEPC タンパク質はそれぞれバクテロイド（根粒菌が感染した細胞内で分化した形態）への硫酸塩，炭素化合物の供給に関与することが知られている．これらのタンパク質の活性が阻害されると共生窒素固定に影響を及ぼし，共生関係が破綻することが予測される．実際に，sst1 変異体や pepc 抑制形質転換体では根粒の早期老化が引き起こされる．SST1，PEPC タンパク質のような代謝に関連するタンパク質の場合，活性阻害度合がある程度の閾値を越えないと表現型への影響が現れないことも考えられる．RNAi-RHT 法においては双方で予測された表現型が観察された．RNAi 法は塩基配列特異的な発現抑制を強力に引き起こすことができる手法であるが，その効果は毛状根のような特異的な組織においても同様であることが示された．

以上の結果から，RNAi-RHT 法は多種多様にわたる根粒特異的遺伝子の機能解析において強力なツールとなることが示唆された．

謝辞

本研究の顕微鏡観察に関しては，農業生物資源研究所の河内宏氏，香川大学農学部の田島茂行教授にご助力いただきました．心より感謝の意を表します．

参考文献

(1) 林誠・今泉（安楽）温子・川口正代司，共生シグナルの受容と共通シグナル伝達経路の分子遺伝学的解明，「蛋白質核酸酵素」51(9):共立出版，2006.

(2) Kouchi H, Shimomura K, Hata S *et al.*, Large-scale analysis of gene expression profiles during early stages of root nodule formation in a model legume, *Lotus japonicus*, DNA research 11, 263-274, 2004

(3) Kumagai, H. and Kouchi, H., Gene silencing by expression of hairpin RNA in *Lotus japonicus* roots and root nodules. Mol. Plant-Microbe Interact. 16: 663-668, 2003

(4) Shimomura K. Nomura M. Tajima S *et al.*, Novel RING Finger Protein, is Required for Symbiotic Interactions Between *Mesorhizobium loti* and *Lotus japonicus*, Plant Cell Physiol. 47, 1572-1581, 2006.

(5) Schauser L, Roussis A, Stiller J *et al.*, A plant regulator controlling development of symbiotic root nodules, Nature 402: 191-195, 1999.

(6) Krusell L, Krause K, Ott T, *et al.*, The Sulfate Transporter SST1 Is Crucial for Symbiotic Nitrogen Fixation in *Lotus japonicus* Root Nodules, Plant Cell. 17:1625-1636, 2005.

(7) Nakagawa T, Izumi T, Banba M *et al.*, Characterization and expression analysis of genes encoding phospho enolpyruvate carboxylase and phosphoenolpyruvate carboxylase kinase of *Lotus japonicus*, a model legume, Mol. Plant-Microbe Interact. 16: 281–288, 2003.

(8) Flemetakis E, Dimou M, Cotzur D *et al.*, A sucrose transporter, LjSUT4, is up-regulated during *Lotus japonicus* nodule development, J. Exp. Bot., 54:1789–1791, 2003.

(9) Nomura M, Mai T, Fujii M *et al.*, Phosphoenolpyruvate carboxylase plays a crucial role in limiting nitrogen fixation in *Lotus japonicus* nodules, Plant Cell Physiol., 47:613-21, 2006.

西神ニュータウンの地理情報で見る経年変化

中尾幸一*

The Study of the Passing Year Change Which is Observed by the Geographic Information About the Seisin New Town

Kouichi NAKAO*

ＡＢＳＴＲＡＣＴ

About 40 years passed after Kobe City had started the development of Seisin New Town. About 25 years have passed since people started living here.The resident's life is also steady now. Seisin New Town thought about the condition because of use as a residential area in the future.It is that the resident has the attachment to this town It is also useful to know the geographic information of Seisin New Town for that. This study makes the thematic map concerning Seisin New Town, and is an explanation of this.

Keywords：geographic， information,

１．はじめに

西神ニュータウンは神戸市が開発した大規模な住宅団地である。計画人口は６１０００人、開発面積６３４ヘクタールで計画され、着工して約４０年が経過しており、人々がここで生活を始めてからも、約２５年が経っている。現在、住民の生活も安定し良好な環境が保たれている。しかし、今後高齢化等により住民の減少が懸念される。西神ニュータウンが、住宅団地として、使用され続けるためには、その対策を考えることが必要である。この街に人々が住み続けるために、この街に住む人々が、街に愛着を持つことが大切であり、住民のコミュニティーの充実や、街としての機能の充実など、様々なことが考えられる。その一つの方法として、西神ニュータウンについての様々な地理情報をわかりやすく知らせることを考えた。

本研究は、西神ニュータウンに住む人々に、その地理情報を提供すべく、西神ニュータウンに関する経年的な地理情報をデータベースとして構築し、これを基に各種の主題図を作成することにより、西神ニュータウンがどのような地理的特徴を持つ地域であるのかを表現したものである。

２．神戸市域の住宅団地

１９６０年から２００５年までの神戸市域の団地造成地の施工者を、住宅都市整備公団、兵庫県、神戸市、民間に分けて整理したものが、図１である。

*都市工学科　教授

図１から、神戸市と民間が開発した面積がそれぞれ４０％を占めていること、また、その件数をみると、民間によるものが約８０％と群を抜いて多いことがわかる。一件当たりの面積では、住宅都市整備公団と神戸市が群を抜いており、いずれも大規模な開発をしていることを示している。以上から、神戸市は大規模な団地開発を多く行ってきたことがわかる。

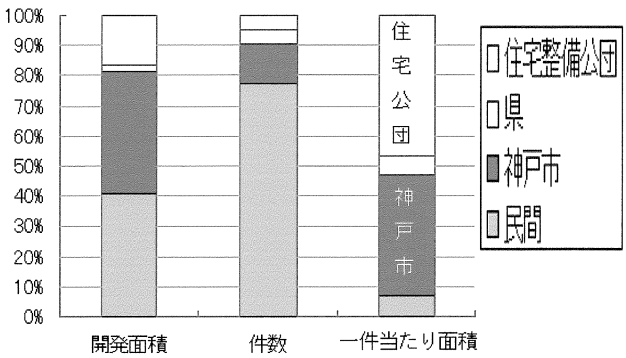


図１　神戸市域宅地開発の施工者の種別割合

図２は、神戸市域の団地を、開発面積の広い順に並べ、円グラフとしたものである。ここにあるように、西神団地(西神ニュータウン)が最も広く、次に西神住宅第２(西神南)、神戸研究学園都市、藤原台、北神戸第２，３、名谷と続く。藤原台、北神戸第２，３、は住宅都市整備公団が開発したものであるが、神戸市が開発した、特に西区周辺の団地が上位を占

めていることがわかる。

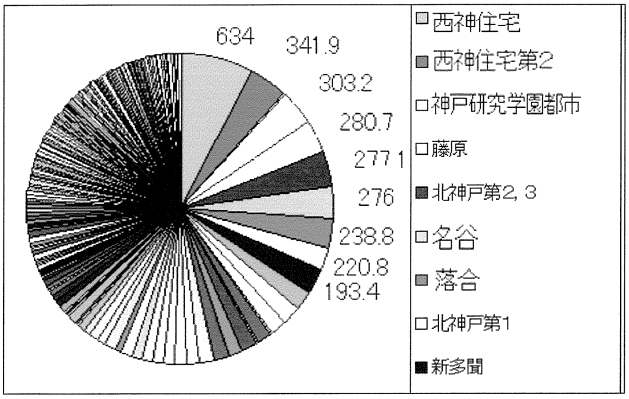


図２　神戸市域の住宅団地の面積

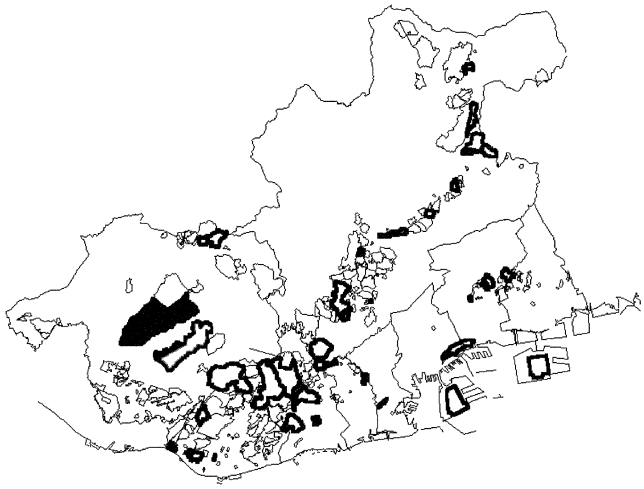


図３　神戸市域の住宅団地

図３は１９６０年以後に開発された住宅団地を示すもので、神戸市が開発した団地は太線で表している。西区、須磨区に神戸市の開発した住宅団地が集中していることがわかる。中でも、西神ニュータウンが格別大きな団地であることがわかる。

３．西神ニュータウン周辺の地形と地質

神戸は、図４のように、東よりに六甲山系があり、北には帝釈山系がある。西区は、両山系から離れ、堆積層による比較的平坦な丘陵地帯が広がっている。

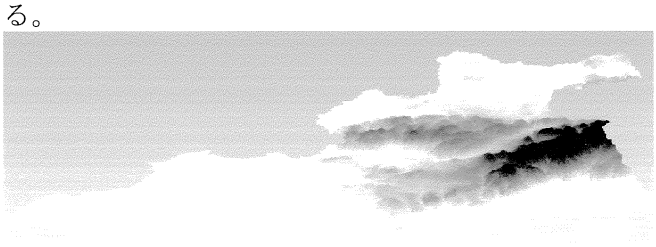


図４　神戸市域の鳥瞰図

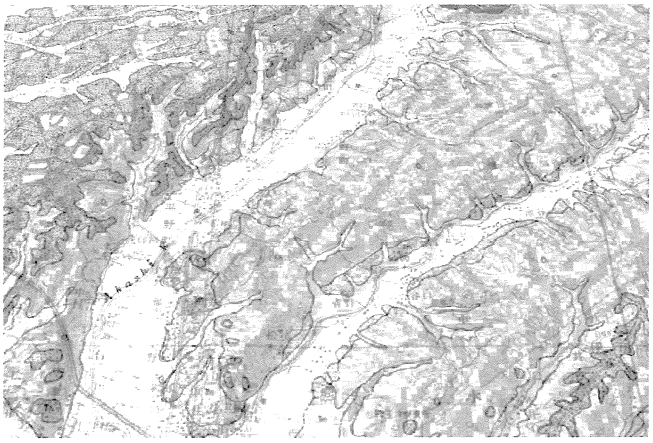


図５　西神ニュータウン周辺の地質図

図５は開発前の西神ニュータウン周辺の地質図の鳥瞰図である。谷部以外の丘陵部はほとんどが大阪層群明石累層で、この地層は鮮新世にあたり約３００万年前の堆積層である。堆積層を浸食してできた谷部に農耕地が広がっている。丘陵部は農耕地には使われていなかった。

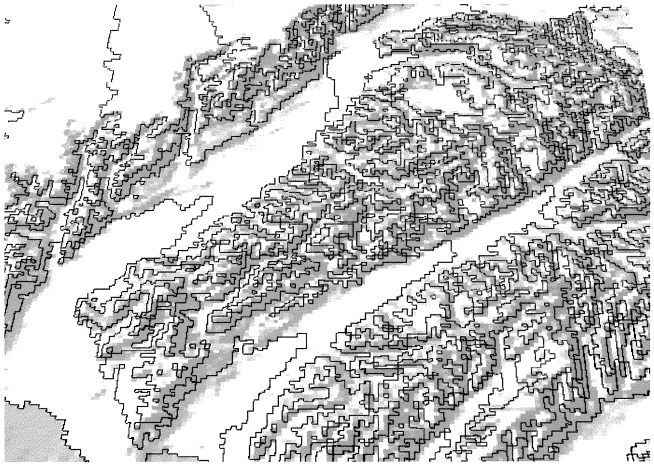


図６　明治期の西神ニュータウン等高線図の鳥瞰図

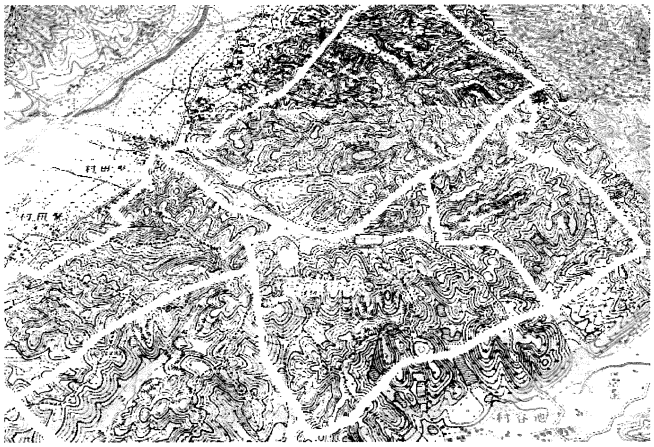


図７　西神中央付近の明治期の鳥瞰図

図６は、明治２０年頃の西神ニュータウン地域の様

子を表す２０ｍ等高線図を鳥瞰図としたものである。丘陵部には、谷が入り込み複雑な地形であったことがわかる。図７は地下鉄西神中央付近の明治２０年頃の地図の鳥瞰図である。谷、山の様子をより詳細に表現している。

４．造成工事による切土と盛土の状況

西神ニュータウンの造成は、当然ながら、谷を埋め、山を削って成り立っている。その概略の状況を知るため、現在の地形を表す、国土地理院発行の数値地図５０メートルメッシュ(標高)と同じ区域の標高データを明治期の地形図の等高線から作成し、現在のデータと比較した。図６も、そのデータを用いて作成している。

盛土、切土の状況を表すため、二つの時期の断面図を作成して比較した。図８はその断面の位置を表している。ここでは４つの断面図を作成した。

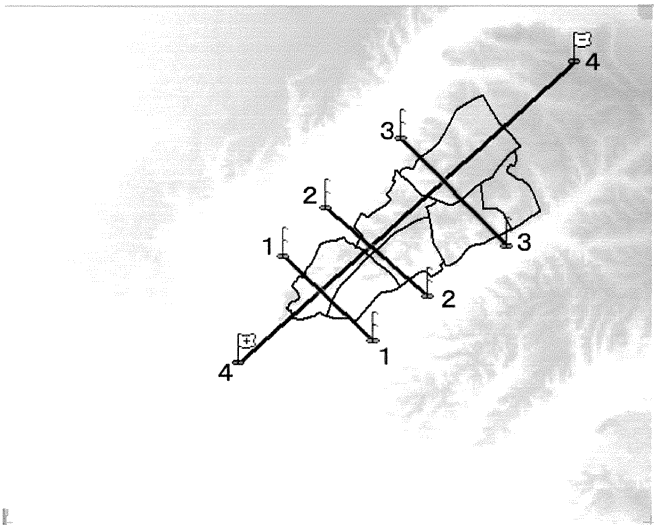


図８　断面の位置

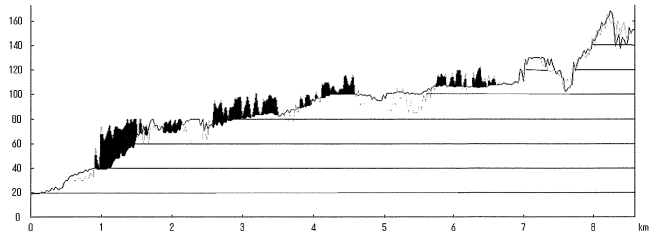


図９　断面４

図９は南から北東に向けての断面図である。左から春日台、美賀多台、高塚台に至る断面図で、ほぼ原地盤に沿って造成されていることがわかる。

図１０、図１１、図１２は断面４に直交する方向の断面図である。断面１が春日台、樫野台、断面２が美賀多台、竹の台、断面３が高塚台、糀台である。断面１は切土部が多く、断面２、断面３は盛土部が多いことがわかる。

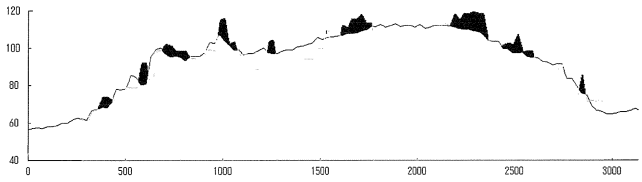


図１０　断面３

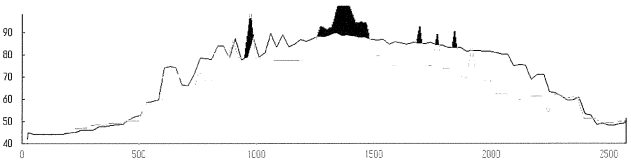


図１１　断面２

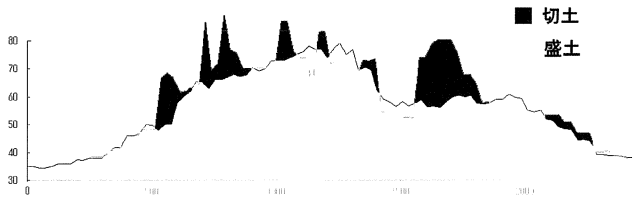


図１２　断面１

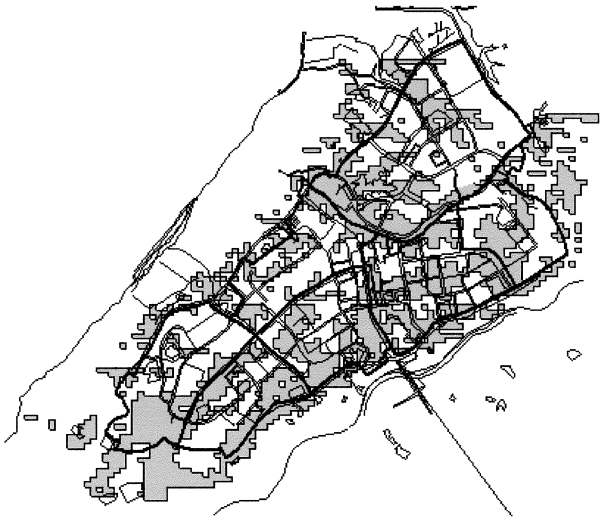


図１３　西神ニュータウンの盛土部

図１３は西神ニュータウンの地図に盛土の部分を重ねがきした図である。薄いグレーの部分が盛土の区域を表している。この図からは、団地の東側に盛土部が多いことが読み取れる。

図１４は明治のデータの標高と現在のデータの標高差を基に作成した鳥瞰図である。盛土部分は黒く谷に見えるよう表現し、切土部は山のように見えるよう表現している。盛土の深さ、切土の高さが感覚的にとらえられる表現になっている。図１３、図１４から盛土、切土の工事の状況の様子をとらえることができるものと思われる。

いる。

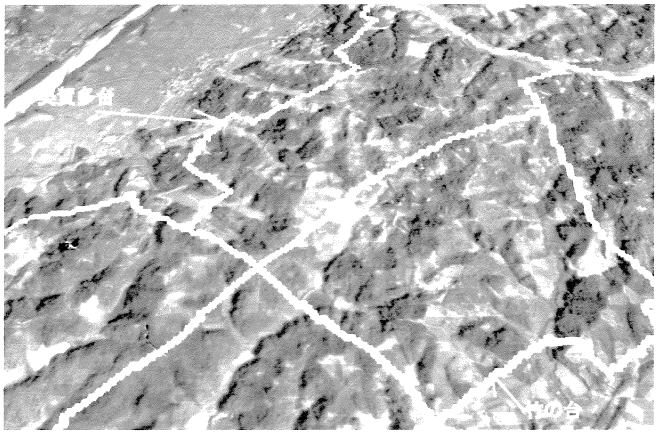


図１９ 美賀多台、竹の台

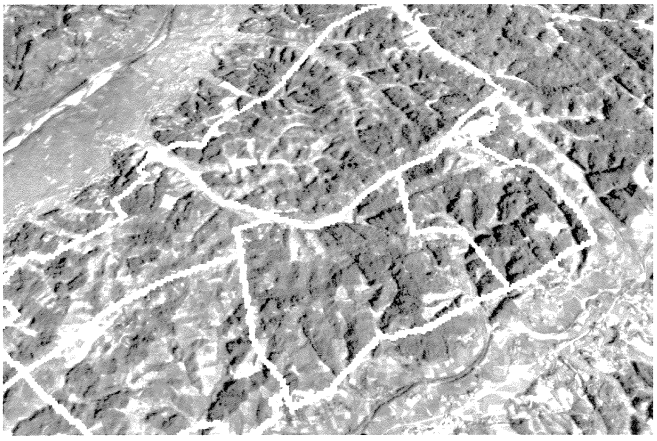


図２０ 高塚台、糀台、狩場台

６．明治と現在の地図の比較

明治２０年頃作成された地図と現在の地図を重ねると、写真とはまた違った表現ができる。図２１、は春日台、樫野台地区のものである。樫野台の谷の状況は写真よりわかりやすい表現ができている。

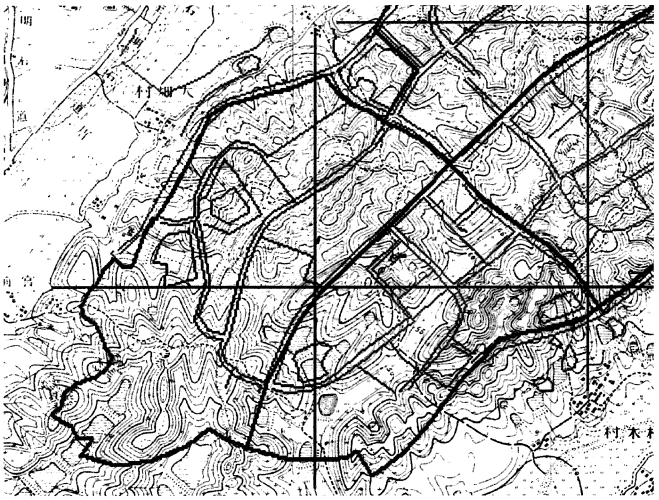


図２１ 春日台、樫野台

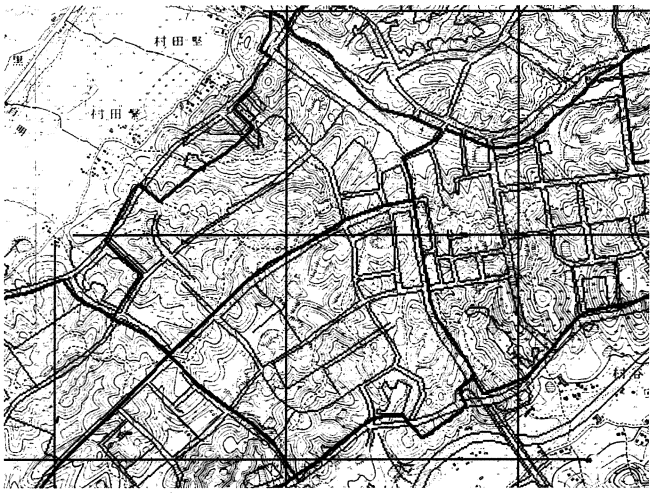


図２２ 美賀多台、竹の台

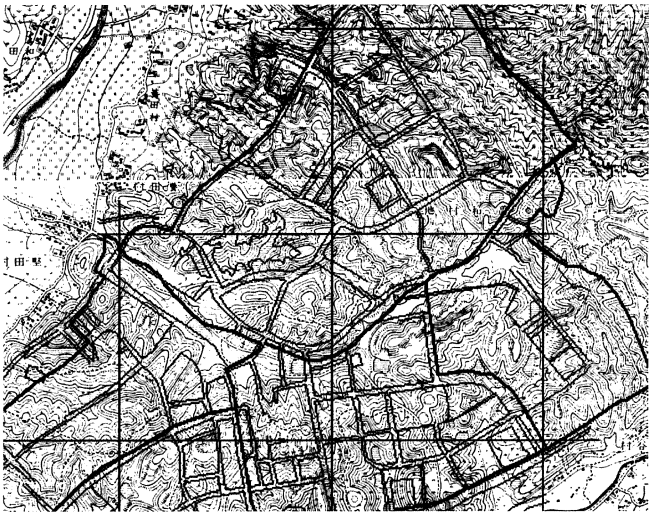


図２３ 糀台、狩場台、高塚台

図２２は美賀多台、竹の台地区であるが、写真ではわかりにくかった竹の台の谷の存在が明瞭に表現されている。

図２３は西神ニュータウン北部地区であるが、谷、池の存在がわかる。

７．人工衛星画像で見る経年変化

人工衛星画像は１９７５年頃から現在まで約３０年間、定期的に観測したデータが保存されている。その間、観測衛星が交代しながら解像度の良いセンサに移行し当初解像度８０ｍであったものが、現在では１０ｍとなっている。この画像を見ると、西神ニュータウンの開発される様子から、住宅が建てられてゆく様子が把握できる。また、植生の変化もよくとらえることができる。図２４は日本の衛星であるALOSの２００８年１月観測の画像である。これを地表被覆分類し、植生域、住宅域、農耕地、裸地、水域などに分けて色分けして作成したものが図２５である。濃いグレーのところが、住宅が建っている

ところで、西神ニュータウン全域に住宅が建っている様子が見える。

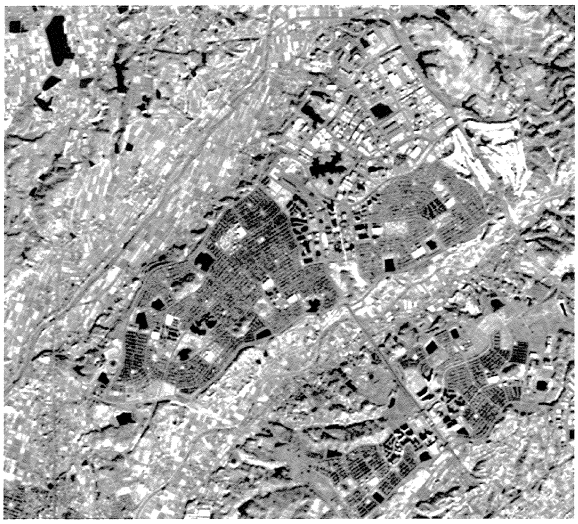


図２４ 2008.1 の西神ニュータウンの画像
（ALOS の ANVIR-2 の画像データより作成）



図２５ 2008.1 西神ニュータウンの地表被覆分類図
（ALOS の ANVIR-2 の画像データより作成）

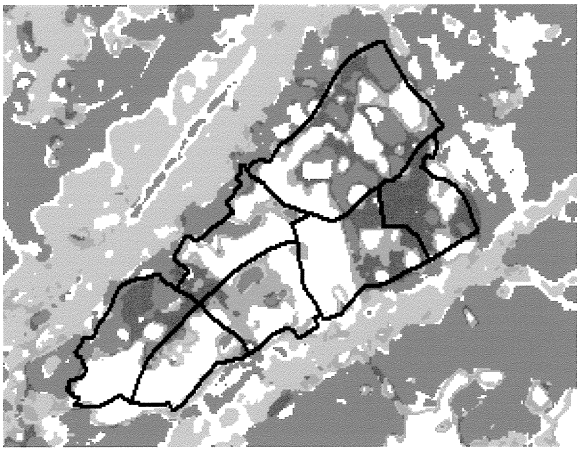


図２６ 1986 年の地表被覆分類図
（LANDSAT の MSS の衛星写真から作成）

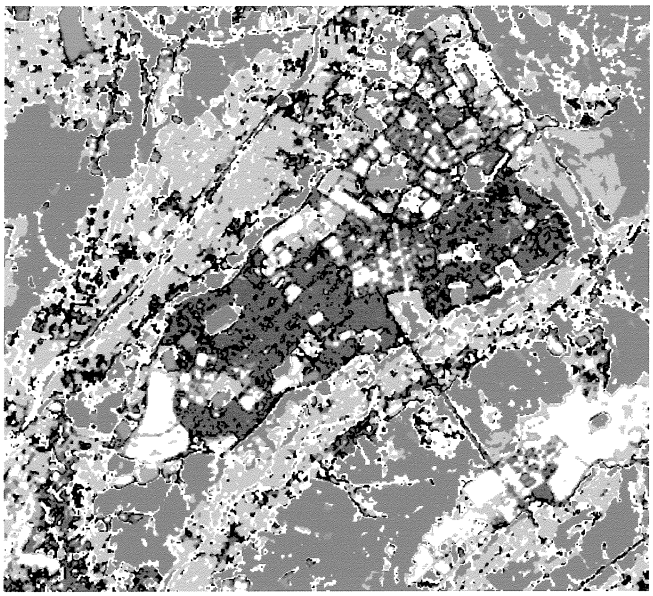


図２７ 1992 年の地表被覆分類図
（JERS-1 の VNIR の画像データより作成）

図２６は住宅が建ち始めた１９８６年の地表被覆分類図である。白いところはまだ土が露出した更地の状態で、春日台、糀台、狩場台に住宅が建っている様子がわかる。図２７は１９９２年の地表被覆分類図である。ほぼ全域に住宅が建っており春日台の一部、美賀多台の一部に更地が残っていることが読み取れる。同様にして、８８年、９０年、９４年、９８年、０３年、０８年の地表被覆分類図を作成し経年変化を調べたところ、１９８８年には竹の台、１９９０年には美賀多台に住宅が建ち、１９９８年にほぼ全域に住宅が建ったことが、推察できた。

８．おわりに

西神ニュータウンに関する地理情報を使って様々な表現をしてその成り立ちや､地形的特徴を表した。ビジュアルに西神ニュータウンを見ることで、新たな発見をし、地域への愛着が生まれれば幸である。この情報が様々な場面で、西神ニュータウンの人々の役に立つことを願う。

ここで使用した人工衛星画像データの所有権は経済産業省／(独)宇宙航空研究開発機構にあり、(財)リモートセンシング技術センターより配布されたものである。また、図１、図４～図２０の作成には国土地理院発行の数値地図 25000(空間データ基盤)、数値地図 50m ﾒｯｼｭ(標高)、空中写真を使用している。

参考文献

(1) 清水靖夫編 ，「神戸都市地図」，柏書房, pp. 21, pp. 24, 1995

都市河川「伊川」における水生生物の生息状況と水温の季節変動

宇野宏司*　中太大智**　田中梢**

Habitat Distribution of Aquatic Insects and Seasonal Change of Water Temperature in Ikawa River

Kohji UNO*　Daichi NAKATA**　Kozue TANAKA**

ABSTRACT

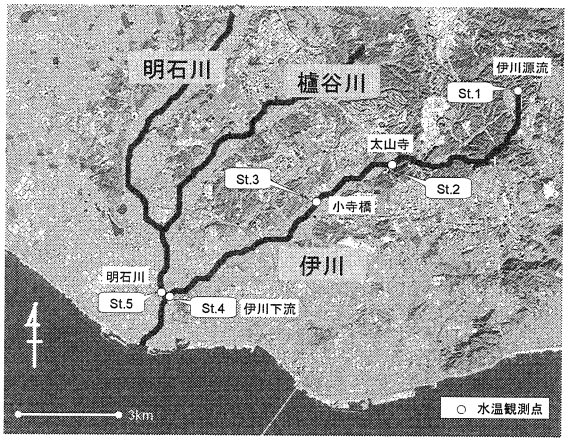
In the Ikawa River which runs through Kobe and Akashi City in Hyogo Prefecture, JAPAN, so called "nature friendly river works" has be completed in the end of fiscal 2006. In this study, to grasp the condition of water environment and the habitat distribution of aquatic insects which inhabit there just after completion of their works, the field observations and the numerical simulation were conducted. Main results are as follows: 1) The water temperature of the Ikawa River shows typical seasonal variation. 2) Habitat distribution of aquatic insects changes in the direction of downstream. The fish of foreign origin are also living in Ikawa River. 3) In one-dimensional numerical simulations, the results show that the observed water temperature and simulated one are good agreement in summer season.

Keywords: Ikawa River, aquatic insect, water temperature, field observation, numerical simulation

1．はじめに

1997年に河川法が改正され，治水・利水に加えて環境が河川の整備・管理目的として認識されるようになった．都市部を流れる河川においても，多自然型川づくりが進められ，コンクリート三面張りの「水路」からの脱却を図りつつある．こうした事業は地域固有の生態系への配慮のもとに進められる必要があるが，特に都市部の中小河川に対しては事業実施後の継続的なモニタリングが十分に行われておらず，事業効果に対する評価があいまいになっている．

本研究で対象とする伊川は神戸市北区の「しあわせの村」付近に源をなし，明石城公園北側で明石川に合流する総延長15.7kmの河川で，このうち下流12.5kmの西区伊川谷町から玉津町を流れる区間が2級河川に指定されている．本河川では，1980年度から2006年度にかけて多自然型川づくりを中心とした河川整備が実施された．これら事業による河川環境の改善効果を継続的なモニタ



図－1　調査地点

*　都市工学科　講師
**　都市工学科　卒業生

表－１　調査地点の特徴

St.	地点名	流域の特徴
1	伊川源流	渓流．自然流路．樹木に覆われて日光が直接水面に到達しにくいため，夏でも低温．
2	太山寺	淵．周辺では魚道の設置等，多自然型河川整備が進められている．夏には水遊びをする親子連れの姿が見られる．
3	小寺橋	瀬．多自然型河川整備が進められているが，落差工となっており，生物的回廊は寸断されている．側方から農業用水の流入がある．
4	合流点（伊川下流）	河床はコンクリート固め．明石川側では下水処理水臭を強く感じる．河川敷を散歩する人々や釣りをする人々の姿が見られる．
5	合流点（明石川）	

表－２　水生生物調査結果

生物種	学　名	水質階級※	源流 St. 1	太山寺 St. 2	小寺橋 St. 3	合流点（伊川下流・明石川） St. 4・St. 5
タニガワカゲロウ	*Ecdyonurus sp.*	Ⅰor Ⅱ		○		
ウルマーシマトビケラ	*Hydropsyche orientalis*	Ⅰor Ⅱ			○	
カワゲラ	*Kamimura tibialis*	Ⅰ	○			
オニヤンマ	Perlidae *Anotogaster sieboldii*	Ⅰ－Ⅲ	○			
カトリヤンマ	*Gynacantha japonica*	Ⅰ－Ⅲ	○			
ムカシトンボ	*Epiophlebia superstes*	Ⅰ	○			
ヘビトンボ	*Protohermes grandis*	Ⅰ	○			
ダビドサナエ	*Davidius nanus*	－	○			
アメンボ	*Aquarius paludum paludum*	－	○			○
ミズカマキリ	*Ranatra chinensis*	Ⅲ		○		
ゲンジボタル（幼虫）	*Luciola cruciata*	Ⅰor Ⅱ	○			
ガガンボ	*Tipulidae*	－	○			
ヒル	*Hirudinea*	Ⅲ		○	○	
ミナミヌマエビ	*Neocaridina denticulata denticulata*	Ⅱ	○	○	○	○
ヤマトヌマエビ	*Caridina multidentata*	－		○		
サワガニ	*Geothelphusa dehaani*	Ⅰ	○			
カワニナ	*Semisulcospira libertina*	Ⅱ			○	
マシジミ	*Corbicula leana*	Ⅱ		○		
カワヨシノボリ	*Rhinogobius flumineus*	－				○
カワムツ	*Zacco temminckii*	－	○	○	○	○
ブルーギル	*Lepomis macrochirus*	－				○

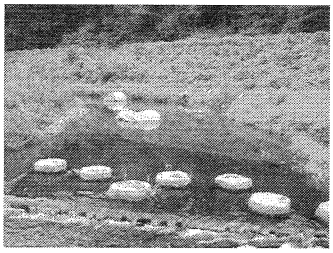
※Ⅰ　きれいな水，Ⅱ　少し汚い水，Ⅲ　汚い水

リング調査により把握することは，今後の都市河川の整備を進める上でも有用であると考えられる．

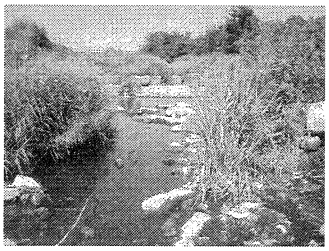
河川の水温変動についての研究は，これまでも精力的に行われてきた[1)～3)]が，都市河川の流域全体を対象とした研究事例は多くない．また，本研究で対象とする伊川では，底生生物の生息と水質や土地利用形態との関係について検討した研究[4)]があるが，整備完了後

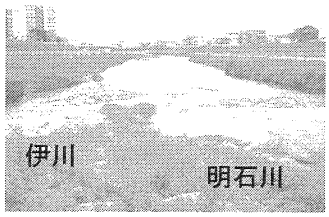
伊川源流（St.1）　　太山寺（St.2）





小寺橋（St.3）　　伊川下流（St.4）と明石川（St.5）





図－２　調査地点の様子

の水環境については十分な検討がなされていない．

そこで，本研究では，整備完了年の2006年度から2007年度にかけて行われた伊川における水生生物の生息状況と水温の季節変動特性について報告する．

２．調査方法

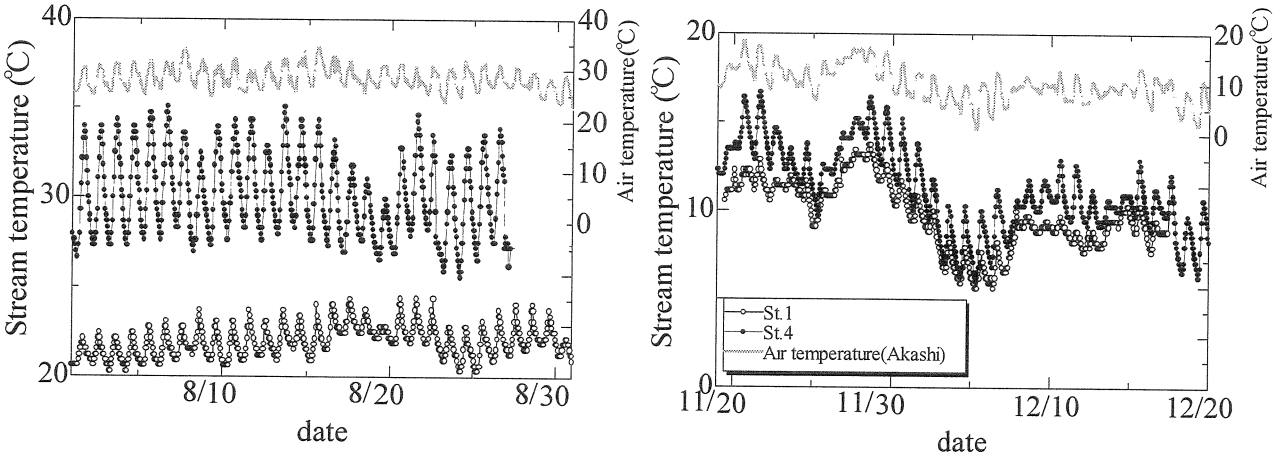
図－１に示すとおり，伊川源流から明石川との合流点間で５つの調査地点を設けた．各調査地点の特徴を**表－１**に，その様子を**図－２**示す．

2.1 水生生物調査　各調査地点において，河床材を採取し，ふるい（ふるい目2㎜）をかけ，ふるいにとどまった水生生物を現地でホルマリン固定した．これらの試料は研究室に持ち帰り，実体顕微鏡を用いて同定を行った．また，魚類等は市販の昆虫網を用いて捕獲した．なお，本研究では出現種の実態把握を目的としたため，定量的な把握には至っていない．

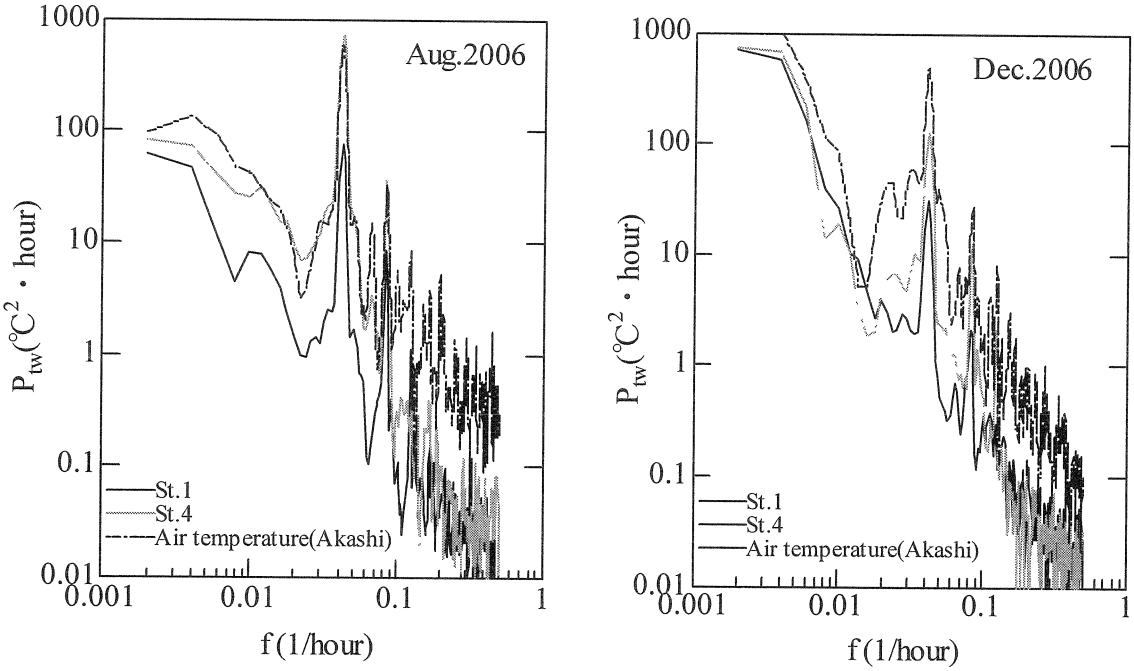
2.2 河川水温連続モニタリング調査　各調査地点に自記録式水温計（TidpiT，onset社製）を設置し，30分間隔で河川水温を計測した．

３．調査結果

3.1 水生生物調査結果　**表－２**に水生生物調査の結果を示す．本表は2006年度の３回の調査（8月18日，9月2日，10月25日）で生息が確認された生物をまとめたものである．水質階級は，国土交通省の「水生生物による水質の簡易調査」によって分類している．出現種類数が最も多かったのは伊川源流（St. 1）で，流下するにつれ



図－３　河川水温と気温の経時変化（左：2006 年夏季，右：2006 年冬季）



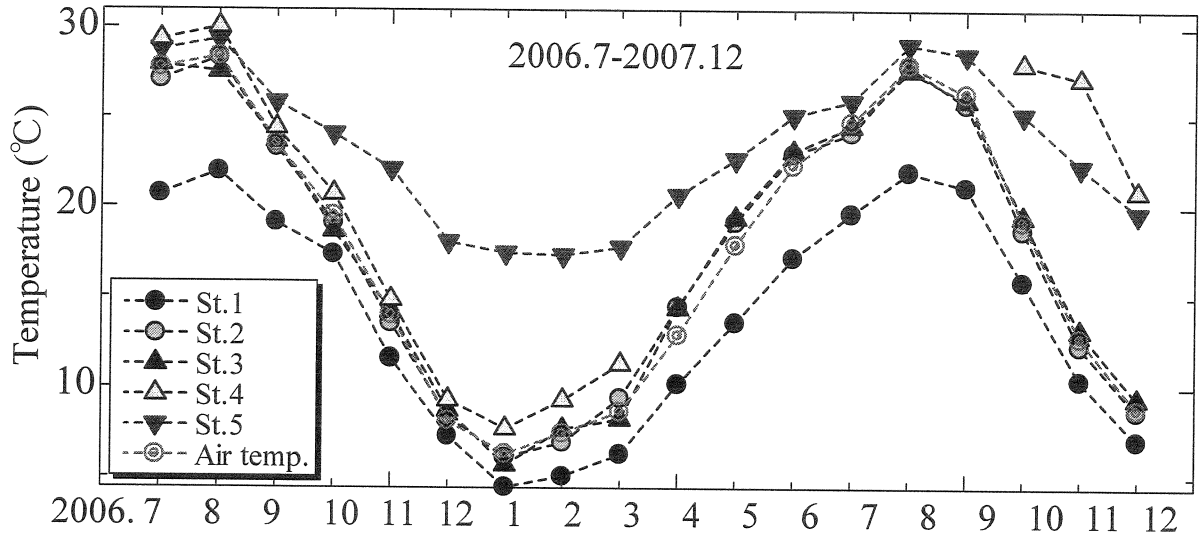
図－４　水温変動時系列のパワースペクトル（左：2006 年夏季，右：2006 年冬季）

て出現種が少なくなっていることがわかる．特に，伊川・明石川合流点（St. 4 と St. 5）では，河床がコンクリートで固められているために，底生生物の生息はほとんど確認できなかった．

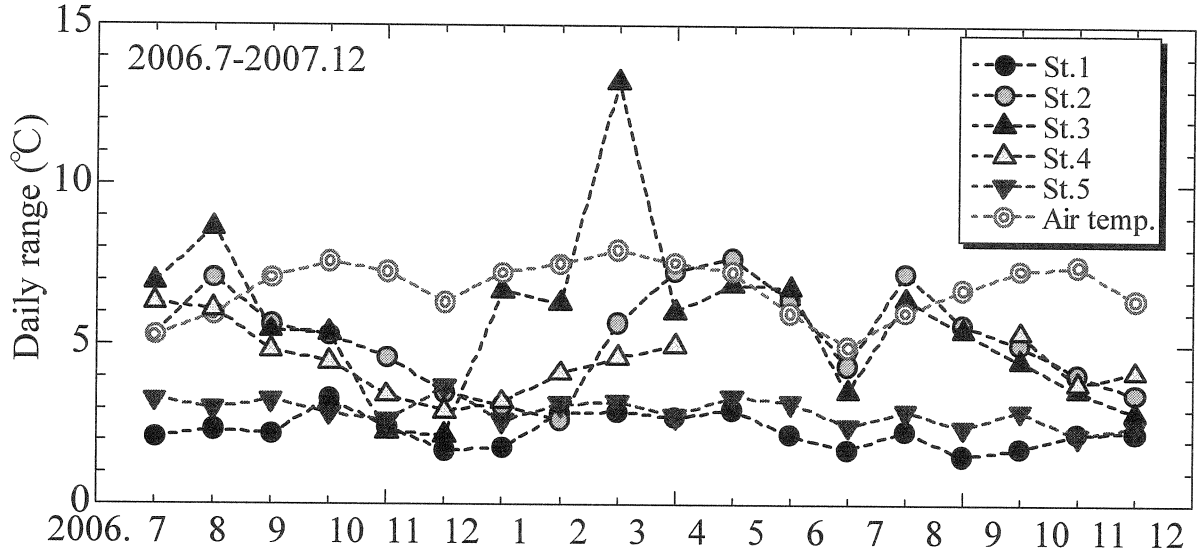
伊川源流（St. 1）では，カワゲラ，ムカシトンボ，ヘビトンボ，サワガニといった「きれい水」を好むとされる生物が多数生息していた．これらの生物は太山寺より下流の調査地点では発見されていないことから，ここでの水質が人為的な影響を受けることなく，極めて良好な状態に保たれていることがわかる．

太山寺（St. 2）では，ヒルやミズカマキリといった「汚い水」に生息するとされる指標生物が出現していた．この理由として，周辺集落からの排水流入が考えられるほか，この付近は淵が多く他の地点に比べ流水の滞留時間が長いために水質が悪化しやすいことが考えられる．特に河川流量の少ない夏季には局所的ではあるが水面が泡立ち，見た目にも濁りが確認できるほどであった．

小寺橋（St. 3）では，シマトビケラを除いては「少し汚い水」「汚い水」に生息するとされる指標生物が多く採取された．太山寺（St. 2）と比較して流れも速く，また側方から農業用水の流入があることから，この地点は水温変動の激しいところであり，生物の定住には適さない．



図－５　月平均水温（気温）の経時変化（2006 年 7 月～2007 年 12 月）



図－６　水温（気温）日較差の経時変化（2006 年 7 月～2007 年 12 月）

伊川・明石川合流点（伊川側：St. 4，明石川側：St. 5）では，外来種であるブルーギルの生息が確認された．この地点ではいずれの調査においても本種の出現が確認されたことから，本種が下流域の優占種となり，地域固有の生態系を脅かす存在になっていることが懸念される．

なお，ミナミヌマエビ及びカワムツについては，全調査区間で生息が確認されており，両種は伊川流域に幅広く生息していることがわかった．

3. 2 河川水温連続モニタリング調査結果　**図－３**に夏季および冬季の河川水温（St. 1：伊川源流，St. 4：合流点（伊川側））と気温（明石）の経時変化を示す．

夏季では，伊川源流と合流点（伊川側）で 10℃程度の水温差がみられる．この原因として，伊川源流では樹木が繁茂し，太陽からの水面への熱供給が遮断されることが考えられる．そのため，伊川源流は下流に比べて日較差が小さく，水温は安定している．前節の水生生物調査では伊川源流が最も出現種が多かったが，こうした水温の定常性が多様性を維持するひとつの要因となっているものと思われる．

一方，冬季では，伊川源流と合流点（伊川側）との水温差はほとんどみられない．また，この時期は冷却過程にあるため，時間の経過とともに水温が低下していく様子が示されている．

次に，水温変動を統計的に解析するために，これらの地点における水温時系列データのスペクトル解析を行った．**図－４**に夏季と冬季における伊川源流（St. 1），合流点（伊川側）（St. 4），気温の時系列データの周波数スペクトルを示す．いずれの季節とも河川水温，気温ともに

24時間周期（周波数0.04（1/hour）程度）が卓越しており，日周成分が変動の大部分を占めていることがわかる．

次に，伊川における水温の時間的，空間的変化を把握するため，各調査地点の月平均水温と月平均日較差の経時変化を整理した．

図－5に，各調査地点における月平均水温（気温）の経時変化（2006年7月～2007年12月）を示す．全期間にわたり，伊川源流（St. 1）の水温が最も低い値を示していた．また，気温と中・下流点（St. 2～St. 4）の水温は極めて似た変動傾向を示していた．伊川源流（St. 1）と中・下流点（St. 2～St. 4）の水温を比較すると，夏季に8℃程度あった水温差が，冬季には3℃以下になっていることがわかる．一方，明石川（St. 5）の平均水温は下水処理水の流入の影響を受けて，冬季でも18℃以上を保っており，日平均水温の季節変化が小さいことが特徴としてみられる．

図－6に各調査地点における水温（気温）日較差の経時変化（2006年7月～2007年12月）を示す．2007年3月の小寺橋（St. 3）で水温の日較差が13℃以上と極めて高い値を示しているが，この地点はもともと水深が浅く，冬季の渇水時に水温計が干出していた可能性が考えられる．伊川の各地点（St. 1～St. 4）では，夏季から冬季にかけて水温の日較差が小さくなる傾向がみられた．一方，明石川（St. 5）における水温の日較差は3℃程度で，年間を通じて安定していた．

4．数値計算による水温変動の再現

4.1 モデルの概要

1次元不定流計算モデル[5]と熱収支モデル[6]を組み合わせて，河川水温の時間変動の再現モデルを作成した．基礎式は，以下に示す1次元不定流の連続式，運動式と1次元熱収支式を用いた．

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_M\frac{\partial Q}{\partial x}\right)-gA\left(\frac{\partial H}{\partial x}+I_E\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial (AT)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(QT)=\frac{\partial}{\partial x}\left(AD_H\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\phi_S-(\phi_b+\phi_c+\phi_e)}{\rho_w c_p h}A \tag{3}$$

ここに，t：時間，A：流積，T：水温，x：流下方向を正とする座標，Q：流量，H：水位，I_E：エネルギー勾配，D_H：運動量の分散係数，D_w：水温の分散係数，ρ_w：水の密度，c_p：水の比熱，ϕ_s：吸収日射量，ϕ_b：有効長波放射量，ϕ_c：大気と水面間の顕熱輸送量，ϕ_e：水の相変化に伴う潜熱輸送量，h：水深，g：重力加速度である．

式（1）は，側方からの流入流量を無視したものとなっている．また，式（3）の右辺第2項においては，河床面との熱移動や降雨の影響を考慮するのが望ましいが，本モデルでは考慮していない．

吸収日射量ϕ_sについては，アメダスデータ（観測地点：大阪）の全天日射量ϕ_{s0}と雲量n（$0\le n\le 1$）を用いて，次式で算定した．

$$\phi_s=0.93(1-0.67n)\phi_{s0} \tag{4}$$

有効長波放射量ϕ_bについては以下に示す雲量を考慮したBrunt-山本式で算定した．

$$\phi_b=\phi_{b0}(1-cn^2)+4S\sigma\theta_w^3(T_w-T_a) \tag{5}$$

ここに，ϕ_b：Bruntの経験式より得られる有効長波放射量，$c=0.65$（中緯度地方での定数），n：雲量（$0\le n\le 1$），S：黒体度（= 0.97），σ：ステファンーボルツマン定数（$=5.67\times10^{-8}\mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}$），$\theta_w$：水温（絶対温度），$T_w$：水温，$T_a$：気温である．

顕熱輸送量ϕ_cについては，式（6）から求めた．

$$\phi_c=K_c(T_w-T_a) \tag{6}$$

ここで，K_cは，乱流熱伝達係数であり，以下に示すFaureの実験式で計算される．

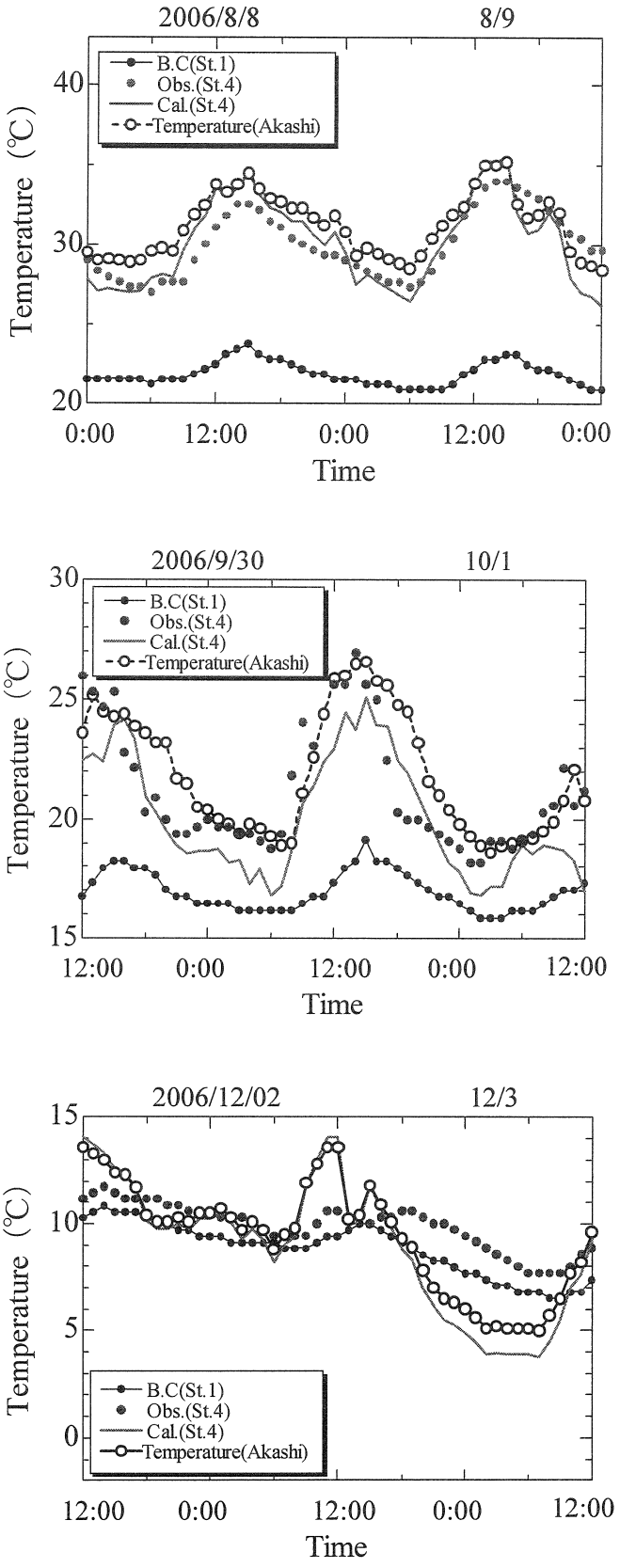
$$K_c=2.77\times10^{-4}(0.48+0.272W_h) \tag{7}$$

ここに，W_h：平均的な海面上の風速（本研究では気象庁アメダスデータを近似的に使用した）である．

潜熱輸送量ϕ_eについては，顕熱輸送量ϕ_cとBowen比Bから算定した．

$$\phi_e=\frac{1}{B}\phi_c \tag{8}$$

これら熱収支量の算定に必要な気温，気圧，風速データは，アメダスデータ（観測地点：明石 or 神戸）を使用した．一方，不等流計算に必要な水位データについては国土交通省「川の防災情報」（http://www.river.go.jp/）で公開されている時間水位（河川名：伊川，観測所名：伊川谷（県））を用いた．また，流量は著者らの現地観測結果から，簡易的に水位ー流量曲線を作成し，これを用いて算定した．



図－7　水温変動の再現計算結果
（上段より夏季・秋季・冬季）

4.2 水温変動再現計算の結果　　**図－7**は，夏季・秋季・冬季の晴天日の伊川下流（St.4）における計算結果を示したものである．各図には，境界条件に用いた伊川源流（St.1）と気温（明石）についても併記した．

夏季の再現結果についてみると，日中のピーク水温が実測値に比べて若干高く出る結果となっているが，概ね良好な再現結果となっている．

秋季の再現結果については，夏季とは反対に，日中のピーク水温が実測値に比べて若干低く出る結果となっているが，概ね良好な再現結果となっている．

冬季の再現結果については，実測値に比べて日較差が大きく，夏季や秋季と比べて，低い再現結果となっていた．局所的な気温や風速等の気象データを用いていないことや，支川等からの流入水の影響を無視していること等，モデル改善の余地を残すものの冬季を除いては，ある程度の再現性を得ることができたものと思われる．

5．まとめ

本研究では，神戸市内を流れる2級河川「伊川」の水生生物の生息状況および河川水温の時空間変動の一端を把握することができた．本河川で進められた多自然型の河川整備は2007年春に完了したばかりであり，今後も継続的なモニタリング調査によって，整備効果を定量的に把握していきたいと考えている．

謝辞

本研究は神戸高専共同研究費（奨励研究）の助成を受けて行われた．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1）佐渡公明・杉山一郎：河川水温に影響する水理・気象要素に関する基礎的研究，水工学論文集，第44巻，pp.1257-1262，2000.
2）岡部健士・竹林洋史：正木ダム減水区間における水温分布特性とその改善案の検討，水工学論文集，第49巻，pp.1183-1188，2005.
3）宮本仁志・道奥康治：流域水温の連続観測と解析，水工学論文集，第51巻，pp.1105-1110，2007.
4）小谷英之・辻本剛三ら：神戸市内の河川における水生昆虫と河川環境との関わり，河川技術論文集，第8巻，pp.289-294，2002.
5）北海道開発局土木試験所・編：現場のための水理学，pp.23-33，1988.
6）松梨順三郎　編著：環境流体汚染，森北出版，pp.177-180，1993.

集約型都市の形成と環境影響に関する研究
－地下鉄沿線の交通流動変化－

橋本　渉一*　　福西　佑紀**

Relation Between Compact City Formation and Environment Pollution
－Traffic Flow Shift along Kobe City Subway－

Shoichi HASHIMOTO*　Yuuki FUKUNISHI**

ABSTRACT

In Kobe City, urban area is developed and traffic lines are extended for the west and north direction of the city from the 1970s. In 1995 Hanshin-Awaji Earthquake struck Kobe areas, a population has decreased about hundred thousands at the whole city, then has recovered ten years after. However Hyogo-ward, Nagata-ward where old urban district has been developed, a population has not been recovered. Kobe city new metro Kaigansen-line opened in 2002, actual transport density is less shortened than demand expectation. It is presumed that a population density at the residence area along Kaigansen-line grow up to the level of the standard population density in Kobe urban area. There are two cases, a population grows at inner city area or suburban area. The effect of carbon dioxide discharge and energy consumption is calculated.

Key Words : compact city, inner city, urban redevelopment, public transportation, kobe city

１．はじめに

神戸市においては約 25 年前から市街地の北西部郊外の西神ニュータウンの整備が進められ，西区方面への市街地開発を進めてきた。この結果，市街地中心付近に職住混在した都市形態から，鉄道および道路網の整備に伴い郊外地へ住居地域を拡充したいわゆる拡散型都市形態へと変化がみられた。

中心部に比べ地価が安く環境が良い都市外延部の土地に住居地域が設定され，通勤地となる商業・工業地域への交通量は，都市の規模が拡大するほど多くなっている。その一方従来に形成された旧市街地においては，夜間人口の流出がみられ，それに伴い商業地も低密度となるいわゆるインナーシティ問題が発生し，市街地の活力が失われることになっている[1) 2) 3)]。

1972 年ローマクラブのレポートで使われた sustainability(持続可能性)という言葉を用い，近年サスティナブルシティーという概念が提唱されている。拡散型都市の構築に伴う交通トリップの増大は，交通エネルギー消費および環境負荷の面からも好ましくはない。これに対し業務、文化施設等の都市機能が元々集積している地域に住居地域，商業地域が近接し，徒歩圏内で生活可能なように再び中心部に近い市街地の活性化を図り，持続可能な集約型都市構造を持つコンパクトシティーは，このサスティナブルシティーの一つの形態と考えられる。

第 2 次世界大戦以前から既に市街地が形成されていた兵庫区，長田区の南部では商工業および住居が混在した地域であったが，1995 年 1 月の阪神淡路大震災において多くの家屋が被害を受け，人口減少が避けられなくなりインナーシティ問題の発生がみられている。

本研究では，神戸市営地下鉄海岸線沿線における人口増加を想定し，西神線沿線の市街地開発地域での同人口増の場合と増加交通量を想定し，交通機関のエネルギー消費量および二酸化炭素排出量の面から環境へ影響を比較することを目的としている。

２．運輸部門における CO_2 排出と施策[4)]

1997 年 12 月に気候変動枠組条約第 3 回締約国会議で採択された京都議定書において，我が国は二酸化炭素を含む温室効果ガスの排出量を 2008～2012 年に基準年（1990 年）から 6%削減することが定められた。

環境省のデータによると、我が国の温室効果ガス排出量は、13 億 6,400 万トン（2005 年度）と京都議定書の基準年比 8.1%増で，このうち CO_2 排出量は 12 億

＊　都市工学科　教授
＊＊　東京大学工学部（平成19年度都市工学科卒）

9,700 万トンと基準年比 13.3%増となっている。運輸部門については、2001 年度以降減少傾向を示しているが、2 億 5,700 万トン（2005 年度）と基準年比 18.1%増で，削減に向けた対策が求められている。

我が国全体の CO_2 排出量の 2 割を占める運輸部門は、自動車に起因するものが排出量の約 9 割を占めている。特に 2004 年の CO_2 排出状況を 1990 年の排出状況と比べると、自家用乗用車からの排出量は走行距離・車両の増加等により 48%増と増加している。

自家用乗用車から公共交通機関へのシフトは、自動車の走行量の削減につながり、地球温暖化対策の面からもその推進が求められている。このため利便性向上を通じた公共交通機関の利用促進や「環境的に持続可能な交通モデル事業」などへの支援が施策として進められている。

3．神戸市の人口変化

神戸市全体の人口変化を図１，２に示す。20 世紀初頭から順調に増加を見ていたが 1995 年の阪神淡路大震災によって約 10 万人の減少となり，その後 10 年を経て回復し現在まで漸増傾向を示している[5]。

西区および東灘区では現在の人口が最大値を示しており，その他の区ではいずれも過去に最大人口を示している。震災前後を比較すると，兵庫・長田・須磨・垂水区など第二次世界大戦後の商業活動，住宅供給を担ってきた地域で減少した状態が続き現在まで推移している。

市内町別の従業人口[6]と労働力人口[7]の差を図３に示す。昼間の従業人口が多い町は濃色で，夜間人口が多い町は淡色で示し，円の直径は両者の差すなわち日中の人口移動数を表わしている。東灘・中央・兵庫区の従来からの商業地と南部に工業地を含む地域に，昼間人口の増加地域が集中している。

市の北部，西部から中央区、兵庫区の中心市街地に向かう通勤交通が集中している。発生交通の上回る地域と集中交通の上回る地域の距離が短くなると，交通量（人キロ）は減少し，エネルギー消費および二酸化炭素排出も削減されることとなる。

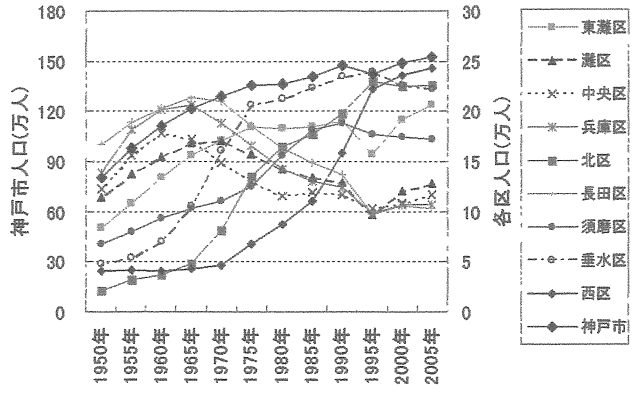


図１　神戸市の人口変化

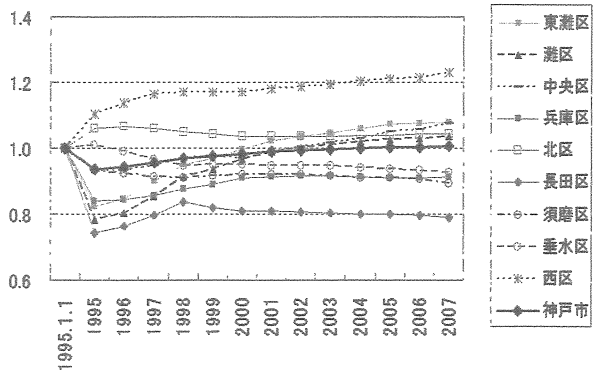


図２　震災後の人口変化

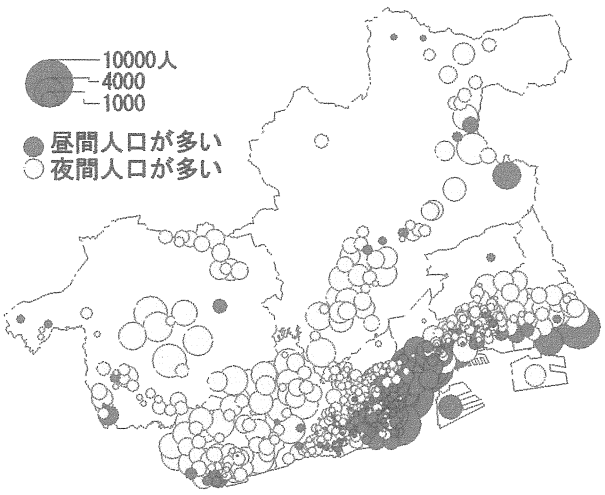


図３　「従業人口－労働力人口」の分布

4．集約型都市の人口

地下鉄海岸線の沿線地域における人口減少，商業の衰退，インナーシティ問題の発生が危惧されており，本研究では兵庫区，長田区内の同線沿線の駅勢圏において，コンパクトシティとしてまちづくりが進められた際に，市街地の再形成と人口回復が起こると仮定し，その場合に想定される増加人口を求める。

海岸線の西部 5 駅において駅を中心に 500m 以内を駅勢圏とし，その範囲内で丁内の大部分が含まれる用途地域は、商業地域、近隣商業地域、第一種住居地域、第二種住居地域、準工業地域、工業専用地域の 6 地域である[8]。ここで想定される増加人口を以下の手順で算出した。

4.1　市内用途地域別の平均人口密度

海岸線沿線の地域と類似性が見られる，東灘区から須磨区須磨浦公園および高尾山までの図4に示す灰色

の範囲を対象とし，現在の用途地域毎の平均人口密度を計算する。

国勢調査による町丁別の人口データと，神戸市の用途地域図から取得される面積データから，５駅の駅勢圏内に存在する６種類の用途地域の人口密度を求め，5 人/ha 以上の町丁から上位 90%の町丁を抽出した中で，平均人口密度を表１の通り算出した。

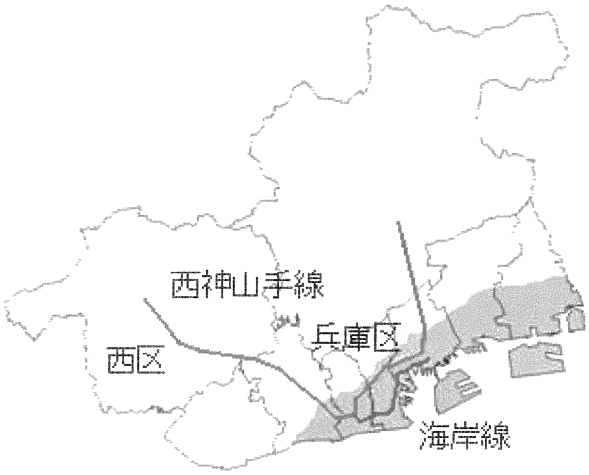


図4　人口密度計算データ取得範囲

表１　平均人口密度(人/ha)

1住居	2住居	近商	商業	準工	工業
206	152	208	141	106	109

4.2　海岸線沿線の予想回復人口

地下鉄海岸線は震災後の沿線人口の減少も影響し，建設時の計画輸送人員に対し，平成 17 年度の実績輸送人員は約３割に留まっている[9]。将来的に集約型都市として沿線人口は再び回復する場合には，現在の神戸市内の同じ用途地域における平均人口密度のレベルまで回復する可能性があると考え，沿線各駅の駅勢圏内の各用途地域面積と神戸市内の用途地域毎平均人口密度から，増加人口の予測値を算出した。

集約型都市における予測人口と現在人口を比較した結果，苅藻駅と駒ヶ林駅の駅勢圏内においては，既に現在の人口密度が市内平均人口密度を上回っており，これら地域では震災後も密度の高い住居地域が形成されていることが確認された。これら駅周辺では既に市街地が整備されており、駒ヶ林駅と苅藻駅の駅勢圏人口増加はないものとした。

それ以外の中央市場前・和田岬・御崎公園の駅勢圏内の予測人口は，表２の通り現在人口のおよそ 1.25 倍となった。

表２　予測駅勢圏人口

	予測人口（人）	現在人口（人）	差（人）	人口増加比率
中央市場前	4308	3353	955	1.285
和田岬	4262	3429	833	1.243
御崎公園	7550	6034	1516	1.251
苅藻	3218	3219	-1	1.000
駒ヶ林	6889	7809	-920	0.882

５．増加トリップ数の算出

集約型都市構造の有用性を検討するため，市営地下鉄海岸線沿線において中央市場前・和田岬・御崎公園の各駅勢圏で集約型都市が形作られ，神戸市内他地域の平均人口密度まで人口増加がみられた場合と，一方現在の郊外部住宅開発が継続され，その同数の増加人口が西神山手線沿線で開発中の西神南ニュータウンに吸収された場合を検討対象とし，その2ケースの鉄道交通および自動車交通トリップの増加量を，仮定を設け予測し比較する。

図５に示す通り，①人口と相関の高いトリップ項目，②鉄道および自動車の交通手段別割合，③増加可能人口と増加交通量，④地下鉄および道路の増加交通量，の４ステップの手順で算出した。

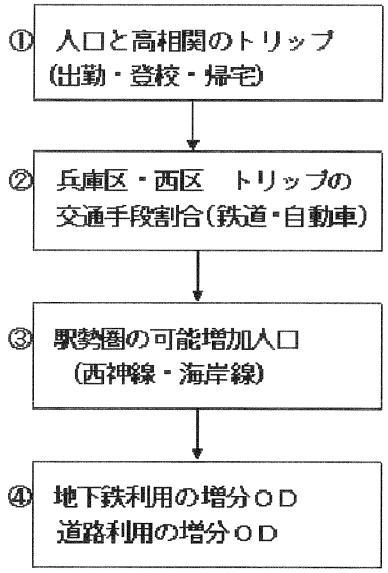


図5　地下鉄・道路トリップの増加予測計算

5.1　人口と相関の高い交通トリップ

パーソントリップ調査結果 [10]から神戸市内各区人口と発生および集中トリップの相関係数を求めた結果を表３に示す。出勤と登校の発生トリップ，帰宅の集中トリップは人口との相関係数が非常に高い値を示している。

表３　区別人口と目的別交通量の相関係数

	人口	従業者数	発生トリップ					
			出勤	登校	自由	業務	帰宅	計
東灘区	191309	79341	67033	31749	133098	45442	178862	456184
灘区	120518	41607	42302	19093	84186	32866	109447	287894
中央区	107982	231779	45868	13963	174402	136468	322978	693679
兵庫区	106897	81796	37670	12303	77464	43401	124509	295347
長田区	105464	47840	35486	12619	64435	26551	89304	228395
須磨区	174056	36790	59419	28831	107329	27321	135453	358353
垂水区	226230	37383	74933	36326	136620	23114	138256	409249
西区	235758	79535	81697	49316	140742	35286	205546	512587
北区	225184	41233	72988	39544	122881	31115	147575	414103
	人口との相関係数		0.985	0.975	0.452	-0.410	0.020	0.238
	従業者数との相関係数		-0.225	-0.336	0.621	0.985	0.909	0.799

	集中トリップ					
	出勤	登校	自由	業務	帰宅	計
東灘区	62466	39324	123130	44138	187690	456748
灘区	33662	29196	77112	31081	116773	287824
中央区	187077	23505	230047	149260	104212	694101
兵庫区	67703	9915	72522	44313	100231	294684
長田区	34905	16770	57506	25792	93584	228557
須磨区	29039	32489	106216	25668	165106	358518
垂水区	23149	27191	123909	20782	214167	409198
西区	62673	49532	135104	33716	231240	512265
北区	30386	32126	117482	27947	205308	413249
人口との相関係数	-0.397	0.755	0.144	-0.425	0.996	0.237
従業者数との相関係数	0.999	-0.121	0.826	0.986	-0.342	0.799

人口：平成12年国勢調査，従業者数：平成13年統計調査，トリップ：平成12年PT調査

5.2　人口比例する交通手段別トリップ

2000 年度京阪神都市圏パーソントリップ調査データ [10] を元に，①ステップで求めた兵庫区，西区における人口と相関の高い３種のトリップデータから主要交通手段別構成割合は，表４の通り算出された。

表４　人口比例の手段別交通量

		鉄道	バス	自動車	二輪	徒歩	その他	計
出勤発生	兵庫区	10141	3659	8964	8913	5993	0	37670
		26.9	9.7	23.8	23.7	15.9	0	100
	西区	32693	2623	34738	7053	4511	79	81697
		40	3.2	42.5	8.6	5.5	0.1	100
登校発生	兵庫区	3281	450	137	1409	7026	0	12303
		26.7	3.7	1.1	11.5	57.1	0	100
	西区	14150	1970	2394	3499	27303	0	49316
		28.7	4	4.9	7.1	55.4	0	100
帰宅集中	兵庫区	17114	7910	17676	21443	36088	0	100231
		17.1	7.9	17.6	21.4	36	0	100
	西区	52624	9981	82162	25683	60355	435	231240
		22.8	4.3	35.5	11.1	26.1	0.2	100
合計	兵庫区	30536	12019	26777	31765	49107	0	150204
		20.3	8.0	17.8	21.1	32.7	0	100
	西区	99467	14574	119294	36235	92169	514	362253
		27.5	4.0	32.9	10.0	25.4	0.1	100

上段：トリップ
下段：構成割合(%)

5.3　人口増による鉄道・道路増加交通

兵庫区内海岸線沿線の３駅の駅勢圏で予想される増加人口と，ステップ②で求めた交通手段別トリップ割合から，鉄道および自動車の増加トリップを表５に示す。

上記の海岸線沿線３駅における増加人口が，西神線西神南駅の駅勢圏で増加した場合の，鉄道および自動車の増加トリップも同じく表５に示す。

表５　交通手段別増加利用者

	人口増加区	人口増加駅	増加人口	増加交通量	増加鉄道利用者	増加自動車利用者
集約型都市	兵庫区	中央市場前	955	1342	273	239
		和田岬	833	1170	238	209
		御崎公園	1516	2130	433	380
		合計	3303	4642	944	827
現状開発	西区	西神南	3303	5076	1394	1672

5.4　地下鉄および道路交通の将来ＯＤ

将来増加した人口による地下鉄利用の発生・集中トリップは，現在の地下鉄ＯＤ表と同パターンで増加するするものと仮定し，神戸市営地下鉄駅間の現在ＯＤ表を元にして，駅間の分布交通量を配分計算した。

海岸線３駅利用者の増加分の分布交通量を表６-1に，西神線西神南駅利用者の増加分の分布交通量を表６-2に示す。

また人口増加による自動車利用の増加交通量は，地下鉄駅間の現在ＯＤ表を元に各駅勢圏を出発地および目的地と見なし，この間を自動車移動するものと仮定し鉄道利用と同様に分布交通量を配分計算し求めた。

６．環境への影響評価

人口増加による増加トリップは，将来ＯＤ表の分布交通量として表される。地下鉄利用トリップに対しては地下鉄駅間距離 [11] を用いて総移動交通量（人・km）を求め，道路利用トリップに対しては各駅間を道路移動した場合の距離を表７に示す通り算出し，総移動交通量（人・km）を求めた。

地下鉄および自動車の単位交通量あたり二酸化炭素排出原単位 [12] は，表８-1 で与えられている。同様に単位交通量あたりエネルギー消費原単位 [13] は表８-2 で与えられている。

兵庫・長田区あるいは西区の人口増にともなう地下鉄および自動車の増加交通量と，上記の原単位から二酸化炭素排出量とエネルギー消費量を算出し，その差から集約型都市による１日当たりの期待される削減量を表９に示す。

７．まとめ

集約型都市への転換が図られた場合の増加交通量と，現状の開発が継続された場合に予測される増加交通量を計算し、それから二酸化炭素排出量および交通エネルギー消費量への影響を検討した。

本研究を進める各段階において明らかになったことは以下の通りである。

表６-1　海岸線の増加予測トリップ

地下鉄増加OD

集中 / 発生	谷上	新神戸	三宮	県庁前	大倉山	湊川公園	上沢	長田	新長田	板宿	妙法寺	名谷	総合運動公園	学園都市	伊川谷	西神南	西神中央	三宮・花時計前	旧居留地　大丸前	みなと元町	ハーバーランド	中央市場前	和田岬	御崎公園	苅藻	駒ヶ林	新長田	合計
谷上																						1	2					3
新神戸																						1	3	1				5
三宮																												
県庁前																												
大倉山																												
湊川公園																						1	1	4				6
上沢																						1		2				3
長田																						1	1					2
新長田																												
板宿																						8	10	17				35
妙法寺																						12	8	19				39
名谷																						13	12	29				54
総合運動公園																						2	2	9				13
学園都市																						7	10	16				32
伊川谷																						1	2	5				8
西神南																						3	7	8				18
西神中央																						13	14	23				50
三宮・花時計前																						71	63	109				244
旧居留地・大丸前																						15	7	21				42
みなと元町																						9	4	8				21
ハーバーランド																						69	62	83				213
中央市場前	1	2						1		8	10	12	3	7	1	1	10	76	19	9	73		3	4	3	9	18	271
和田岬	2	3				1		1		12	8	13	3	7	2	7	14	59	13	4	63	2		1	1	3	21	240
御崎公園	4	1		1	3	3	2			17	19	21	9	13	5	5	21	102	25	9	83	5	2		1	11	68	432
苅藻																						4	1	3				7
駒ヶ林																						8	3	13				23
新長田																						26	26	57				109
合計	7	7		1	3	4	3	2		37	37	47	14	28	8	13	44	237	57	22	220	272	241	432	4	24	107	1871

表６-2　西神線の増加予測トリップ

地下鉄増加OD

集中 / 発生	谷上	新神戸	三宮	県庁前	大倉山	湊川公園	上沢	長田	新長田	板宿	妙法寺	名谷	総合運動公園	学園都市	伊川谷	西神南	西神中央	三宮　花時計前	旧居留地　大丸前	みなと元町	ハーバーランド	中央市場前	和田岬	御崎公園	苅藻	駒ヶ林	新長田	合計
谷上																5												5
新神戸																30												30
三宮																505												505
県庁前																36												36
大倉山																25												25
湊川公園																44												44
上沢																12												12
長田																31												31
新長田																110												110
板宿																70												70
妙法寺																32												32
名谷																97												97
総合運動公園																16												16
学園都市																84												84
伊川谷																28												28
西神南	8	33	493	56	28	42	12	32	118	66	23	78	25	92	26		205	1	2	3	12	2	26	6	4	1		1394
西神中央																210												210
三宮・花時計前																1												1
旧居留地・大丸前																4												4
みなと元町																4												4
ハーバーランド																14												14
中央市場前																1												1
和田岬																27												27
御崎公園																4												4
苅藻																2												2
駒ヶ林																1												1
新長田																												
合計	8	33	493	56	28	42	12	32	118	66	23	78	25	92	26	1394	205	1	2	3	12	2	26	6	4	1		2787

表7　地下鉄駅間を道路利用した場合の距離表

	谷上	新神戸	三宮	県庁前	大倉山	湊川公園	上沢	長田	新長田	板宿	妙法寺	名谷	総合運動公園	学園都市	伊川谷	西神南	西神中央	三宮・花時計前	旧居留地・大丸	みなと元町	ハーバーランド	中央市場前	和田岬	御崎公園	苅藻	駒ヶ林	新長田
西神南	18.8	17.3	21.1	20.4	19.2	18.3	17.2	16.4	17.5	12.7	9.6	7.4	5.0	3.3	1.7		2.6	18.7	20.9	20.0	19.6	18.8	19.6	18.7	17.8	18.2	17.5
中央市場前	13.1	5.1	3.9	3.1	2.3	1.8	2.8	3.2	3.7	4.4	7.7	10.3	11.4	13.0	17.7	18.8	20.7	3.6	3.1	2.3	1.3		1.2	2.1	3.0	3.8	3.7
和田岬	14.2	6.2	5.1	4.3	3.5	2.9	3.1	3.4	3.4	4.7	8.5	11.1	12.2	13.8	18.5	19.6	22.5	4.8	4.2	3.5	2.5	1.2		1.0	1.8	2.6	3.3
御崎公園	15.2	7.2	6.0	5.3	4.5	3.9	3.3	2.4	2.4	3.7	7.6	10.1	11.2	12.9	17.6	18.7	21.5	5.8	5.2	4.4	3.5	2.1	1.0		0.9	1.6	2.4

表８-1　二酸化炭素排出原単位[12)]

	二酸化炭素排出原単位 ($g-CO_2$/人km)
地下鉄	10.8
自家用乗用車	192.2

表８-2　エネルギー消費原単位[13)]

	エネルギー消費原単位 (MJ/人km)
鉄道	0.187
自家用乗用車	2.289

表９　集約型都市構造による削減効果(１日)

		集約型	現状開発	削減効果
交通量 (人km/日)	鉄道	10170 29%	35408 100%	25238 71%
	道路	9660 20%	48038 100%	38378 80%
二酸化炭素排出量 (ton)	鉄道	0.11 29%	0.38 100%	
	道路	1.86 20%	9.23 100%	
	計	1.97 20%	9.62 100%	**7.65** 80%
エネルギー消費量 ($GJ=10^9J$)	鉄道	1.90 29%	6.61 100%	
	道路	22.12 20%	109.97 100%	
	計	24.01 21%	116.58 100%	**92.57** 79%

①　神戸市における昼間人口の分布と夜間人口の分布状況の差から，市の北西部から神戸港に面する従来から市街地を形成する中央区，兵庫区方面へのトリップの多いことが明らかになった。

②　旧市街地をほぼカバーする広範囲内の各用途地域別の平均人口密度の値を明らかにした。

③　海岸線沿線の駒ヶ林駅と苅藻駅の駅勢圏内では，現状で市内平均の人口密度を上回っている。

④　インナーシティ部で集約型都市が形成された場合に可能な人口を求め，それによる鉄道・道路発生交通量を仮定の下に求めた。またこの増加人口が現在開発が行なわれている西区海岸線沿線に居住した場合の，鉄道・道路発生交通量を仮定の下に求めた。

⑤　④の計算結果より集約型都市では拡散型都市と比較して鉄道交通量で約７割、自動車交通量で約８割の減少となった。

⑥　⑤の交通量から集約型都市では拡散型都市と比較して，二酸化炭素排出量，交通エネルギー消費量ともに約８割の削減となった。

神戸市営地下鉄の２路線を対象とした試算例を示した。中心市街地の活性化効果を検討するためには交通量変化の他，商業地形成の変化なども検討要素として加える必要があると考えられる。

本研究を進めるにあたり神戸市交通局から神戸市営地下鉄駅間のＯＤデータの提供を受けたことを記し，ここに謝意を表します。

参考文献

1)蓑原敬・河合良樹・今枝忠彦　「街は要る　中心市街地活性化とは何か」　学芸出版社、2000年

2)財団法人　都市計画協会「コンパクトなまちづくり改正まちづくり三法による都市構造改革」ぎょうせい、2007年

3)海道清信　「コンパクトシティ　―持続可能な社会の都市像を求めて」　学芸出版社、2001年

4) 国土交通白書2007（平成18年度年次報告）

5) http://www.city.kobe.jp/cityoffice/06/013/toukei/contents/18toukeisho.html
第83回神戸市統計書平成18年度版

6)http://www.city.kobe.jp/cityoffice/06/013/toukei/contents/shoutiiki.html
神戸の統計小地域の統計

7) http://www.stat.go.jp/data/roudou/2005n/ft/zuhyou/307010.xls
労働力調査基本集計　平成17年度平均近畿地方

8) http://www.city.kobe.jp/cityoffice/33/33/yoto/　神戸市用途地域の検索

9) http://www.city.kobe.jp/cityoffice/54/040/jigohyoka/houkokusyo.pdf　地下鉄海岸線事後評価報告書

10)http://www.keihanshin-pt.com/pt_h12/data/data.html　平成12年度京阪神都市圏パーソントリップ調査集計結果

11) http://www.city.kobe.jp/cityoffice/54/030/ryokin.htm
神戸市営地下鉄各駅間区数・距離・普通料金

12) 平成16年度版環境白書　図1-1-13

13) http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2006EnergyHTML/excel/i2102036.xls　2006年版エネルギー白書(第212-3-6)旅客輸送機関別エネルギー消費原単位の推移

授業アンケート結果から窺える学生気質

大多喜 重明*、長井 清香**

Student Character Inferred from The Result of Questionnaire about Class in KCCT

Shigeaki OHTAKI* and Kiyoko NAGAI**

ABSTRACT

We have questioned to students of KCCT (Kobe City College of Technology) to improve and devise the class methods. It was clarified from this questionnaire that the class according to student's understanding level made the point comprehensible and lead to increase the interest and the greediness for learning, and that student's comprehensive evaluation was high. It was showed that the class improvement advanced like that judging from the comparison of A4-E4 scatter charts of 2005 fiscal year and 2007 fiscal year.

It seems that it is thought that result of the questionnaire leads to the teacher's own self-evaluation, and the class questionnaire is effective to the education.

Moreover, a necessary approach in the Technical College about physics class is to decrease the alternation of the person in charge of the class.

Keywords: questionnaire, student, class, improvement, evaluation

1. はじめに

神戸高専(神戸市立工業高等専門学校)では、授業方法の改善・工夫を図り、効果的な授業を行うことを目的として、学生を対象とした授業に関するアンケートを平成 7 年度から行ってきた。平成 15 年度よりUNITY(大学共同利用施設)加盟高等教育機関の間で単位互換講座が開講され、平成 16 年度からは、本校教員の担当講座でも授業に関するアンケートが実施されるようになった。

現在、教育機関は様々な外部評価を受けるようになり、アンケート結果も様々な目的に使われるようになった。学生やその保護者だけでなく、学内外の多様な評価者に対し、どのような表やグラフが彼らの目的に的確に応え、また、分かり易いか検討し改善することが必要となった。

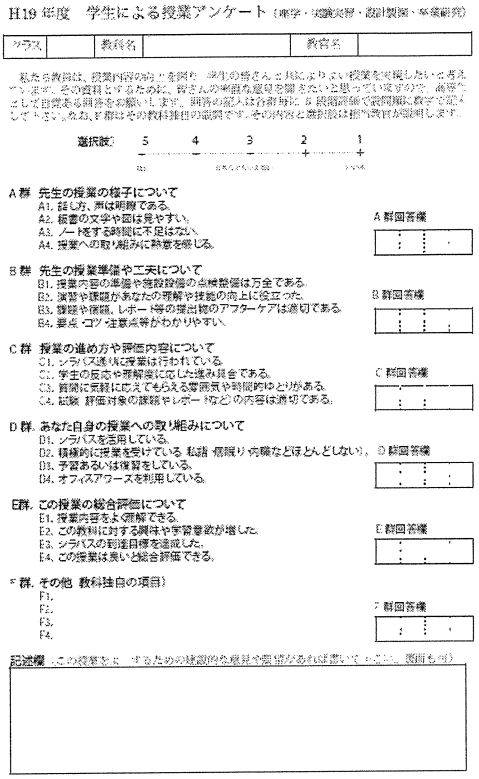
平成 17 年度のアンケート結果[1]等、公開された資料をもとに分析を行い、本校では順調に授業改善がなされていること、学生気質に学科間で差がみられたこと、UNITY の単位互換科目受講者と本科生の間には顕著な差がみられたことを日本高専学会第 13 回年会講演会で報告[2]した。

今回、学内公開された平成 19 年度のアンケート結果[3]を分析し、平成 17 年度の分析結果と比較・検討した。また、平成 15 年度から平成 19 年度までの物理の授業に関するアンケート結果をもとに、物理の授業改善についても調べ、検討した。その結果、受講学生の気質がアンケートに窺え、高い総合評価値を学生から得るためには、学生気質も考慮し、授業改善を進める必要があることが分かったので、これらについて報告する。

* 一般科 教授
** 無所属 博士（理学）

2. 授業アンケートの分析方法

平成19年度のアンケートは平成17年度と同時期に行われ、前期科目に関するアンケートは7月前半、通年科目と後期科目については翌年の1月後半の授業中に実施された。また、本校教員が担当するUNITYの単位互換講座でも、それに合わせて行われた。


H19年度　学生による授業アンケート（座学・実験実習・設計製図・卒業研究）

クラス　　教科名　　教官名

私たち教員は、授業内容の向上を図り、学生の皆さんと共によりよい授業を実現したいと考えています。その責務であるために、皆さんの率直な意見を聞きたいと思っています。つきましては、下記のアンケートに協力をお願いします。まず、科目の記入は各自割当て、5段階評価で該当欄に数字で記入してください。なお、D群はその教科担当の感想です。その内容と理由は自由な表現が可能です。

選択肢：5　4　3　2　1

A群　先生の授業の様子について
A1. 話し方、声は明瞭である。
A2. 板書の文字や図は見やすい。
A3. ノートをする時間に不足はない。
A4. 授業への取り組みに熱意を感じる。
A群回答欄

B群　先生の授業準備や工夫について
B1. 授業内容の準備や施設備品の点検整備は万全である。
B2. 演習や課題があなたの理解や技能の向上に役立った。
B3. 課題や宿題、レポート等の提出物のアフターケアは適切である。
B4. 要点・コツ・注意点等がわかりやすい。
B群回答欄

C群　授業の進め方や評価内容について
C1. シラバス通りに授業は行われている。
C2. 学生の反応や理解度に応じた進み具合である。
C3. 質問に気軽に応えてもらえる雰囲気や時間的ゆとりがある。
C4. 試験、評価対象の課題やレポートなどの内容は適切である。
C群回答欄

D群. あなた自身の授業への取り組みについて
D1. シラバスを活用している。
D2. 積極的に授業を受けている（私語・惰眠り・内職などほとんどしない）。
D3. 予習あるいは復習をしている。
D4. オフィスアワーズを利用している。
D群回答欄

E群. この授業の総合評価について
E1. 授業内容をよく理解できる。
E2. この教科に対する興味や学習意欲が増した。
E3. シラバスの到達目標を達成した。
E4. この授業は良いと総合評価できる。
E群回答欄

F群. その他（教科独自の項目）
F1.
F2.
F3.
F4.
F群回答欄

記述欄（この授業をより一層するための建設的な意見や要望があれば書いてください。裏面も可）

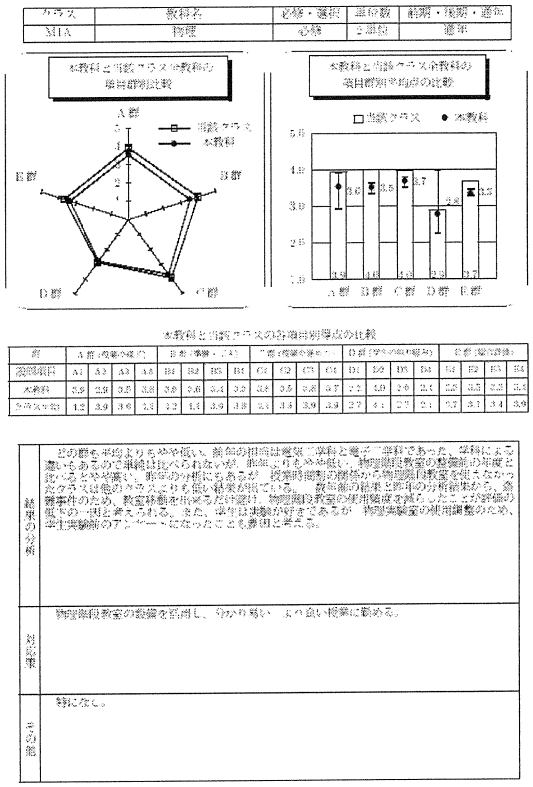
図1　座学他のアンケート用紙

図1は保健体育以外の授業科目用のアンケート用紙で平成19年度のものである。平成15年度から使われているものと同じである。各群4項目の6群(A～F)で構成され、F群の4項目は各教員が質問を設定することができる。また、A群とB群の設問は保健体育とそれ以外の科目で多少異なる。

アンケート集計は授業担当者ごとに行い、結果を分析し、対応策を提示する。図2は、平成17年度に学内公開されたデータの例である。A～E群の平均値のレーダーチャート、その棒グラフ、各項目の平均値、授業担当による結果の分析、対応策等が学内Webに公開されている。

学内公開されるデータの様式は、平成15年度から使われているもので、平成17年度と平成19年度についても、全く同じ様式である。

平成17年度に公開されたデータ総数は653（単位互換講座を含む）あり、平成19年度に公開されたデータ総数は687である。年度でデータ総数が異なるのは、開講期間が通年の授業科目を前期と後期で異なる教員が担当した場合、担当者ごとに授業アンケートを実施し、結果を担当者ごとに公開するからである。複数の教員で担当する授業科目数の多少で、公開されるデータ総数が増減する。


クラス　教科名　必修・選択　単位数　前期・後期・通年
M1A　物理　必修　2単位　通年

本教科と当該クラス全教科の項目別平均点の比較

本教科と当該クラス全教科の項目別平均点の比較

本教科と当該クラスの各項目別得点の比較

群	A群（授業の様子）				B群（準備・工夫）				C群（授業の進め方）				D群（学生の取り組み）				全群（総合評価）			
設問項目	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
本教科	3.9	3.9	3.5	3.8	3.8	3.6	3.4	3.6	3.8	3.8	3.7	3.7	4.0	3.6	3.1	3.5	3.8	3.5	3.8	3.8
クラス平均	4.2	3.9	3.6	4.1	4.2	4.1	3.9	4.0	4.1	3.9	3.9	3.9	3.7	4.1	3.7	3.1	4.2	3.9	4.1	3.9

結果の分析

この群も平均よりもやや低い。前年の担当は電気二学科と電子一学科であった。学科によって違いもあるので単純には比べられないが、前年よりもやや低い。物理演習教室の整備前の年度と比べるとやや高い。前年の分析にもあるが、授業時間割の関係から物理演習教室を使えないクラスは他のクラスに比べて低い結果が出ている。昨年前の結果と照らしの分析結果から、偶然事件のため、教室移動を余儀なくだけ。物理演習教室の使用頻度が減ったことが評価の低下の一因と考えられる。また、学生は実験が好きであるが、物理実験室の使用調整のため、学生実験時のアンケートにならないことも要因と考える。

対応策

物理演習教室の設備を活用し、分かり易い・楽しい授業に努める。

その他

特になし。

図2　公開データの例

公開されたデータの「本教科と当該学年の各項目別得点の比較」表の「本教科」欄に示されている項目別得点間の相関係数を求め、平成19年度の結果と平成17年度の結果とを比較・検討した。また、物理と化学について、E群(総合評価)の平均値のクラス依存性を調べ、平成18年11月度の神戸高専のFD学習会で報告したE群の平均値のクラス依存性と比較･検討した。

3. 分析結果

保健体育以外の本科生の科目について、アンケート項目間の相関係数を調べ、係数値が高い部分ほど薄くなるように濃淡をつけて得た表が、図3と図4である。図3は平成19年度の相関係数表であり、図4は平成17年度のものである。どちらの図もD群のエリアは濃い。これはD群の結果が他群の結果に関係しないこと

H19	先生の授業の様子				先生の授業準備や工夫				授業の進め方や評価内容				自身の授業への取り組み				授業の総合評価			
本科	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
A1	1.00																			
A2	0.72	1.00																		
A3	0.53	0.66	1.00																	
A4	0.81	0.67	0.55	1.00																
B1	0.73	0.72	0.60	0.78	1.00															
B2	0.66	0.69	0.59	0.75	0.83	1.00														
B3	0.65	0.70	0.64	0.76	0.79	0.91	1.00													
B4	0.73	0.77	0.65	0.78	0.81	0.87	0.88	1.00												
C1	0.54	0.53	0.39	0.58	0.68	0.69	0.62	0.63	1.00											
C2	0.68	0.73	0.76	0.75	0.76	0.83	0.86	0.89	0.64	1.00										
C3	0.63	0.67	0.72	0.70	0.73	0.80	0.82	0.79	0.58	0.89	1.00									
C4	0.57	0.58	0.55	0.62	0.68	0.78	0.80	0.79	0.65	0.81	0.74	1.00								
D1	0.03	0.10	0.05	0.05	0.11	0.16	0.17	0.20	0.22	0.21	0.14	0.20	1.00							
D2	0.44	0.44	0.28	0.46	0.50	0.63	0.50	0.55	0.50	0.51	0.51	0.45	0.20	1.00						
D3	0.08	0.16	0.07	0.10	0.13	0.34	0.25	0.25	0.22	0.23	0.19	0.21	0.43	0.48	1.00					
D4	0.03	0.12	0.07	0.10	0.11	0.19	0.22	0.20	0.11	0.20	0.17	0.14	0.49	0.19	0.55	1.00				
E1	0.60	0.66	0.62	0.69	0.69	0.80	0.79	0.86	0.61	0.86	0.76	0.80	0.24	0.55	0.29	0.19	1.00			
E2	0.64	0.66	0.60	0.73	0.75	0.88	0.83	0.86	0.63	0.84	0.80	0.77	0.25	0.64	0.36	0.26	0.89	1.00		
E3	0.52	0.60	0.57	0.62	0.64	0.75	0.75	0.76	0.70	0.78	0.70	0.73	0.38	0.53	0.36	0.27	0.84	0.83	1.00	
E4	0.74	0.74	0.68	0.81	0.82	0.89	0.88	0.92	0.68	0.90	0.84	0.82	0.18	0.58	0.26	0.20	0.88	0.91	0.80	1.00

図３　平成 19 年度本科の設問項目間の相関係数表模様

H17	先生の授業の様子				先生の授業準備や工夫				授業の進め方や評価内容				自身の授業への取り組み				授業の総合評価			
本科	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
A1	1.00																			
A2	0.67	1.00																		
A3	0.46	0.64	1.00																	
A4	0.80	0.65	0.53	1.00																
B1	0.70	0.70	0.60	0.78	1.00															
B2	0.66	0.64	0.57	0.75	0.80	1.00														
B3	0.67	0.64	0.58	0.76	0.77	0.86	1.00													
B4	0.74	0.75	0.64	0.80	0.79	0.86	0.86	1.00												
C1	0.42	0.37	0.36	0.45	0.55	0.58	0.54	0.53	1.00											
C2	0.68	0.72	0.75	0.75	0.74	0.80	0.82	0.89	0.52	1.00										
C3	0.60	0.65	0.72	0.70	0.70	0.75	0.77	0.79	0.47	0.90	1.00									
C4	0.53	0.55	0.60	0.62	0.68	0.75	0.77	0.78	0.52	0.79	0.71	1.00								
D1	0.04	0.08	0.13	0.03	0.06	0.08	0.07	0.12	0.25	0.14	0.10	0.10	1.00							
D2	0.41	0.35	0.21	0.46	0.42	0.53	0.38	0.42	0.38	0.39	0.37	0.29	0.06	1.00						
D3	0.18	0.18	0.12	0.19	0.19	0.28	0.24	0.21	0.25	0.17	0.14	0.14	0.34	0.48	1.00					
D4	0.00	0.12	0.10	0.05	0.07	0.10	0.14	0.08	0.05	0.11	0.15	0.06	0.35	0.09	0.49	1.00				
E1	0.57	0.63	0.63	0.64	0.66	0.77	0.73	0.84	0.49	0.83	0.74	0.79	0.15	0.50	0.23	0.10	1.00			
E2	0.59	0.58	0.58	0.71	0.70	0.83	0.75	0.82	0.51	0.81	0.77	0.74	0.19	0.58	0.30	0.16	0.87	1.00		
E3	0.49	0.50	0.55	0.58	0.59	0.69	0.67	0.71	0.65	0.73	0.67	0.69	0.27	0.41	0.26	0.11	0.77	0.79	1.00	
E4	0.71	0.72	0.67	0.81	0.81	0.87	0.85	0.92	0.55	0.90	0.84	0.82	0.15	0.48	0.24	0.13	0.87	0.90	0.76	1.00

図４　平成 17 年度本科の設問項目間の相関係数表模様

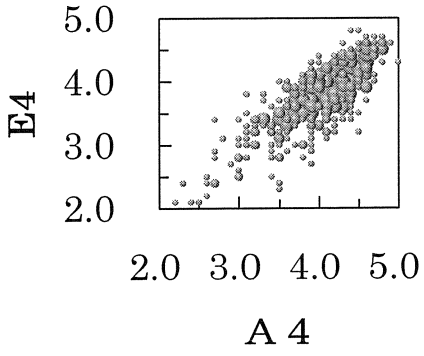


図５　平成 19 年度本科 A4-E4 散布図

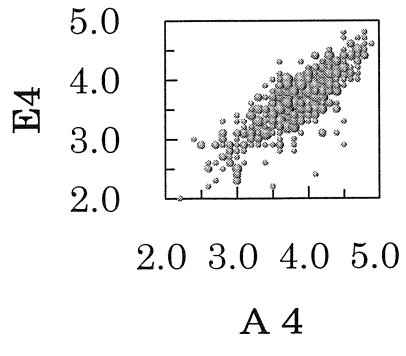


図６　平成 17 年度本科 A4-E4 散布図

を示している。B群とE群、B群とC群、C群とE群の相関を示している部分の色が薄い。中でも、設問項目B4とE4、B4とC2、C2とE4の相関係数値が特に高くなっている。同じ群の項目間では、C2とC3、E2とE4の相関係数値が大きくなっている。このことから、「学生の反応や理解度に応じて進めている教科は、要点等がわかりやすく、興味や学習意欲も増し、学生の総合評価が高い。」ということがわかった。

設問項目C1との相関を示す欄がやや濃い。これは、シラバス通りに授業を行っても行なわなくとも他の設問項目に影響を及ぼさないことを示している。しかし、平成17年度と平成19年度を比較すると、平成19年度の方がやや薄くなっている。これは、年度初めに行われる授業の進め方の説明を、教科書の目次からシラバスを使った説明へ、教員が切り替えたことにより、シラバスの認知度が学生の間で上がってきているためと思われる。

A群の中では、設問項目A4との相関を示す線がやや薄い。E4との相関係数は両年度とも高く、値も同じ0.81である。神戸高専の学生にとって、A群の中では、A4は授業の総合評価の重要な因子になっている。

図5と図6は、同じ点に重なるデータ数の多少をバブルの大小で表した散布図である。図5は、平成19年度、図6は、平成17年度の本科のA4-E4散布図である。グラフの形は、ほぼ同じであるが、図5の重心の方がやや上方にある。これは、授業改善が進んでいることを示しているものと考える。

H19	先生の授業の様子				先生の授業準備や工夫				授業の進め方や評価内容				自身の授業への取り組み				授業の総合評価			
E科	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
A1	1.00																			
A2	0.76	1.00																		
A3	0.58	0.74	1.00																	
A4	0.77	0.59	0.42	1.00																
B1	0.73	0.79	0.71	0.60	1.00															
B2	0.71	0.72	0.64	0.67	0.82	1.00														
B3	0.75	0.75	0.68	0.71	0.82	0.90	1.00													
B4	0.77	0.79	0.72	0.68	0.85	0.89	0.90	1.00												
C1	0.63	0.62	0.58	0.58	0.71	0.82	0.76	0.79	1.00											
C2	0.74	0.79	0.80	0.68	0.81	0.86	0.88	0.94	0.79	1.00										
C3	0.66	0.72	0.76	0.57	0.70	0.73	0.81	0.77	0.60	0.87	1.00									
C4	0.59	0.60	0.55	0.54	0.70	0.79	0.79	0.82	0.75	0.80	0.67	1.00								
D1	0.30	0.37	0.34	0.18	0.40	0.42	0.42	0.49	0.45	0.53	0.48	0.45	1.00							
D2	0.50	0.49	0.45	0.46	0.48	0.71	0.58	0.60	0.56	0.63	0.51	0.46	0.41	1.00						
D3	0.19	0.20	0.16	0.22	0.26	0.47	0.37	0.33	0.35	0.34	0.31	0.25	0.51	0.51	1.00					
D4	0.18	0.22	0.19	0.21	0.25	0.36	0.37	0.27	0.28	0.36	0.43	0.23	0.46	0.33	0.64	1.00				
E1	0.69	0.68	0.63	0.64	0.68	0.82	0.78	0.86	0.69	0.85	0.66	0.81	0.41	0.59	0.34	0.26	1.00			
E2	0.70	0.66	0.61	0.62	0.71	0.90	0.84	0.85	0.72	0.83	0.73	0.78	0.49	0.68	0.50	0.44	0.89	1.00		
E3	0.64	0.63	0.60	0.60	0.65	0.80	0.76	0.80	0.70	0.81	0.66	0.75	0.51	0.60	0.39	0.32	0.88	0.86	1.00	
E4	0.76	0.77	0.70	0.69	0.81	0.89	0.89	0.94	0.76	0.92	0.81	0.85	0.44	0.61	0.37	0.37	0.91	0.92	0.79	1.00

図7　平成19年度電気工学科の設問項目間の相関係数表模様

H19	先生の授業の様子				先生の授業準備や工夫				授業の進め方や評価内容				自身の授業への取り組み				授業の総合評価			
S科	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
A1	1.00																			
A2	0.84	1.00																		
A3	0.76	0.87	1.00																	
A4	0.90	0.79	0.76	1.00																
B1	0.84	0.83	0.78	0.89	1.00															
B2	0.84	0.82	0.78	0.89	0.92	1.00														
B3	0.84	0.80	0.78	0.90	0.91	0.96	1.00													
B4	0.87	0.84	0.79	0.89	0.91	0.92	0.93	1.00												
C1	0.77	0.74	0.72	0.84	0.86	0.86	0.83	0.83	1.00											
C2	0.84	0.82	0.85	0.89	0.88	0.92	0.92	0.93	0.83	1.00										
C3	0.80	0.81	0.81	0.83	0.86	0.89	0.88	0.88	0.83	0.94	1.00									
C4	0.82	0.79	0.77	0.88	0.88	0.92	0.93	0.90	0.82	0.93	0.89	1.00								
D1	0.27	0.22	0.22	0.26	0.28	0.30	0.30	0.38	0.15	0.30	0.25	0.28	1.00							
D2	0.61	0.60	0.56	0.66	0.66	0.69	0.66	0.68	0.64	0.70	0.70	0.67	0.37	1.00						
D3	0.30	0.30	0.19	0.25	0.26	0.34	0.31	0.34	0.14	0.31	0.25	0.27	0.63	0.41	1.00					
D4	0.15	0.16	0.16	0.14	0.17	0.23	0.23	0.26	0.03	0.20	0.19	0.14	0.60	0.22	0.54	1.00				
E1	0.77	0.75	0.75	0.83	0.81	0.88	0.88	0.91	0.77	0.90	0.85	0.88	0.35	0.69	0.27	0.25	1.00			
E2	0.76	0.75	0.75	0.84	0.81	0.88	0.87	0.91	0.77	0.90	0.85	0.87	0.30	0.73	0.28	0.22	0.95	1.00		
E3	0.73	0.74	0.75	0.82	0.80	0.85	0.86	0.89	0.82	0.88	0.83	0.87	0.39	0.73	0.32	0.20	0.92	0.92	1.00	
E4	0.83	0.81	0.80	0.90	0.89	0.93	0.93	0.94	0.84	0.93	0.89	0.92	0.33	0.73	0.31	0.24	0.94	0.95	0.91	1.00

図8　平成19年度都市工学科の設問項目間の相関係数表模様

図７は平成 19 年度の電気工学科の相関係数表、図８は平成 19 年度の都市工学科の相関係数表である。学科別の相関係数表の濃淡に大きな違いはなく、図３とほぼ同じであるが、都市工学科の方が全体的に薄くなっていること、設問項目 A4 との相関を示す欄とその周りの欄のコントラストが逆になっていることが異なる。A4 と E4 の相関係数の値は、電気工学科が 0.69、都市工学科が 0.90 であり、差がある。学科によって重視するファクターが異なることがわかる。

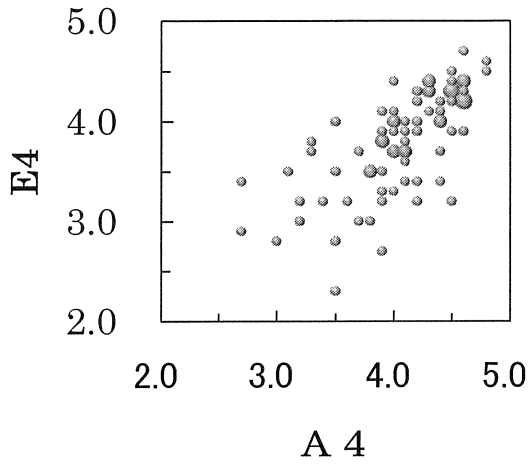


図９　平成 19 年度電気工学科 A4-E4 散布図

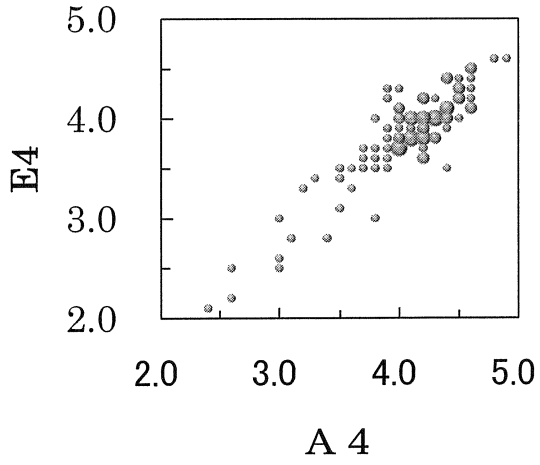


図 10　平成 19 年度都市工学科 A4-E4 散布図

平成 19 年度の A4-E4 散布図について、電気工学科（図９）の方が、都市工学科（図 10）よりも、全体的にばらつきが大きくなっている。特に、評価点が低いところでのばらつきが大きい。この傾向は平成 17 年度のアンケート結果にも見られる。都市工学科の学生は教官の授業に対する熱意を重視していることがわかる。

平成 17 年度の A4-E4 散布図について、相関係数の値は、電気工学科（図 11）が 0.78、都市工学科（図 12）が 0.80 と差がないが、評価点が低いところでのばらつきは電気工学科の方が大きい。また、平成 19 年度と平成 17 年度の散布図の重心を比較すると、両科とも、平成 19 年度の重心の方が上方になっている。電気工学科、都市工学科の両科とも授業改善が進んでいることを示しているものと考える。

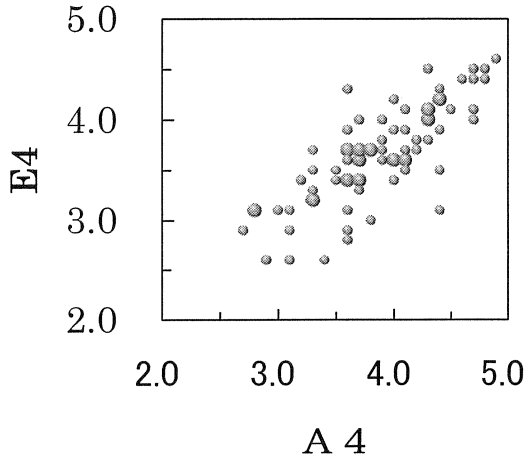


図 11　平成 17 年度電気工学科 A4-E4 散布図

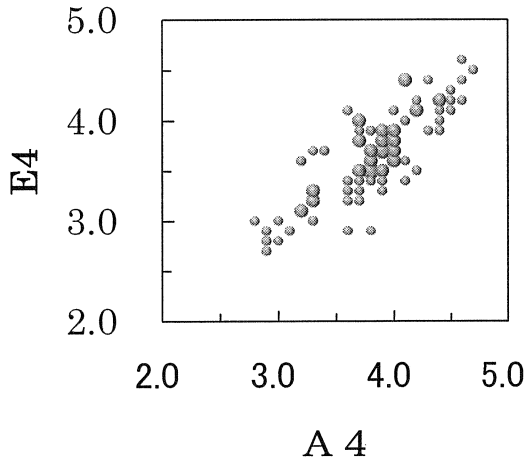


図 12　平成 17 年度都市工学科 A4-E4 散布図

次に、物理の授業改善について結果を示す。平成 15 年度から平成 19 年度までの物理の授業に関するアンケート結果をもとに検討した。

第１学年は週１回９０分授業を３０週行い、力学を学ぶ。第２学年は１週間に９０分、５０分授業を１回ずつ行い、熱力学、波動力学、電磁気学、原子核・素粒子を３０週で学ぶ。時間数は約 1.5 倍になっているが、内容が広範囲に及び、教科書のページ数では約 4 倍程度になっている。

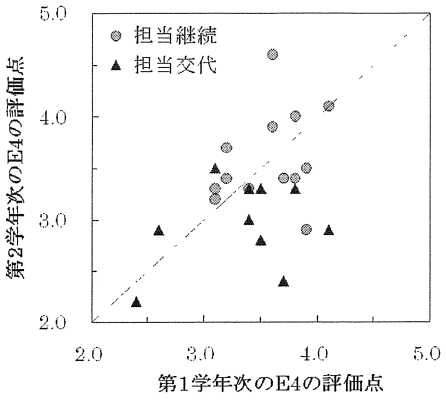


図13　物理の項目E4のクラス依存性

図13は、1学年次の項目E4（授業の総合評価）の平均値に対するそのクラスの2学年次の平均値を散布図で示したものである。図で、プロットが対角線よりも上にあれば、そのクラスの翌年度の評価が上ったことを示す。同じ担当者が引き続き受け持ったクラスの総合評価は、「1年次に授業を高く評価したクラスは2年次の授業も高く評価する」という傾向が見られる。授業担当者が交代したクラスには、その傾向は見られず、2年次には総合評価が下がっている。

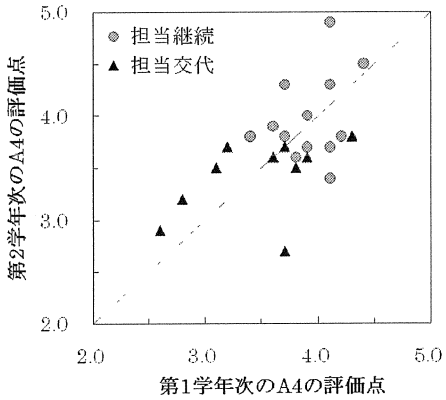


図14　物理の項目A4のクラス依存性

図14は、図13と同様にして、項目A4（授業に対する教員の熱意）について調べたものである。授業担当者が継続して受け持ったクラスも、交代したクラスも、対角線より上方にプロットが多い。担当者が交代するしないによらず、教員は前年以上に熱意をもって授業に取り組んでいると学生は感じている。

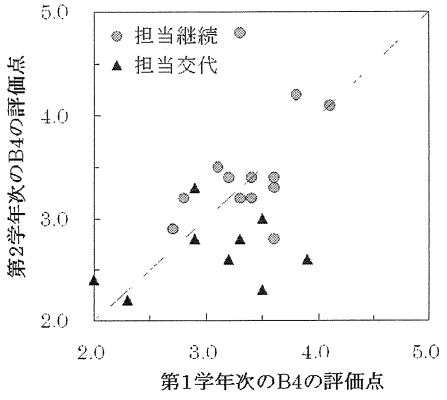


図15　物理の項目B4のクラス依存性

それに対し、項目B4（要点・コツ・注意点等がわかりやすい）については（図15）、同じ担当者が継続して受け持ったクラスでは、1年次に授業を高く評価したクラスは2年次の授業も高く評価する傾向が見られ、授業担当者が交代したクラスでは、2年次には前年よりも分かり難くいと評価しているクラスが多い。

即ち、総合評価の結果（図13）は、B4の結果（図15）の影響が考えられる。担当者が同じ場合は、アンケート結果をもとに、教官が要点・コツ・注意点等がわかりやすくなるよう努めた結果ではないかと考えられる。学生も教官の教え方に慣れたからかもしれない。

4. まとめ

アンケートから、学生の理解度に応じた授業の進め方は、要点等がわかりやすく、興味や学習意欲も増し、学生の総合評価が高いことが示された。平成17年度と平成19年度のA4-E4散布図の比較から、授業改善が進んでいることがうかがわれる。以前の検討結果[(2)]でも、授業改善が進んでいた。このことから、アンケート結果が教官自身の自己評価につながり、授業改善が進んでいるものと考えられる。授業アンケートは教育に有効であると思われる。

また、物理では、授業担当の交代が少なくなるよう、高専全体での取組みも必要であることもうかがわれた。受講者の気質の違いも考慮して授業改善を進めた方が、より学生が授業に好印象を持つことも示された。

参考文献

(1)評価委員会編集：「平成17年度学生による授業アンケート」，神戸市立工業高等専門学校，2006.
(2)大多喜重明，松本久司：「神戸高専の授業アンケートーアンケートに見える学生気質ー」，日本高専学会第13回年会講演会講演論文集，pp.43-44，2007.
(3)評価委員会編集：「平成19年度学生による授業アンケート」，神戸市立工業高等専門学校，2008.

MEP.1 plan の構成について

末次武明*

Construction of Main Effect Plus One Plans

Takeaki SUETSUGU*

ABSTRACT

This paper gives main effect plus one plans (MEP.1 plan) 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 MEP.1 plan with the above property, where "+" stands for a union of two designs.

Keywords: search design, main effect, two levels, linear code

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もとで行なわれてきた．

その中でも，一般平均と主効果がすべて推定可能で，2因子以上の交互作用から高々1個の未知効果が検索できて推定可能であるような検索可能計画：**MEP.1 plan** を取り上げる．

特に，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）が上記の条件を満たすような計画を構成したい．検索する未知効果は2因子交互作用からとする場合と2因子・3因子交互作用からとする場合を考える．

こういう計画としては，例えば，次のような計画があげられる．

Ghosh[2] で構成されている MEP.1 plan では，T_1：weight(1 の数) が $0, m-1, 1$ の処理組合せを全部集めた計画としていて，検索する未知効果は2因子・3因子交互作用からとしている．

Shirakura[3] で構成されている MEP.1 plan では，T_1：weight(1 の数) が $0, 1$ の処理組合せを全部集めた計画としていて，検索する未知効果は2因子交互作用だけからとしている．

2．準備

次のような線形モデルを考える．

$$\mathbf{y} = A_1\boldsymbol{\xi_1} + A_2\boldsymbol{\xi_2} + \mathbf{e} \qquad (1)$$

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，各成分は互いに独立で $N(\mathbf{0},\sigma^2 I_N)$ に従う．

特に，モデル (1) において，(a) $\boldsymbol{\xi_1}$ のすべての要素は未知，(b) $\boldsymbol{\xi_2}$ 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）場合を考えると，次の定理が成り立つ．

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．

$$rank(A_1 : A_{20}) = \nu_1 + 2k \qquad (2)$$

特に，誤差がない $(\sigma^2 = 0)$ 場合には，条件 (2) 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 $N\times m$ 行列とする．

$\boldsymbol{\xi_1}$：一般平均と主効果，$\boldsymbol{\xi_2}$：2因子・3因子交互作用から成る未知母数ベクトルとするとき，T に対する計画行列は，次のように与えられる．（4因子以上の交互作用は無視可能とする）

$$[\mathbf{1}_N, \mathbf{g}_1, ..., \mathbf{g}_m, \mathbf{g}_{12}, \mathbf{g}_{13}, ..., \mathbf{g}_{m-1\,m}, \mathbf{g}_{123}, ..., \mathbf{g}_{m-2\,m-1\,m}]$$

* 一般科 教授

ただし，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．g_j $(1\le j\le m)$ は j 番目の主効果に，g_{ju} $(1\le j<u\le m)$ は j 番目と u 番目の２因子交互作用に，g_{juv} $(1\le j<u<v\le m)$ は j 番目と u 番目と v 番目の３因子交互作用に，それぞれ対応している．

$T=[\mathbf{t}_1,\ \cdots,\ \mathbf{t}_m]$ とすると，

$$\begin{aligned}\mathrm{g}_j &= 2\mathbf{t}_j-\mathbf{1}_N, \quad 1\le j\le m,\\ \mathrm{g}_{ju} &= \mathrm{g}_j*\mathrm{g}_u, \quad 1\le j<u\le m,\\ \mathrm{g}_{juv} &= \mathrm{g}_j*\mathrm{g}_u*\mathrm{g}_v, \quad 1\le j<u<v\le m,\end{aligned} \tag{3}$$

ここで，$*$ はアダマール積を表す．

これから，３節で，$\boldsymbol{\xi_2}$ が２因子交互作用だけから成る未知母数ベクトルである場合を，４節で，$\boldsymbol{\xi_2}$ が２因子・３因子交互作用から成る未知母数ベクトルである場合を研究する．

３．$\boldsymbol{\xi_2}$ を２因子交互作用からとるとき

３．１ 構成の為の条件と 新しい構成法

これから，主効果がすべて推定可能で，２因子交互作用から高々１個の未知効果が検索できて推定可能であるような MEP.1 plan を考えることにすると，条件 (2) は次のように表される．

行列 $G=[\mathbf{1}_N,\mathrm{g}_1,\ldots,\mathrm{g}_m,\mathrm{g}_{p_1q_1},\mathrm{g}_{p_2q_2}]$ ($1\le p_1<q_1\le m$, $1\le p_2<q_2\le m$, $(p_1,q_1)\ne(p_2,q_2)$)
に対して，

$$\text{rank } G=m+1+2 \tag{4}$$

である．

Mukerjee and Chatterjee[4] で注意しているように，$\mathbf{t}_{ju}=\mathbf{t}_j*\mathbf{t}_u$ とするとき，

$$U=[\mathbf{1}_N,\mathbf{t}_1,\ldots,\mathbf{t}_m,\mathbf{t}_{p_1q_1},\mathbf{t}_{p_2q_2}] \tag{5}$$

とすると，(3) から rank G = rank U であることが容易に示されるので，(4) の条件を，T から直接作った (5) の U を使って，調べることができる．

これからは，weight(1 の数) が i である処理組合せ全部を $\Omega(m,i)$ とするとき，

$$T_1=(\Omega(m,0)',\Omega(m,1)')' \tag{6}$$

を考える．(処理組合せの個数は $N_1=m+1$)

このとき，T_1 に対する (5) の行列 U_1 は次のようになる．

$$U_1=\begin{pmatrix}1 & \mathbf{0}_m' & 0 & 0\\ \mathbf{1}_m & I_m & \mathbf{0}_m & \mathbf{0}_m\end{pmatrix} \tag{7}$$

ただし，I_m は $m\times m$ 単位行列，$\mathbf{0}_m$ は $m\times 1$ 零ベクトル，$\mathbf{1}_m$ は 各要素が 1 の $m\times 1$ ベクトルとする．

(7) の行列を考えると，この T_1 に対して，T_1+T_2 が MEP.1 plan になるような T_2 の満たすべき条件は，T_2 の列ベクトルを $\mathbf{t}_j$ $(j=1,\cdots,m)$ とすると，次のように与えられる．

定理 1 (Shirakura[3])　上記の T_1 について，$T=T_1+T_2$ が，処理組合せの数が $N=N_1+N_2$ の MEP.1 plan である必要十分条件は，T_2 で，$1\le i<j\le m$ を満たす任意の i,j について，$\mathbf{t}_i*\mathbf{t}_j$ が $\mathbf{0}$ でなく，互いに異なることである．

これから，定理１を満たす新しい MEP.1 plan の構成の例をあげる．

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，$n\times(2^r-1)$ 行列 W を次のように決める．

W の列は，$(0,\ldots,0)$ を除いた上記の全ての r-次元の点でラベルづけられているとする．W の行は，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．

$$\sum_{i=1}^{r}\alpha_i\beta_i \pmod 2$$

例 1)　$r=3$ に対する W 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

定理 2　(6) で定義した計画 T_1 について，上記のように定義した行列 W を T_2 とすると，$T=T_1+T_2$ が MEP.1 plan になる．

証)　「W の任意の２列 $\mathbf{t}_a$, $\mathbf{t}_b$ を取ると，$\mathbf{t}_a*\mathbf{t}_b$ は $\mathbf{0}$ でなく，互いに異なる」ことを示す．

まず，W を，ラベルで1がa番目にある w_a 行を集めた部分行列 W_1 と，ラベルで1がa番目とb番目にある w_{ab} 行を集めた部分行列 W_2 に分けておく．このとき，w_a 行と w_b 行の和は w_{ab} 行になることに注意する．

1） Sirakura et al[5] の Lemma 2 より，W の任意の2列 $\mathbf{t}_a$，$\mathbf{t}_b$ について，$\mathbf{t}_a$ の第 k 成分 $=\mathbf{t}_b$ の第 k 成分 $=1$ となる k が必ず存在するので，

$$\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_b \neq 0 \tag{8}$$

2） 1つの列が重なっているとき，$\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_b \neq \mathbf{t}_a * \mathbf{t}_c$ を示す．（$b \neq c$）

∵) W の性質より2列の差はWのある列になるので，

$$\begin{aligned}\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_b - \mathbf{t}_a * \mathbf{t}_c &= \mathbf{t}_a * (\mathbf{t}_b - \mathbf{t}_c)\\ &= \mathbf{t}_a * \mathbf{t}_d\\ &\neq \mathbf{0}\ (\ (8)\ \text{より})\end{aligned}$$

3） 任意の4列を取ったとき，$\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_b \neq \mathbf{t}_c * \mathbf{t}_d$ を示す．（a, b, c, d は全て異なる）

∵) W は，Sirakura et al[5] の4.1に述べられているように，任意の4列を取ったとき，$\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix}, \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}, \begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}, \begin{bmatrix}1\\1\end{bmatrix}$ から成る 2×4 部分行列を含む．

だから，一般性を失うことなく，$\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}, \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}, \begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix}, \begin{bmatrix}1\\1\end{bmatrix}$ を含む列をそれぞれ $\mathbf{t}_a$，$\mathbf{t}_b$，$\mathbf{t}_c$，$\mathbf{t}_d$ として，$\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_b \neq \mathbf{t}_c * \mathbf{t}_d$ を示す．（この4列から成る部分行列を W_0 とする）

$\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_b = \mathbf{t}_c * \mathbf{t}_d$ と仮定してみると W_0 は，(1001), (0101) という2行を含む．

また，$\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_b = \mathbf{t}_c * \mathbf{t}_d$ より

W_0は，(1110), (1101), (1011), (0111), (1100), (0011) という行を含むことはできない． (9)

これから，(1001), (0101) という2つの行が，W_1, W_2 のどちらに入っているかによって場合分けをする．

1. (1001), (0101) がどちらも W_1 に入っている場合

w_i 行：(1001)，w_j 行：(0101) とすると，w_{ij} 行：(1100) になり，(9) に矛盾する．

2. (1001) が W_1 に，(0101) が W_2 に入っている場合

w_i 行：(1001)，w_{jk} 行：(0101) とすると，w_j 行, w_k 行になる可能性のあるのは，(9) の条件を考えると，次の3つの分け方の場合だけである．

$$\begin{aligned}0101 &= 0000 + 0101 \quad \cdots \quad \text{(c)}\\ 0101 &= 0001 + 0100 \quad \cdots \quad \text{(d)}\\ 0101 &= 1111 + 1010 \quad \cdots \quad \text{(e)}\end{aligned}$$

(c) のときは，w_j 行：(0000)，w_k 行：(0101) とすると，w_{ik} 行：(1100) になり，(9) に矛盾する．

(d) のときは，w_j 行：(0001)，w_k 行：(0100) とすると，w_{ik} 行：(1101) になり，(9) に矛盾する．

(e) のときは，w_j 行：(1111)，w_k 行：(1010) とすると，w_{ik} 行：(0011) になり，(9) に矛盾する．

3. (0101) が W_1 に，(1001) が W_2 に入っている場合

w_i 行：(0101)，w_{jk} 行：(1001) とすると，w_j 行, w_k 行になる可能性のあるのは次の3つの分け方の場合だけである．

$$\begin{aligned}1001 &= 0000 + 1001 \quad \cdots \quad \text{(f)}\\ 1001 &= 0001 + 1000 \quad \cdots \quad \text{(g)}\\ 1001 &= 1111 + 0110 \quad \cdots \quad \text{(h)}\end{aligned}$$

(f) のときは，w_j 行：(0000)，w_k 行：(1001) とすると，w_{ik} 行：(1100) になり，(9) に矛盾する．

(g) のときは，w_j 行：(0001)，w_k 行：(1000) とすると，w_{ik} 行：(1101) になり，(9) に矛盾する．

(h) のときは，w_j 行：(1111)，w_k 行：(0110) とすると，w_{ik} 行：(0011) になり，(9) に矛盾する．

4. (1001), (0101) がどちらも W_2 に入っている場合

(c),(d),(e) と (f),(g),(h) の全ての組合せについて，(9) に矛盾することが言える．

以上のことから，全ての場合について，$\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_b \neq \mathbf{t}_c * \mathbf{t}_d$ であることが示された．

$\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_c \neq \mathbf{t}_b * \mathbf{t}_d$ ，$\mathbf{t}_a * \mathbf{t}_d \neq \mathbf{t}_b * \mathbf{t}_c$ も同様に示すことができる． □

3．2 N_2 を最小にする構成について

(6) で定義した計画 T_1 について，$T = T_1 + T_2$ が MEP.1 plan になるような $T_2(N_2 \times m)$ の中で，N_2 が最小になるような T_2 を構成するという問題は，Shirakura[3] であげられている．

ここでは，Shirakura[3] の Table 2 ($3 \leq m \leq 10$) に対し，それより大きい $11 \leq m \leq 15$ に対して，T_2 の N_2 を最小にする計画を構成した．

表1に結果をまとめているが，Shirakura[3] にならい，N_2 の最小値を $g(m)$ としている．また，$N_2{}^*$ は

$2^{N_2}-2 \geq m(m-1)/2$ 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．

但し，$m \geq 12$ では，3.1 節の W の N_2 は上限の改善になっているので，下の表には $\mathrm{lc}(m)$ として載せている．（$2^{n-1}-1 \leq m < 2^n-1$ のとき，$\mathrm{lc}(m)=\binom{n}{1}+\binom{n}{2}$ である）

表１　N_2 の最小値 $g(m)$ $(3 \leq m \leq 15)$

m	$N_2{}^*$	$g(m)$	$\mathrm{lc}(m)$	$g^*(m)$
3	3	3		3
4	3	3		3
5	4	4		4
6	4	5		5
7	5	6		6
8	5	6		7
9	6	7		8
10	6	7		9
11	6	8		10
12	7	8	10	11
13	7	9	10	12
14	7	10	10	13
15	7	10	10	14

注）$3 \leq m \leq 10$ は Shirakura[3] Table 2 より取ったものである．

注）$m=15$ のときは，前節の W と同じ構成である．

新たに構成した $11 \leq m \leq 15$ の T_2 を以下に示すが，m=11 と m=12 の場合は，最後の列だけが異なる．

表２　T_2 $(11 \leq m \leq 13)$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0
1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0
1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1
1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1
0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1

表３　T_2 $(14 \leq m \leq 15)$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0

4．ξ_2 を２因子・３因子交互作用からとるとき

この節で研究したいのは，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，

$$T_1=(\Omega(m,0)',\Omega(m,m-1)',\Omega(m,m)')' \qquad (10)$$

を考え，（処理組合せの個数は $N_1=m+2$）T_2 を併置して，MEP.1 plan を構成する問題である．

この問題は，Ghosh[2] が最初に研究したものであるが，その後，Ohnishi & Shirakura[6] で修正され，T_2 の処理組合せの最小値が，$3 \leq m \leq 8$ で分かっている．

ここでは，$m>8$ の場合を探るために，まず T_2 が MEP.1 plan 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．

$$\left(\begin{array}{c|cccccc|cc|cc}
1 & -1 & -1 & \ldots & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ \hline
1 & -1 & 1 & \ldots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\
1 & 1 & -1 & \ldots & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\
1 & 1 & 1 & \ldots & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\
1 & 1 & 1 & \ldots & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\
1 & 1 & 1 & \ldots & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\
1 & 1 & 1 & \ldots & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ \hline
1 & 1 & 1 & \ldots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1
\end{array}\right)$$

行の基本変形で

$$\left(\begin{array}{c|cccccc|cc|cc}
1 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline
0 & 1 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 1 & \ldots & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \ldots & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline
0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1
\end{array}\right)$$

さらに，$\mathbf{c}_{ij}=\mathbf{g}_{ij}-\mathbf{g}_i-\mathbf{g}_j-\mathbf{1}$, $\mathbf{c}_{ijk}=\mathbf{g}_{ijk}-\mathbf{g}_i-\mathbf{g}_j-\mathbf{g}_k$ 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．

$$\left(\begin{array}{c|cccccc|cc|cc}
1 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline
0 & 1 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & \ldots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \ldots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline
0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1
\end{array}\right)$$

以上のことから，次の定理が導かれる．

定理 3　(10) の T_1 について，$T=T_1+T_2$ が MEP.1 plan である必要十分条件は，T_2 からの計画行列で，$1 \leq i<j \leq m$, $1 \leq p<q<r \leq m$ を満たす任意の i,j

と p,q,r について，$C_{ij} = \mathbf{g}_{ij} - \mathbf{g}_i - \mathbf{g}_j - \mathbf{1}$, $C_{pqr} = \mathbf{g}_{pqr} - \mathbf{g}_p - \mathbf{g}_q - \mathbf{g}_r$ を考えるとき，どの２つのベクトルも 互いに異なることである．

注）定理３で，２因子交互作用に対応する２列が異なる条件，２因子と３因子交互作用に対応する２列が異なる条件，３因子交互作用に対応する２列が異なる条件を調べると，Ohnishi & Shirakura(6) の定理３の各条件が導かれる．

この定理３を用いて，T_2 の処理組合せの最小値を，$9 \leq m \leq 13$ まで調べた結果を次の表にあげている．

表４　N_2 の最小値 $l(m)$ $(3 \leq m \leq 13)$

m	N_1	$l(m)$	N
3	5	2	7
4	6	5	11
5	7	5	12
6	8	8	16
7	9	8	17
8	10	10	20
9	11	10	21
10	12	11	23
11	13	11	24
12	14	12	26
13	15	13	28

注）$3 \leq m \leq 8$ は Ohnishi & Shirakura(6) 表１より

新たに構成された $9 \leq m \leq 13$ での T_2 を示す．

表５　T_2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1
0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0

参考文献

(1) Srivastava,J.N.(1975). Designs for searching non-negligible effects, in: A Survey of Statistical Design and Linear Model (ed. J.N.Srivastava), 507-519, North-Holland.

(2) Ghosh,S.(1981). On some new search designs for 2^m factorial experiments, J.Statistical Planning and Inference 5,381-389.

(3) Shirakua,T.(1993). Fractional factorial designs of two and three levels. Discrete Mathematics 116, 99-135, North-Holland.

(4) Mukerjee,R. and Chatterjee,K.(1994). An application of Hadamard matrices for the construction of main effect plus two plans for 2^m factorials, Utilitas Math. **45**, 213-218.

(5) Shirakura,T. , Suetsugu,T. and Tsuji,T.(2002). Construction of main effect plus two plans for 2^m factorials, J.Statist.plann.Inf.,105,405-415

(6) Ohnishi,T. and Shirakura,T.(1985). Search designs for 2^m factorial experiments, J.Statistical Planning and Inference 11,241-245.

高等数学修得のためのライセンスフリー教材の作成について

横山 卓司*

Making Free Documents for Teaching and Learing Mathematics

Takuji YOKOYAMA

ABSTRACT

Today, about teaching and learing materials for advanced mathematics , high-quality, free-licenced, machine readable documents are much needed. We started the project of making such documents with the help of the Internet and computer systems. The project runs very well, and some GFDL-licenced documents have been written. These documents are very useful for everyone to teach and learn advanced mathematics.

Keywords: teaching materials for advanved mathematics , free document, open content , GNU, GFDL

1. 背景

高等学校および高専・大学で扱われる解析学や線形代数学などの高等数学を学ぶための教材のありようについて、現状の問題点から考えていきたい。

まず、学ぶ側から見ると、数学教材は量は多く世に出回っているものの、全般的に不親切で、自分にぴったりのものを選択しにくいと考えられているようである。受験参考書がしのぎを削り、あらゆるレベル、学習状況に応じた選択が可能な中学校・高等学校用の参考書や問題演習書に比べると、大学以降の高等数学修得のための数学教材は、数は多いものの、学習者の学習状況に配慮したきめ細やかさや種類の豊富さに欠ける部分が多い。大学の授業で講義とともに利用されることを目的とした教科書と演習書が多数出版されているが、どれも非常によく似た構成である。全体的に内容が高度で、講義とともに利用されることを想定しているためか学習者を突き放した記述スタイルが多いのも特徴である。学ぶ側の自発的な学習姿勢を前提にしていることもその一因であろう。別の形態で記述された教材もあってもよいのだが、そのようなものは少ない。そのことが、大学以降の数学に対する学習者の感じるとっつきにくさにつながっている。

次に教える側から見ると、世に出ている数学教材は、量はたくさんあるものの、その中から自分が行なう授業にぴったりくるものを探すのは大変難しい。教える学生のレベル、自分が行ないたい授業の進度や深度はいつも一定ではなく、その時々の講義により変化する。それに応じて教材を変化させられるかというと、現状はとても難しい。結局、一部手作りのプリントなどで補ったり、板書で別に記述したりして対応することになるが、これらが学生が手にする教材にあらかじめきちんと記述されていたら、より円滑に授業が進められるのにと感じることが多い。数学教材は出版物という形態で提供されることがほとんどであるが、この点が教材の柔軟性を欠いている一つの原因である。すぐに大幅な改訂を行なうのは困難であるし、項目の削除や追加を現場で教える個々人が勝手に行なうことは難しい。それに加えて高等数学の基礎になる中学校や高等学校前半の数学の授業は、文部科学省の学習指導要領改訂の影響を受け、扱われる内容が数年ごとに大きく変化してきた。そのため、これまで学習者側に前提にしていた知識が利用できなくなったり、扱いが薄くなったためより前段階から詳細な記述が必要になったりすることも多く見られ、硬直した出版物としての数学教材はそのような変化と相容れない。これらのことを考えると、教える内容に応じて、教授側が自分流にアレンジできる数学教材を利用することが望ましい。ただそのような数学教材を提供したり、授業で教えるのに利用するためにはいくつかの壁が存在する。

1つには著作権や知的所有権、いわゆるライセンスの問題が存在する。数学教材は一般に、その著者が完全にオリジナリティを発揮して新規に書き下ろした部分は少ない。入試問題や古くから広く知られた問題を

* 一般科 准教授

学習しやすいように改善して利用したり、いろいろな教科書で使われている定義・定理などをなぞって記述してある部分が多い。著者のオリジナリティは主に、説明の部分や例題・演習問題の取捨選択、問題の解答の仕方などに現れるが、数学教材に限って言えば、オリジナリティが発揮される部分は非常に限定的と言ってよい。そうなると、そうして作られた数学教材は、自由に再編集され、別の数学教材の一部として再利用されてもよさそうなものだが、元の著者がそれを事前に明確に許諾していないと、再編集して再配布した者は元の著者の権利を犯したことになる。現在世に出ている数学教材の多くは、著者がその著作である数学教材のライセンスを明確にオープンにしていないために、再利用できない。そのため、自分の講義に寄り添った数学教材を配布したい場合には、一から完全にオリジナルなものを作成せざるを得ない、という状況がこれまでずっと続いてきた。しかしよく考えてみると、この状況は、本来、自分の著作に対する著者の考えを正しく反映した結果なのであろうか。数学教材を作成する際に、それを再編集・再構成してよりよい教材を作りたいという者を歓迎する立場をとる著者も存在するのではないだろうか。

2つには、出版物という配布形態が、再編集や再配布がしやすい形態でないことがあげられる。PC とTEX というフリーソフトウェア、およびネットワークの普及により、一度データとして記述された数学教材を再編集して再配布することは非常に容易になった。ところが大学等で利用される数学教材は、まだその大半が出版物を学生に購入させるという形で配布されている。紙に印刷された内容は、そのままでは再加工がしにくく、改変を加えて再度別の教材に利用するにはもう一度データ化する作業が必要になる。これがネットワーク上で TEX のデータとして公開されて、さらに1つ目に述べたように自由に改変でき再配布できるライセンスが明記してあれば、どんなに利用しやすいだろう。大学の数学教員の中には、ネットワーク上で自分の授業の教材を公開している方も多く見られるが、その公開の際にライセンスを記述しておらず、そういう状況での公開では実際に再利用することが難しいのである。

これらの壁を克服した上で、学ぶ側にも教える側にも利用しやすい数学教材を追求することが必要である。

2. 自由なライセンス

第1節でも述べたように、数学教材が世に出た場合、通常その教材を再編集・改変して再配布するためには、著者がそれらを可能とする許諾を明確にしていなければならない。許諾を明確にするための方法として、GNU Free Documentation License (GFDL)[1] やクリエイティブ・コモンズ・ライセンス (CCL)[2] など、いわゆるオープンライセンス、フリーライセンスを採用して、明記するのがよい。GFDL はウィキペディア[3] やその他ネットワーク上で公開される多くの文書に採用されている。CCL も MIT の OpenCourseWare を始めとして、早稲田大学等のネット公開された教材ですでに多数採用されている。両者の違いについて、CCL は公開された著作の拡がりのコントロールのために採用されている感が強いのに対し、GFDL は公開された著作のその後の自由な利用の方に重点が置かれている。再利用しようとする立場から考えると、GFDL の方が自由度が高く、より柔軟な改変が可能だが、逆に著者の立場から言うと改変者に対するコントロールが効かないことを不安に考え CCL を採用する場合も多いようである。本来ならこのようなライセンスはわかりやすく1本化されて、認知がより広まった方がよい。論理的というより心理的な面で GFDL がなかなか著者に採用してもらえないことも多いが、理想的には GFDL が広く採用されることが望ましい。

3. 数学教材作成プロジェクト

以上の状況を踏まえて、我々は 2006 年度からライセンスとして GFDL を採用した数学教材を作成するプロジェクトをスタートさせた。すでにほぼ同じ手法で、2002 年から数年間に渡って神戸高専の情報基礎の教科書を作成し[4]、メンテナンスサイクルを軌道に乗せている。その経験を踏まえ、さらに数学教材として配慮しなければならない点を追加して、3 年間ノウハウを蓄積した。

同じように GFDL のライセンスで数学の教科書を作成するプロジェクトとして Wikibooks プロジェクト[5] が存在するが、このようなプロジェクト運営を円滑に進めるのは Wikipedia プロジェクト程には易しくはないようで、実際には 2008 年現在のところ、大きな成果はあがっていないようである。

これらのことを踏まえて、このようなプロジェクトを運営する際に留意する点を挙げておく。

1つめに、各文書に対するリーダー (取りまとめ役) の明確化が必要である。数学教材であるから、記号や語句の統一、何を定義とするかの判断など、文書1つ1つの首尾一貫性を保証するためには最終責任者を明確にしておくのがわかりやすい。リーダーはプロジェクト運営の際になるべく民主的に同意事項を積み上げ、参加メンバーが同意した決まりごとはいつでも参照可能なように、その履歴とともにウェブページ等にまとめておくことも重要である。ソフトウェアプロジェクトにおけるコーディングルールにあたるもので、メンバーの作業を円滑に進めやすくするために重要なことである。

2つめに、文書を作る際にはいわゆる IT (Information Technology) を最大限に活用することが大切である。全員で情報を共有すること、成果物を履歴を含めて時系列でメンバーに提示し常に利用可能とすること、メンバーで議論する際の意志確認の手続きを行いやすいように整備すること、利用者からの意見や教材の修正点を広く頻繁に収集しなるべく迅速に反映させること、また意見や修正点などを1つ1つ番号を付けて管理し実際の文書ファイルに反映できているかステータス管理を行なうことなど、文書作成作業および文書のメンテナンス作業にはさまざまな局面が存在する。それらのさまざまな局面でメーリングリストや専用ウェブサイト、バグトラッキングシステム、バージョン管理システムをはじめとする IT の助けを借りることにより、今日の IT の発展以前には困難だった多くの人々の参加による集団編集が、現在では十分可能となっている。というよりも、これまでは IT の助けがなかったから出版物による教材が主だったのだと感じられるようになる時が必ず来るはずである。

3つめに、作成した文書が他の場所でどのように利用されても、それを歓迎することが大切である。2次利用、3次利用に、仮に著者の想定外のことがあったとしても、それを受け入れる。このことは、フリーソフトウェア開発に GNU Public License を適用した場合に起こることと同様に考えるとわかりやすい。

4. プロジェクトの現状

2006 年からスタートしたプロジェクトは、現在はプロジェクト運営のための IT システムを構築し整備し終え、教材の作成にとりかかっている。「線形代数学」と「統計入門」の教科書と自習のための演習書がほぼ完成と呼べるレベルまで仕上っている。2006 年度, 2007 年度, 2008 年度の 3 年間の神戸高専における線形代数学の授業で実際にこれらの教材を利用し、フィードバックをかけた。記述をより分かりやすく書き直す、演習問題の差し替えや増量、難易度の調整、タイプミスの訂正、演習問題解答の訂正、図の追加など、フィードバックの作業は多岐に渡り、また修正点は利用するたびごとに常に発見される。これらについて、IT システムの助けにより迅速な文書のメンテナンスが可能となり、教材がブラッシュアップされきた。

今後、2009 年度も引き続き、すでに出来上がった教材の完成度を上げる作業を続けるとともに、微分積分学、ベクトル解析等、教材の種類を増やす取組みが継続して行なわれる予定である。

5. まとめ

本論文では、2006 年度から続く GFDL に基づく数学教材作成プロジェクトについて、そのプロジェクトの構築に当たって留意すべき点を中心に報告を行なった。これからの数学教材においては、ライセンスフリーであることが、その教材の利用者の利便性を高めることを述べた。また、プロジェクトを運営する際に留意すべきこととして、IT の活用が核となることを示した。

参考文献

(1) GNU フリー文書利用許諾契約書
http://www.gnu.org/licenses/fdl.html
http://www.opensource.jp/fdl/fdl.ja.html

(2) Creative Commons License
http://creativecommons.org/about/license/
http://www.creativecommons.jp/

(3) Wikipedia プロジェクト
http://ja.wikipedia.org/

(4) 横山 卓司 , “情報教育のためのライセンスフリー教材の作成について”, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要 第 41 号 pp.95 - 97 2003 年

(5) Wikibooks プロジェクト
http://ja.wikibooks.org/

英語プレゼンテーション・スピーチコンテスト発表者のアイコンタクト解析

西山　正秋*

Analysis on the Eye Contact of Speakers in English Presentation & Speech Contest

Masaaki NISHIYAMA

ABSTRACT

Eye contact is one of the most important skills required to be an excellent speaker in the English presentation contest. In this study, the motion analysis software is used to automatically measure the eye contacts during presentation. This 'objective' data and the 'subjective' evaluation by judges are combined for the analysis. The result shows that these two types of data are highly consistent. It is aimed to improve the evaluation system of English presentation competence.

Keywords: English presentation, eye contact, analysis

１．はじめに

英語のスピーチやプレゼンテーションコンテストの評価は、ジャッジによる項目別得点をもとに行われる。このような主観的判断は、スポーツでの採点競技でも行われているが、何らかの客観的データを用いることによって、より公平で正確なジャッジが期待できる。本研究では、スピーチコンテストでの重要な要素であるアイコンタクトを取り上げる。

アイコンタクトは、ノンバーバルコミュニケーションの１つとして、社会心理学等の分野で多くの研究がある。福井（1984）によると、アイコンタクトとは、日常会話や面接などで、「相互に目を見ている」（視線交錯）状態である。しかし、視線交錯が正確に知覚されるかどうかは、顔の向きやお互いの距離に影響を受ける。視線の送り手が受け手に向かって左右 30° に首をむけている場合は、まっすぐの場合より誤った判断をされやすい。つまり実際の視線方向よりも、顔の向きに偏った方向を見ていると知覚される(1)。

スピーチコンテストのように大勢の聴衆を相手に、ある程度の距離をおいて話すときのアイコンタクトの場合は、さらに顔の向きの影響が大きいと考えられる。聴衆には話し手の瞳孔の状態などは分からないので、顔の向きを手がかりにしてアイコンタクトを知覚・判断することになるからである。とくに、コンテスト入賞者のように優秀な話し手は、原稿をみたりうつむいたりせず常に聴衆の方を見ているので、顔の左右の向きがアイコンタクトの判断の大きな指標となる。

本研究では、英語プレゼンテーションコンテスト入賞者のアイコンタクトを、客観的データに基づいて評価する方法を検討した。ただし、今回研究材料としたコンテストでは、プレゼンテーションの部は映像が暗すぎて分析不可能だったため、スピーチの部入賞者を分析対象とした。プレゼンテーションとスピーチでは、スライド画面の評価以外はジャッジの評価項目もほぼ同じであり、基本的なアイコンタクトの取り方にも大差はないと考えられる。

アイコンタクトの自動検出方法に関して、西山（2007）は英文朗読者の視線をビデオに撮って画像解析ソフトにかけ、その波形から時間と位置が求められることを示した(2)。本研究では、実際のプレゼンテーションコンテストのビデオ映像を用いて、特徴部位の座標値（客観的データ）と視認による評価（主観的データ）を用いて分析を行った。

２．目的

プレゼンテーションコンテストのビデオ画像から得られる座標データを解析し、発表者の視線の変化を識別する方法を見出す。また、発表者による視線移動パターンの違いを座標データから見出す方法を探る。そして、プレゼンテーション・スピーチコンテストでのアイコンタクト評価システムの改善に役立てる。

３．方法

材料：　第１回全国高等専門学校英語プレゼンテーションコンテスト・スピーチの部、１位・２位入賞者（発

＊　一般科　教授

表者Ａ、発表者Ｂ）の映像を用いた。

手続き：

(1) 発表開始から2000フレーム（約１分間）までを再生して、左・正面・右のどちらを向いているかを３名の評定者が主観判断した。

(2) 動画分析ソフト（PV Studio 2D）で鼻・口・右目を自動追尾し、各フレーム(1/30秒）における各部位の座標値を取得した。自動追尾の様子を図１に示す。

(3) オリジナル映像全体の大きさが２者で異なっていたので、背景の座標値から拡大倍率を算出し、座標変換による補正を行った。

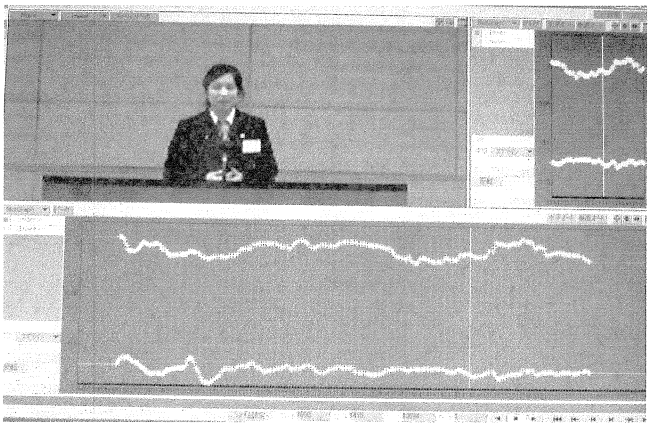
(4) 得られたデータから、3部位間の相関係数及び各部位のx, y座標の平均値・最大値・最小値・標準偏差を求めた。

(5) 平均値・標準偏差から閾値を設定し、鼻のx座標データから顔の向きを決定していった。主観判断との一致率（検出率）を求めた。

(6) 鼻の時系列データから「停留点」を抽出し、その座標値グラフと主観判断グラフを比較検討した。

(7) 鼻の時系列データをフーリエ解析にかけ、そのスペクトルグラフを比較検討した。

〈発表者Ａ〉



〈発表者Ｂ〉

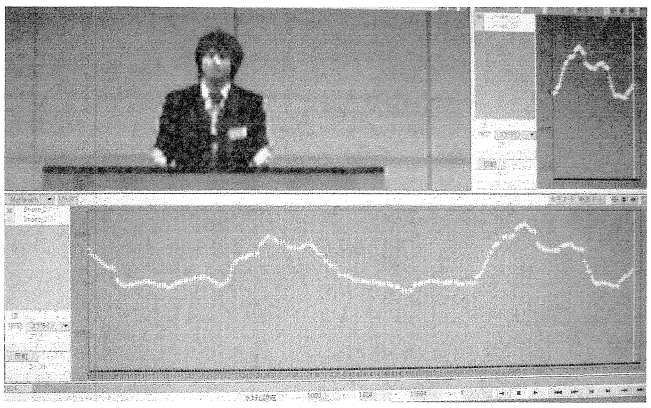


図１　動画分析ソフトによる自動追尾の様子

４．結果

４．１　特徴点間の相関係数

顔の動きを運動解析ソフトで自動追尾し、目・鼻・口の座標値を求めた。それぞれのX座標値間の相関係数を表１に示す。

表１　特徴点間の相関係数

	nose	mouth	eye
nose	1.00		
mouth	0.63	1.00	
eye	0.86	0.81	1.00

４．２　統計量

発表者Ａと発表者Ｂの鼻のx座標値について、各種統計量を表２に示す。

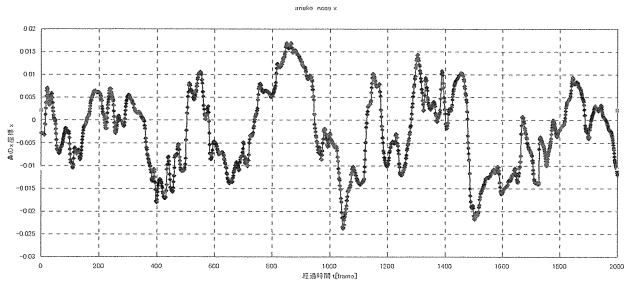
表２　鼻のx座標統計値の比較

	発表者Ａ	発表者Ｂ
max	0.0169	0.0617
min	−0.0238	−0.0203
mean	−0.0023	0.0132
SD	0.0087	0.0182

４．３　座標値の時系列変化

発表者Ａと発表者Ｂの鼻のx座標値について、時系列変化のグラフを図２に示す。

発表者Ａ



発表者Ｂ

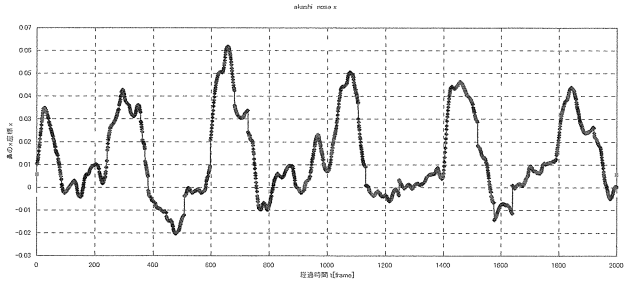


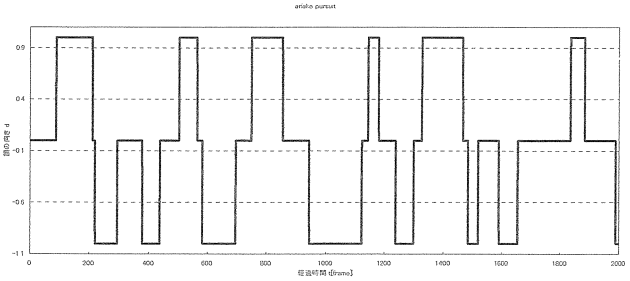
図２　鼻のx座標の変化

４．４　主観的判断による視線の変化

評定者が映像（無音声）を再生しながら、視線の向きを聴衆から見て右・正面・左に分類し、開始フレー

ムと終了フレームを記録した。右を＋１、正面を０、左を－１としてグラフにしたものが図３である

〈発表者Ａ〉



〈発表者Ｂ〉

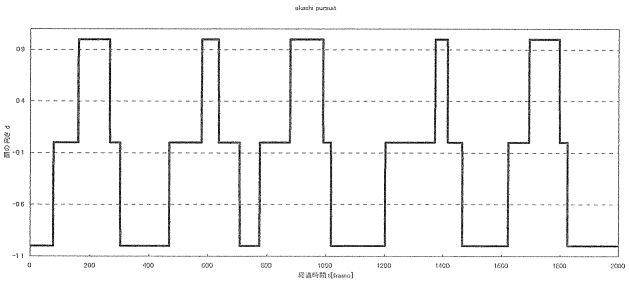


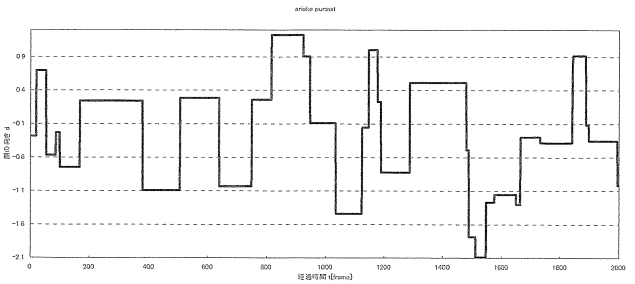
図３　主観的判断による視線の変化

４．５　停留点の変化

停留点解析は、読書中の眼球運動分析の手法を応用したものである。読書中の眼の動きは、連続して文字を追うのではなく、ある点から別の点まで飛び越して移動し、そこでしばらく留まり、また次の注視点まですばやく移動する。この瞬間的な飛躍運動をサッカード(saccade)、注視点にとどまることを停留（fixation）と呼ぶ。Rayner らの研究によると、英語母語話者の平均停留時間は 200 から 250 ミリ秒、平均サッカード時間は約 30～40 ミリ秒である(3)。

一方、スピーチ発表者の左右方向への視線移動も、連続的かつ滑らかな動きでなく、鋭い山や谷のある波形として現れる。そこで停留点抽出プログラムを作成し、座標データから停留点と停留時間を求めた。本研究では「停留点」の定義を、停留時間 170 ミリ秒で停留範囲 13（座標値）とした。

〈発表者Ａ〉



〈発表者Ｂ〉

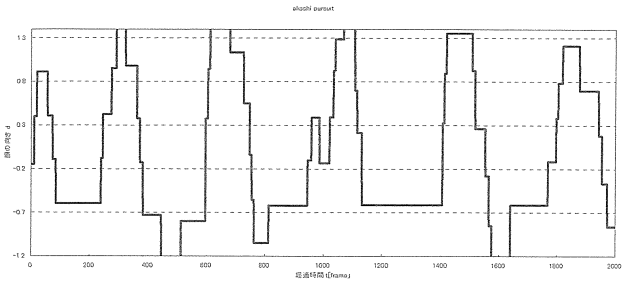


図４　停留点の変化

５．考察

(1) 一般的にアイコンタクトとは「視線があったとき」を意味するが、大勢の聴衆を相手のスピーチコンテストの場合は、「聴衆の方を向いている」と考える方が実際的である。そして、聴衆の方を向いているかどうかは、顔の向きで判別できる。従って本研究では、視線＝顔の向きとして運動解析を行った。

(2) 分析に適した顔の特徴点を選ぶため、目・鼻・口について追尾・分析を行った。目は鼻・口との相関係数が非常に高かった（表１）。また、鼻は左右を向いたときも追尾しやすく正確な座標データが得られた。結果として、顔の向きを表す指標として鼻のｘ座標値がもっとも適していることが分かった。

(3) 図１は鼻のｘ座標値の変化で、観客から見て右側を向いたときは鋭い山形の波形、左を向いたときが谷形の波形である。このピーク点に注目すれば、左右に何回向きを変えたかの概略がつかめる。また、振幅の大きさから、発表者Ｂは発表者Ａよりも左右方向に大きく視線移動していることが分かる。このことは、数値データ全体の統計値からも読みとれる（表２）。

(4) 座標値データから、顔の向きの自動検出を試みた。閾値として鼻のｘ座標値の平均値を用いると、主観判断との一致率が 73% となった。より細かく波形の山と谷を切り出すために、平均値±σと平均値±2σを閾値にしたが、検出率は低くなった。これは、発表中は顔全体が左右に移動するため、正面（原点）の座標値が変動するためだと考えられる。

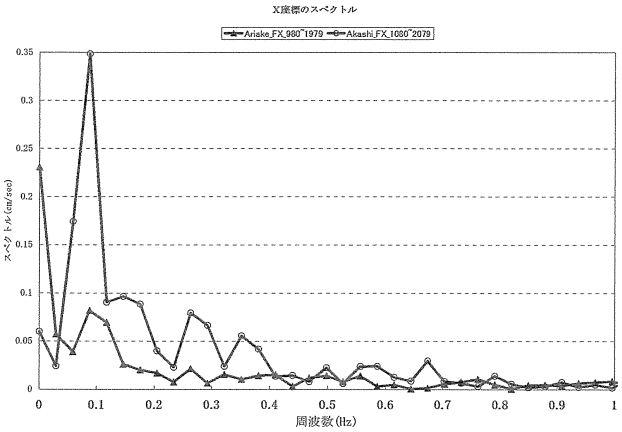
(5) 停留点解析のグラフ（図４）を主観判断のグラフ（図３）と比較すると、発表者Ａはかなり良く一致していることが分かった。一方、発表者Ｂの場合は時間的なずれが見られるが、これは顔全体が左右方向に大きく揺れ動いていたことに起因すると考えられる。

(6) 映像を見ると、発表者Ａと発表者Ｂでは視線移動運動に関して顕著な違いが見られる。発表者Ａは女性で、左右・上下の動きが控えめで細かな印象を与えるが、発表者Ｂは男性で左右・上下にかなり大きな動きを繰り返している。視覚的に捉えられるこのような違いを、数値的な解析で客観的データに置き換えるために、本研究では、音声や地震などの波形分析に用いら

れるフーリエ解析を応用した。

発表開始からの1000フレームを用い、鼻のｘ座標とｙ座標をフーリエ解析ソフトにかけた。その周波数スペクトルを図５に示す。ｘ座標スペクトルを見ると、どちらの発表者も周波数0.1Hz付近が卓越しているが、その値は発表者Ｂの方が顕著に高い。これは、発表者Ｂの左右方向への基本的な動きが大きいことの現れだといえる。ｙ座標グラフでも同様の傾向が読みとれる。

〈X座標(左右の視線移動)〉



<Y座標(上下の視線移動)>

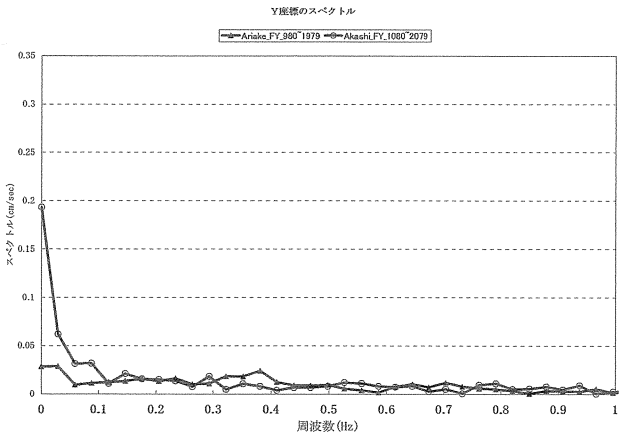


図５　鼻の座標値のスペクトル

６．総合的考察

プレゼンテーション・スピーチコンテストのように発表者がほとんど同じ位置に立ち続けている場合には、動画解析ソフトで目・鼻の追尾がしやすく、かなり正確な座標値が得られることが分かった。また、優れた発表者の左右方向への顔（視線）の動きを自動検出するには、鼻のｘ座標平均値を閾値とすればよいことも分かった。なお、プレゼンテーションの場合には、手元のパソコンや後のスクリーンを見る時に顔の上下動があるため、ｙ座標値も含めての解析が必要である(4)。今回用いた画像は非常に小さく画質も粗かったが、かなりの精度で視線の追尾・検出に成功した。また、停留点解析が視線の自動検出にある程度有効であることが確かめられた。停留点の定義変数（停留時間、停留範囲）を最適化することによって、もっと検出率が上がると期待できる。発表者の視線移動の特徴をとらえるために、フーリエ解析が応用できることも確認できた。

７．今後の展望

本研究は、「視線解析に基づく英語プレゼンテーション能力評価システムの改善」の一環である。視線の方向を運動解析ソフトで分析し、自動判定することが可能であることが示された。視線移動の頻度や大きさなどを分析するために、現在、ローパスフィルターを用いたピーク点検出の研究を進行中である。このような客観的測定・分析によって、ジャッジの主観的評価を補完することが期待できる。

また、プレゼンテーション能力を評価するためのシステムを全体としてみた場合、評価項目の検討も必要である。この点に関しては、上垣(2008)がアイコンタクトを含めてスピーチスキルの再検討を行っている(5)。視線に関する研究と評価項目に関する研究を総合して、よりよい評価システム構築を目指している。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C)「視線解析に基づく英語プレゼンテーション能力評価システムの改善」（課題番号19520541）を受けて行われた。

参考文献

(1) 福井康之：「まなざしの心理学」，創元社，1984.
(2) 西山正秋：「英文朗読者の視線解析」，全国英語教育学会第33回研究大会予稿集Ⅱ，pp. 71-72，2007.
(3) 西山正秋，門田修平：「外国語としての英語の読みにおける眼球運動：日本人英語学習者に対する予備的研究」，言語処理学会第10回年次大会発表論文集，pp. 197-200，2004.
(4) 西山正秋：「英語プレゼンテーションコンテスト発表者のアイコンタクト――座標データに基づく分析」，全国高等専門学校英語教育学会第32回研究大会発表，2007.
(5) 上垣宗明：「プレゼンテーションの評価項目の再検討」，神戸市立工業高等専門学校研究紀要第46号，pp. 95-98，2008.

日本手話の連続動詞構文

今里典子*

Serial Verb Constructions in JSL

Noriko IMAZATO*

ABSTRACT

Close observation of the actual visual data in Japanese Sign Language (JSL) clearly reveals that JSL does have serial verb constructions (SVCs), as well as American Sign Language (ASL). And these SVCs nurture the phenomena of grammaticalization. The purpose of this paper is to describe the conditions that bring about the grammaticalization. By analyzing the limited scope of data, we have concluded that only the secondary verbs in the SVCs are to be grammaticalized. It is shown that the grammaticalized secondary verbs which function as an aspect markers or imperative markers follow the primary, typical manner verbs or manner of motion verbs.

Keywords: Japanese Sign Language (JSL), serial verb construction (SVC), grammaticalization

1. はじめに

最近，音声言語を対象とした言語類型論的研究が注目を浴びている．そしてそれらの研究成果から，日本語を含む多くのアジア言語を始め様々な言語に，連続動詞構文(serial verb construction，以下 SVC) 注1)が見られることが報告され，またこの構文こそが，文法化(grammaticalization) 注2)をはぐくむ場となっていることが指摘されている．一方，手話言語においても，アメリカ手話(American Sign Language，以下 ASL)やオランダ手話 Netherlands Sign Language，以下 NSL)などで，SVC が見られることが紹介されている．例えば，Supalla(1990)[1]や Slobin & Hoiting(1994)[2]などは，この事実を賢明にも指摘した初期の研究であるといえる．しかし ASL と NSL は同じ語族に属すると考えられているので，実際には，広く手話言語でこの構文が見られるのかどうかは，語族の異なる手話言語の，実際のデータによって証明されなければならない．

本論では，ASL とは語族の異なる日本手話(JSL) 注3)において，SVC が見られるか，またこの構文が，音声言語と同じように，文法化の現象が生まれる環境を提供しているのかどうかを，実際に JSL のインフォーマントを対象にフィールドワークを行い撮影した映像データの分析によって調査することを目的としている．

まず第 2 節では、JSL 話者 2 名から，同じ条件で語ってもらった 2 つ分のストーリーを撮影したデータから，移動表現を表す表現に絞って SVC を取り出し，その特徴を明らかにした上で，構文内で文法化の現象が起こることを紹介し，その条件を明らかにする．第 3 節では、第 2 節で分析したデータ以外のフィールドワークのデータから，移動表現の連続動詞で観察される，JSL に特徴的な別の文法化された動詞の例をいくつか紹介して，文法化のシステムについて考察する．最後に，第 4 節では，まとめとともに，今後どのような研究が必要となるか，その課題と展望について述べる．

* 一般科 准教授

2. JSL のデータ分析（1）

2．1 フィールドワークの条件

本節で分析する対象のデータは，手話話者に 2 つのストーリーを語ってもらった表現を撮影したものである．

まず，インフォーマントは，東海地方在住の 30 歳代のサイナー2 名（男性 1 名，女性 1 名）である．両名ともに，教育によって習得した書記日本語とのバイリンガルであるが，音声日本語習得以前に失聴し，デフ・ファミリーで育ったことから，JSL をまず習得し，使用するようになった．主に手話で生活・成育し，現在でも家庭では日常的に JSL を中心に使用し生活している．事前のアンケートでも，「自らの第 1 言語は JSL である」と回答しているネイティブ・サイナーである．

次に撮影内容は 2 種類のデータに基づいている．ひとつ目は，音声のついてない，洋ナシについての物語のビデオ映像を見て，その内容を手話で説明するというもの（洋ナシストーリー），もうひとつは少年とカエルについての物語が，文字はなく，絵だけで表現されている絵本をみて，その内容を手話で説明するというもの（カエルストーリー）である．撮影は，インフォーマントと撮影者の 2 者のみで行い，それぞれのインストラクションは日本語が一切介入しないよう，JSL のみによって行った． 1 名には日をあらためて 2 度（合計 4 単位），もう 1 名は 1 度（合計 2 単位）撮影を行った．

2．2 SVC データの選択

今回 2 名のインフォーマントそれぞれについて，洋ナシストーリーおよびカエルストーリーのデータ，あわせて6

単位のデータを分析対象としたが，研究の目的から，これら 2 種類のデータを区別する必要がないので，まとめて分析することにした．また，Supalla や Slobin のデータとの比較を可能にするため，対象が移動事象を記述する表現を取り出し，その述部部分に注目して分析する．

6 単位すべてのデータにおいて，移動事象を記述し，移動動詞が述部に含まれるような表現の例文が 105 例見られた．そのうち，2 つ以上の動詞が共起している例は，43 例であった．（但し，共起する動詞の間に挿入されている語の有無は問わない．）しかし，これらすべてを SVC として認めることはできないと思われる．

Diller [(3)]が分析しているタイ語と，JSL は，動詞に関する構造が類似しており，どちらの言語も特別なつなぎ語（linker）を明示することなしに，非常に自由に，語を連続することができるという特徴がある．ゆえに，本来の SVC と，それ以外の動詞連続を区別するための基準が必要である．Diller が提案している基準を参考に JSL において SVC 判定を行う．

1．「SVC の基準1として，連続する動詞が，それぞれどれも同じ主語について叙述していなければならない」，という条件が必要である．例えば，

(1) [ひっぱる][CL1 移動する 後→前][ひっぱる]
V1 V2 V3
（（ヤギの飼い主が）後ろから前方へ移動するように，しきりにひっぱっている）

この例では，動詞があたかも 3 つ並んでいる SVC であるかのように見えるかもしれない．しかし，V1 と V3 は同じ動詞で，もちろん主語は共通している．この場合は，ヤギの首にロープをかけて引っ張っているヤギの飼い主の男が主語である．しかしながら，V2 の主語は，ひっぱられているヤギ自身であり，実際にはこれらの 3 つの動詞はそれぞれ別々の主語について異なる出来事を述べている．よって，この連続体はひとつの単位としての SVC とは認められない．また実際，形式上，V1 と V3 が同じ様態動詞であり，間にある V2 が移動動詞であるこのような連続体パターンは，他にいくつもその例を見つけることができる．

(2) [自転車こぐ][CL1 移動する 後→前][自転車こぐ]
V1 V2 V3
（（少年が）後ろから前方へ移動するように，しきりに自転車をこぐ）

がある．この例では，V1，V3 と V2 の主語はたまたま同一であるが，この形式は，様態を強調する別の構文として認定することができる．データでは同様の例は合計 6 例見られた．これらは SVC から排除する．

2．「SVC の基準 2 として，複数の動詞が並列関係にあり，その語の間に，[次に]などの語が挿入されても全体の文意が変わらず，文法関係も破綻をきたさない例は SVC ではない」例えば，

(3) [(水に)はまる][CL Λ 上がる]
V1 V2
（（水の中に）はまって，そして浮かんでくる）

では，V1 と V2 の間に，[次に]を挿入しても文章は破綻しないので 1 つの述部として機能しているとは認めがたい．さらに，

3．「SVC の基準 3 として，[理由]が挿入されても文意が変わらない場合は SVC ではない」，という基準も必要である．

(4) [カエル][消える][CL 男 にげる]
V1 V2
（カエルは消えたのは逃げた（から））

これらの例を排除した結果，21 例を SVC の例として分析対象とした．

2．3 データ結果

SVC の 21 例を観察すると，JSL においては，V1+V2 のように，動詞は 2 つ連続するというのが普通で，V1+V2+V3 のように 3 つ連続する例は，連続する出来事を，動詞を次々に並べて表現する例か，または次の例で見られた．

(5) [自転車こぐ][帰る 3][消える]
V1 V2 V3
（自転車をこいで行ってしまってもういない）

しかしながら，このような例においてさえも，たとえ 3 つ動詞が並んでいても，V1+V2 と V3 の間に区切れを感じると報告するインフォーマントが存在する．この区切れに関しては，今後さらにデータ数を増やした分析で，考察していく必要がある．

V1+V2 の並びでは，それぞれの組み合わせは，

①移動動詞	＋移動動詞	（6 例）
②様態／様態移動／移動原因動詞	＋移動動詞	（13 例）
③様態移動動詞	＋移動動詞以外	（2 例）

であった．この結果から，V1 には，少なくとも様態の意味を含む動詞が来る可能性が高いとはいえ，移動動詞や「のせる」などの動詞も含まれるので，意味的には比較的自由な動詞が選択できることがわかる．一方，V2 は，2 例を除いて，すべて移動動詞に限られており，またさらに移動動詞の種類も，[去る][帰る][帰る 2][帰る 3]か，類辞（CL）を含む移動動詞のみと制限が厳しい．

ちなみに，V2 が移動動詞でない例は，どちらも V2 が[ほしい]という動詞である．これらの例の取り扱いについては，2.5 で述べる．

2．4 結果の考察 ： SVC の性質

SVC がひとつのユニットの述語として存在している証拠として，次のような調和現象があげられる．

(6) [のせる][あと][自転車こぐ][帰る 2]
V1 V2
((かごに)乗せた後，自転車をこいで帰る)

この例においては，V1 を表現している時からサイナーの体が V2 を表現するときに手を動かす方向に向き，前傾していることが見て取れる．述部 V1+V2 の主語がサイナーの体として表されるときに，V1 と V2 の動詞で調和が起こっているのである．V2 の行く方向をすでに予見して V1 が算出されているということは，この連続した述部がひとつの単位としてまとめて認識されていることの証拠であると考えられる．

またインフォーマントからの聞き取り調査の結果を合わせると，SVC としての証拠はさらに列挙が可能である．例えば，SVC の V1 と V2 の間に「間」を空けることはないということ，V2 には完了などのアスペクトや否定辞などがつくことができるが，構文内で V1 にこれらの要素がつくことは決してできない．

これらの具体的な証拠を観察に続いて，SVC の特徴についても述べておく必要があろう．まず一つ目は，V2 にはアスペクトや否定辞がつけるが，V1 にはつけないことから，V2 をヘッドとして認めることができるということである．第 2 に，出来事が継起的に起こっているのか，それとも同時に起こっているのかということが，非常に重要である．動詞が複数継続しても，継起的な，並列的な出来事は，SVC とは異なる(2.3 参照)．また同時的であれば，手話の両手での表現についても扱うことが可能になる．例えば，

(7) [子供][カエル][のせる][帰る][帰る]
[テ 4] [持つ]
V1 V2
(子供はカエルを手の上に乗せて帰る)

＊但しこの例で一番後ろの[帰る]は，後ろから 2 番目の[帰る]を言い換えたものである．

このような例を見ると，[テ 4]でカエルを手の上に乗せたことを表した後，この非優位の手は，優位の手が最後の V2 を表現し終えるところで，[持つ]を表すことで，家まで帰る間中ずっと手に持っている状態が[帰る]という出来事と同時に起こっていることを表示し，結果として，「手に乗せて持ち帰る」の意味を表すことが可能となっている．

2．5 結果の考察 ： 文法化の過程

上の分析によって，JSL の SVC の性質が明らかになってきたが，音声言語の研究成果は，音声言語ではこのような SVC こそが，文法化をはぐくむ場であると指摘している．手話言語，本論では JSL のデータにおいても，この点について考察する必要がある．

まず，Aikhenvald [4]はその著書のなかで，SVC を定義し，その項目のひとつとして，

(8) Each component of an SVC must be able to occur on its own. (1:10-11)

と述べている．この主張の理論的問題点についての議論は，Shibatani [5] [6]に詳しいので，ここでは繰り返さない．これとは別に，本論で取り上げるべき，(8)の著者の主張とは，「SVC を構成する V1 も V2 も，それぞれがもとの独立した動詞の姿で文の述部となれる」，ということである．この視点からもう一度データを見直し，特に，V2 である[帰る]に注目して，考察したいと考える．まず，以下の(9)の例を見る．すでに紹介した例と一部重なるが，比較のためにあえて再掲する．今里[7]でも触れたが，

(9) a. [一緒][帰る]
(自転車をこいで帰る)

b. [のせる][あと][自転車こぐ][帰る 2] (6)再掲
V1 V2
((かごに)乗せた後，自転車をこいで帰る)

c. [自転車こぐ][帰る 3][消える] (5)再掲
V1 V2 V3
(自転車をこいで帰ってしまってもういない)

(9a)では，[帰る]を単独で述部としている例であり，本当に「(少年が自分の)家に帰る」という意味で使用された例である．このときは 5 指を伸ばしCの形を作り，これをつぼめながら帰る方向へ手を移動させる形で表現する．(9b)と(9c)は，主語が実際に家に帰っているのかどうかはわからないが，とにかくこの場から離れていなくなっているような状況を表現したものである．とくに(9c)では，さらに V3 に[消える]という表現が実際に使用されており，「帰宅」の意味よりも，「この場所にいなくなる」と言う意味が強く表現されていることがよくわかる例である．興味深いのは，それぞれ(9b)と(9c)の手形がどのように表されるかである．(9b)では，人差し指から中指までの 3 指で C の形を作り，それをつぼめながら移動方向に動かすようにする．次に，(9c)では，親指と人差し指の 2 指のみで同様に表現するのである．つまり(9a)から(9c)になるにつれて，手形はどんどん簡略化されているということがわかる．そしてこの簡略化は，[帰る]というもともとの動詞の「帰宅する」意味が薄れて，「とにかく移動の結果ここにいなくなる」という意味に変化していくのと平行している．形式の簡素化と意味の漂白は，文法化の指標であることから，このような変化は，SVC における V2 の動詞の文法化の過程であると考えることは妥当であろう．このような V2 の文法化(の過程)の例は，紙面の都合上，例は省略するが，他にも[去る]や[逃げる]などの動詞を源に，同様の現象が観察される．

では，このような文法化は，どのような環境で起こるのであろうか．ここで扱ったデータからわかることは，文法化を起こす要素は SVC の構文内で必ず V2 である，ということである．2.3 で見たように，V1 は比較的どのような種類の動詞でも選択可能であるが，V2 には厳しい制限があることを見た．JSL では CL を含む移動動詞は V2 に選択されうるが，それ以外は，ある程度決まった動詞しかあらわれることができないようである．つまり，[帰る][逃げ

る][出る]の3つであり，さらに上で見た，移動動詞ではない2つの例外でみられた[望む]である．これらの特定の動詞がなぜ選ばれるのかについての探求は，今後の課題である．

第2節では，特定のデータを分析することで，SVCの姿や性質，またその構文内で起こる文法化の特徴について述べた．しかし，文法化についてはさらに考察を深める必要がある．JSLではSVC内のV2の位置に選択される特定の語のみ文法化をすることがわかった．音声言語においても同様の指摘がすでになされており，文法化しやすいこのような特定の動詞には，音声日本語でも馴染み深い，「行く・来る」などもあげられている．そこで，次節では，本節で分析を試みたデータ以外の例を紹介しながら，JSLにおける，別の文法化現象について紹介し，考察したい．

3．JSLデータ分析（2）：文法化

3．1　データについて

第2節と同じサイナーを対象に撮影した別のデータから，文法化に注目してデータを取り出し，文法化について議論する．移動の出来事を表す表現において，「行く・来る」に対応するJSL表現について取り出し，文法化の現象が見られるかどうかを確認し議論する．

3．2　データ分析結果

JSLにおける[行く][来る]にあたる動詞は，実は異なる2つの動詞とは考えにくいという特別な事情があるので，まず説明しておきたい．JSLの[行く]は，人差し指だけを伸ばし，その指先で移動対象の経路をなぞるように，自分に近い位置から遠い位置へ指を動かすことで表現できる．逆に[来る]は，同じ手形を，自分から遠い位置から近い位置へ指を動かすことで表現できる．つまり同じ手形で方向のみ逆の移動を行えばよいわけである．サイナーを中心に据えた表現のときは，違いははっきりしている．しかし，対象の移動がサイナー（1人称）と目の前の相手（2人称）以外のとき，例えば3人称の間の出来事「彼が彼女のところに行く」という文を表現しようとすると，サイナーの目の前を，右から左に（または左から右に）人差し指の手形を移動させることになる．これが[行く]であるか，[来る]であるかを判定するのは簡単ではない．日本語の表現とJSLの表現を同じものとしてみなさなければならないという理由はないように思われる．JSLの[行く・来る]は，[人差し指手形Iが移動する]方向がどちらを目指しているかで変化する，ということで，これは，JSLの他の多くの動詞の性質と全く同じである．したがって，本論では，あえて人差し指の手形を，[行く]か[来る]かという，2つの相反する日本語の語彙と対応させて表記するのではなく，ひとつの[I 移動する]という語彙として記述することにする．

JSLの[I 移動する]に関しては，言語理論が予測するように，文法化に深くかかわるデータを見つけることができる．次の例で，

(10) [私 i][学校 j][I 移動する i→j]
（私は学校に行く）

(11) a. [あなた][弁当][食べる]
（あなたは弁当を食べる）

b. ([あなた])[弁当][食べる]
（弁当をたべろ）

c. ([あそこ i]) [弁当][食べる] [I 移動する i]
V1　　V2
（あそこへ弁当を食べに行け）

d. [弁当][食べる][I移動する]
V1　　V2
（弁当を（移動しないでここで）食べろ）

(10)にあるように，一般動詞として使用すると，[I 移動する]は自分の位置から，離れたところに手形を動かすと，その場所に行くという意味になり，日本語訳は「私は学校に行く」となる．

さて，JSLの命令形は，普通(11b)で見られるように，通常動詞に[あごあげ]をつけることで表現される．このとき命令は目の前にいる相手に対して言うのであるから，もちろん動詞の主語である[あなた]は表現しないのが普通である．よって（ ）を付してある．命令形と平叙文の違いは(11a)との比較で明らかである．

次に，(11c)の表現では「あそこへ弁当を食べに行け」という命令の意味を表すことが可能である．同様に(11d)でも，「弁当を（移動しないでこの場で）食べろ」という強い命令の意味[注4)]を表すのである．(11c)と(11d)の違いは，前者のほうが，[I 移動する]を，実際に移動してほしい方向にあわせて，比較的大きな動きで表す必要があるのに対して，後者では，[I 移動する]を，サイナーの体の前で，実際に食事をする場所とは方向をあわす必要なく，しかも非常にちいさな簡略化された手の動きで表現するのである．しかも，(11c)や(11d)では，(11b)とは異なり，V1[食べる]部分にも，V2[I 移動する]部分にも，[あごあげ]をつけなくて良い，というよりはむしろ，[あごあげ]は伴わないのである．言い換えれば，ここにおいて[I 移動する]は，[あごあげ]のかわりをつとめていると言ってよい．(11c)(11d)の例は，したがって，V1+V2のSVCがあれば，V2に選択される移動動詞が，「対象が移動する」というもともとの動詞の意味からはなれた機能を持ちうることを示唆している．特に，(11c)から(11d)の変化は注目に値する．(11c)では，もとの動詞を表現する場合と同じように，実際の移動の方向や距離を反映する必要があり，また意味も依然として，移動の意味を保持しているが，形式が簡略化するにつれ，本来の移動の意味は薄れ，(11d)にいたっては，別の，より文法的な「命令」の機能を持ちうるようになり，もともとの[I移動する]の動詞は，すっかり命令を表示する文法標識である[あごあげ]のかわりとなっている．

但し，この簡略化した[I移動する]命令標識が，どんなV1とも共起するかといえば，そうではない．

(12) [走る][I 移動する]
（走れ）

(13) *[逃げる][I 移動する]
(逃げろ)

例えば，[食べる]や[走る]とは(11d)の用法で共起できるが，[歩く]は(11c)の用法は可能だが，(11d)の用法はインフォーマントの意見が分かれてしまう．[逃げる]では，(11c)の用法でも(11d)の用法でも共起しにくいという観察がある．

どのような V1 のときに，命令マーカーとして機能できるのか，またできないのかを詳細に分析すれば，少なくともこの文法化を生み出す条件について，知見が得られるだろうと予測している．

さらに，他にも，SVC 内で文法化した表現がいくつも観察される．例えば[する・行う]も，V2 としていくつかの動詞と SVC を構成し，「意思」や「近い未来」を表す例がある．また，[味わう]という動詞は，同じように V2 として，いくつかの動詞と SVC を構成し，「経験」の意味を持つことが明らかになった．また[終わる]は V2 として「完了」を表す．このような V2 の動詞にはどのようなものがあり，その共通点は何なのか，これらの V2 動詞と共起しうる V1 の動詞にはどのような制限があるのか，さらに V2 が文法化を起こすときの共起制限はいかなるものなのか，を明らかにすることは，SVC と文法化の関係を明らかにするのに必要な仕事であると考えている．

また SVC 内の制限だけでなく，SVC 外の条件，例えば命令の場合のように，2 人称という条件が必要かどうかも調査する必要があるだろう．

最後にもうひとつ重要な事項として，第 2 節で見た文法化の結果，どのような機能が表されるようになるのかも十分検討されなければならないと考える．

4. まとめと今後の課題

手話言語，特に JSL の SVC の研究は，非常に新しく，しかし大きな知見を得ることができる分野であるが，フィールドワークの作業を行い，インフォーマントから丁寧に聞き取りと撮影をしたデータを分析して，実証的な研究がなされなければならない．本論では，JSL の移動構文に含まれる SVC の特徴や，文法化を生み出す機能などを，データの分析を通して，実証的に明らかにした．

最後に，すでに議論した今後の課題をまとめておく．いくつかの特定の動詞が SVC で V2 に選ばれ文法化するのはなぜか．またそれら特定の動詞の共通性は何かあるのか．どんな環境で，文法化が起こるのか．とくに V1 にどのような動詞が選択できるか，またそのうち V2 が文法化する組み合わせとはどのようなものか．V1+V2 の組み合わせ以外に，文法化を生み出す条件はあるのか．文法化の結果，その動詞の表す意味，または果たす機能は何なのか．さらに進んで，音声言語と比較の上，このような文法化を引き起こす機能的要因は何か，などである．これらの探求を目的として研究を進めることによって，JSL という，身近でありながら，未だ全貌が知られていない言語の姿を明らかにするだけでなく，音声言語と手話言語を含む，広く一般言語学理論にも資することができるだろう．

謝辞

日本手話(JSL)のインフォーマントとして，高岡真美氏，桜井強氏の両氏には，お忙しいスケジュールをやりくりし，長時間にわたり，忍耐強く，撮影にご協力をいただいた．またネイティブ・サイナーとしての有益なコメントをたくさんいただき，参考にさせていただいた．ここに心から感謝の意を表したい．

言うまでもなく，論文に残る不備は，すべて筆者の責任である．

なお本研究は、科学研究費補助金基盤研究(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)を受けている．

注

1) 連続動詞構文については，参考文献の(1)に詳しい．定義や考え方の問題点については，同じく参考文献の(3)(4)にある．
2) 文法化については，Paul J. Hopper & Elizabeth C. Traugott: 「Grammaticalization」, Cambridge University Press, 2003. などを参照．
3) JSL を記述するために以下の記号を使用している．なお，本文において[ ]内の語は，すべて JSL の語を表している．例文内での i, j の記号は，それが付帯された語が，同じ記号がついた語と一致することを表し，( )内は記述した JSL の例文が対応する音声日本語訳を付している．

本文中の記号
- [ ] : 手話語彙
- CL1 : 類辞．人差し指だけを伸ばした手形
- → : 手形の移動を表す．この向きはサイナーから離れる方向．→が反対になれば，逆にサイナーに近づく方向
- CLΛ: 類辞．人差し指と中指の 2 本を指先下向きに伸ばした手形．
- 手1 : 5 指をすべて伸ばし，手のひらを下向き，指先を腕と反対の方向に伸ばす手形
- 手4 : 5 指をすべて伸ばし，手のひらを下向き，指先を前方に伸ばす手形
- [___]: 下線を付した語に[あごあげ]を付帯する

4) ここで扱った JSL の命令文について，以下の区別を注意するべきである．[あごあげ]を伴う形は標準的な命令の形である．基本的にはどんな動詞にもつくことができる一般的な表現方法である．一方，[I 移動する](いわゆる音声日本語の「行く」「来る」に対応するような語)を利用する命令は，特別な，非常に強い命令を表す方法である．一般的には女性はあまり使わず，男性が使う頻度が圧倒的に高い．また，必ず目上の者が目下のものに指示する場合にしか使用す

ることができない．命令するものと命令されるものの上下関係は圧倒的であるほうが自然な命令だと受け取られる．例えば，会社の上司と部下，教師と小学生，親と幼い子供，体育会系の先輩と後輩などである．本文中で非文になっている例は，たとえこのような条件を配慮したとしても，やはり不自然であり非文であることを示している．

参考文献

(1) Supalla, T.:「Serial Verbs of Motion in ASL」, *Theoretical Issues in Sign Language Research, Vol.1:Linguistics*, S. D. Fischer and P. Siple (eds.), pp127-152, Chicago: University of Chicago Press, 1990.

(2) Slobin, D. I. & Hoiting, N.:「Reference to Movement in Spoken and Signed Languages: Typological Considerations」, Proceedings of the Twentieth Annual Meeting of the Berkeley Linguistics Society, pp487-505, 1994.

(3) Diller, A. V. N.:「Thai serial verbs: Cohesion and culture」, Aikhenvald, A. Y. & M. W. Dixon (eds.), *Serial Verb Constructions: A Cross-linguistic Typology*, Oxford University Press, pp161-177, 2006.

(4) Aikhenvald, A. Y. & M.W. Dixon (eds.):「*Serial Verb Constructions: A cross-linguistic typology*」, Oxford University Press, 2006.

(5) Shibatani, M.:「Verb serialization in Formosan languages- Their form and grammaticalization pattern-」, (to appear)a.

(6) Shibatani, M.:「On the form of complex predicates— Toward demystifying serial verbs—」, (to appear)b

(7)今里典子：「JSL の移動表現について:動詞に注目した予備的研究」, 神戸言語学論叢, pp69-78, 2007.

プレゼンテーションにおけるポーズの役割

上垣　宗明*

The Role of Pause Duration on the Presentation

Muneaki UEGAKI*

ABSTRACT

Today's society has needed and will need further develop and improve student's presentation skills. However, the research on presentation in the field of English language education has not been very popular. There would be some criteria to evaluate the presentation. Focusing on the utterance of the students' presentation among these criteria, we would research the role of pause duration time on the presentation, and we would examine the appropriate pause duration time and the number of pause duration times. We would also examine the difference between Native Speaker's judgment of students' presentation and Japanese English Teacher's judgment. The purpose of this paper is to consider the role of pause duration, in order to evaluate the most effective presentation for the audience.

We would analyze four Advanced Course Students' presentations at Kobe City College of Technology. The results of the analysis found the importance of the student's pause duration. We would understand that the number of times and the time of the pause duration would affect the evaluation of the presentation.

Keywords：presentation, evaluation, pause duration

1．はじめに

本高専は、2002年度より以前の英語スピーチコンテストに代わり、英語プレゼンテーションコンテストを実施している。高等教育レベル（大学・大学院など）での外国語教育について古石は次のように述べている。

> 各自の専門に合わせた高度の運用能力をつけることのできる学習教育環境を整える必要があります。学習言語でのアカデミック・ライティングやプレゼンテーション、そして原書の精読や要約の仕方など、高校までには断片的にしかやらなかったような事柄に総合的にアプローチし、研究や将来の職業に役立つような教育をこそすべきです。(1)

このような視点から本高専のプレゼンテーションコンテストを考えると、学生自身の研究に関することをテーマとし、それを英語でプレゼンテーションを行うので、学生は英語学習に総合的に取り組んでいると言える。プレゼンテーションは今後学生にとっては必要となるスキルの一つなので、より効果が期待できる指導方法を研究し、実践していきたい。より効果が期待できる指導を行うためにはその評価についても検討する必要がある。適切な評価項目を設定し、その基準を十分に満たすような指導が必要である。適切な評価項目はより効果的な指導を行う上では非常に重要であると言える。

本高専のプレゼンテーションの評価項目は実施当初から変わっておらず、1. 英語力：English（pronunciation、speed、intonation、etc.）、2. 興味深さ：Attractiveness（interesting、etc.）、3. 発表態度：Manner（gesture、eye contact、etc.）、4. 画像構成：Slideの4項目である。この評価項目は、他のプレゼンテーションの評価項目と比較しても妥当な評価項目であった(2)。以前にもプレゼンテーションに関する調査を、英文原稿、発表態度、画像構成を対象に行った。その結果、英語プレゼンテーションを評価する際に、アイコンタクトと英文原稿の読みやすさが大きな影響を与えていることが明らかになった(3)。本稿では、評価項目の一つであり、英語教育の中でも非常に重要だと思われる英語力に焦点をあてて

*　一般科　准教授

分析する。

2．Native Speaker と日本人英語教師の評価の違い

本高専で行われた第 26 回英語スピーチコンテストプレゼンテーションの部（平成 20 年 1 月 23 日実施）に参加した学生（専攻科 1 年生 4 名）のプレゼンテーションを Native Speaker（以下：NS）3 名と本高専の日本人英語教師（Japanese Teacher of English 以下：JTE）3 名で評価した。NS は、市内中学校の外国語指導助手 1 名、本高専の英語非常勤講師 1 名、他大学の英語非常勤講師 1 名である。NS と JTE の男女比はともに男性 2 名、女性 1 名であった。評価項目は本高専の 4 つの評価項目とアイコンタクトである。アイコンタクトの評価は 5 点満点でそれ以外の評価項目は 10 点満点で評価した。それらの評価において NS と JTE との間に違いがあるのかを分析していく。また、違いがあるのならどのような項目に大きな違いが見られるのかを検討する。

表 1 に、NS の 3 名（NS1～NS3）と JTE の 3 名（JTE1～JTE3）が 5 つの項目に対して、4 名の学生それぞれを評価した点数の平均を示す。

表 1　NS と JTE の評価点

	英語	興味	態度	画像	アイコンタク
NS1	8	7.75	7.5	8.5	2.75
NS2	8	7.75	7	7.5	3
NS3	7.5	8	7.5	8	3.5
平均	7.83	7.83	7.33	8	3.08
JTE1	7	7	5.5	7.5	3
JTE2	7.25	7.25	4.5	7	2.25
JTE3	7	7	6	7	2.5
平均	7.1	7.1	5.33	7.17	2.58
全平均	7.46	7.46	6.33	7.58	2.83

（英語：英語力、興味：興味深さ、態度：発表態度、画像：画像構成、アイコンタク）

表 1 から分かるように、JTE は NS よりも全ての項目で低い評価をしている。平均において大きな差がみられる項目は発表態度で、その差は 2 点もある。発表態度の項目には、アイコンタクトの項目も含まれるが、アイコンタクトの評価点の差は、0.5 で 10 点満点に換算しても 1 点の違いしか生じていない。JTE は、ジャッジの対場というよりも教師の立場で評価したために全ての項目で厳しい評価をしていたことが推察できる。特に発表態度は教師として一番気になる項目なので JTE と NS の間にこのような評価の差が生じたのだろう。その他の項目の評価においても、JTE はコンテストに出場した学生を発表者という立場ではなく、このコンテストを授業の一環として捉え自分たちが指導してきた学生として評価したために、このような評価点になったことが推察できる。

3．評価の違いについて

次に、学生個人に対しての ジャッジ 6 名の平均点と NS と JTE のそれぞれの平均点を表 2 に示す。

表 2　学生に対する NS と JTE の評価の違い

	英語	面白い	マナー	画像	アイコンタク
S1	7.50	7.17	6.50	8.17	2.83
NS	7.33	7.67	6.67	8.67	2.67
JTE	7.67	6.67	6.33	7.67	3.00
S2	7.00	7.33	5.33	7.17	1.83
NS	7.33	7.33	6.33	7.33	2.00
JTE	6.67	7.33	4.33	7.00	1.67
S3	7.17	7.50	6.17	7.17	2.83
NS	7.67	8.00	8.00	7.67	3.33
JTE	6.67	7.00	4.33	6.67	2.33
S4	8.17	7.83	7.33	7.83	3.83
NS	9.00	8.33	8.33	8.33	4.33
JTE	7.33	7.33	6.33	7.33	3.33

（S1～S4：コンテスト出場学生、6 名の平均点を記述）

先述したように、やはり NS よりも JTE の方が各項目の平均値で約 1 点厳しい評価をしていることが分かる。NS と JTE の学生個人に対しての評価では S1 に対しての評価が非常に興味深い。英語とアイコンタクトの評価が NS と JTE で逆転しており、NS よりも JTE の方がよい評価をしていることが分かる（英語：NS 7.33、JTE 7.67、差 0.34、アイコンタクト：NS 2.67、JTE 3.00、差 0.34 ）。前回の調査でアイコンタクトと英文原稿の受身の文の割合が評価に影響を与えていることが明らかになったが、今回でも英語とアイコンタクトの評価は他の項目とは異なる傾向が見られ、評価全体に対してなんらかの影響を与えていることが窺える。前回の調査では、アイコンタクトについて詳細に分析したが、英語については学生が書いた英文原稿のみの分析しか行っていない。今回は、前回と同様に英文について分析し、前回は調査できなかった音声についても分析を加えていきたい。

4．英語の分析

4．1 英文原稿の分析

前回と同様に英文原稿を Microsoft 社のワープロソフト “Word2002” に付属している文章校正機能を利

用し学生が書いた英文原稿を分析する。その結果を表３に示す。

表３　学生の英文原稿の調査

	S1	S2	S3	S4
語数	299	416	295	342
文字数	1529	1994	1468	1625
文	21	26	20	28
単語数 / 1文	14.1	15.8	14.8	12.2
文字数 / 単語	5	4.8	4.8	4.6
全文中の受身の割合	14%	15%	5%	14%
Flesch Reading Ease	53.8	55.6	57.8	66.4

表３の特徴的な項目として、文の総数、全文中の受身の割合、Flesch Reading Ease（英文の難易度）をあげることができる。その他の項目については、S2の英文が長いことが指摘できるが、それ以外はほとんど同じような値となっている。文の総数はS4が最も多く（28文）、そのために1文中の平均の語数が最も少ない（12.2）。1文中の単語数が最も多いS2と比較すると3.6語もの違いがある。次に受身の全文章中に占める割合は、S3がもっと少なく５％であるのに対して、その他は14%程度とほぼ同じような値である。英文原稿の分析で最も注目すべき項目がFlesch Reading Easeの値である。Flesch Reading Easeは、英文中の文の長さや単語の長さ、受身の割合などを総合して算出している。前回の調査では全文中の受身の割合がFlesch Reading Easeの数値にかなり影響を与えていたが、今回の調査では、受身の割合があまり影響してないようである。さらにFlesch Reading Easeの値について詳しくみて行く。

このFlesch Reading Easeの求め方については遠藤が詳しく説明しており、現在最も普通に使われているformulaになっていると述べている（表４：関係箇所のみ抜粋）[4]。

表４　Flesch 難易度評価

Score	Style Description	Estimated Reading Grade
30 － 49	Difficult	13th to 16th grade
50 － 59	Fairy difficult	10th to 12th grade
60 － 69	Standard	8th to 9th grade

表３、表４から分かるように、受身の割合がS1とS4は、同じ値になっているがFlesch Reading Easeの値はかなり異なっている。S4の英文原稿の難易度は、アメリカの8th to 9th gradeの学生が読むのに最適である。日本では中学校２年生から３年生にあてはまる。S1の英文原稿は４名の中で最も難易度が高く10th to 12th gradeの学生が読むのに最適である。日本では高校３年生の学年にあてはまる。この読み易さの開きが、表２の英語の評価点の開きに影響していることが推察できる。

次に、発表時間と単語数を計測し、１分間に何語話されたかを分析する。

表５　発表時間と英文原稿

	S1	S2	S3	S4
語数	299語	416語	295語	342語
総発表時間	3分15秒	4分10秒	2分44秒	3分35秒
単語/1分間	92語	99.8語	107.9語	95.4語

総発表時間は、言い間違いや言い淀みを含めた時間なので、英語を読む速さを正確に求めるためにはこれらを考慮すべきだが、それらを考慮しなくても傾向を読み取ることができる。S1の読む速度が一番遅く、その次にS４の読む速度が遅いことが分かる。

このコンテストにおいては、S1が優勝し、S４が準優勝であった。表２～表５を見ても、この両名にはFlesch Reading Ease以外の項目で大きな違いが見られない。この違いは、英文原稿の難易度の違いが強く影響していた。しかし、英語の評価には英文原稿だけではなく、発表時の音声も含まれるので、次にその音声が評価に影響を与えたのかを検討する。音声に関しての分析は非常に時間がかかるために、今までの調査で特徴的であり、またコンテストで優勝、準優勝を修めたS１とS４の音声を分析対象とする。

４．２　発表音声の分析

S1とS4の英語に対するNSとJTEの評価の違いを検討する。発表者の音韻的特長の一つであるポーズに焦点をあてて分析する。音韻的特長は、アクセント、発音、ストレス、ポーズなどをあげることができる。杉藤は日本語の発話理解においてポーズの重要性について以下のように述べている。

> ポーズは、話し手にとって生理的にかくことのできないものですが、聞き手にとっても、話を記憶し理解するうえでかくことができない。つまり、話を相手に分かってもらううえでのポーズの重要性をしめすことが教育上必要だとおもいます。[5]

杉藤の記述は、日本語の音声についての記述であるが、英語を聞いて理解するうえでも非常に重要なことである。日本語の文章でもポーズがないと内容を理解できない。外国語である英語を理解するためにも読み手が適切な箇所でポーズを取ることは必要である。また、英語を母語とするNSについても同様のことが次の杉藤の記述からも言える。

> また、話してのポーズの時間については、その他の言語材料についても実験をしたが、ポーズが聞き手にとって話を理解するための知能処理の時間であり、ポーズの時間を完全に切除した音声をきかせると、聞き手は話が全く理解できなくなる。また、ポーズをとるとやたらに早口にきこえる。などということが明らかになった。(6)

杉藤が述べているように、日本語や英語の音声を理解する上では非常にポーズが重要であることが分かる。さらに、ポーズの重要性については、「ポーズは文法的・意味的情報を伝え、さらに聞き手の注意を話に集中させるために話しことばでは有効である(7)」との記述もある。

次に、学生の発表を音声分析ソフト(Speech Analyzer 3.0.1)を用いて分析した結果を表6に示す。ポーズの回数は、0.4秒以上のポーズを対象とし、その合計時間や平均時間を算出した。ポーズ間の語数は、ポーズとポーズの間に発せられた単語数を数え、その平均を算出した。文末のポーズの時間は、ピリオド後のポーズを対象とした。

表6 発表の分析

	S1	S4
語数	299語	342語
ポーズの回数	69回	95回
ポーズの時間（合計）	91.8秒	115.7秒
ポーズの時間（平均）	1.35秒	1.19秒
ポーズ間の語数(平均)	4.21語	3.52語
ポーズの時間（平均）	1.35秒	1.19秒
文末のポーズの時間(合計)	44.2秒	60.9秒
文末のポーズの時間(平均)	2.21秒	2.25秒
文末以外のポーズの時間（平均）	0.97秒	0.85秒
言い間違い（回数）	9回	4回
言い間違いの合計時間	21.8秒	4.7秒
ポーズを除いた時間	81.4秒	94.6秒
1単語にかかる時間（平均）	0.28秒	0.28秒

表6より、S1とS4の違いについて検討する。最も大きな違いとしては、言い間違いについての2つの項目をあげることができる。S1は、言い間違いを9回、21.8秒の時間を費やしているのに対して、S4は回数も4回で時間も4.7秒と非常に言い間違いが少ない。しかし、この項目はNSにとってもJTEにとっても同じように聞こえるのでNSとJTEの英語に対する評価の違いに大きな影響を与えているとは言えないだろう。S1とS4の学生は1単語にかかる発音時間にも違いが見られないが、ポーズの回数に違いがある。ポーズの回数はS1が69回とS4が95回と26回の違いがあり、平均のポーズの時間ではほとんど違いはみられないが、回数の多いS4の方が0.16秒短いことが分かる。しかし、文末のポーズの時間はほぼ同じ時間である。ポーズに関係して、ポーズとポーズの間に発せられる単語数がS1は4.21語でS4は3.52語とS4の方が早めにポーズを置いていることが分かる。NSのS4に対する英語の評価は、平均9点と非常に高い値であった。NSにとっては1回のポーズの時間は短くてもよいが、フレーズ毎に短い間隔でポーズを置くような発話のほうが理解を助けるポーズになっていると推察できる。反対にJTEのS1の英語に対する評価点の平均は、NSの平均と逆転していた(JTE:7.67、NS:7.55)。JTEにとっては、ポーズ間で発話される単語の数は多くても理解ができると推察できる。この結果から、NSが高い評価する発表とは、ポーズを短い間隔で刻んでいき、言い間違いをしないような発表であることが分かる。

しかし、このようなNSとJTEの評価の違いに関しては他の要因が関係している可能性もある。NSは、発表原稿をコンテスト会場で初めて目にし、その場の学生のプレゼンテーションだけで評価した。しかし、JTEは前もってプレゼンテーションの発表原稿を目にすることができ、プレゼンテーションを聞く前に内容を理解することが可能であった。プレゼンテーションの発表用英文原稿以外にも、英文原稿の概要を日本語で書いたものを読むこともできていた。すでに、JTEはプレゼンテーション聞く前に発表内容を理解していたのなら、NSとの評価の違いが生じるはずである。その違いがS1とS4における、英語の評価の違いに表れたのだろう。つまり、S4の学生のポーズを短い間隔で、短い時間置いていく発表は、始めて聞く聴衆にとっては理解しやすいものになった。しかも、発表する英文は簡単な英文であったために、内容理解がしっかりでき、それが高い評価へとつながったと考えられる。S4のNS3名の評価は4名中最高で、平均9点という非常に高い値であった(JTEの平均は7.33である)。反対に、ある程度発表内容を知っているJTEにとっては、ポーズを少し長い間隔でとっていき、英文が少し難しくても、既に内容を理解している

ので、発表を聞くだけで充分内容が理解できたのだろう（S1 の英語における JTE 3 名の平均は 7.67、NS は 7.33）。実際のプレゼンテーションにおいては、発表以前に内容を知らされることはあまりなく、発表だけで判断することが多いと思われる。このような観点から言うと、S4 の発表は、実用的な発表だと言えるだろう。 S1 の発表は、プレゼンテーションコンテストなどで発表する際に前もって発表原稿を提出させるコンテスト用の発表だと言えるだろう。

４．３ モデルリーディングとの比較

コンテスト出場者の練習用教材として、学生が書いた英文原稿を NS が読み、それを録音したファイルを利用した。このファイルを、学生の音声を分析したときと同様に Speech Analyzer を利用し分析した。ポーズに関しては、以前のポーズと同様に、0.4 秒以上のポーズを対象として調査した。

発表と読むことでは、かなり違う要素が関係しているが S1とS4の違いを把握する上では、充分に参考となる資料である。

表7 NS のモデルリーディングの分析

	S1	S4
NS のモデルリーディング（時間）	3 分 7 秒	3 分 3 秒
NS のポーズ（合計）	41.2 秒	42.6 秒
NS のポーズ（回数）	36 回	46 回
NS のポーズ（平均）	1.14 秒	0.97 秒
1 分間の語数	95.9 語	112.1 語
ポーズ間の語数	8.31 語	7.43 語

総単語数や文字数は S4 の原稿の方が多かったが、読むのに費やした時間は S4の原稿の方が短いことが分かる。S4 の原稿は、1 単語に占める文字数が S1 の原稿と比較すると0.4 文字少ない。少ない文字数の単語を利用して英文を書いていることも関係し、読みやすい原稿を作成していた。そのために、読む時間が短くなったのだろう。S1 の原稿と比べると S4 の原稿は読みやすい原稿だったことも表7からも十分推察できる。

表6の学生のポーズの回数と比べると、モデルリーディングの方がポーズの回数や時間が少なく、ポーズ間の語数が多いことが分かる。プレゼンテーションと読むということの違いにも起因しているが、Native Speaker のポーズ間の語数からも分かるように、S4 の原稿は1つのフレーズを少ない語数でまとめているので、読みやすく、理解しやすい英文となっている。

５．考察

以上の結果から、英語プレゼンテーションにおいて、評価に影響を与えている２つの要因が明らかになった。英文原稿の読みやすさと発表時のポーズに関係する事柄である。読みやすさについては、前回の調査では、受身の文章が多く含まれている英文は読みやすさの難易度が高くなり、あまりよい評価を得ることができなかったが、今回の調査では、受身の割合がほぼ同じ英文原稿でも読みやすさが異なっていた。受身の比率よりも、１文の長さや１フレーズの長さの方が、読みやすさに影響していた。その結果、読み易さがプレゼンテーションにおける英語の評価に影響していることが明らかになった。

音声に関しては、今回はポーズに焦点をあてて分析した。評価に与える影響、特に NS に与える影響としては、ポーズを短い間隔で置き、時間をあまりかけないようなポーズがよい評価を与える一つの要因になりうることが分かった。ポーズ間の語数は、読むときと発表するときでは違いが見られるが、意味のまとまりである句毎にポーズを入れるほうが内容理解を助け、高い評価を得やすいことも分かった。

６．今後の課題

2002 年度より、プレゼンテーションコンテストに向けて、本高専英語科が取り組んできたが[8]、今回のような調査の結果を踏まえて、さらに効果的なプレゼンテーションをできるような指導を検討していくべきである。

本稿では、ジャッジが NS ３名と JTE ３名の計６名の非常に少人数の評価を対象として分析した。しかも、評価対象のプレゼンテーションは４件と非常に少ないものであった。そのために、詳細な分析が可能となったが、より客観性を高めるためにはジャッジを増やし、評価対象となるプレゼンテーションを増やしていくべきである。単年で評価対象となるようなプレゼンテーションを増やすのには限りがあるが、継続的にプレゼンテーションを分析していくことで、多様な側面からの分析が可能となり、より客観的な分析ができるようになるだろう。

音声に関しては、本稿ではポーズに焦点を当てて分析していったが、杉藤が述べている様に、ポーズは音韻的特長の一つであり、ポーズ以外にも重要なものがある。例えば、発音やイントネーション、アクセントなどは、日本語話者が英語を話すときには非常に気をつけなければいけないことであり、当然、適切に評価されるべき項目である。

今後は、音韻的特長の多くの側面を分析できるような研究を進めていきたい。また、前回の調査でも同じようなことを感じたのだが、人間がこのような分析をすることは非常に時間と労力を必要とする。以前にも

指摘したが、時間や労力をかけないようにコンピューターを利用した分析方法の開発が望まれる。

参考文献

（1）大津　由紀優　編著、古石　篤子：『日本の英語教育に必要なこと　小学校英語と英語教育政策』、「モノリンガリズムを超えて　―大学までの外国語教育政策」、慶応義塾大学出版会、pp.111-134、2006

（2）上垣　宗明：「プレゼンテーションコンテストの評価項目の再検討」、神戸市立工業高等専門学校研究紀要、第46号、pp.115-120、2008

（3）上垣　宗明：「プレゼンテーションの評価について」、第33回全国英語教育学会大分研究大会発表予稿集II、pp.71-72、2007

（4）遠藤 力：「Readability Formula（読みやすさ公式）の活用 ―コンピューターを利用した英語教材分析とその開発―」、平成17年度 山梨県総合教育センター、2005
http://www.ypec.ed.jp/center/kenkyukaihatu/kiyou/H17/genendo.pdf　2007年8月検索

（5）杉藤　美代子.『日本語音声の研究第7巻　教育への提言』、和泉書院、p.321、1999

（6）（5）と同じ、p.266

（7）小池　生夫　編集主幹：『応用言語学辞典』研究社、p.475、2003

（8）上垣 宗明、西山 正秋、前田 誠一郎、折附 良啓、柳生 成世、田口 純子、今里 典子：「英語プレゼンテーションコンテストの実施に向けての取り組」、英語教育研究、関西英語教育学会紀要No.28、pp.49-62、2005

Speech Analyzer 3.0.1
SIL International が Web 上にあげている Free Software
<URL>
http://www.sil.org/computing/sa/sa_download.htm

米国ブッシュ政権の安全保障戦略の形成過程

高橋秀実 *

The Process of Formation of the US Security Strategy of Bush Administration

Hidemi TAKAHASHI *

ABSTRACT

The Islamic fundamentalism terrorists' attack against USA on September 11, 2001 gave a great shock throughout the world. President Bush declared to revenge against the terrorists. On January 2002, after the attack on Afghanistan, he referred to Iran, Iraq and North Korea as an axis of evil. They might develop weapons of mass destruction. He expressed his strong determination that he would continue the fight against terrorists and rogue states and that he wouldn't hesitate to make preemptive attacks on them. The objective of this paper is to verify how the US Security Strategy of Bush Administration has been composed and how Neoconservatives influenced the US Security Strategy.

Keywords: Bush Administration, Neoconservatives, Israel Lobby, rogue state, preemption

1. はじめに

２１世紀最初の米国大統領ジョージ・W・ブッシュ（George W. Bush）は就任当初から米国国益中心主義の対外政策を強行し、欧州諸国とも軋轢が生じていた。2001年9月11日米国中枢を襲った同時テロは衝撃的な転換点となり世界的潮流に変容を強いる。テロとの戦いを大義名分とし、抑止戦略の見直しまで含めて、ブッシュ政権の安全保障戦略の体系が形成されてゆく。

アフガニスタン軍事攻撃後の2002年1月29日ブッシュはイラク・イラン・北朝鮮を大量破壊兵器開発・テロ支援国家の「悪の枢軸（Axis of Evil)」と名指し、攻撃の矛先をイラクへ転じる。世界各国や国連安保理の反対の声も無視して、2003年3月20日イラク戦争を強行したブッシュ政権は、圧倒的軍事力でフセイン政権を崩壊させ勝利宣言したが、その後イラク情勢は米軍占領統治へのテロ続発や宗派間抗争など混迷の一途を辿り、米国のイラク・中東政策は破綻した。2008年9月15日リーマン破綻で火を噴いた米国発世界金融危機も相まって、超大国米国の威信は失墜した。

2008年11月4日米大統領選挙で、イラク戦争反対・米軍イラク撤兵を主張した民主党のバラク・オバマ（Barack Obama）が圧勝した。オバマの圧勝は二期八年間に及ぶブッシュ共和党政権に対する外交・経済両面での圧倒的不信任を意味する。ブッシュ政権が終焉を迎えた今まさに、ブッシュ政権時代を再検討し総括して歴史的に位置づけることが不可欠である。

本論文では、まず成立当初のブッシュ政権の外交安全保障政策を検討する。そして９・１１テロ(2001.9)を転機に、「QDR(2001.10)」、「NPR(2002.1)」、「一般教書演説(2002.1)」、「ウェストポイント演説(2002.6)」を経て、「米国国家安全保障戦略(2002.9)」に結実するまで体系化されてゆくブッシュ政権の安全保障戦略の形成過程を、諸資料を通じて考察する。その際、「ならず者国家（rogue state)」や「先制攻撃（preemption)」などの概念を検証する。さらにブッシュ政権の安全保障戦略を主導してイラク戦争へと駆り立てたのはいかなる政治勢力・政治理論であったのかを究明することを目的とするものである。

＊　一般科（人文社会）教授

2. 政権初期(９・１１テロ以前)の外交安全保障政策

ブッシュ政権の外交安全保障政策の基本方針は、政権発足時より国家安全保障担当大統領補佐官（2001年1月～2004年11月）、パウエル国務長官辞任後は後任の国務長官（2004年11月～2008年12月現在）としてブッシュ政権の外交安全保障政策の中枢を担ったコンドリーザ・ライス（Condoleezza Rice）が、2000年1月（当時は大統領候補顧問）に“Foreign Affairs”誌に発表した論文“Promoting the National Interest”に明確に示されている。ライスはブッシュ政権が目指す外交安全保障政策の課題として、次の５点を挙げた。

「第1に、米軍が間違いなく戦争を抑止し戦力を展開し、抑止が崩れた場合には国益を守るために闘うこと。第2に、自由貿易と安定した国際通貨システムをこの原則を支持するすべての国に広めることによって経済成長と政治的開放を促進すること。（中略）第3に、アメリカの価値を共有し、平和、繁栄及び自由を育むための責任を分担できる同盟国と強固で緊密な関係を新たに構築すること。第4に、将来の国際政治システムの性格を形作っていく能力があり実際に試みるであろう大国との関係、特にロシア、中国との包括的な関係を政策の焦点とすること。第5に、ならず者国家の政府や敵対的な国家が作りだす脅威に対して断固たる態度で臨むこと。こうした諸国はテロリズムや大量破壊兵器（WMD）の開発に手を染めつつある。」(1)

ライスは、クリントン政権が冷戦後一貫した戦略ビジョンを持たず場当たり的対応で多国間協調を重視し、米国の国益に沿わない協定に調印してきたと批判し、米対外政策は米国の国益追求を目的とすべきだと強烈に主張した。ブッシュ政権の対外政策がクリントン政権の路線から大きく転換し、ユニラテラリズム（単独行動主義）へ向かうという露骨な宣言であった。

「たしかに全人類にとって有益なことをなすのは悪いことでない。しかしそれはある意味副次的に達成されるべきものだ。アメリカが国益を追求することによって自由と平和・市場経済を促進する条件が整備される。事実、第二次世界大戦後にアメリカが国益を追求したことによって繁栄した民主的世界が形成されたわけで、同様のことは今後にも言える。多国間協定や国際機関の支援そのものを目的にしてはならない。」(1)

「だが、クリントン政権は多国間協調型の問題解決に躍起となるあまり、アメリカの国益に反するような協定に調印することもあった。京都議定書がその顕著な例である。地球温暖化をめぐる事実がどのようなものであれ、この議定書は中国を対象に含んでいない上に、厳しい基準の対象から『開発途上国』を外し、一方でアメリカ企業は基準で縛られる。これではアメリカの国益に反する。　同様に、アメリカの包括的核実験禁止条約（ＣＴＢＴ）批准に関する議論も示唆に富む。1992年以来アメリカは一方的に核実験を自制してきた。この姿勢を通じてアメリカは世界に範を示してきたが、この自制が『永遠』に続くわけではない。核実験が必要になった場合には実験を再開できる。しかし核兵器保有に反対する『規範』を求めて政府が合意した条約は、条約違反を防ぐ査察が不可能な上、ならず者国家による核兵器開発の脅威にも対処できず、自国が保有する核兵器の信頼性を損ねてしまった。」(1)

「象徴的な意味しかない協定に執着したり、甘めに見ても幻想としかいえない国際行動規範を模索するのは行き過ぎである。そんなものはリーダーシップとはいえない。『アメリカは世界における特別な役割を担っているのだから、国際協約や協定のすべてに固執すべきではない。』という立場は妥当であり、これを孤立主義と批判するのは見当違いだ。」(1)

ライス論文に示された米国外交安全保障政策の方針は米国中心主義・米国国益優先主義に貫かれており、こうした方針の下にブッシュ政権は政権始動段階から国際協調を無視して露骨な米国国益優先主義をとり、欧州同盟諸国さえも不信感を強めていた。地球温暖化防止の京都議定書への拒否表明(2001年3月28日)、ミサイル防衛構想推進提唱の演説（同年5月1日)、包括的核実験禁止条約（ＣＴＢＴ）からの離脱、国際刑事裁判所（ＩＣＣ)・対人地雷禁止協定・生物兵器禁止条約等に対する拒絶姿勢など、枚挙にいとまない。

「われわれの国際主義は、幻想にすぎない国際社会の利益ではなく、アメリカの国益という確固たる基盤から導き出されるものでなければならない。(中略)アメリカの中核的な価値を共有する国々と協調しつつ、権力を行使し国益を模索すれば、世界はより繁栄し平和で民主的になる。これこそ過去においてアメリカに課せられた特別な役割だった。二十一世紀に向けて再びわれわれはその責務を担わなければならない。」(1)

ライスはイラクにも言及しサダムフセイン（Saddam Hussein）を政権の座から排除するためにはあらゆる手段を用いるべきだと強調していた。

「サダム・フセイン政権は孤立しその通常兵力も大きく損なわれ、民衆は貧困と恐怖の中で生活している。(中略)彼は大量破壊兵器の開発に躍起になっている。サダムが政権にいるかぎり何も変わらない。従って我々は彼を政権の座から排除するために、反体制勢力への支援も含めあらゆる手段を用いるべきだ。」(1)

のちにブッシュ政権のイラク戦争占領統治が行き詰まり、米国のイラク中東政策の破綻が明白となったブッシュ政権末期の 2008 年７月、“Foreign Affairs”誌にライス国務長官が再び発表した論文”Rethinking the National Interest” は、2000 年に発表された論文“Promoting the National Interest”の横柄な論調とは全くトーンが異なり、ブッシュ政権の実施した対外政策の言訳と自己正当化に躍起となっている。

「アメリカ人・イラク人双方の人命と財産を奪ったこの戦争のコストは想像していたよりもはるかに大きなものになった。（中略） だが我々が現時点で議論すべき基本的なテーマは『サダム・フセインを追放するという決断が正しいものだったかどうか』だ。私は今もこの決断は正しかったと考えている。」(2)

3. ９・１１テロ(２００１年)と米国安全保障戦略

2001 年９月 11 日、ハイジャックされた航空機による自爆攻撃で世界貿易センターと国防総省という米国経済・軍事の中枢を襲った同時多発テロの衝撃は世界を震撼させた。９・１１テロは繁栄を謳歌してきた米国の威信を傷つけ、米国の外交軍事戦略及び冷戦後の世界的潮流に変容を強いる象徴的な転換点となる。ライスは９・１１テロの衝撃を次のように表現した。

「そして９・１１が起きる。１９４１年の真珠湾攻撃の時と同様に、アメリカはこの事件を境にそれまでとは全く異なる世界へと引きずり込まれていく。」(2)

第二次世界大戦後の米ソ対立の下で、敵国・敵陣営よりも強大な軍事力を有することにより自国・自陣営を防衛しうるという抑止論が米国安全保障理論の大前提であった。核抑止力の発想もここに由来する。米国に対抗しうる敵はもう一つの超大国ソ連しかないというのも自明の前提であった。しかも米国は地理的に太平洋と大西洋に挟まれ、米本土が直接の戦場になることはあり得ないというのが暗黙の前提であった。

しかし９・１１テロはこの大前提を吹き飛ばした。数人のテロリストによる自爆攻撃は、自らの生命をも含む大量無差別殺戮の覚悟さえあれば、世界最強の軍事大国米国の中枢をも壊滅させ得ることを実証した。これは米国にとって現実の被害以上の衝撃であった。米国が地理的条件によって直接攻撃から安全だという前提も、抑止論の絶対性もすべて吹き飛ばされた。

９・１１テロ以後、米国の安全保障戦略は抑止論も含めて根本から見直され、ブッシュ政権独自の安全保障戦略が構築されてゆく。ブッシュ政権の安全保障戦略の形成過程を、９・１１テロ以降の変化に焦点を当てながら考察してゆく。

4.「ＱＤＲ」（２００１年１０月）

ラムズフェルド国防長官（Donald Rumsfeld）は 2001 年 10 月１日、連邦議会に「４年毎の国防計画見直し(Quadrennial Defense Review：ＱＤＲ)」を提出した。米国史上初めて米国本土が大規模な攻撃を受け、多数の犠牲者が出たテロ事件に関する記述が多い。

「新たな安全保障環境の特徴として以下が指摘された。（1）不確実性：ソ連という敵が明確に認識されていた冷戦時代と異なり、誰がいつどこで米国に脅威を与え攻撃してくるか予測困難である。 （2）非対称的脅威の出現：テロ・大量破壊兵器・弾道ミサイル・サイバー攻撃など、冷戦後の新たな脅威が高まっている。（3）国土防衛の重要性：同時多発テロは米国の地理的条件が米国の国土に対する攻撃を免れさせるわけではないことを明らかにした。」(3)

「米国の国防政策の目標として次の４点が設定された。（1）同盟国・友好国に米国のコミットメントを保障する。（2）敵に将来の軍事的競争を思いとどまらせる。（3）前方展開戦力により敵の脅威や威圧を抑止する。（4）抑止が崩れた場合、いかなる敵も決定的に打破する。」(3)

「ほぼ同時に生起する二つの大規模戦域戦争（中東湾岸地域と朝鮮半島）で敵を決定的に打破できる能力を維持するという前政権の戦力構成アプローチを放棄し、次の４つの目的のために戦力を構成するとした。（1）米国の国土を防衛する。（2）４つの重要な地域（欧州、北東アジア、東アジア沿岸部、中東・南西アジア）において前方抑止する。（3）同時に２つの戦域において敵を迅速に打破し、うち１つの戦域においては、敵を決定的に打破する。（4）限定的な数の小規模緊急事態に対処する。」(3)

ブッシュ政権は 2001 年５月下旬からＱＤＲ作業に着手し、同年９月上旬には既に内容がまとまっていたのだが、９・１１テロの発生を受けて、報告書の記述を大きく変更せざるをえなくなった。

９・１１テロを踏まえて、ＱＤＲでは国防政策の目標として米本土防衛を前回よりランクアップさせて米軍の最優先課題と位置付け、通常の軍事力では防御できないテロ攻撃など非対称な脅威への対応も重視した。そして圧倒的な戦力によって敵の脅威を抑止し、抑止が崩れた場合はいかなる敵も決定的に打破するとした。しかもそれは外国領土の占領や敵対的な政権の交代をも含むとしたのである。このＱＤＲにおける脅威の認識や国防政策が、「悪の枢軸演説」へと繋がってゆく。

5.「ＮＰＲ」（２００２年１月）

このＱＤＲに基づいて、2002 年 1 月米国防総省は『核態勢の見直し(Nuclear Posture Review:ＮＰＲ)』の秘密報告書を議会に提出した。

冷戦時代の米国の核戦略は、ソ連との間で戦略核戦力を均衡させ、相互確証破壊による抑止を図る戦略であった。しかし大量破壊兵器や弾道ミサイルが拡散する中で、核抑止は必ずしも有効でなくなり、冷戦時代の戦略では対応しきれないとの認識に至る。そして今後は冷戦期の戦略核の三本柱（ICBM・SLBM・戦略爆撃機）に代わる新たな三本柱として、攻撃戦力（核・通常戦力）・防衛力（ミサイル防衛）・インフラ整備（指揮・統制・情報等）が掲げられている。

ＮＰＲの注目点は、「抑止と均衡としての核兵器」から「使える核兵器」として核戦略を機能転換する点にある。冷戦時代には米ソ間で核軍拡競争が繰り広げられ、米ソ核戦争による世界破滅寸前の危機的状況、「恐怖の均衡」が支配したが、これは核抑止論に基づく戦略であり、事実上は米ソ超大国による核戦力共同管理体制の性格が強く、実際にキューバ危機など緊迫した局面は多々あったものの、結果的には遂に米ソ直接戦争や現実の核兵器使用に至ることはなかった。

しかしＮＰＲでは、従来表明されていた抑止にとどまらず、実際に核兵器を使用するという恐るべき方針が打ち出されたのである。例えば、地下施設破壊の為に核兵器を使用する場合についても述べられており、それ故に地下核実験の再開も必要であるとされた。

ＮＰＲは新たな核使用態勢下でアメリカが核攻撃を迫られかねない非常事態を、即時の非常事態、潜在的な非常事態、不意の非常事態、の３種類に分類した。そしてこの３つの非常事態に関わり、アメリカの核使用の対象となりうる国家を、イラク、イラン、シリア、リビア、北朝鮮、中国、ロシアの７か国と名指ししており、このうちイラク、イラン、シリア、リビア、北朝鮮は、即時の非常事態、潜在的非常事態、不意の非常事態のいずれにも関連する国であるとした。

「即時の非常事態」の現実の事例としては、イラクによるイスラエルとその近隣諸国にたいする攻撃、北朝鮮による韓国にたいする攻撃、台湾の地位をめぐる軍事的対決を挙げている。また中国はひきつづき戦略目的を発展させ、核戦力と非核戦力の近代化を進めているので、即時の非常事態、もしくは潜在的な非常事態に関連する国家に含めることができるとした。(4)

ＮＰＲが意味するところをその表現を用いて言い換えれば、「テロリストを支援し、大量破壊兵器の開発に熱心だ」と米国が見なす「イラク・イラン・シリア・北朝鮮などの」国々が関与すると見なした「差し迫った、または潜在的な」脅威に対しては、「核兵器使用の柔軟性」の下に、米国が核兵器を「適度に」使用することを現実に認める、という重大な内容である。

ＮＰＲは、次節の「悪の枢軸演説」と同一の論理から成る米国の新国家戦略としての核戦略なのである。実は国防総省が提出したＮＰＲ報告は、ネオコン系政策シンクタンクたる「国家公共政策研究所（ＮＩＰＰ）」が 2001 年 1 月に作成した報告書『核戦略と軍備管理の論理と必要』が土台となっていた。

6.「悪の枢軸(Axis of Evil)」演説（２００２年１月）

9・11 テロ実行犯と断定したイスラム原理主義組織アルカイダの首領オサマ・ビンラディン（Osama bin Ladin）が潜伏するとしたアフガニスタンに対して、米英軍は 2001 年 10 月 7 日軍事攻撃を開始し、北部同盟を支援して 11 月 13 日首都カブール制圧、12 月 7 日カンダハルを制圧して、タリバン政権を壊滅させた。しかし米軍は９・１１テロ実行犯と名指したアルカイダの首領ビンラディン容疑者を身柄拘束出来なかった。

にも拘らず翌 2002 年 1 月 29 日、ブッシュ大統領は一般教書演説（State of the Union)で、反テロ戦争の第２段階として、イラン・イラク・北朝鮮の三国を、テロ支援・大量破壊兵器開発・抑圧的独裁体制による国際社会への脅威であり、「悪の枢軸（Axis of Evil)」であると名指し、テロ非難の矛先を転じたのである。

「われわれの第二の目標は、アメリカとその友邦、同盟国を大量破壊兵器で脅すテロを支援する体制から守ることである。これらの体制のうちいくつかは９月１１日以後はおとなしくしている。しかしわれわれは彼らの本性を知っている。北朝鮮の政権は国民を餓死させながら、ミサイルと大量破壊兵器で武装している。イランはそれらの兵器を熱心に追求し、テロを輸出する一方で、選挙で選ばれていない少数者がイラン国民の自由への希望を抑圧している。イラクはアメリカに対して敵意を見せびらかしテロへの支援を続けている。イラクの政権は十年にわたって炭疽菌や神経ガスや核兵器の開発を企ててきた。この政権は、すでに毒ガスを使用して数千人の自国民を殺害し、死んだ子どもの上に母親の死体を積み上げてきた。この政権は国際査察に同意しながら査察官を追い出した。この政権は文明世界に何かを隠している。これらの国やこれらの国と同盟関係にあるテロリスト国家は悪の枢軸を構成し、世界の平和を脅かすために武装している。」(5)

「私の希望は、すべての国家が我々の呼びかけを心に留め、テロリストという寄生虫を取り除くことだ。しかしいくつかの政府はテロの前に小心だ。彼らが行動しないのなら米国が行動する。」(5)

イラン・イラク・北朝鮮の三国は特に重大な脅威として軍事攻撃も含めて政権転覆を目指すと宣言したのであり、宣戦布告にも等しい特異な大統領演説である。

7.「ウエストポイント演説」（２００２年６月）

欧州歴訪から帰国直後の 2002 年 6 月 1 日、ブッシュ大統領はウェストポイント陸軍士官学校で演説を行なった。以下はその核心部分である。

「過去半世紀の間、米国の防衛は冷戦時代の抑止と封じ込め政策の上に成り立ってきた。これらの戦略がまだ有効な場合もある。しかし新しい脅威は新たな思考を必要としている。抑止、即ち国家に対する大量報復という脅しは、守るべき国家や市民を持たない隠れたテロリストのネットワークに対しては全く意味を成さない。（中略）国土防衛とミサイル防衛はより強力な安全保障政策の一部であり米国にとって死活的な優先度を持つ。しかしテロとの闘いは防御だけでは勝てない。我々は敵と戦い敵の計画を打破し、最悪の脅威はそれが生まれる前に叩かねばならない。（中略）我々の自由を守り生活を守るため、必要とあらば先手を取って行動する用意がなければならない。」(6)

これは米国対外戦略史上の一大方針転換である。
つまり冷戦期における抑止論・封じ込め戦略は対テロ戦争では通用しなくなったとして、米国歴代政権で初めて公に先制攻撃容認を宣言したのである。
そしてブッシュ大統領は次のように演説を続けた。

「正義とか悪といった言葉を口にすることは、外交的ではなく礼儀を損なうと懸念するものもいる。私はそう思わない。ところ変われば品変わることはあっても、道徳が変わるなどということはあり得ない。いかなる文化、いかなる時代、いかなる場所においても、道徳の正しさは同じである。（中略）正義と邪悪、無垢と罪悪の間に中間はない。われわれは善と悪の戦いのさなかにあり、アメリカは悪をその名で呼ぶ。」(6)

アメリカ＝正義、アメリカの敵対勢力＝悪、という西部劇のような善悪二元論と勧善懲悪の単純な図式を、ブッシュが独善的に確信していることを如実に示す発言だが、問題はこれが単なる一市民の発言ではなく、アメリカ大統領としての公的発言なのである。およそ近代国家における国家権力と道徳の関係にも、ベトナム戦争などで一般市民を大量殺戮してきた米国国家権力の残虐な暴力性にも、また多様な文明や世界観の存在にも、深い見識はおろか全く理解も及ばない人物が、世界で最も強大な国家の最高権力者として君臨し戦争を指揮命令した世界の現実を象徴している。

この「ウエストポイント演説」が「米国国家安全保障戦略」（2002 年 9 月）につながってゆくのである。従来の抑止戦略と比較しながらブッシュドクトリンの「先制攻撃戦略」の論理を検証してゆく。

8.「米国国家安全保障戦略」（２００２年９月）（The National Security Strategy of the U.S.A.）

2002 年 9 月 20 日発表された「国家安全保障戦略」は、2001 年 9 月 11 日の同時テロ以降、ブッシュ政権が打ち出してきた安全保障戦略、特に「ＮＰＲ（核態勢見直し）」（2002 年 1 月）、「悪の枢軸演説」（同年 1 月）、「ウエストポイント演説」（同年 6 月）、「2002 年度国防報告」（同年 8 月）などを承けて、これらを集大成し国家戦略方針としたもので、ブッシュ政権の安全保障戦略が体系化されたものと言えよう。

「国家安全保障戦略」の序文ではまず冷戦が米国的な「民主主義と自由経済」の勝利に終わったと高らかに唱いあげ、今後は米国の卓越した軍事力で新たな敵たるテロリストなどと徹底的に闘うことこそが米国の使命なのだと宣言している。

「自由主義と全体主義の間の２０世紀の大闘争は、自由主義諸勢力の決定的な勝利で幕を閉じた。そしてこれは国家的成功の唯一持続可能なモデル、すなわち自由と民主主義と自由経済の勝利であった。（中略）
現在、合衆国は比類なき軍事力と巨大な経済的、政治的な影響力を有する地位を享受する。（中略）我々は、テロリストや圧制者と闘うことによって平和を防衛する。（中略）アメリカはテロリストを匿う諸国も含めて、テロに妥協する諸国に責任をとらせる。テロとの同盟は文明の敵である。」(7)

「米国国家安全保障戦略」の第５章「大量破壊兵器による合衆国・同盟国・友好国に対する敵からの脅威の抑止」では、ソ連崩壊と冷戦終結で米国の安全保障環境は根底から変容したとする。冷戦時は敵の武力行使の抑止に重点をおき、相互破壊確証の戦略が基本であったが、現在ソ連に代わる新たな脅威は「ならず者国家（rogue state）」と「テロリスト」だと認識する。

9.「ならず者国家（rogue state）」の概念

「ならず者国家（rogue state）」とは元来クリントン政権の国家安全保障担当大統領補佐官であったアンソニー・レイク（Anthony Lake）が、国際社会の規範を拒否し冷戦後の国際秩序への脅威と見なされる国際テロ支援国家を示すため 1994 年に唱えた概念である。米国務省がこれまで「ならず者国家」として指定したのは、イラク・イラン・シリア・リビア・北朝鮮・キューバ・スーダンの 7 か国であった。

「米国国家安全保障戦略」では「ならず者国家（rogue state）」の特徴として次の 5 点を挙げた。

「(1) 自国民に暴虐を加え、支配者の私的利得のために国家資源を浪費する。
(2) 国際法に尊重をまったく示さず、隣国に脅威を与え、当事国である国際条約に平気で違反する。
(3) 大量破壊兵器を他の先進的な軍事技術とともに入手する意思を固めて、これを脅威として利用するか、これら体制の侵攻計画を攻撃的に実現しようとする。
(4) テロリズムをグローバルな規模で後援する。
(5) 基本的な人間の価値を拒絶し、合衆国及び合衆国のための何者も憎悪する。」(7)

こうしたならず者国家やテロリストと大量破壊兵器の結びつきについて、次の具体的危険性を指摘している。

「(1) 報復の脅威だけに基づく抑止は、国民の生命や財産を賭しても危険を賭すならず者国家の指導者に対して作用する見込みが低い。(2) 冷戦時代、大量破壊兵器は使用した者を破壊の危険にさらす最終兵器だと考えられた。今日、敵は大量破壊兵器を選択できる兵器だと考えている。ならず者国家にとってこれらの兵器は隣国に対する威嚇や軍事侵攻の手段である。
(3) 伝統的な抑止の概念は、無差別な破壊をおこない、罪なき人々を標的にする戦術をとると公言しているテロリストの敵に対して作用しない。彼らが兵士と称する者は殉教を求め、彼らの最大の強みは国家をもたないことにある。テロ支援国家と大量破壊兵器を追求する国家が重なっている以上、われわれが行動しなければならない。」(7)

「ならず者国家」や「テロリスト」は圧倒的に劣る通常兵器で米国に対抗できないので、大量破壊兵器で米国や同盟国を脅迫し、テロによって無慈悲な破壊と無辜の民を狙うから、報復の脅威に基づく従来の抑止戦略は通用しない、という論理で「先制攻撃戦略」が展開される。

「我々は、ならず者国家やテロリストが合衆国や同盟国・友好国に大量破壊兵器の脅威を与えたり、これを使用する前に、これらを阻止する用意がなければならない。(中略) 潜在的な攻撃者に対する抑止の無力、現在の脅威の即時性、敵の兵器選択により引き起こされる潜在的な損害の規模、これらは事後対応型の選択を許さない。我々は敵に先制攻撃はさせない。」(7)

「ならず者国家やテロリストは従来型の手段を用いて攻撃はしない。彼らはそうした攻撃が失敗することを知っている。彼らが依拠するのはむしろテロ行為であり、潜在的には大量破壊兵器、簡単に隠匿でき秘密裏に運搬でき警告なしに使用できる兵器の使用である。(中略) 2001年9月11日の損害によって証明されたように大量の民間犠牲者がテロリストの明確な目標であり、テロリストが大量破壊兵器を入手し使用すれば、これらの損害は累乗して激烈になるだろう。」(7)

「合衆国はわが国の国家安全保障に対する十分な脅威に対抗するための先制攻撃という選択肢を長く温存してきた。脅威が増大すれば行動しない場合の危険も増大する。(中略)敵による敵対行為の機先を制し防止するために、合衆国は必要ならば先制行動をとる。」(7)

そして最終章の第9章「21世紀の課題と好機に対応するアメリカ国家安全保障制度の転換」では、QDRの内容を継承し、次のように締めくくられている。

「アメリカの国家安全保障の主要な制度は今とは異なった要求に合わせて設計された。そのすべてが転換されなければならない。いまこそアメリカの軍事力の不可欠な役割を再確認する時である。(中略)わが軍の最優先課題は合衆国の防衛である。これを効果的に行うためにわが軍は以下を責務とする。(1) 同盟国や友好国を確保すること。(2) 将来の軍事的競争を断念させること。(3) 合衆国の利益や同盟国や友好国に対する脅威を抑止すること。(4) 抑止できない場合はいかなる敵も断固として打破すること。」(7)

10. 「先制攻撃（preemption）」の概念

国家安全保障戦略では「急迫した攻撃を行う危険のある相手から自分を守る為に攻撃に曝される必要はない。」として「先制攻撃（preemption）」も辞さぬと明記された。先制攻撃の概念は「大量破壊兵器に対抗する国家戦略」(2002.12) や「テロリズムに対抗する国家戦略」(2003.2)にも引き継がれたブッシュドクトリンの象徴的概念である。

米国ブッシュ政権の先制攻撃戦略は、国連憲章や国際法を無視し、主権尊重の原則を脅かし戦争を誘発する、危険極まりない米国の単独行動主義の象徴である。「先制攻撃戦略」は以下のような危険性が予想される。
(1) 武力行使を禁じた国際法の基礎を揺るがし、法と正義による国際統治の考え方を根本的に変化させる。
(2) 当然他国も先制攻撃戦略を採用するようになり、偶発的にも戦争が起こる危険性が強くなる。
(3) 先制攻撃の対象を十分に特定できる保障はないので、誤認や民間人への被害を招く危険性が強い。
(4) 米国一極支配構造を拡大させ、価値を共有しない国との共存を否定する考え方になる危険が強い。

外務省条約局国際協定課長等を歴任した元外交官の浅井基文教授（明治学院大学）は、国際法における自衛権行使の条件について次のように述べている。

「しかし戦略報告は、委細かまわず先制攻撃を正当化する主張を次のように展開する。まず、『急迫した攻撃を行う危険のある相手から自分を守るためには、攻撃に曝される必要はない。』というのだ。これは、自衛先制の正統性の条件として、急迫した脅威の存在だけで十分とするものである。元来自衛権行使が正当化されるのは、次の三条件が満たされる場合のみであることは広く国際法的に承認されている。すなわち、急迫不正、他に手段がないこと、必要最小限度、がそれである。戦略報告は他の二要件と急迫不正のうちの不正の部分をも無視して『急迫』性があるだけで先制自衛攻撃ができるとするのである。」(8)

世界システム論の権威たるイマニュエル・ウォーラーステイン教授(Immanuel Wallerstein：ビンガムトン大学）は、先制攻撃戦略は自衛の論理とは全く異なると、次のようにわかりやすく説明している。

「先制攻撃が防衛でないことはごく普通の一つの理由から明らかのように思われる。すなわち法が防衛を認める唯一の道は行為が起こった後のことであるということだ。行為を行なおうという意思は行為を構成しない。なぜなら意思は実行されない限り知りえないからである。加えて先制攻撃は相手の意思を解釈するが、その解釈は誤りである可能性がある（そして実にしばしば実際に誤りである)。刑法において、仮に誰かが私に悪意あることを言っているのを耳にし、その誰かがいつか私を撃つだろうと考えて、私がその人物を撃ったとしたら、それは法的に正当化されない。しかし仮にその誰かが私に銃を向けたのなら、私は自衛のために彼を撃つことは許される。この基本的な区別がなければわれわれは法のない世界におかれてしまう。」(9)

11. 「国防計画指針草案」（１９９１年）

イラク・中東を舞台とする米国の先制軍事攻撃戦略の源流は、十年前のブッシュ(父)政権時代にまで溯る。湾岸戦争が終わり、ソ連解体が始まった 1991 年秋、ブッシュ（父）政権下の国防総省で「国防計画指針草案」なる極秘内部文書が策定された。

同草案を策定した中心人物はブッシュ（父）政権の国防次官ポール・ウォルフォビッツ（Paul Wolfowitz）である。彼はシカゴ大学で戦略問題で博士号をとり、エール大学で教鞭をとった後、国防総省中枢へ進んだユダヤ人ネオコンの中心人物である。彼の執務室で国防次官補ルイス・リビー（Lewis Libby）に作業が委ねられ、国防次官補代理ザルメイ・ハリルザッド（Zalmay Khalilzad）が起草した。秘密報告策定の主宰者は国防長官ディック・チェイニー（Dick Cheney）である。この文書の内容は下記の如きであった。

「『アメリカの一番の目的は,新たなライバルの出現を何としても防ぐことであり,アメリカに敵対的な国家でしかも将来世界的な大国になる可能性のある国に対しては,たとえ地域的な覇権であってもそれを認めない』（中略）『世界秩序はアメリカによって維持されていると自覚し,危機に集団対応できない時はアメリカ単独で行動する構えをとる』と述べ、さらに『誰が我々の利益や同盟国の脅威となり得るのかを決めるのは我々自身であり,我々は世界の中でもそうした傑出した責任を持つべきなのだ』（中略）『大量破壊兵器の開発・使用を目指す者には核や通常戦力による先制攻撃を検討し,米本土を守るためミサイル防衛導入を目指す』『アメリカはイラク,北朝鮮への大量破壊兵器拡散防止のため軍事的措置の決断を迫られるだろう』またイラクについては『１９９０年代半ばまでに制裁は実効性を失い,イラクは軍事力を再強化して再び中東の脅威となる』と予測していた。」(10)

「国防計画指針草案」の主要な論点を整理する。

（１）「世界秩序はアメリカによって支えられる」というビジョンを描き、冷戦後に「唯一の超大国」となったアメリカの政治的軍事的役割を維持する。そのため「西欧、アジアや旧ソ連で、アメリカと競合し得るいかなる大国の台頭をも阻止する。」

（２）「日本とドイツをアメリカ主導の集団安全保障体制に統合し、民主的な『平和の区域を設けるのに成功した』ことを『冷戦の隠された勝利』と位置づけ、アメリカが北朝鮮、旧ソ連、イラクの核拡散防止のために軍事力を行使することもやむをえない」と述べた。

（３）永続的な同盟諸国との協力に代わり、湾岸戦争時のような「臨機応変な結集」で国際問題に対応する。国連中心の集団安全保障体制に冷笑的である。

（４）「核兵器・化学兵器・生物兵器による差し迫った攻撃には先手を打って阻止する」必要がある。

しかし当時のブッシュ(父）政権はブッシュ父大統領、ジェームズ・ベーカー国務長官(James A. Baker,Ⅲ)、ブレント・スコウクロフト国家安全保障担当補佐官(Brent Scowcroft)など政権中枢が国際主義派であり、「国防計画指針草案」は採用されなかった。

その後ブッシュ（父）は大統領選でクリントンに敗れ再選出来なかったため、この秘密計画はクリントン民主党政権時代（1993～2000）は地下潜行していた。2001 年 1 月ブッシュ（息子）政権が誕生すると、同草案を作成したメンバーが中枢閣僚として復活し再結集する。チェイニー副大統領、ウォルフォビッツ国防副長官、リビー副大統領補佐官、ハリルザッドイラク大使ら、まさにブッシュ政権でイラク先制攻撃を推進したネオコン路線の中枢閣僚の面々である。

12. ネオコンと「悪の枢軸」

９・１１テロ(2001年)からイラク戦争(2003年)へと米国ブッシュ政権の外交安全保障戦略が具体化される過程は、ワシントンポスト紙のボブ・ウッドワード（Bob Woodward）がその著“Bush at War”（2002）“Plan of Attack”（2004）において、ブッシュ政権内部の路線対立の詳細に至るまで克明に描き出している。チェイニー副大統領、ラムズフェルド国防長官、ウォルフォビッツ国防副長官を中心とする超タカ派ネオコン路線を推進する勢力と、多国間主義をとるパウエル国務長官(Colin Powell)を中心とした国務省中道穏健路線の対立は、ネオコン勢力が優勢でパウエルが孤立することが多かった。ライス大統領補佐官はブッシュ大統領随一の側近としてこれを裁定する立場にいた。

ブッシュ大統領はイラン・イラク・北朝鮮の３国を並べて「悪の枢軸」と呼んだ。一見イラン・イラク・北朝鮮の三国をテロ支援国家として同列扱いしたように見える。しかし真の攻撃目標は最初からイラクに照準が定められていた。むしろイラクとテロとの結びつきを示す確たる証拠が何も無かったからこそ、こうした荒唐無稽なレトリックまで用いてイラク攻撃を正当化しようとしたのであり、この時点で既にブッシュ政権はフセイン政権転覆を目的にイラクを軍事攻撃する意志を固めていたのである。大量破壊兵器疑惑とはイラクに戦争を仕掛ける口実に過ぎなかった。

「悪の枢軸」という奇抜な表現は実はブッシュ大統領自身が考え出したものではない。ブッシュ演説のスピーチライターであったネオコンのデビッド・フラム(David A. Fulghum)が、イラク攻撃を正当化するため簡潔なキャッチフレーズを考案してくれとホワイトハウスから要請され思いついたフレーズが源である。彼自ら退職後に得意げに舞台裏事情を明かした。

ウッドワードは著書“Plan of Attack（2004)”で、イラク軍事攻撃の大義名分である「悪の枢軸」の表現が完成するまでのホワイトハウス高官のやりとりを、まるでその場にいたかの如くリアルに描き出している。

「そこでフラムの表現『憎悪の枢軸』を『悪の枢軸』に変更して、この観念の幅を拡げると共に、一層悪意に満ちた不気味な存在に変えた。サダム・フセインを悪魔の手先だとほのめかしているような感じになる。フセイン政権と大量破壊兵器と国際テロリズムが結びつくと、世界は正義と悪との最後のハルマゲドンへの道を歩み始めるというわけだった。最初のころ草稿に目を通したライスは、大統領が大量破壊兵器とテロリズムの結びつきに言及することに満足した。（中略）そこでライスとハドリーは、他の国を加えてはどうかと提案した。北朝鮮とイランはいずれもテロリズムを支援し、大量破壊兵器の開発を進めているので格好の候補だった。イラク、イラン、北朝鮮の三カ国を挙げるという案は、ブッシュも気に入った。」(11)

2008年6月18日ライス国務長官は、核計画申告提出と引換えに北朝鮮のテロ支援国家指定を解除すると明言し、同年10月11日北朝鮮のテロ支援国家指定を正式に解除した。日本人拉致問題など多くの懸案未解決で北朝鮮の不誠実な対応にも拘らずである。

大量破壊兵器疑惑とはイラク軍事攻撃の大義名分でっち上げにすぎなかった。だからこそ実際は大量破壊兵器を持っていなかったイラクを軍事攻撃し、実際に核兵器を所持した全体主義国家北朝鮮に対しては、ヒル国務次官補（Christopher Hill）に主導させた対北朝鮮妥協外交のあげくテロ支援国家指定を解除した。

ネオコンは北朝鮮にはほとんど利害関心もなく、人権抑圧に対する非難は単なるお題目に過ぎず、ただ米国の正当性を示すため付け加えられたにすぎなかった。

13. 米国安全保障戦略とネオコン・イスラエルロビー

ジョン・ミアシャイマー教授(John J Mearsheimer シカゴ大学）とスチーブン・ウォルト教授（Stephen M Walt：ハーバード大学）は共著で2006年3月“London Review of Books”誌に“The Israel Lobby and U.S. Foreign Policy”という衝撃的な論文を発表した。

AIPAC（アメリカ・イスラエル公共問題委員会）に代表されるイスラエルロビー（ユダヤロビー）が、米国の外交安全保障政策をイスラエルの利益に従わせるべく、米国歴代政権やほとんどの共和党・民主党議員に対して絶大な影響力を及ぼしてきたという驚愕すべき事実を、膨大な資料により立証した。これまで学界やジャーナリズムでも触れることすら許されない長年に亘るタブーを破ったのである。

「イスラエルロビーの大部分はユダヤ系米国人によって構成されている。彼らは米国の外交政策が『イスラエルの利益である、と彼らが考えるもの』を確実に推し進めるべく懸命に取り組んでいる。」(12)

「具体的に言うと、イスラエルロビーはイスラエルとパレスチナ人との長年にわたる紛争に関し、米国がイスラエルを支持するように画策する。さらにイスラエルロビーはイスラエルに敵対する民衆運動や国家に対し、米国が軍事力や経済力を使って制裁を加えるよう仕向けるのだ。」(12)

「2001年12月シャロン首相は次のように述べている。『米国はテロに対する戦争を戦っている。私たちイスラエルもテロに対する戦争を戦っている。私たちは同じ戦争を戦っているのだ。』」(12)

「民主党も共和党も等しくイスラエルロビーの勢力を恐れている。大統領選立候補者はイスラエルロビーが推進したいと願う政策を批判しようものなら大統領になるチャンスが潰れることをよくわかっている。」(12)

「イスラエルとイスラエルロビーの努力は実を結んだ。ブッシュ政権は徐々に、イスラエルへの脅威は米国への脅威でもあるというイスラエルロビーの主張を受け入れるようになった。」(12)

米国が指定する「ならずもの国家」とはイスラエルの利益を脅かすか否かが決定的重要性をもつのである。

「イスラエルの主な敵国とは、サダム・フセイン支配下のイラク、イラン、そしてシリアだった。イスラエルロビーは米国政府に対して、こうしたいわゆる『ならず者国家』を米国の力で封じ込め、核兵器を持たないようにしてほしいと要望している。いくつかの親イスラエル団体はもっと過激だ。彼らは米国が軍事力を用いて、イラク・イラン・シリアの政治体制を崩壊させるべきだと強硬に主張している。」(12)

ブッシュ政権の安全保障戦略に巨大な影響力を及ぼし、政権転覆を目的にイラク先制軍事攻撃へ駆り立てたのは、イスラエルのシャロン首相などシオニズム右派と一体のネオコンやイスラエルロビーであった。親イスラエル右派・軍需利権を真髄とするネオコンが主導したブッシュ政権の軍事標的は、当初より中東のイラクに照準を定めていたのであり、さらにイラク軍事攻撃成功後の次の標的はイランとシリアであった。

カーター政権の大統領補佐官として米国安全保障戦略を担ったブレジンスキー(Zbigniew Brzezinski)も、ネオコンが主導したブッシュ政権のイラク戦争を痛烈に批判している。

「あの戦争の唯一の救いは、ネオコンの夢をイラクの大地に葬ったことかもしれない。イラク戦争が成功していれば、米国は引き続きシリアやイランとも戦端を開いていただろう。」(13)

「言葉を換えれば、『テロとの戦争』の戦略とは、ペルシア湾の石油権益を確保しつづけたいという昔ながらの帝国主義的願望と、イラク抹殺によってイスラエルの安全を強化したいというネオコン主義的願望の結晶なのである。」(13)

ネオコンやイスラエルロビーの活動は、米国の安全保障戦略を歪め米国の国益を損なっている、とミアシャイマー教授及びウォルト教授は鋭く指摘している。

「今日、中東地域には米国にとって大切な三つの利益が存在する。第1にペルシア湾で産出される石油が世界中に輸出される仕組みを維持すること。第2に大量破壊兵器が中東地域や世界中に拡散するのを防ぐこと。第3に中東地域から送り出されるテロリストによる反米テロ攻撃を抑え込むことだ。(中略)しかし多くの場合イスラエルロビーに属する諸団体が推進する政策は米国の中東地域における利益を損なってきた。」(12)

「イラクとの今回の戦争を求めるユダヤロビー指導部とネオコン達の強力な支持がもし無ければ、我々は今回の開戦に至らなかったであろう。」(12)

REFERENCES

(1)CondoleezzaRice,*PromotingtheNationalInterest,* Foreign Affairs, Jan/Feb 2000.pp.45-62.
(2)Condoleezza Rice,*Rethinking the National Interest,* Foreign Affairs ,July/August 2008.
(3)U.S. Department of Defense, *Quadrennial Defense Review Report*, Sep 2001
(4)U.S. Department of Defense, *Nuclear Posture Review,* Jan 2002
(5)George W. Bush, *President Delivers State of the Union Address* ,The White House Office of the Press Secretary, Jan 2002
(6)George W. Bush, *President Bush Delivers Graduation Speech at West Point* , The White House Office of the Press Secretary, June 2002
(7)*National Security Strategy of the U.S.A,* The White House Office of the Press Secretary, Sep 2002.URL(http://usinfo.state.gov/topical/pol/terror/secstrat.htm)
(8)浅井基文『集団的自衛権と日本国憲法』集英社 2002
(9)Immanuel Wallerstein, *Reading the World2002-3,* Fujiwara-Shoten,2003
(10)Richard Cheney, *Hearings of Defense Strategy for the 1990s: The Regional Defense Strategy,* Office of Secretary of Defense, 1993
(11)Bob Woodward,*Plan of Attack,* Simon&Schuster 2004
(12) John J. Mearsheimer & Stephen M. Walt, *The Israel Lobby and U.S. Foreign Policy,* William Morris Agency, 2007
(13)Zbigniew Brzezinski, *Second Chance: Three Presidents and the Crisis of American Superpower,* Schecter Communications Corp, 2007

米国ブッシュ政権の安全保障戦略と新保守主義

高橋秀実 *

The US Security Strategy of Bush Administration and Neoconservatives

Hidemi TAKAHASHI *

ABSTRACT

America made war against Iraq on March 2003. Why did Bush administration invade Iraq? Many people believe that Iraq War was a "war for oil". In fact, Iraq War was a "war for Israel". Neoconservatives and Israel Lobby played important roles in the decision to invade Iraq. A number of prominent Neoconservatives held important positions in Bush administration. Iraq war would certainly not have occurred without Neoconservatives. The objective of this paper is to analyze the American Conservatism and to verify how Neoconservatives influenced the US Security Strategy of Bush Administration and the decision to invade Iraq.

Keywords: Conservatism, Neoconservatives, Iraq War, Bush Doctrine

1. はじめに

イラク戦争を考察する際、ブッシュ政権がイラク攻撃に踏み切った真の理由の解明が最大の課題となる。当初はテロ支援国家だからとし、次は大量破壊兵器の査察に関する国連決議違反への制裁となり、果てはフセイン独裁政権打倒とイラク解放のため、中東民主化のため、と表向きの理由は二転三転した。大義名分は何であれ、米国がイラクを軍事攻撃し政権転覆させるという結論自体は初めから決められていたのである。

何故ブッシュ政権はあくまでイラク軍事攻撃に固執したのか。最大の動機は何だったのか。そしていかなる政治勢力及び政治理論が、イラク戦争に至るブッシュ政権の外交安全保障政策を決定づけたのだろうか。

ブッシュ政権が国際社会の強い反対を押し切ってまでイラク軍事攻撃を強行した理由については様々な説があった。イラク戦争を批判する知識人の間でも、イラク攻撃の主要因を米国のイラク石油利権であるとする見方がかなり有力であった。

しかし米国ブッシュ政権の外交安全保障政策を背後から操縦し、「悪の枢軸」のレトリックまで用いて敵と名指した政権の転覆を目指し、先制軍事攻撃によるイラク戦争へと強引に駆り立てたのは、親イスラエル右派のネオコンサーバティブ（新保守主義：以下ネオコンと略称）、そして米国政界に巨大な影響力を及ぼすイスラエルロビー（ユダヤロビー）であった。

本論文は、前掲論文「米国ブッシュ政権の安全保障戦略の形成過程」の続編であり一体を成すものである。本論文では、まず米国の保守主義の考え方や全体像を鳥瞰する。そして米国保守主義政治勢力の諸潮流の中で新保守主義（ネオコン）を位置づけ、ネオコン政治勢力の源流、その歩み、特異な政治理論を考察する。さらにネオコンが米国ブッシュ政権の安全保障戦略やイラク戦争決行の意思決定に及ぼした影響を検証する。そしてネオコン世界戦略としてのブッシュ政権の安全保障戦略を、戦後米国の対外政策と比較して巨視的な視点から考察する。

＊　一般科（人文社会）教授

２．米国の保守主義とリベラリズム

東京大学前総長の佐々木毅教授は、著書において、米国政治における保守主義とリベラリズムの関係を明快に分析している。以下にその内容を要約する。

「リベラリズムと保守主義は２０世紀アメリカの二大政治潮流であるが、その関係はヨーロッパの場合とは全く異なる。市民革命が掲げた自由や民主政に真っ向から反対し、封建制旧体制の身分秩序と権威主義を擁護するヨーロッパ的な伝統的保守主義は、封建制時代を経験せず当初から自由・平等・人民主権を基本原理として移民によって建国されたアメリカ合衆国にはそもそも存在しなかった。アメリカの保守主義とは、西部劇のように個人の独立独歩を強調し、個人の自由と競争を主張する自由放任主義であり、資本主義と市場メカニズムに対して楽観的である。これに対して、個人の高度な発達を目標とし、経済面での政府の役割を強調し、政府による社会サービスの提供、福祉国家観と結びついた思想的潮流がリベラリズムと呼ばれる。アメリカの保守主義は自由主義や人民主権の原理を否定するものではなく、むしろそれを前提としている点でヨーロッパの保守主義とは根本的に異なる。アメリカの保守主義はヨーロッパの自由主義に近く、アメリカのリベラリズムはヨーロッパの社会民主主義に近い。アメリカにおけるリベラリズムと保守主義の対立は、ヨーロッパにおけるその対立と意味が異なり、広い意味の自由主義原理の解釈と理解をめぐる対立であった。

それでは戦後米国政党政治において、リベラリズムと保守主義の現実の力関係はどうだったのだろうか。１９３０年代大恐慌時代にルーズベルト民主党政権でニューディール連合が成立して以来、民主党はリベラリズムの政党として米国政党政治で優位に立ってきた。

しかし１９６０年代末ベトナム戦争が泥沼化し、若者の反乱や黒人運動が過激化して米国社会は混迷する。リベラリズムへの信頼は動揺する。リベラリズムを巡る論争は激化し、遂に民主党の内部分裂にまで至る。伝統的価値を擁護する運動が保守主義の新たな一翼を担うようになる。７０年代後半、人権外交などリベラルな路線をとってきたカーター民主党政権は、ソ連のアフガニスタン侵攻やイランの米大使館人質事件など外交面、及びインフレなど経済面でも行き詰まった。米国民は苛立ち、ソ連と断固対決する強硬な外交路線や軍備増強を求める声が強まった。

こうした行き詰まり感からの解放を求める社会的潮流の下で、１９８０年の大統領選挙では「強いアメリカの復活」を掲げた共和党のレーガンが圧勝する。様々な争点でリベラリズムに反発する保守主義諸派の動きがレーガン支持に結集したのである。超タカ派のレーガン大統領の下で、西欧への核兵器配備や戦略防衛構想（ＳＤＩ）など軍拡・対ソ強硬路線を打ち出され、新冷戦へと突き進んだ。国内においても大減税や規制緩和が実施される一方で、社会福祉は切り捨てられ、貧富の格差が拡大してゆく。１９８０年代、レーガン保守革命から冷戦の勝利に至るレーガン・ブッシュ（父）の共和党政権時代において保守主義の全盛時代が実現する。」(1)

3. 米国の保守主義諸派

「１９７０年代以降の米国保守主義の政治運動とは、様々な問題・争点から出てきた様々なグループの寄せ集め的性格が強い複雑な運動体だが、伝統的な保守主義の中核的グループは次の二つである。

第一は、俗にウォールストリート保守派と呼ばれる、共和党を支持するビッグ・ビジネスの集団である。国際ビジネスを展開する大手銀行や多国籍企業の経営者など、東部エスタブリシュメントと呼ばれる米国のエリート階層の多くがこれに属する。保守穏健派・中道右派であり民主党政権とも共存してきた。対外政策も比較的イデオロギー的でなく現実主義的・国際主義的であり、米国の安定的リーダーシップの下で米欧協調によって国際秩序を維持する路線を重視した。

第二は、オールドライトともメインストリート保守派とも呼ばれる、中西部・南部・西部の企業家などに支持されるグループである。反東部・反ヨーロッパの意識が強く、アメリカらしい保守主義精神を典型的に代表している。自由放任主義と独立独歩、「小さな政府」の実現と反ワシントン（反連邦政府）主義、減税などによる私企業活動の育成を主張し、福祉国家に対しては徹底した反対姿勢をとる。西部劇に象徴されるような自力で生きる人間の姿への根強い共感があり、強靭な個人主義の信奉者から成る。反ソ反共主義が極めて強いが、同時に米欧の相違をも強調し、東部エスタブリッシュメントに比べ孤立主義的精神態度が強い。レーガンに典型的に見られるタイプである。

共和党内部におけるこの二大潮流の主導権争いは長く、かつては前者が優勢であったが、１９８０年代前半レーガン時代には後者が優位を占めた。この伝統的二大保守グループに加えて、さらに二つの新たなグループが保守主義の一翼を担うようになる。

その一つがキリスト教右派（ニューライト）である。キリスト教右派の台頭は、強制バス通学など人種問題でのリベラルな政策に反対し、人工妊娠中絶や同性愛などの社会的争点をめぐって、家族や生命の伝統的価値を守ろうとする運動から生じた。先の二大保守グループに比べると、参加者には低所得階層が多く、従来民主党を支持していた労働者階層も加わっていた。この運動の注目点は、経済的には政府の積極的施策に賛成するはずの階層が主な担い手になったことである。

潜在的な民主党支持層や旧支持層を民主党から切り離し、それに真っ向から激しく反対する保守主義の前衛に組織したのだった。これは人種的不平等是正政策に対する白人下層中間層の巻き返しの側面が強い。ニューディール連合分裂の象徴である。この運動は宗教意識と結びついていた。アメリカが先進国の中で例外的に強い信仰心を示す国であり、リベラリズムと親近性を持つ自由主義的宗派よりも原理主義的宗派の影響力が強まったことでこうした問題に対する宗教的動員が可能となった。従来民主党の基盤であったカトリック教徒が保守へ傾斜していったのは動員の結果であった。彼等は激しい行動力を示した。この社会・文化型保守主義は保守主義に乏しかった大衆的基盤をもたらした。

そして１９７０年代に注目を集めたもう一つのグループが、ネオコンサーバティブ（Neo-Conservative 新保守主義：略称ネオコン）である。」(1)

4. ネオコン（新保守主義）の源流

ネオコンの源流は１９５０年代に遡る。その先駆者はニューヨーク在住のユダヤ系知識人やジャーナリストであった。『パブリック・インタレスト』誌と『ナショナル・インタレスト』誌の編集長たるアーヴィング・クリストル（Irving Kristol）は「ネオコンの父」と呼ばれたユダヤ人論客である。『コメンタリー』誌の編集長ノーマン・ポドレーツ（Norman Podhoretz）や、『イデオロギーの終焉』・『脱工業化社会の到来』などの著書で名高い社会学者ダニエル・ベル（Daniel Bell）もアーヴィング・クリストルの同志であった。

アーヴィング・クリストルは意外にも戦前に元左翼の経歴を持つ。彼が１９３０年代ニューヨーク市立大学の学生時代に、第４インターナショナル系のトロッキスト組織たる社会主義労働者党（ＳＷＰ）の青年社会主義者同盟の一員であった事実を、彼自身回想録で認めている。１９３９年独ソ不可侵条約を締結したソ連を労働者国家として認めるかを巡ってＳＷＰで激しい党内論争が起こり、これが決裂してトロッキストの一部は反ソ強硬派に変貌を遂げてゆく。左翼から転向した知識人が逆に徹底した反ソ反共主義の煽動者と化したのだが、現実離れした観念主義や過激な行動主義だけは左右を問わず常に一貫している。

朝鮮戦争が勃発した１９５０年、当時国際平和会議の開催で注目されていた左翼系知識人を攻撃するイデオロギー闘争のため、彼等ユダヤ系知識人達は「文化的自由のための会議（ＣＣＦ）」という反共団体を設立し、西側各国に提携組織を作って活動を展開した。クリストルやダニエル・ベルらはＣＣＦの機関誌『エンカウンター』の編集を手がけた。『コメンタリー』誌もＣＣＦと協力関係にあった雑誌の一つである。しかし「ＣＣＦにはＣＩＡのエージェントが中心メンバーに加わって、ＣＩＡの資金援助を受けながら、左翼系知識人の監視活動をしている。」という衝撃的な記事が１９６６年ニューヨークタイムズ紙に報じられて以来、ＣＣＦの活動は衰退し解散に追い込まれる。アーヴィング・クリストルとダニエル・ベルは１９６５年『パブリック・インタレスト』誌を創刊し、以後はこれと『コメンタリー』誌を中心に彼等の言論活動が続けられる。

１９６０年代はベトナム戦争で米国が大きく揺れた時代であった。ベトナム反戦運動や黒人公民権運動が全米に拡がり、米国社会はリベラルの嵐に覆われた。進歩的知識人やマイノリティは平等を求め、学校での白人・黒人の共学実現を目指す強制バス通学や、職場での一定比率のマイノリティ雇用を義務づける割り当て制度の導入など、リベラリズムの左傾化が進んだ。こうした諸問題をめぐってリベラルは分裂してゆく。主にユダヤ系から成るネオコン知識人達は、パレスチナ解放闘争への連帯感やイスラエル批判が強まった時代潮流に強い危機感を感じていた。彼等はリベラルの道徳的・文化的相対論、米国的価値観の相対化の風潮に真っ向から対抗し、時代の潮流に逆行するかの如く、道徳的退廃を強く批判し、反ソ反共主義と「強い米国の復活」を強調した。彼等はベトナム反戦運動やその指導者ノーム・チョムスキー（Noam Chomsky）のようなリベラル左派知識人、及び家族の価値など伝統的価値観を破壊するヒッピー運動など、カウンター・カルチャー（対抗文化）を徹底的に敵視した。

１９６０年代に民主党内で勢力を増した反戦運動や女性解放運動などの急進的リベラリズムに対抗する目的で、１９７２年にネオコン知識人を中心に「民主的多数派の連合（ＣＤＭ）」という団体が設立された。ＣＤＭの創設者は民主党議員ヘンリー・ジャクソン（Henry Jackson）の元秘書ベン・ワッテンバーグ（Ben Wattenberg）、『コメンタリー』誌編集者でノーマン・ポドレッツの妻ミッジ・デクター(Midge Decter)、ジョージタウン大学教授ジーン・カークパトリック（Jeane Kirkpatrick）などである。

ジーン・カークパトリックは長く民主党員であったが、民主党のリベラリズムを見限ってネオコンに転向し、レーガン共和党政権で国連大使に任命された。彼女のネオコンへの転向は民主党に衝撃を与えた。

保守系シンクタンクの中でもとりわけアメリカン・エンタープライズ研究所（ＡＥＩ）は、１９７０年代にカークパトリックなどの著名なネオコン知識人を研究員に抱えて、伝統的保守主義とネオコンを連合させる役割を果たした。

現代ネオコンの代表的理論家ウィリアム・クリストル(William Kristol)は、「ネオコンの父」であるアーヴィング・クリストルと母ガートリュード・ヒンメルファーブの息子である。母はスタンフォード大学フーバー研究所とＡＥＩでの米軍事政策の研究者であり、叔父ミルトン・ヒンメルファーブ(Milton Himmelfarb)は世界最大のユダヤ系金融財閥であるロスチャイルド財閥の幹部である。ウィリアム・クリストルはハーバード大学で博士号を取得し、民主党タカ派上院議員のヘンリー・ジャクソン (Henry Jackson)の下にいたが、１９７６年共和党へ転向する。１９８５年レーガン政権でウィリアム・ベネット教育長官(William Bennett)の主席補佐官となり、ブッシュ父政権では極右で悪名高いダン・クウェール副大統領(Dan Quail)の主席補佐官として活躍した。クリントン民主党政権成立後は医療保険制度プランや大統領のスキャンダルを攻撃する急先鋒となり、１９９５年保守系政治雑誌『ウィークリースタンダード』誌を創刊し編集長に就任する。同誌はメディア王ルパート・マードック系資本に属するが、彼の系列資本は『Foxテレビ』や『ウォールストリートジャーナル』社説などメディア界に巨大な影響力を及ぼし、『Foxテレビ』はイラク戦争で戦意高揚番組を連発した。マードックもユダヤ人である。(2)

ロバート・ケーガン(Robert Kagan)も１９９７年ウィリアム・クリストルと共に「アメリカ新世紀プロジェクト（ＰＮＡＣ)」を設立させたネオコンのユダヤ人である。彼はレーガン政権時代の１９８４～８８年に国務長官ジョージ・シュルツ(George P. Shultz)のスピーチライターとして国務省の外交政策立案を担当した。ケーガンは２００２年 “Policy Review”誌に発表した論文”Power and Weakness” で、米国軍事力優越で米欧の世界観は隔絶したとして「ヨーロッパはもはやアメリカのパートナーではない」と米欧同盟関係を侮蔑的に嘲笑し、国連中心の国際協調を無視する超タカ派権力政治理論を展開し、欧州知識人に衝撃を与えた。本論文の序においてケーガンは次のように述べている。

「ヨーロッパとアメリカが同じ世界観を共有しているという幻想にすがるのは止めるべき時期がきている。同じ世界に住んでいるとすら考えるべきではない。力という決定的な点についての見方、つまり軍事力の有効性、道義性、妥当性についての見方が、アメリカとヨーロッパとで違ってきている。ヨーロッパは軍事力への関心を失った。少し違った表現を使うなら、力の世界を越えて、法律と規則、国際交渉と国際協力という独自の世界へと移行している。歴史の終わりの後に訪れる平和と繁栄の楽園、十八世紀の哲学者イマヌエル・カントが『永遠の平和のために』に描いた理想の実現に向かっているのだ。これに対してアメリカは、歴史が終わらない世界で苦闘しており、十七世紀の哲学者トマス・ホッブズが『リバイアサン』で論じた万人に対する万人の戦いの世界、国際法や国際規則があてにならず、安全を保障し、自由な秩序を守り拡大するにはいまだに軍事力の維持と行使が不可欠な世界で、力を行使している。主要な戦略問題と国際問題で現在、アメリカ人が戦いの神、火星から、ヨーロッパが美と愛の神、金星からきたとされているのは、そのためだ。両者が合意できる点はきわめて少なくなり、相互の理解も希薄になってきた。そして、この状態は一時的なものではないし、アメリカの政権交代や悲劇的な事件の結果でもない。欧米の違いをもたらした原因は根深く、長年にわたって形作られてきたものであり、今後も長く続く可能性が高い。国益の優先順位を設定し、脅威を確認し、課題を明確にし、外交政策と国防政策を策定し実行するにあたって、アメリカとヨーロッパは別の道を歩むようになった。」(3)

5. ＰＮＡＣ：ブッシュ政権とネオコン

ネオコン知識人は現在も言論界を中心に活躍し、多くの言論誌の他に政策シンクタンクも主宰している。ネオコン系シンクタンクとしては、「アメリカン・エンタープライズ研究所（ＡＥＩ)」「戦略国際問題研究所（ＣＳＩＳ)」「国家公共政策研究所（ＮＩＰＰ)」「国家安全保障問題ユダヤ研究所（ＪＩＮＳＡ)」「安全保障政策センター（ＣＳＰ)」「ハドソン研究所」「アメリカ新世紀プロジェクト（ＰＮＡＣ)」等が挙げられる。

「アメリカ新世紀プロジェクト（Project for the New American Century）：ＰＮＡＣ」は、１９９７年ウィリアム・クリストルやロバート・ケーガンらによって設立されたネオコンの牙城とも言うべき政策シンクタンクである。ネオコン政治勢力がブッシュ政権の外交安全保障政策に絶大な影響力を及ぼした何よりの証拠に、ＰＮＡＣ設立に関与した多くの政治家がブッシュ政権の国防政策を担う中枢閣僚に就任している。以下にその主要メンバーを列挙する。

ディック・チェイニー（Dick Cheney：副大統領)、ドナルド・ラムズフェルド（Donald Rumsfeld：国防長官)、ポール・ウォルフォウィッツ (Paul Wolfowitz：国防副長官、後に世界銀行総裁)、リチャード・パール（Richard Perle：国防政策委員長)、ダグラス・ファイス(Douglas Feith：国防次官)、ピーター・ロッドマン(Peter Rodman：国防次官補)、ルイス・リビー(Lewis Libby：副大統領主席補佐官)、ジョン・ボルトン（John Bolton：国務次官、後に国連大使)、ポーラ・ドブリアンスキ(Paula Dobriansky ：国務次官)、エリオット・エイブラムス(Elliott Abrams：国家安全保障会議中東上級部長)、ザルメイ・ハリルザッド(Zalmay Khalilzad：アフガン特使、イラク大使)など。

またこの他にも、ダン・クウェール（Dan Quail：元副大統領）、ウィリアム・ベネット（William Bennett：元教育長官）、ジェブ・ブッシュ（Jef Bush：フロリダ州知事・ブッシュ大統領の弟）、ノーマン・ポドレッツ（Norman Podhoretz：「コメンタリー」誌編集長）やその妻ミッジ・デクター（Midge Decter）、フランシス・フクヤマ（Francis Fukuyama：ジョンズホプキンス大学教授）など、米国の多くの有力な保守派政治家や言論人がＰＮＡＣの設立趣意書に署名しており、その政治的影響力の絶大さを示している。

フランシス・フクヤマは、冷戦終結の１９８９年に「歴史の終わり？」と題する論文をネオコンの『ナショナル・インタレスト』誌に発表し、「この地上の全ての国家が、結局最後にはアメリカ型のリベラルデモクラシーに到達する。それで人類の歴史はひとまず終わるのだ。」と論じて大きな反響をよんだ。

ネオコンの米国外交安全保障政策は、ＰＮＡＣ結成当時の設立趣意書(1997 年)に端的に表現されている。

「アメリカの外交政策と国防政策は漂流している。保守派はクリントン政権の支離滅裂な政策を批判してきた。孤立主義の衝動に対しても、それぞれの立場から闘ってきた。しかし、世界におけるアメリカの役割について、保守派が確信をもって戦略的なヴィジョンを提示したことはなかった。(中略)我々の目的はこれを変えることである。アメリカのグローバルなリーダーシップのために提言をおこない、支持を結集することが我々の目的である。２０世紀が終わりに近づく中で、合衆国は世界の超大国となった。西側を冷戦の勝利に導いたアメリカは好機と挑戦に直面している。しかし過去の功績の上に構築すべきヴィジョンが合衆国にあるだろうか。アメリカの原理と利益にかなった新たな世紀を形成する決意が合衆国にあるだろうか。」(4)

米国外交安全保障政策は 1980 年代レーガン時代を理想としグローバルリーダーシップを発揮せよとする。

「我々はレーガン政権の成功に不可欠であった要素を忘れてしまったようである。現在と将来の挑戦に立ち向かう用意の整った強力な軍、アメリカの原理を国外で大胆かつ果敢に推進する外交政策、そして合衆国のグローバルな責任を引き受ける、この国のリーダーシップを忘れてしまったようである。(中略)２０世紀の歴史が大切だと教えてくれているのは、危機が発生する前に状況を固めること、そして脅威が現実化する前に立ち向かうことである。今世紀の歴史が教えてくれているのは、アメリカのリーダーシップを大義とすることである。」(4)

ここにブッシュドクトリンの中核理念となる「先制攻撃戦略」の萌芽が見られる。そしてＰＮＡＣ設立趣意書はそのマニフェスト（基本綱領）として次の４項目の目標を打ち出した。

「(1) 現在のグローバルな責任を果たし、将来のために軍を現代化しようとするならば、国防支出を大幅に増大させる必要がある。
(2) 民主的な同盟国との結びつきを強化し、我々の利益や価値に敵対的な体制に挑戦する必要がある。
(3) 政治的、経済的な自由の大義を国外で推進する必要がある。
(4) 我々の安全、繁栄、原理に親和的な国際秩序の保全と拡大におけるアメリカ特有の役割について、責任を引き受ける必要がある。」(4)

これは 1980 年代レーガン時代の保守革命を集約した目標である。冷戦後の米国がレーガン政権を模範として唯一の超大国の圧倒的軍事力で覇権を強大化させ、世界でリーダーシップを発揮せよ、とＰＮＡＣは提唱したのである。彼らは常に国防予算の増大を主張している。ネオコン（新保守主義）は従来の保守派も批判しており、伝統的保守主義とも一線を画する。

９・１１テロ以降のブッシュ政権は、「先制攻撃の必要性」から「大量破壊兵器の脅威」まで、ＰＮＡＣの主張をそのまま発表しているかの如くであり、ネオコンの新帝国主義的戦略がブッシュドクトリンに如実に反映されていたのである。

6. ネオコンの先制攻撃戦略とイラク戦争

ネオコンの代表的理論家ウィリアム・クリストルは以前からイラクに対する先制攻撃の必要性を繰り返し強く主張していた。

「ブッシュドクトリンの第一の綱領は、ある種の状況の下では、先制行動が必要となることを認める意志の表明だ。抑止と封じ込め政策は、米国の国家安全保障戦略からすると、その有効性をもはや失っている。『ならず者国家やテロリストの目標からして、米国は過去のように相手の攻撃に対して反撃するというやり方にはもはや依存できない。』これに代わってアメリカは『それがわが国の国境に届く前に』我々に危害を加える者の脅威を見つけ出し破壊せねばならぬ。何故かと言えば、それはブッシュ大統領がウェストポイントで、『弱小国家や小規模グループが強大な国家を攻撃できる破局的な破壊力を手に入れることが可能である』とし、『過激主義とテクノロジーの交差点』に立っていると宣言した世界が今日存在するからである。そしてこの二つの要素はイラクで最もはっきりと交差したのである。」(5)

「アル・ゴアも、『この先制攻撃というドクトリンが果たす役割は、構成国のすべてが法に従う責任を持つと考える世界が掲げる目標の破壊である』という。しかしブッシュドクトリンのこれらの批判者の主張は、歴史の事実に逆らうものなのだ。国際法でも、国際慣行としても、そしてアメリカの歴史にも、先制攻撃のドクトリンの前例は実は数多くあるのだ。」(5)

ネオコンの先制攻撃戦略の標的はイラクに照準が定められていた。そしてブッシュ政権内で一貫して最も強硬にイラク軍事攻撃を主導したのは、ネオコンの中心人物たるウォルフォビッツ国防副長官であった。

レーガン以降四代大統領の下でテロ対策専門官として従事し、ブッシュ政権でテロ対策大統領特別補佐官を勤めたリチャード・クラーク（Richard Clarke）は、退職後に著書 “Against All Enemies”（2004）を著わした。9・11テロ発生以前の2001年4月にブッシュ政権の高官が集合した会議の席上で、米国がアルカイダやビンラディンによってテロに襲われる危険性をクラークが再三警告したにも拘らず、ウォルフォビッツ国防副長官はアルカイダやビンラディンには全く関心を持たずに敵はイラクだと主張し続けた、という事実を、クラークは怒りをこめて証言している。

「私はすぐにアルカイダの対処に不可欠な懸案事項に話を戻した。『我々はタリバンとアルカイダの両方に圧力をかける必要があります。（中略）プレデターで偵察を再開しビンラディンと指導部を捕えるべきです。』国防総省でラムズフェルドの副官を務めるウォルフォビッツはいらいらした様子で顔をしかめ、ハドリーに私の話をどう思うか尋ねられると答えた。『ああ、なぜいきなりビンラディンという男について話し合わねばならないのか理解できんだけだ。』（中略）信じがたいことにウォルフォビッツは全く信頼性のない伝説をとうとうとまくしたてた。1993年に世界貿易センターで起こった爆弾事件の黒幕をイラクとする説だ。数年にわたる研究の結果、この説が完全に事実に反していることが立証されていたにもかかわらず。」(6)

9・11テロの4日後、ブッシュ政権の閣議の席上で、ウォルフォビッツ国防副長官は強硬にイラク軍事攻撃を主張した。ボブ・ウッドワード（Bob Woodward）はその著 “Bush at War”（2002）や “Plan of Attack”（2004）でその様子を克明に描き出している。

「9・11同時テロは、アメリカがフセインを討伐するための新しい突破口になったのである。ウォルフォビッツはその好機に飛びついた。『アフガニスタン攻撃は見通しが明るくない。約十万名のアメリカ軍兵士が進攻後6か月にわたってアフガニスタンの山岳戦で動きがとれなくなるおそれがある。一方、イラクは固くても簡単にぽきりと折れる可能性がある強圧的な政権だ。つぶせるかもしれない。』とウォルフォビッツは説いた。（中略）ウォルフォビッツはアフガニスタンよりイラクを相手に戦争をする方がずっと簡単だという自分の理論をさらに強く主張した。」(7)

何故ブッシュ政権はイラク攻撃に固執したのか。イラク攻撃の理由も、当初はテロ支援国家だからとし、次は大量破壊兵器査察に関する国連決議無視への制裁となり、果てはフセイン独裁政権打倒とイラク解放、中東民主化のため、と理由は二転三転したが、イラク軍事攻撃という結論自体は当初より不動であった。

ブッシュ政権を批判する知識人にも、米国のイラク攻撃の主要因をイラク石油利権だとする見方は多い。ブッシュ家は代々テキサスの石油企業オーナーであり、サウジアラビアの大富豪ビンラディン家とも石油採掘企業の共同出資者になるなど長年石油ビジネスで親密な利権関係にあった。チェイニー副大統領は就任以前は世界最大の石油掘削機企業ハリバートン社 CEO であった。ブッシュ政権高官の多くが石油利権の絡む企業経営に関わっており、石油産業がブッシュ政権の重要な支持基盤であるのは紛れもない事実である。

しかし米国のイラク戦略に決定的な影響を及ぼしたのは、軍需産業と結びついた親イスラエル右派のネオコンであった。ブッシュ政権の主要閣僚たるポール・ウォルフォビッツ、リチャード・パール、ダグラス・ファイス、ルイス・リビー、エリオット・エイブラムスや、ネオコン言論人クリストル父子、ロバート・ケーガンなど、ネオコンの多くがユダヤ系米国人である。

米国ブッシュ政権の安全保障戦略はユダヤシオニスト強硬派をメンバーとしたネオコン世界戦略である。米国の敵（実はイスラエルの敵）を「悪の枢軸」と呼んで、政権転覆を目的に先制軍事攻撃をかけた根底にはネオコン世界戦略があった。イラク攻撃の裏には、パレスチナ人の抵抗運動インティファーダを支援した「イスラエルの敵イラク」を抹殺せよとのユダヤシオニスト強硬派の本音が隠されている。「イラクの大量破壊兵器疑惑」も「中東民主化」もこの本音を隠す口実であった。先制攻撃戦略は「パレスチナ人が攻めてくる前に撃退せよ」というシオニストの発想に通じる。「アメリカにつくか、テロリストにつくか」（ブッシュ）と善悪二元論を振りかざし、イスラエルとこれを擁護するアメリカに刃向かう勢力を「テロリスト」や「ならず者国家」と名指し、先制攻撃戦略の下に圧倒的軍事力で殲滅せんとする使命感に燃えたネオコン戦略がブッシュ安全保障戦略の思想的支柱であった。

7. ネオコン新世界戦略としてのブッシュドクトリン

ジョン・アイケンベリー教授（G. John Ikenberry：プリンストン大学）は2002年9月の“Foreign Affairs”誌に発表した論文“America's Imperial Ambition”で、同時テロ以降のブッシュドクトリンを米国の新世界戦略と位置づけて精緻に分析している。以下にアイケンベリー論文の論理展開を忠実に辿る。

「４０年代以降のアメリカの外交政策は、近代の国際政治秩序の形成を促してきた二つの大戦略を基盤としてきた。一つは、封じ込め政策、抑止、地球規模の勢力均衡を軸とするリアリスト戦略だ。４５年以降、危険な拡張主義的傾向を持つソビエトに直面したアメリカは、スターリンと赤軍に対抗しようと、イギリス帝国の衰退とヨーロッパ秩序の崩壊によって生じた力の真空を埋めていく。この戦略の基盤とされたのがソビエトの『勢力圏』拡大阻止を目的とする封じ込め政策だった。（中略）もう一つの大戦略、つまり、戦後世界経済の再建を目的に第二次世界大戦中に考案された路線はリベラルな大戦略だった。（中略）リアリストの大戦略が、ソビエトのパワーに対抗することを目的にしていたのに対して、リベラルな大戦略の目的は、３０年代の状況が再現するのを回避すること、つまり地域経済ブロックが形成され、貿易紛争や戦略的ライバル関係によって秩序が不安定化するのを避けることにあった。開放的な経済、民主主義、そして制度化された多国間関係は一つのパッケージと見なされてきた。（中略）リベラルな大戦略は、ブレトンウッズ体制、関税貿易一般協定（現ＷＴＯ＝世界貿易機関）、経済協力開発機構（ＯＥＣＤ）などの一連の経済重視型の制度を通じて模索されていく。」(8)

リアリスト戦略とリベラル戦略が戦後米国の二大世界戦略を形成してきた。１９９１年ソ連消滅をもって冷戦構造は崩壊する。冷戦終結は意外にも世界秩序の大再編を伴わなかったが、冷戦終結後１０年を経た２００１年の米国同時テロという脅威を契機に、ブッシュ政権を主導するネオコンは唯一の超大国たる米国の新たな世界戦略を打ち出した。ブッシュドクトリンはそのマニフェストと位置づけうる。従来の「抑止・封じ込め論」に対するブッシュドクトリンの「先制攻撃論」は、リアリスト戦略に対するネオコン新世界戦略の視点から捉えうる。アイケンベリー教授は、米国の帝国的ビジョンとして打ち出された新世界戦略が今後世界秩序の大変革を引き起こす可能性を指摘した。

「対テロ戦争の背後で、アメリカの大戦略と単極構造世界の再編に関する壮大な新概念が形成されつつある。新概念の支持者たちは、必要なら、アメリカは（脅威に対して）『先制、あるいは予防攻撃』を実行すべきだと考えている。（アメリカに賛同する）『自発的な同盟勢力』とも連帯すべきだが、基本的にワシントンは国際コミュニティーのルールや規範にとらわれることなく（単独で）行動すべきだ、というのが彼らの考えだ。新概念の極端な系譜が新アメリカ帝国論だ。このビジョンでは、アメリカは『世界的な基準を設定し、脅威が何であるか、武力行使を行うべきかどうかを判断し、正義が何であるかを定義するグローバルな役割を担っている』と不遜にも想定されている。　アメリカの主権はより絶対的なものと見なされ、一方で、ワシントンが設定する国内的・対外的行動規範に逆らう国の主権はますます制約されていく。」(8)

アイケンベリー教授はブッシュ政権の世界戦略を、［１］単極構造世界の維持　［２］テロリストと大量破壊兵器　［３］抑止理念の淘汰と先制攻撃理論　［４］主権概念の変化［５］国際法と同盟関係の軽視［６］単独行動主義と同盟の軽視［７］国際的安定への認識の低下、の７要素から成り立つと分析している。

以下はブッシュ世界戦略の７要素についてのアイケンベリー教授の分析の概要である。

［１］単極構造世界の維持

「第一の要素は、対等のライバルがいない単極構造世界を維持することへのコミットメントだ。アメリカ抜きの諸大国の連合が覇権を確立するのをアメリカは許さない。ブッシュは２００２年６月のウェストポイント演説で、単極構造世界の維持をアメリカの安全保障政策の中核課題とすることを宣言した。『アメリカは、他の挑戦を寄せつけない軍事的強さを持っているし、今後もこの力を維持していく。そうすることで秩序を不安定化させたかつての軍拡レースの時代を過去へと完全に追いやり、各国間の競争を貿易やその他の平和の模索へと向かわせることができる。』勢力均衡を基盤とするグローバルシステム内で活動する穏健なリアリスト戦略で安全保障を確保しようとは思わない。制度、民主主義、統合された市場で、権力政治の重要性を低下させようとするリベラルな戦略を模索することもない。アメリカが今後も主要国と比べてはるかに力強い存在であり続ければ、大国間の戦略的ライバル関係や安全保障競争は無意味となり、アメリカだけでなく、その他の諸国も今よりもよい環境を手にできる。」(8)

［２］テロリストと大量破壊兵器

「第二の要素はグローバルな脅威の分析、脅威に対する攻撃についての、これまでとはまったく異なる新概念だ。『ならず者国家の助けを得ている小規模のテロリスト集団が、破壊性が高く、途方もない惨劇を強いる能力を持つ核兵器、化学兵器、生物兵器などを早晩手にするかもしれない。』いまやわれわれは、こうした

憂鬱な現実に直面している。しかもテロ集団には、宥和策も抑止策も通用しない。だから、根絶しなければならない。ブッシュ政権はこう考えている。」(8)

［３］抑止理念の淘汰と先制攻撃理論

「新大戦略の第三の要素は、冷戦期の抑止理念がすでに淘汰されていると考えられていることだ。抑止、主権、勢力均衡はともに支え合うかたちで機能してきた。だが抑止がもはや機能しなくなったために、リアリストがこれまで思い描いた秩序像は崩れ去りつつある。（中略）現在の脅威は、居場所が定かでないトランスナショナルなテロネットワークだ。彼らは自分たちの大義のためであれば死をも恐れないし、居場所が一定でないために反撃を受ける恐れも少ない。よって抑止されることもない。（中略）とすれば、現在の脅威に対抗する唯一の方法は『攻撃』である。こうした戦略概念を支持する勢力は、潜在的な脅威が大きな問題と化す前に、先制攻撃、あるいは予防攻撃を行う必要があると主張している。」(8)

［４］主権概念の変化

「形成されつつある新大戦略の第四の要素は、主権概念の再定義だ。（中略）ブッシュ政権は新たな原則を確立させつつある。それは『説明責任を果たさず、非友好的で専制的な国家は、その存在そのものが、対抗策をとるべき脅威にほかならない』という考えだ。テロリズムとＷＭＤの脅威が高まるなか、これらの定義に符合する諸国はいまや『看過できない脅威』と見なされている。つまり、国際法をとくに侵していない諸国も、実害を強いる能力を開発する可能性が高いとワシントンが判断すれば、アメリカの軍事力の標的にされる恐れがある。（中略）しかし、この新概念が今日において目新しく、論議を呼ぶと思われるのは、ブッシュ政権が主権の制約という概念を地球規模で適用し、主権が制限されるかどうかの判断を独自に、しかも憶測で下そうとしているからだ。」(8)

［５］国際法と同盟関係の軽視

「新大戦略の第五の要素は、国際的ルール、条約、安全保障パートナーシップが軽視されていることだ。こうした姿勢はそれ自体が脅威である。『対テロ戦争にかかわってくるものが非常に大きくなり、間違いを犯せる余地がますます狭まっているのだから、武力行使を枠にはめる多国間の規範や合意などは、煩わしい障害にすぎない』と見なされつつある。脅威をなくすことが重大な課題であるのは間違いない。しかし、形成されつつある単独行動主義は、国際合意そのものに対する根深い不信に根ざしている。（中略）地球温暖化をめぐる京都議定書に始まり、国際刑事裁判所（ＩＣＣ）、生物兵器禁止条約（ＢＷＣ）にいたる、ブッシュ政権の国際的な条約やレジームからの離脱は、こうした新たな偏見に根ざしている。」(8)

［６］単独行動主義と同盟の軽視

「現在の脅威に対抗するには、アメリカは何の制約も受けずに行動を起こすべきだと考えられている。これが新たな大戦略の六つ目の要素だ。こうした確信にも似た考えは『アメリカ以外のいかなる国家も欧州連合（ＥＵ）を含むいかなる国家連合も、テロリストやならず者国家に対抗できるような対外展開能力を持っていない』という判断に一部基づいている。（中略）もちろん、ブッシュ政権のなかで、ＮＡＴＯや日米同盟の解体を求める者は誰もいない。だが、今日の脅威に対抗するうえでは、同盟関係もかつてほど重要ではないと見なされている。（中略）こうした環境では、『真の同盟パートナーシップ』という幻想を維持していくのはますます困難になっていく。アメリカにとって同盟諸国は、『ことによると役に立つかもしれない』単なる戦略資産と化している。」(8)

［７］国際的安定への認識の低下

「新たな大戦略の第七の要素は、新戦略が国際的な安定をあまり重視していないことだ。単独行動主義を支持する勢力のなかには、『これまでの伝統を削りとる必要がある』と考える者もいる。弾道弾迎撃ミサイル（ＡＢＭ）制限条約からの離脱であれ、その他の公的な軍備管理条約調印へのためらいであれ、政策決定者たちは、冷戦期の時代遅れの思考から脱却する必要があると確信している。（中略）新帝国主義の思想家は、こうした勇猛果敢な世界にあっては、これまでのようなリアリストやリベラルの大戦略は役に立たないと主張する。『リアリストの大戦略が想定する、抑止や安定した大国間関係の維持というやり方では、アメリカの安全保障は確保できない。非対称の脅威が存在する世界では、戦争と平和を左右するのは世界的な勢力均衡ではない。 同様に、開放的な貿易と民主的な制度も、長期的にはともかく、差し迫ったテロの脅威に対する措置とはなり得ない。終末論的な暴力がすぐそこに待ちかまえている以上、国際コミュニティーのルールや制度の強化をめざしても現実的な価値はない。』」(8)

以上のように、戦後米国の二大世界戦略たるリアリスト大戦略ともリベラル大戦略とも異なる第三の新帝国主義大戦略として、アイケンベリー教授はブッシュドクトリンを巨視的な視点から分析した。

戦後半世紀にわたり米国が世界のリーダーシップを確保してきたのは、この二大世界戦略によって築きあげてきた戦後国際秩序を維持すべく、歴代米政権が同盟関係や多国間主義の枠組みを重視して協調に努めてきたからであり、だから世界の同盟国や主要国も米

国のパワーとアジェンダを受け入れてきたのであって、戦後国際秩序として確立されてきた規範や制度を無視して、米国が圧倒的軍事力を思うままに行使すれば、国際情勢は敵意に満ちたものとなり、これまでの成果も脅かされ結局は米国の国益も損なわれるだろう、とアイケンベリー教授はネオコン新帝国主義戦略としてのブッシュドクトリンの危険性を的確に指摘していた。

「歴史の教えるところに従えば、現在のワシントンのやり方を続ければ、各国の敵意と反抗を呼び込み、アメリカは敵対的で分裂した世界に直面することになる。（中略）新帝国主義的大戦略の支持者たちは、テロリズムによる惨劇という側面にとらわれすぎて世界におけるアメリカの役割を急激に変化させようとしている。他の追随を許さぬ圧倒的パワーとテロの脅威の時代の到来が帝国主義の誘惑を大きくしている。しかしこうしたビジョンはあまりに極端であり、世界をより危険で分裂したものとし、結局はアメリカの安全も損なわれることになる。」(8)

8. おわりに：イラク戦争と超大国アメリカの凋落

以上検証したように、ネオコンの先制攻撃戦略がブッシュ政権の安全保障戦略として結実したのであった。

ネオコンは９・１１テロを絶好のチャンスと考え、ネオコン先制攻撃戦略を実行に移してイラク攻撃し、中東の反米・反イスラエル勢力を根こそぎ倒して中東の地図を塗り替え、米国とイスラエルの覇権を確立しようとした。しかし中東情勢はさらに混迷を深めた。ブッシュ政権末期の2008年12月27日イスラエル軍はパレスチナ自治区ガザへの大規模攻撃に踏み切った。

二期八年に亘るブッシュ政権の強圧的な対外戦略は米国及び世界にいかなる変化をもたらしただろうか。イラク戦争を軸とする親イスラエル右派のブッシュ政権の対外戦略は、平和を求める世界の人々を敵に回し、同盟国の信頼さえも失い、当初の意図とは全く逆に、米国の国際信用に取り返しのつかぬダメージを与えた。

政権末期に火を噴いた米国発世界金融危機とも相まって、ブッシュ政権時代は超大国アメリカの凋落をもたらす歴史的転換点になるものと考える。

嘗てカーター政権の大統領補佐官として米国の安全保障戦略を担ったズビグニュー・ブレジンスキー（Zbigniew Brzezinski）は、2007年刊行した著書で、ネオコンが主導したイラク戦争によって米国は甚大な代償を払うことになった、とブッシュ政権の安全保障戦略を痛烈に批判している。ブッシュ政権の安全保障戦略やイラク戦争は、嘗て米国安全保障戦略の中枢を担った著名な戦略家によっても酷評されているという事実を確認して、小論を閉じる。

「第１に、イラク戦争で米国は国際社会の信用を失い、同盟を分裂させ世界の力を結集出来なくなり、米国のグローバルリーダーシップは甚大なダメージを蒙った。第２に、米国がテロの脅威へ向けるべき資源と関心をすべてイラク戦争に注いだ結果、アフガニスタンでも旧タリバン勢力が巻き返し、再びアルカイダの安息地になる可能性さえ生まれた。中東全域で反米感情が湧き上り、イスラム原理主義急進派勢力が民衆の支持を集め、アラブ諸国の親米政権を脅かし始めた。イラク戦争でイランに対抗可能な唯一のアラブ国家を破壊し、地政学的見地から米国は自業自得の敗北を喫した。第３に、イラク戦争が米国に対するテロの脅威を増大させた。『テロとの戦争』はイスラム過激主義を台頭させ、穏健派の政治的立場も危うくし、イスラム世界を反米で一致させ、次々とテロリストを生み出した。」(9)

「イラク戦争は、政権内部での意志決定、世界各国に対する宣伝、開戦以来の運営方法など、あらゆる面で汚点を残しており、ブッシュ政権には『歴史上まれにみる大失敗』の烙印が押されている。」(9)

謝辞

本論文２篇は、イラク戦争勃発直後の2003年12月放送大学大学院文化科学研究科に修士論文として提出した『ネオコン世界戦略としてのブッシュドクトリン』に、その後の国際情勢や内外諸文献を踏まえて考察を加え加筆したものである。斯界の権威であり貴重な研究助言を賜った阿部斉教授（米国政治）・高橋和夫教授（中東政治）には心より感謝の意を表します。

REFERENCES

(1)佐々木毅『アメリカの保守とリベラル』講談社,2001
(2)菅原出『日本人が知らないホワイトハウスの内戦』ビジネス社,2003.
(3)Robert Kagan*Power and Weakness* PolicyReview June 2002
(4)Project for the New American Century, URL (http://www.newamericancentury.org/)
(5)Lawrence Kaplan & William Kristol, *The War Over Iraq：Saddam's Tyranny and America's Mission,* Encounter Books,2003
(6)Richard A.Clarke, *Against All Enemies,* RAC Enterprises 2004
(7)Bob Woodward,*Bush at War,*Simon&Schuster, 2002
(8)John Ikenberry, *America's Imperial Ambition,* Foreign Affairs, Sep/Oct 2002. pp.44-60.
(9)Zbigniew Brzezinski, *Second Chance: Three Presidents and the Crisis of American Superpower,* Schecter Communications Corp, 2007

国際政治年表： 2001～2008 （ブッシュ政権時代）

高橋秀実 *

The Chronological Table of International Politics

2001 ～ 2008 （ Bush—era ）

Hidemi TAKAHASHI *

（２００１年）

＊1月 20 日 ブッシュ第４３代米国大統領就任。
＊1月 20 日 フィリピン、アロヨ大統領就任。
＊2月 10 日米潜水艦・日本水産実習船衝突死亡事故。
＊3月 7日 イスラエル、シャロン政権発足。
＊3月 28 日 ブッシュ、京都議定書拒否表明。
＊4月 1日 米中軍用機接触事故。
＊4月 26 日 日本、小泉純一郎内閣発足。
＊5月 1日 ブッシュ、MD(ミサイル防衛)推進演説。
＊5月3日成田空港で金正男を不法入国拘束国外退去。
＊7月8日ブッシュ、CTBT(核実験禁止条約)離脱示唆。
＊7月 22 日 G8 ジェノバサミット。
＊8月 13 日 小泉首相が靖国神社参拝。中韓批判。
＊9月 11 日 米同時テロ。（貿易センター・国防総省）
＊9月 12 日 国連安保理、米テロ非難決議。
＊9月 20 日 ブッシュ米議会で対テロ戦争宣言演説。
＊9月 24 日 プーチンがテロ事件で対米支援発表。
＊9月 25 日 小泉首相訪米。日米首脳会談。
＊9月 26 日 米、臨界前核実験実施。
＊10 月 1日 米、QDR（国防計画見直し）発表。
＊10 月 2日米テロで NATO 第５条集団防衛条項適用。
＊10 月 7日 米英軍がアフガニスタン攻撃開始。
＊10 月 20 日 APEC 会議（上海）
＊10 月 29 日 日本、テロ対策特措法が可決成立。
＊11 月 13 日 アフガン北部同盟が首都カブール奪還。
＊11 月 27 日 朝鮮半島非武装地帯で銃撃戦発生。
＊12 月 3日 米、ミサイル防衛実験成功。
＊12 月 6日 アフガニスタン、タリバン政権崩壊。
＊12 月 7日 アフガン反タリバンがカンダハル奪還。
＊12 月 11 日 中国、WTO(世界貿易機関)加盟。
＊12 月 20 日 国連安保理、ISAF 設立決議。
＊12 月 22 日アフガン暫定行政機構カルザイ議長就任。
＊12 月 13 日 米、ロシアに ABM 条約脱退通告。
＊12 月 31 日 米、NPR（核戦力体制見直し）発表。

（２００２年）

＊1月 1日 欧州 12 か国でユーロ紙幣導入。
＊1月 21 日 アフガン復興支援会議（東京）
＊1月 29 日 ブッシュ一般教書「悪の枢軸」演説。
＊1月 31 日 ラムズフェルド、二正面戦略放棄演説。
＊3月 29 日 イスラエル軍がパレスチナ自治区侵攻。
＊5月 14 日 ロシア・NATO 理事会設置合意。
＊5月 20 日 東ティモールがインドネシアから独立。
＊5月 24 日 米ロ戦略核兵器削減条約調印。
＊6月 1日ブッシュ陸軍士官学校演説。先制攻撃容認。
＊6月 11 日 アフガニスタン、ロヤジェルガ開催。
＊6月 13 日 米、ABM 条約正式脱退。
＊6月 26 日 G8 カナナスキスサミット。
＊6月 29 日 北朝鮮・韓国警備艇銃撃事件。
＊9月 12 日ブッシュ、イラク攻撃辞さずと国連演説。
＊9月 17 日 小泉訪朝、金正日会談。日朝平壌宣言。
＊9月 20 日 米、「国家安全保障戦略」発表。
＊10 月 11 日 米議会が対イラク武力行使容認決議。
＊10 月 12 日 インドネシアバリ島で爆弾テロ。
＊10 月 15 日 イラク、信任投票でフセイン大統領信任。
＊10 月 15 日 北朝鮮拉致被害者日本人５人が帰国。
＊10 月 23 日チェチェンゲリラモスクワ劇場占拠事件。
＊11 月 5日 米中間選挙、共和党が上下両院で圧勝。
＊11 月 8日 国連安保理決議 1441 号(イラク査察要求)
＊11 月 13 日 イラクが国連決議(査察要求)受入決定。
＊11 月 15 日 中国共産党、胡錦濤総書記選出。
＊11 月 21 日 NATO、東欧７か国新規加盟決定。
＊11 月 27 日 国連査察団がイラク査察再開。
＊11 月 29 日 IAEA が北朝鮮に核査察受入れ要求。
＊12 月 7日 イラク、WMD 申告書提出。
＊12 月 13 日 EU に東欧 10 か国新規加盟決定。
＊12 月 17 日 米、ミサイル防衛配備発表。
＊12 月 19 日 韓国大統領選、盧武鉉勝利。
＊12 月 27 日 北朝鮮が IAEA 査察官追放発表。

＊ 一般科（人文社会）教授

（２００３年）
＊1月10日 北朝鮮がNPT(核不拡散条約)脱退宣言。
＊1月27日 国連査察団、イラク最終報告提出。
＊1月28日ブッシュ教書演説。イスラエル総選挙。
＊2月5日 パウエルが安保理でイラク兵器証拠提示。
＊2月10日安保理で仏独ロがイラク攻撃拒否。米対立。
＊2月14日 UNMOVIC・IAEAがイラク査察報告。
＊2月15日 世界各国で反米反戦デモ。
＊2月24日 米英が国連にイラク攻撃容認決議案提出。
＊2月25日 韓国、廬武鉉大統領就任
＊3月1日 トルコ国会が米軍駐留否決。
＊3月10日シラクがイラク攻撃容認決議拒否権表明。
＊3月15日中国全人代、胡錦濤主席・温家宝首相選出。
＊3月17日 ブッシュ、イラク攻撃最後通牒演説。
＊3月20日 米英軍がイラク攻撃。イラク戦争開始。
＊4月9日 バグダッド陥落。フセイン政権崩壊。
＊4月14日米軍がティクリート制圧、イラク全土掌握。
＊4月21日 ガーナーORHA復興人道支援室長着任。
＊4月28日 日本株暴落。日経平均7600円台最安値。
＊4月29日 パレスチナ評議会、アッバス首相承認。
＊4月30日 米、パレスチナ和平案ロードマップ提示。
＊5月1日 ブッシュがイラク戦闘終結勝利宣言。
＊5月6日 ブレマーCPA文民行政官任命。
＊5月16日 CPAがバアス党解体・幹部公職追放決定。
＊5月22日 国連安保理決議1483号（米軍占領容認）
＊5月23日 イラク、国軍・情報省・国防省解体。
＊6月2日 G8エビアンサミット。
＊6月6日 日本、有事法制三法が可決成立。
＊6月15日 米軍がファルージャで反米勢力掃討。
＊7月13日 イラク統治評議会発足。
＊7月22日米軍がフセインの息子ウダイ・クサイ殺害。
＊7月26日 日本、イラク復興支援特措法可決成立。
＊8月19日 バグダッド国連テロ。デメロ代表爆殺。
＊8月27日 北京で北朝鮮核問題六か国協議開始。
＊8月29日 ナジャフでテロ。ハキムSCIRI議長死亡。
＊9月1日 イラク統治評議会が閣僚任命。
＊9月23日 国連総会でアナン事務総長が米国批判。
＊10月15日 中国が米ソに次ぎ有人宇宙飛行に成功。
＊10月15日 イラクで新紙幣ディナール流通開始。
＊10月16日 国連安保理決議1511号（イラク復興）
＊10月23日 マドリードでイラク復興支援会議。
＊11月9日 日本、衆院総選挙。
＊11月15日CPAとイラク統治評議会が新政権合意。
＊11月19日 第２次小泉内閣発足。
＊11月23日 グルジア、シュワルナゼ大統領辞任。
＊11月29日 イラク、日本外交官銃撃死亡事件。
＊12月9日 日本政府、自衛隊イラク派遣計画決定。
＊12月13日 米軍、フセイン元イラク大統領拘束。
＊12月15日 日本、自衛隊をイラクサマワへ派遣開始。
＊12月26日 イラン大地震発生。

（２００４年）
＊1月4日 グルジア大統領選、サーカシビリ勝利。
＊1月28日米上院公聴会、イラク大量破壊兵器否定。
＊3月11日 マドリード列車爆破テロ。
＊3月14日 ロシア大統領選挙。プーチン再選。
＊3月19日 イラクムスリムウラマー協会結成声明。
＊3月22日 イスラエルがハマスのヤシン師殺害。
＊3月29日 NATOに東欧7か国新規加盟。
＊4月8日 日本人３名イラク武装勢力に拉致拘束。
＊4月14日ブッシュ・シャロンイスラエル首相会談。
＊4月19日 金正日訪中。北朝鮮で列車爆発事故。
＊4月28日 国連決議1540号(大量破壊兵器不拡散)
＊5月1日 EUに東欧10か国加盟。加盟国25か国。
＊5月9日 カディロフチェチェン大統領暗殺。
＊5月22日 小泉首相訪朝・金正日会談。
＊6月1日イラク暫定政権発足。アラーウィ首相就任。
＊6月8日国連決議1546号(イラク多国籍軍駐留継続)
＊6月8日 G8シーアイランドサミット。
＊6月9日 ブッシュ・ヤーウィルイラク大統領会談。
＊6月28日 CPAからイラク暫定政権へ主権移譲。
＊9月1日チェチェンゲリラ北オセチア学校占拠事件。
＊10月6日 在韓米軍削減発表。
＊10月29日 EU首脳、欧州憲法条約に調印。
＊11月3日 米大統領選。ブッシュがケリー破り再選。
＊11月8日イラク、米軍がファルージャ掃討総攻撃。
＊11月11日 アラファトPLO議長死去。
＊11月16日 米、パウエル国務長官辞任。後任ライス。
＊12月7日 アフガニスタン、カルザイ大統領就任。
＊12月26日ウクライナ大統領選。ユーシェンコ勝利。
＊12月26日 スマトラ沖大津波。（死者30万人以上）

（２００５年）
＊1月15日 パレスチナ自治政府アッバス議長就任。
＊1月30日 イラク、国民議会選挙。
＊2月10日 北朝鮮が核兵器製造声明発表。
＊4月9日 中国で大規模反日抗議デモ。
＊4月28日イラク移行政府発足。ジャアファリ政権。
＊5月11日 北朝鮮、使用済核燃料棒取出完了発表。
＊6月24日イランでアフマディネジャド大統領選出。
＊7月6日 G8スコットランドサミット。
＊7月7日 ロンドン連続テロ。
＊7月26日 北朝鮮核問題に関する第4回六か国協議。
＊8月18日 中ロが初の合同軍事演習。
＊9月11日郵政民営化解散総選挙で小泉自民党圧勝。
＊10月15日 イラク、新憲法案国民投票。
＊10月31日 第３次小泉改造内閣発足。
＊11月3日 日朝政府間協議が１年振り再開。
＊11月9日北朝鮮核問題に関する第5回六か国協議。
＊11月22日 独大連立政権メルケル首相就任。
＊12月15日 イラク、国民議会選挙実施。
＊12月16日 国連総会、北朝鮮人権状況非難決議。

（２００６年）

＊1月10日 イラン、ウラン濃縮実験開始。
＊1月17日 金正日訪中。胡錦濤主席と会談。
＊1月20日 イラク国民議会選挙、シーア派連合勝利。
＊1月25日 パレスチナ評議会選挙、ハマス勝利。
＊1月26日 国連EU米がハマスに武装解除要求。
＊2月3日　アラブ諸国で欧州各紙風刺画に抗議デモ。
＊2月3日　米、QDR（国防計画見直し）発表。
＊2月4日　イラン、IAEA核査察拒否。
＊2月13日 イラン、IAEAにウラン濃縮再開通知。
＊2月19日 パレスチナ自治政府ハニヤ首相決定。
＊2月22日 イラク、サマラでシーア派聖廟爆破テロ。
＊3月1日ブッシュ、アフガン訪問。カルザイと会談。
＊3月16日 米、「国家安全保障戦略」発表
＊3月31日 パレスチナ自治政府、ハマス内閣成立。
＊4月7日名護市長が普天間飛行場辺野古沖移設合意。
＊4月11日 イラン、濃縮ウラン製造発表。
＊5月11日沖縄知事・防衛相が在日米軍再編確認調印。
＊5月15日 米がリビアをテロ支援国家指定解除。
＊5月20日イラク新政府発足。マリキ首相就任。
＊5月23日 米・イスラエル首脳会談。
＊6月8日　イラク政府がザルカウィ容疑者殺害発表。
＊6月13日ブッシュ、イラク訪問。マリキ首相と会談。
＊6月27日 イスラエル軍、ガザ地区侵攻。
＊6月29日 日米首脳会談。日米同盟共同声明。
＊7月5日　北朝鮮、弾道ミサイル7発日本海へ発射。
＊7月10日 チェチェン独立派バサエフ司令官殺害。
＊7月12日 イスラエル軍、レバノン南部侵攻。
＊7月13日小泉首相とパレスチナアッバス議長会談。
＊7月13日イラクムサンナ県治安権限イラクへ移譲。
＊7月15日　G8サンクトペテルブルクサミット。
＊7月15日 国連安保理決議1695号（北朝鮮非難）
＊7月31日 国連安保理決議1696号（イラン警告）
＊8月10日 英当局、航空機テロ計画摘発。
＊8月11日国連決議1701(イスラエルレバノン停戦)
＊8月16日 ロシア警備隊が日本漁船銃撃拿捕。
＊9月19日タイ軍事クーデター。タクシン政権崩壊。
＊9月26日 日本、安倍晋三内閣発足。
＊10月5日 ISAFがアフガン全土治安維持任務拡大。
＊10月9日 北朝鮮、地下核実験実施発表。
＊10月13日 国連、潘基文事務総長選出。
＊10月14日 国連安保理決議1718号（北朝鮮制裁）
＊11月7日 米中間選挙、上下院で民主党過半数勝利。
＊11月8日 米、ラムズフェルド国防長官引責辞任。
＊11月18日 APEC首脳会談（ハノイ）
＊11月22日 イラクとシリアが外交関係再開。
＊12月18日 米、ゲーツ国防長官就任。
＊12月19日 国連総会、北朝鮮外国人拉致非難決議。
＊12月23日国連安保理決議1737号(イラン経済制裁)
＊12月30日 フセイン元イラク大統領死刑執行。

（２００７年）

＊1月1日ブルガリア・ルーマニア加盟EU27か国へ。
＊1月1日 国連第8代事務総長に潘基文が就任。
＊1月10日ブッシュ、イラク米軍2万人増派戦略発表。
＊1月27日 WTOドーハラウンド交渉再開。
＊2月9日　メッカ合意（パレスチナ挙国一致内閣）
＊2月22日 IAEAがイランの決議1737号違反報告。
＊3月17日パレスチナ挙国一致内閣(ハマス/ファタハ)
＊3月23日イランがペルシア湾で英兵拘束、後日解放。
＊3月24日国連安保理決議1747号(イラン追加制裁)
＊4月1日 米韓がFTA（自由貿易交渉）妥結。
＊4月23日 エリツィン前ロシア大統領死去。
＊5月6日 仏大統領選、サルコジ当選。(5/16就任)
＊5月17日 イスラエルがガザ地区空爆。停戦崩壊。
＊5月20日 レバノン国軍とファタハ武力衝突。
＊5月28日　米・イラン公式協議（27年振り）
＊6月5日 スペイン、バスク独立派が停戦破棄声明。
＊6月6日　G8ハイリゲンダムサミット
＊6月9日 ガザ地区でハマスとファタハ戦闘発生。
＊6月14日アッバス挙国一致内閣解散。非常事態宣言。
＊6月15日 ハマスがガザ自治区武力制圧。
＊6月17日 パレスチナ、ファイヤード内閣発足。
＊6月20日日本,イラク特措法改正案成立。(2年延長)
＊6月27日 ブラウン労働党首が英首相就任。
＊7月3日パキスタン,イスラム神学生が軍と武力衝突。
＊7月7日　イラクで自爆テロ（死者150人以上）
＊7月19日 アフガン、タリバンが韓国人集団拉致。
＊7月21日 インド大統領選、パティル当選。
＊7月29日 日本、参院選で自民党惨敗、与野党逆転。
＊7月30日 米下院、日本に従軍慰安婦謝罪要求決議。
＊7月31日国連決議1769(スーダンダルフールPKO)
＊8月9日 アフガン・パキスタン合同和平ジルガ開催。
＊8月9日仏パリバファンド解約凍結。ECB資金供給。
＊8月14日 イラクで自爆テロ（死者400人以上）
＊8月27日 日本、安倍改造内閣発足。
＊8月28日 トルコ、ギュル大統領就任。
＊9月2日レバノン国軍,パレスチナ難民キャンプ制圧。
＊9月3日　ブッシュ、イラク訪問。
＊9月6日　イスラエル空軍機がシリア施設攻撃。
＊9月8日　APEC首脳会議。（シドニー）
＊9月10日　駐イラク米軍司令官が削減計画発表。
＊9月12日　日本、安倍首相辞任表明。
＊9月26日　日本、福田康夫内閣発足。
＊9月26日ミャンマー政府が仏教僧デモ武力弾圧。
＊9月29日沖縄で集団自決の教科書削除に抗議集会。
＊9月30日　ウクライナ総選挙。親欧米派勝利。
＊10月2日　盧武鉉訪朝、金正日と南北首脳会談。
＊10月6日　パキスタン大統領選、ムシャラフ当選。
＊10月11日 NYダウ1万4千ドル台。史上最高値。
＊10月12日 ゴア前米副大統領がノーベル平和賞。

＊10月 15日中国共産党大会、胡錦濤が科学的発展観。
＊10月 17日　トルコ国会がイラク越境軍事作戦承認。
＊10月 18日　パキスタン、ブット元首相帰国。
＊11月 1日テロ特措法失効,自衛隊インド洋活動中断。
＊11月 2日　日本、福田小沢大連立構想失敗。
＊11月 3日　パキスタン、ムシャラフ非常事態宣言。
＊11月 7日　グルジア、サーカシビリ非常事態宣言。
＊11月 20日 ASEAN 首脳会議。福田・温家宝会談。
＊11月 24日　豪選挙で野党勝利。12年振り政権交代。
＊11月 26日米銀シティがアブダビ投資庁の出資受入。
＊11月 27日中東和平国際会議(オルメルト/アッバス)
＊11月 28日　日本、守屋前防衛次官収賄逮捕。
＊12月 2日　ロシア下院選。プーチン与党圧勝。
＊12月 10日プーチン後継大統領メドベージェフ指名。
＊12月 11日　韓国北朝鮮結ぶ列車,56年振り運行開始。
＊12月 12日　ロシア、CFE 条約履行停止。
＊12月 13日　EU27か国首脳がリスボン条約調印。
＊12月 18日国連安保理,イラク多国籍軍1年延長決議。
＊12月 19日　韓国大統領選で李明博(ハンナラ党)当選。
＊12月 23日　タイ下院選、タクシン前首相派勝利。
＊12月 23日ウズベキスタン大統領選、カリモフ三選。
＊12月 25日　ロシア、ICBM・SLBM 発射実験。
＊12月 27日　パキスタン、ブット元首相暗殺。

（２００８年）

＊1月 1日　ユーロ通貨圏 15か国に拡大。
＊1月 2日　NY 原油価格高騰 1バレル 100ドル突破。
＊1月 3日　米大統領選開幕、アイオワ州予備選。
＊1月 6日　グルジア大統領選、サーカシビリ再選。
＊1月 9日　コソボ、サチ首相大連立内閣発足。
＊1月 9日　イラク人死者 15万人と WHO 発表。
＊1月 11日日本、新テロ対策特措法が衆院再可決成立。
＊1月 12日　イラク、旧バース党員公職追放解除。
＊1月 14日　タリバンがカブール外国人ホテル襲撃。
＊1月 16日　NATO・ロシアが共同ミサイル防衛演習。
＊1月 17日　イスラエルが長距離ミサイル発射実験。
＊1月 18日　イスラエル軍、ガザ自治区封鎖。
＊1月 20日　セルビア大統領選、極右ニコリッチ首位。
＊1月 23日　ガザ国境の壁爆破。エジプトに住民流入。
＊1月 24日　イタリア、プロディ首相不信任で辞任。
＊2月 3日　セルビア大統領選決戦、タディッチ再選。
＊2月 5日　米大統領選予備選スーパーチューズデー。
＊2月 17日　コソボ自治州がセルビアから独立宣言。
＊2月 19日　キューバ、カストロ議長退任。
＊2月 19日日本、自衛隊護衛船が漁船衝突死亡事故。
＊2月 25日　韓国、李明博大統領就任。
＊3月 14日　中国、チベット自治区で仏教僧らデモ。
＊3月 15日　中国全人代、習近平副主席ら選出。
＊3月 16日　ベアスターンズ救済買収。FRB 特別融資。
＊4月 3日　NATO、クロアチア・アルバニア加盟承認。
＊5月 2日ミャンマーサイクロン被災(死者 14万以上)
＊5月 7日ロシア,メドベージェフ大統領プーチン首相
＊5月 12日　中国四川省大地震（死者 9万人以上）
＊5月 14日　ブッシュ、イスラエル訪問。
＊5月 20日　台湾、馬英九総統就任。
＊6月 7日　ヒラリークリントンが大統領選撤退表明。
＊6月 18日ライス、北朝鮮テロ支援国家指定解除表明。
＊6月 26日　北朝鮮が核計画申告を中国に提出。
＊7月 7日　G8 北海道洞爺湖サミット（温暖化防止）
＊7月 11日　NY 原油先物高騰 147ドル（史上最高値）
＊7月 30日　米住宅金融公社 2社破綻救済(政府管理)
＊8月 1日　日本、福田改造内閣発足。
＊8月 8日　北京オリンピック（～8/24）
＊8月 8日　南オセチア紛争でロシアがグルジア侵攻。
＊8月 18日　パキスタン、ムシャラフ大統領辞任。
＊8月 26日　アフガニスタン、日本人ＮＧＯ誘拐殺害。
＊8月 27日　米民主党大会、大統領候補オバマ指名。
＊9月 1日　日本、福田首相辞任表明。
＊9月 3日　米共和党大会、大統領候補マケイン指名。
＊9月 6日　パキスタン大統領選、ザルダリ勝利。
＊9月 15日リーマン破綻メリル買収。米国発金融危機。
＊9月 16日　米政府が保険大手 AIG 救済（実質破綻）
＊9月 24日　日本、麻生太郎内閣発足。
＊9月 29日　米下院が金融安定化法案否決。株大暴落。
＊10月 6日 NY ダウ 1万ドル割れ。世界同時株暴落へ。
＊10月 10日 G7 財務相会議(銀行へ公的資金注入合意)
＊10月 11日　米が北朝鮮テロ支援国家指定解除発表。
＊10月 15日　タイ・カンボジア国境紛争で軍事衝突。
＊10月 26日　米機がシリア越境攻撃,子供ら 8人死亡。
＊10月 28日日経平均最安値更新。26年ぶり 6千円台。
＊11月 4日　米大統領選、オバマがマケイン破り圧勝。
＊11月 14日　G20 金融サミット(金融規制強化へ転換)
＊11月 19日　NY ダウ 5年 8か月ぶり 7千ドル台。
＊11月 22日　APEC 首脳会議。（リマ）
＊11月 23日米政府,米銀シティ救済不良資産政府保証。
＊11月 27日　インド、ムンバイでイスラム過激派テロ。
＊12月 2日　タイ、反政府運動でソムチャイ政権崩壊。
＊12月 11日米上院,GM など三大自動車救済法案廃案。
＊12月 12日　円高急伸 13年ぶり 80円台。
＊12月 15日　タイ、反タクシン派アピシット首相選出。
＊12月 15日　ブッシュ、イラク人記者に靴投げられる。
＊12月 16日　FRB 利下げ。米史上初のゼロ金利へ。
＊12月 17日　NY 原油価格暴落 4年ぶり 30ドル台。
＊12月 19日　米政府、GM など自動車大手救済融資。
＊12月 19日　イスラエルとハマスの半年停戦失効。
＊12月 27日　イスラエル軍、ガザ大空爆開始。米黙認。
＊12月 31日 NY 株大恐慌後最大下落,世界株総額半減。

参考文献

2001年 1月～2008年 12月 の朝日新聞・毎日新聞・日本経済新聞・Japan Times・Herald Tribune の記事を参考に作成。

21世紀における外国語学習と文化学習

前田誠一郎*

Language Learning and Cultural Learning in the 21st Century

Seiichiro MAEDA*

Keywords: learning foreign languages, learning culture, web browsing, cross-cultural communication

1. はじめに

英語教育の現場に立って 30 年以上になるが、英語教育に関連したことで驚かされることがよくある。それは、国を挙げて、異文化理解が大切だ、平和のためには国際理解が欠かせない、早期英語教育が重要だと声を大にして叫んでいる割には、学生たちが英語文化圏に属する国々の知識が乏しいことである。たとえば、英語発祥の地、イギリスに関しても同様である。シェイクスピアの人物像や作品はおろか、スコットランドやウェールズがイギリスのどのあたりに位置しているのかを知らない英語学習者がいたりする。2006 年の 10 月に発覚した全国各地の高等学校における世界史未履修問題に表れているように、国際的な視野で物事を考えることができる能力を育成するために必須科目になっている世界史が敬遠されている。西洋と東洋が交互に登場し、人名もカタカナや複雑な漢字が使われるため、大学受験科目としては他の社会科系の科目より負担が大きいと見なされているのが、その一因である。しかも、中学校までの義務教育では、歴史や地理の学習は日本が中心になっている。したがって、異文化理解教育の一端を担うはずの社会科系科目がその役割を果たせず、外国語教育だけが異文化理解教育という重要な責務を負っていると言っても過言ではない現状である。

そのような状況下で、英語学習者の諸外国に関する文化的知識不足にたびたび直面すると、英語教師としての自らの力不足を痛感し、反省することになる。それと同時に、英語文化圏に属する国々や地域の文化を分かりやすく教える方法はないものかと頭をひねったり、それを英語の授業に取り入れることはできないものかと思案することにもなる。

2. 外国語教育と文化学習

2.1 日本における外国語教育と文化学習

国際化や情報化が加速度的に進行している時代の流れの中で、国家や地域レベルを超えた交流が急増している。国際化により海外に出て行くことが珍しいことではなく、誰にでもあり得ることになっている。同時に、コンピュータとインターネットの普及に伴う情報化により、学校内や家庭内での国際交流も日常茶飯事のものになっている。そのような状況の中で、外国語学習の重要性ばかりではなく、外国語学習に付随する国際理解や異文化理解のための文化学習の必要性が増している。外国語学習と文化学習は対立的な関係にあるのではなく、実りのある国際交流や国際理解のためには、外国語だけの習得では不十分で、その背景にある文化までを視野に入れて外国語を学習する必要性がある。このように、文化の理解を伴わない外国語の学習はあり得ないとの立場から、高等学校における教育の方向性を示す文部科学省の『高等学校学習指導要領（平成 11 年 3 月）』では、外国語の目標の中で文化について次のように触れている。

> 外国語を通じて，言語や文化に対する理解を深め，積極的にコミュニケーションを図ろうとする態度の育成を図り，情報や相手の意向などを理解したり自分の考えなどを表現したりする実践的コミュニケーション能力を養う(1)。

さらに、文部省の『高等学校学習指導要領解説　外国語編　英語編』は、文化に関して次のように述べている。

> ・・・文化の理解とは，主に学習対象となる外国語の言語構造に含まれていたり，また，実際の言語使用の際に現れたりする文化的な背景や要素を手がかりに，その言語を話す人々がもつ文化の理解を深めることを意味している。
>
> さらに，そのような学習を通して，日本語や日本の文化との比較が行われ，日本語や日本の文化についても理解が深まるとともに，一般的に言語や文化に対する感受性を高め，ひいては，

* 一般科　教授

広い視野をもち，国際感覚や国際協調の精神の育成につながることを意味している[2]。

このように、習得を目標としている外国語の背景にある文化の学習は、日本における外国語教育の重要な柱になっているのである。

2.2 アメリカにおける外国語教育と文化学習

日本の学習指導要領に対して、アメリカの 21 世紀における外国語教育の指針となっているものが、外国語学習スタンダーズと呼ばれる教育内容の枠組みである。ACTFL（American Council on the Teaching of Foreign Languages）が中心となってその作成にあたり、その成果が、NSFLEP（National Standards in Foreign Language Education Project）により 1996 年に発行された *Standards for Foreign Language Learning: Preparing for 21st Century*（『外国語学習スタンダーズ：21 世紀への準備』）[3]と 1999 年発行の *Standards for Foreign Language Learning in the 21st Century*（『21 世紀の外国語学習スタンダーズ』）[4]である。前者は、全言語共通の外国語学習スタンダーズの教育内容がまとめられている。後者は、前者の内容に加えて 9 つの言語別の外国語学習スタンダーズを含む構成になっている。

文化とは何かという質問に即座に答えることは難しい。辞書を引けば百科辞典的な定義は存在するが、すべての人を納得させる文化の定義はない。しかし、もし、外国語教育における文化の分かりやすい定義がないとすれば、学習者とその指導者が共通理解しておかなければならない文化に対する明確な教育目標を設定することができない。それ故に、外国語教育では、国際理解や異文化コミュニケーションを可能にするために、学習者が習得すべきと考えられるいくつかの構成要素に、文化を分割して定義する方式が採られている。この点に関して、Tang は次のように述べている。

> In foreign language (FL) education where culture has been increasingly advocated as an integral part of the curriculum, debate over the meanings of the term takes on a different dimension because attention is often centered on the question of what component(s) of a foreign culture should be taught in the FL classroom. Culture, in other words, is viewed as composed of various segments, and one segment may be prioritized over another as the focus of instruction depending on the orientation of the proponent and the times. . . . because breaking culture into a few identifiable parts is convenient with regard to cultural learning in the FL classroom, it seems at present logical and sensible to continue with this approach in the teaching of the subject[5].

外国語学習スタンダーズでは、教育の目標領域として 5 つの C（Communication, Cultures, Connections, Comparisons, Communities）を設定している。文化はその 5 つの目標領域の 1 つとして位置づけられ、学習目標として “Gain Knowledge and Understanding of Other Cultures[4]” という項目が掲げられている。そして、「他の言語を学習することによって、言語と密接な関係のある文化を理解するようになると言われているが、人々が言語を使用する裏にある文化的背景を完全に理解できるようになってはじめて、本当にその言語を習得したと言える。」[4] と述べられている。さらに、目標領域である 5 つの C の関連に関して、『21 世紀の外国語学習スタンダーズ』の中に次のような記述がある。

> The standards for foreign language learning are organized within the five *goal areas* which make up foreign language education: *communication*, *cultures*, *connections*, *comparisons*, and *communities*. None of these goals stands alone; all are interconnected. Each goal area contains a rationale for its inclusion as a part of foreign language education and a discussion of definitions and important pedagogical issues associated with it[4].

このように、それぞれの目標領域は切り離すことができないものであり、文化領域の学習は他の目標領域の学習と同様に外国語学習において重要な役割を果たしていると、外国語学習スタンダーズは指摘しているのである。

さらに、『21 世紀の外国語学習スタンダーズ』では、文化の目標領域に関して学習者が習得すべき 2 つの学習基準(standard)が示されている。

> **Standard 2.1:** Students demonstrate an understanding of the relationship between the practices and perspectives of the culture studied.
> **Standard 2.2:** Students demonstrate an understanding of the relationship between the products and perspectives of the culture studied[4].

これを見ると、外国語学習スタンダーズが、文化を 3 つの P（Product, Practice, Perspective）で定義していることが分かる。つまり、文化は、文化的産物・所産、文化的習慣・慣習、そして背景・考え方の 3 つで構成されているという定義を採用している。その定義を Tang が分かりやすく解説している。

> . . . the all-familiar concepts of “Big C” and “little c” cultures were replaced by a new categorical

approach to culture, dividing it into three parts: cultural perspectives, cultural products, and cultural practices. Cultural perspectives include the popular beliefs, commonly upheld values, shared attitudes, and widely maintained assumptions of the members of a culture. The products of a culture are both tangible (e. g., paintings, works of literature, or a pair of chopsticks) and intangible (e. g., oral tales, rituals, or systems of education). Cultural practices comprise the patterns of behavior accepted by a society and other procedural aspects of culture such as rites of passage, use of the forms of discourse, and so forth[5].

この 3 つの P による文化の定義にもとづいて、外国語学習スタンダーズは文化に関する２つの学習基準を提示しているのである。その学習基準は、学習すべき文化的要素だけではなく、ある文化に所属する人が行うことを知ることによって、あるいは、その人が使うものを知ることによって、その背景にある考え方の理解を深めていくことができるという文化学習の道筋も明示している。

3. 外国語学習とインターネット

コンピュータの高性能化と低価格化、そして、ADSL、CATV、光ファイバーなど高速通信のできるブロードバンドの普及に伴い、企業は言うに及ばず、学校や一般家庭でもインターネットの利用が劇的に進んでいる。インターネット上には膨大な量の情報が提供されている。しかも、その情報は、インターネットに接続可能な環境があれば、誰でも、いつでも、どこででも自由にインターネット上から情報を取り出すことができる。日本語のインターネットの世界だけでも得られるものは多い。しかし、日本語だけで利用できるインターネットは、膨大なインターネットのごく一部である。外国語という壁を乗り越えれば、無限に広がるインターネットの世界にアクセスすることができる。インターネットの有効利用のためには、外国語は欠かすことができないものである。そして、逆に、インターネット有効利用に必要な外国語の学習のために、インターネットを活用する外国語教育が浸透し始めている。

さらに、よりよい語学教育環境を目指して、CALL（Computer-Assisted Language Learning）システムや e-Learning システムが開発され、大学が中心ではあるが、神戸市立工業高等専門学校をはじめ多くの高専にも導入され始めている。この点に関して、宮本節子は、次のように述べている。

近年、大学教育の世界で最もめざましいのがホームページの活用であろう。インターネットの上に置かれた個人の教材あるいは大規模なデータベースを閲覧して必要な情報を収集し、学習を進めるという方法である。・・・

インターネット上に構築された海外のホームページはほとんどが英語情報である。それゆえ、それらを教材とすれば多量の英語情報を読みこなす速読力が養成できるであろう。・・・

・・・WWW の英語情報はまさにオーセンティックな英語である。英語力の高い学習者は有効利用できるであろうが、英語力の低い学習者は大量のインターネット情報に圧倒され、学習意欲を喪失しかねない。何らかのヘルプを付加するなり、平易な英語のサイトを選択提示するなりの工夫が必要と思われる[6]。

つまり、英語を苦手とする学習者に対する方策を工夫しながら、外国語学習と飛躍的に拡大しているインターネットをうまく組み合わせることができれば、効果的な外国語学習が期待できるのである。

4. 文化学習とWWW

従来、外国語教育における文化学習は、文部科学省検定済教科書や大学用教科書を使った普通教室における語学の授業の中で、文化のことはあまり意識されずに行われてきた。授業担当者が授業方針を変更しなければ、今後もこの状態が続いていくと思われる。

しかし、WWW（World Wide Web、Web）の利用価値は、外国語学習に止まらず、文化学習にも及ぶのである。オーセンティックな英語で書かれた Web 上では、人類史上最も大規模に、文化、慣習、地図、ビジネス、芸術、文学、科学技術、旅行、個人的な経験など実にさまざまな情報がデジタル化され、共有されている。つまり，無限と言っていいほどの文化に関する様々な情報がインターネット上に存在している。その Web 上の文化的情報は、効率的にしかも簡単に、検索エンジンを使って検索したり、Web ブラウザを使っての閲覧が可能である。

マレービアン[7]は、人が他人から受け取る感情というメッセージ、つまり情報の割合は、言葉によるものが 7 %、声（の調子）によるものが 38 %、顔（の表情）によるものが 55 %であるという実験結果を発表し、言葉、声の調子、そして表情の 3 者間における重要性の順位は、今後の実験においても変わることはないであろうと述べている。つまり、マレービアンによれば、言葉が情報を伝達する割合は、7 %にしか過ぎず、人間の情報伝達では、言語によるコミュニケーションよりも非言語コミュニケーションの方が大きな役

割を果たしていることになる。この現象は、文化学習においても当てはまるのではないかと考えられる。文化の中には、言葉で表現できない、あるいは言葉では表現しにくいものが無数にある。たとえば、レオナルド・ダ・ビンチの名画「モナリザ」、世界遺産になっているエジプトのピラミッド群やスフィンクス、日本の古典芸能である歌舞伎などは言葉では鑑賞することができない。実際に自らの目で見ないとそのすばらしさを味わうことはできない。したがって、文化学習においては、言葉だけより写真や絵などの画像と言葉を組み合わせたものの方が、文化学習者に理解されやすく、文化の伝達能力が高いと考えられる。イギリス文化学習としてイギリス国旗の成り立ちを学ぶ際に、白地に赤の十字のイングランドの旗と青地に白い斜め十字のスコットランドの旗が合体して 1606 年に最初のユニオン・フラッグが誕生したと学習するよりも、Web ページ上に表示されたそれぞれの旗を目で確認しながら学習する方が、学習効果が高くなると容易に想像できる。つまり、Web サイト閲覧による文化学習の実践は、十分に意義があると考えられる。

5. おわりに

前節で述べたように、異文化理解教育の責務を負っている外国語教育に、教材準備に比較的手間がかからない Web サイト閲覧活動を利用した文化学習を採り入れるのは、有意義であると考えられる。また、教師個人レベルではなく、学校単位、さらに学校を超えたレベルでの文化学習に最適な Web サイト情報の共有化をはかることも可能である。そうなれば、外国語教師は、過度に負担に感じることなく、授業の一環として、Web サイト閲覧による文化学習や異文化理解教育に積極的に取り組むことができる。その結果として、授業や自学自習時間における文化学習は、高専生の文化的能力の向上や異文化理解に一役買うことになるだろう。

参考文献

(1) 文部科学省：『高等学校学習指導要領（平成 11 年 3 月）』改訂版，国立印刷局（編集出版），2004.

(2) 文部省：『高等学校学習指導要領解説 外国語編 英語編』，開隆堂出版，1999.

(3) National Standards in Foreign Language Education Project: “*Standards for Foreign Language Learning: Preparing for 21st Century*”, Allen Press, Inc. Lawrence, KS., 1996.

(4) National Standards in Foreign Language Education Project: “*Standards for Foreign Language Learning in the 21st Century*”, Lawrence, KS: Allen Press, Inc., 1999.

(5) Tang, Yanfang: “Beyond Behavior: Goals of Cultural Learning in the Second Language Classroom”, *Modern Language Journal*, 90（i）, pp. 86-99, 2006.

(6) 宮本節子：『マルチメディア語学学習教材の開発と評価－理論と実証と－』，渓水社．2001.

(7) マレービアン，アルバート（著），西田司・津田幸男・岡村輝人・山口常夫（訳）：『非言語コミュニケーション』，聖文社，1986.

(8) 前田誠一郎：「Web サイト閲覧による文化学習効果を調べる実証的研究」，神戸市立工業高等専門学校研究紀要，第 46 号，pp. 99-108，2008.

(9) 文部科学省：『中学校学習指導要領（平成 10 年 12 月）』改訂版，国立印刷局（編集出版），2004.

(10) 文部省：『中学校学習指導要領（平成 10 年 12 月）解説－外国語編－』，東京書籍，1999.

数学教育におけるテクノロジー利用

八木善彦*

Mathematics Education with Technology

Yoshihiko YAGI*

Keywords: Mathematica, mathematics education, technology

1. はじめに

近年, コンピュータやインターネット環境等のインフラ面, 学校教育用コンテンツの開発や教育情報 ナショナルセンター等のソフト面の整備が急速に進展してきている. これは1990年代の数学教育の情報化の進展がもたらしたものである.

このようなテクノロジーを利用した教育や学習を促進するために, 高専や大学では、MathematicaやMapleのキャンパスサイトライセンス取得して学生の利用を図っている. 数学科教育法の講義で, 「ものづくり」として数式処理ソフト Mathematica, 図形ツール Cabri Geometry や 関数グラフ描画ソフト GRAPES で数学教材を学生に作成させる取り組みを行っている. 今回, 発表の機会を得たので Mathematica を用いた教材作りを紹介する.

2. Mathematica を用いた教材

2.1 作品構成

高専や大学で習う教科書の複雑な微分や積分の例題を Mathematica は全て解くことができる. 関数論の「留数」問題や、電気系基礎数学や制御工学でも使う「ラプラス変換」の問題まで難なく記号的に解くことができる. テイラー展開や固有値・固有ベクトルの問題まで記号的に計算ができるので電卓と同じような感覚で使うことで仕事の効率を上げることができる.

ここで紹介するのは, 学生達が「ものづくり」として Mathematica を用いた教材を作成 したものである. 講義では, Mathematica の機能を理解するために, まずは Mathematica のチュートリアル を解説する [1]. その後各自操作し, どのようなことができるのかを 演習する. その際, 分からないことがあった時には, ヘルプブラウザの活用もできるようにしてその有効性を理解できるようにしている. Mathematica を用いた全教材作品141件のうち134件に図形描画機能が用いられている（Plot 92件, Plot3D 42件）[2]. 図形を扱ったものが59件と一番多く（平面図形19件, 立体図形24件）断面を表示するものが16件あった. 関数を扱ったものがそれに次いで多く19件であった.

表 1: 教材の分野 (多いものから)

分野	作品数	分野	作品数
立体図形	24	極限	7
平面図形	19	微分	7
三角関数	10	積分	6
他の関数	9	統計	6
方程式	9	テーラー展開	5

作成された教材の対象分野は, 整数論, 数列, 微分・積分, 線形代数, 級数展開, 確率・統計, 大学入試問題など多岐にわたり全分野におよぶ (表 1). また, アニメーションの使用も23件あり, 学生がわかりやすいと考える表現方法が伺える.

教材を作成した後, 電子機器を用いたデモンストレーションを行わせる. その後, そのプレゼンテーションについて議論を行い相互評価をさせわかりやすい表現を学ばせている.

2.2 作品

2.2.1 立体図形

立体図形の分野では, 立体図形を表示し, さらに視点をかえることで立体図形のイメージをつかませるものや, 回転体の表示, 立体の切断面の表示などをアニメーションを交えて行う作品などである.

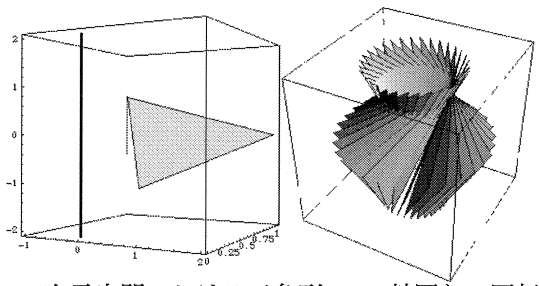


図 1 : 3 次元空間における三角形の, Z 軸回りの回転

*一般科 教授

次の図は立方体の断面をアニメーションで示した作品である.

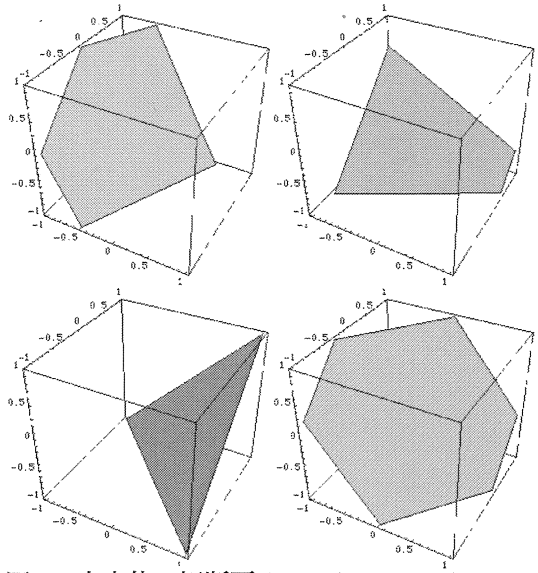


図 2: 立方体の切断面 (アニメーション)

2.2.2 平面図形

平面図形自体はよくわかっているためか, 平面図形を扱う教材は他の分野の応用として使用されたものが多い. 次の図 3 は入試問題に登場する図形 (エピサイクロイド) のアニメーションである.

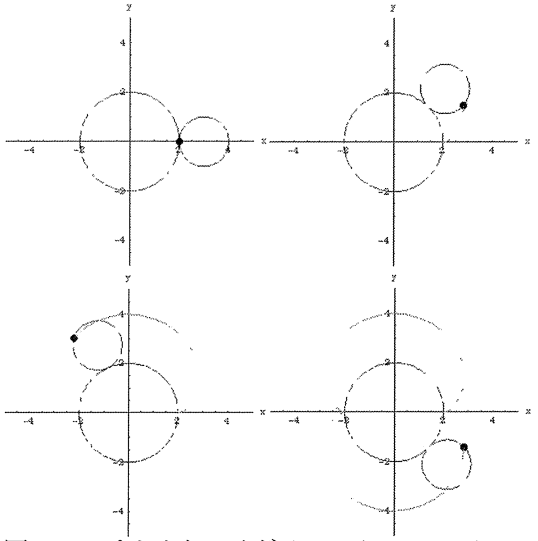


図 3: エピサイクロイド (アニメーション)

この教材は最終的に, 点 P の描く曲線で囲まれた領域の面積を求めるものであるが, その補助教材として点 P の軌跡がどんな図形を描くかというイメージを視覚でつかませるのに, Mathematica のアニメーション機能を使っている.

2.2.3 三角関数

三角関数の教材は単位円と三角比の関係を扱う初歩的な教材からフーリエ級数を扱うものまで, 幅広い内容である.

次の教材図 4 は単位円の上をで点を動かすことによって、三角比 ($\sin\theta$, $\cos\theta$) について考えようという教材である.

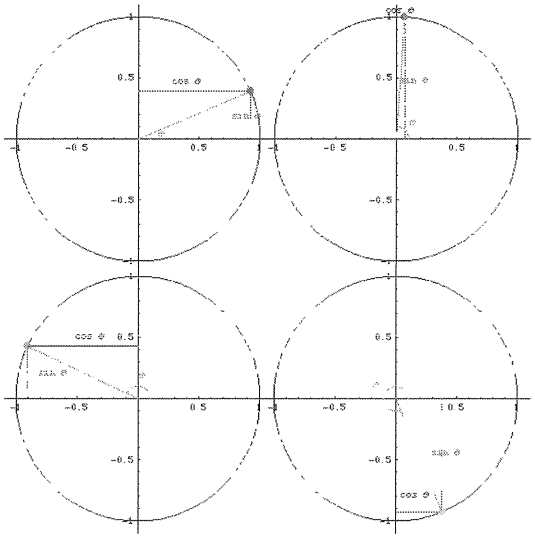


図 4: 単位円と三角比 (アニメーション)

数式処理 Mathematica では定番であるフーリエ級数の表示も簡単に作成してくれた (図 5).

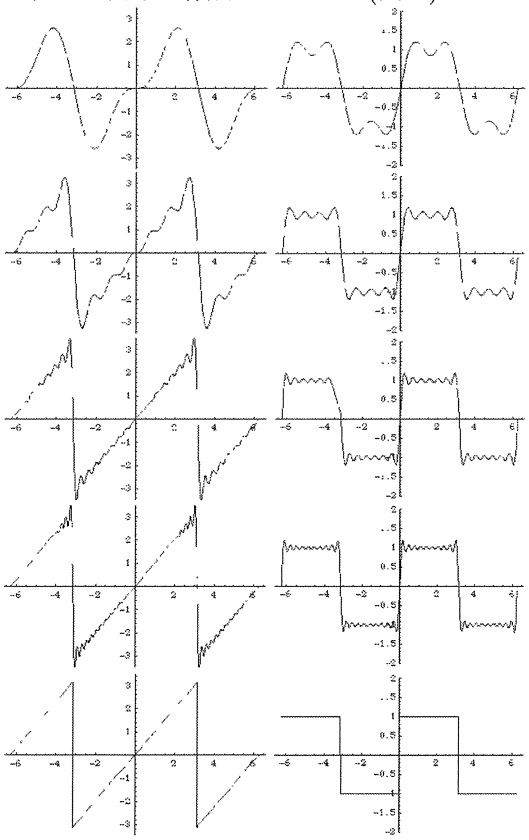


図 5: フーリエ級数見る (アニメーション)

図5は鋸歯状波と矩形波について、0次から30次までのフーリエ級数を計算してグラフにたもので, アニメーションとして見ると興味深い.

2.2.4 微分・積分

微分の教材は接線や極限を扱ったものが圧倒的に多く, 積分の教材は区分求積を扱ったものが多い. 図6はMathmaticaのグラフ描画機能および計算処理機能を生かした教材で区分求積法の分割数を増やしていったとき, 極限計算と積分が一致することを示す教材である.

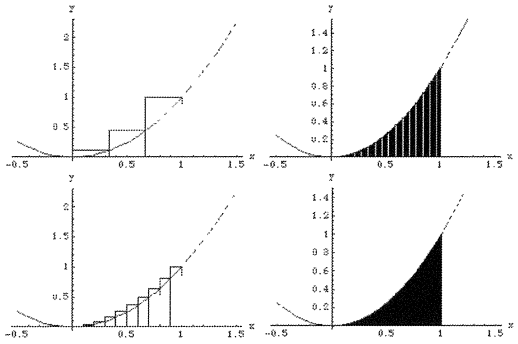


図6: 区分求積法

2.2.5 Taylorの定理の教材

Taylor展開もMathmaticaでは一瞬で計算ができ, 任意の次数までの展開のグラフがすぐに描画できることから, Mathmaticaの教材では定番となっているものである.

図7は$y = \sin x$のTaylor展開を1次, 3次, 5次, 7次まで

$$\sin x \approx x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} - \frac{x^7}{5040}$$

を重ねて表示し一致の度合いを示したものである.

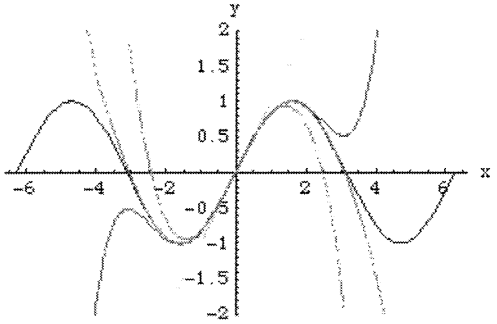


図7: $y = \sin x$の多項式近似

2.2.6 その他

作成された教材の対象となる分野は多岐にわたり, また多くの分野にまたがっている. 整数論や確率(実験数学), 物理学との関連で速度や加速度, 振り子やバネの振動, 微分方程式との関連で粘性抵抗や包絡線など多くの教材が作成された. その中で次の図8は, 本年度の作品の一部である.

$(1+i)^t$を考えて, tを0から増やしていった場合と減らしていった場合に複素数が描く軌道をしめした.

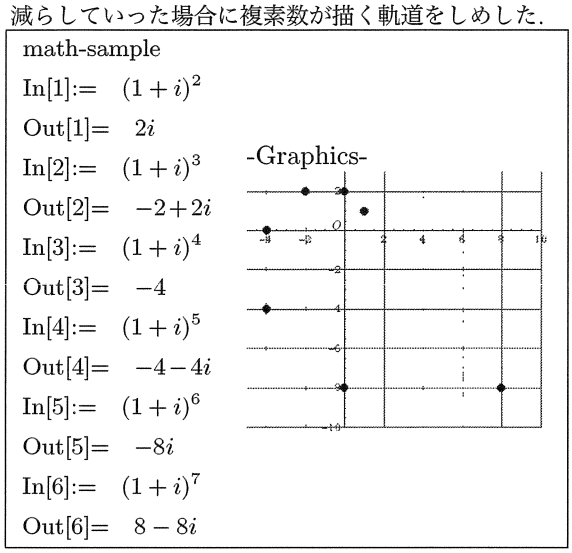


図8: 複素平面での複素数の累乗

3. おわりに

数学教育においてもテクノロジーの効果は圧倒的であり, とくにMathematicaの計算能力とグラフィックの機能は教材の作成においても教師学生の双方に利益をもたらしている.

教材作成という「ものづくり」を通じて学生はMathematicaの使用法を体得すると同時に, 本人自身も数学の内容に対する理解を深めたようである. さらに, 教材のプレゼンテーションとその相互評価を行うことで, わかりやすい提案や発表の仕方を学んだ.

このようなコンピュータやインターネットテクノロジー利用のリテラシーを養成することは技術者の基礎的な能力を向上させると考えられる. また, 情報をわかりやすく計画提案する能力も向上するものと期待できる.

参考文献

(1) 田村直行:「神戸大学Mathematica入門ページ」, http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/mma/nyumon/.

(2) Stephen Wolfram.:「The Mathematica Book, 5th ed.」Wolfram Media , 2003.

A　資料

本文で取り上げた教材の Mathematica コードの一部を参考までに資料として掲載する.

A1　Z 軸回りの回転

```
************************************************
```

Z 軸回りの多角形の回転

(i)XZ 平面上の三角形の、Z 軸回りの回転

XZ 平面上において点 (1,1), (2,0), (1,-1) を頂点とする次のような三角形を、 Z 軸回りに回転させるとどのような立体になるであろうか。

```
x1=1; z1=1;
x2=2; z2=0;
x3=1; z3=-1;
Show[Graphics[Polygon[{{x1,z1},{x2,z2},{x3,z3}}]],
AxesOrigin ->{0,0},
Axes ->{False,True},
AxesLabel ->z,
AspectRatio ->Automatic]
```

これを Z 軸回りに回転させるわけだが、Z 軸回りに n 枚の回転させた三角形を描画する ことによってこの作業を実現する。 真上および真横を視点とした場合を併せて 3 通り示す。

```
n=128;
t1=Table[Polygon[{{x1 Cos[t], x1 Sin[t], z1},
{x2 Cos[t], x2 Sin[t], z2},
{x3 Cos[t], x3 Sin[t], z3}}],
{t,0,2Pi-2Pi/n,2Pi/n}];
Show[Graphics3D[t1],BoxRatios ->{1,1,1}]
Show[%, ViewPoint ->{0.000, 0.000, 3.384}]
Show[%, ViewPoint ->{3.384, 0.000, 0.000}]
```

(ii)XZ 平面上の四角形の、Z 軸回りの回転

今度は、XZ 平面上において点 (1,1), (1,-1), (2,-1) , (2,1) を頂点とする 次のような四角形を、Z 軸回りに回転させるとどのような立体になるであろうか。

```
x1=1; z1=1;
x2=1; z2=-1;
x3=2; z3=-1;
x4=2; z4=1;
Show[Graphics[Polygon[{{x1,z1},{x2,z2},{x3,z3},
   {x4,z4}}]],
AxesOrigin ->{0,0},
Axes ->{False,True},
AxesLabel ->z,
AspectRatio ->Automatic]
```

(i) の三角形の場合と同様に描画する。真上および真横を視点とした場合を併せて 3 通り示す。

```
n=128;
t2=Table[Polygon[{{x1 Cos[t], x1 Sin[t], z1},
{x2 Cos[t], x2 Sin[t], z2},
{x3 Cos[t], x3 Sin[t], z3},
{x4 Cos[t], x4 Sin[t], z4}}],
{t,0,2Pi-2Pi/n,2Pi/n}];
Show[Graphics3D[t2],BoxRatios ->{1,1,1}]
Show[%, ViewPoint ->{0.000, 0.000, 3.384}]
Show[%, ViewPoint ->{3.384, 0.000, 0.000}]
```

(iii)3 次元空間における三角形の、Z 軸回りの回転

3 次元空間において点 (-1,1,1), (2,1,0), (1,0,-1) を頂点とする次のような三角形を、 Z 軸 (太線) 回りに回転させるとどのような立体になるであろうか。

```
x1=-1; y1=1; z1=1;
x2=2; y2=1; z2=0;
x3=1; y3=0; z3=-1;
Show[Graphics3D[
{Polygon[{{x1,y1,z1},{x2,y2,z2},{x3,y3,z3}}],
{AbsoluteThickness[3],
Line[{{0,0,Min[z1,z2,z3]-1},{0,0,Max[z1,z2,z3]+1
   }}]}},
Axes ->True,
BoxRatios ->{1,1,1}],
ViewPoint ->{1.606, -2.964, 0.000}]
```

Z 軸回りに n 枚の回転させた三角形を描画すると、次のようになる。

```
n=32;
t3=Table[
Polygon[{{x1 Cos[t]-y1 Sin[t], x1 Sin[t]+y1 Cos[t], z1},
{x2 Cos[t]-y2 Sin[t], x2 Sin[t]+y2 Cos[t], z2},
{x3 Cos[t]-y3 Sin[t], x3 Sin[t]+y3 Cos[t], z3}}],
{t,0,2Pi-2Pi/n,2Pi/n}];
Show[Graphics3D[t3],BoxRatios ->{1,1,1}]
```

真上および真横を視点とした場合を描画すると、次のようになる。

```
Show[%, ViewPoint ->{0.000, 0.000, 3.384}]
Show[%, ViewPoint ->{3.384, 0.000, 0.000}]
```

(iv) 最後に

上記のプログラムの座標値を変えれば、様々な三角形・四角形を Z 軸回りに回転させたときにできる 立体を描画させることができる。また、Polygon 内の点の数を変えれば、いろいろな多角形を Z 軸回 りに回転させたときにできる立体を描画させることができる。

A2　立方体の切断面

```
************************************************
data=Table[ParametricPlot3D[{x,y,(d - (a^2-2) x
     - b y)/c},{x,-1,1},{y,-1,1},
PlotRange->{-1,1},PlotPoints->2]
,{c,1,1},{b,-1,0,1},{d,-1,0},{a,-2,2,.2}]
Flatten[data]
ShowAnimation[data]
```

とりあえず、これを用いると、立方体の切断面はどんなものがあるのか、台形をはじめとして 平行四辺形やひし形、そして正方形までそろっている為、小学校の四角形の種類に関する説明 に使える。三角形もあります。

```
a=1
```

```
b=1
c=1
d=0
data=Table[ParametricPlot3D[{x,y,(d - a x - b y)/c}
    ,{x,-1,1},{y,-1,1},
PlotRange->{-1,1},PlotPoints->2
,ViewPoint->{5 Sin[s] Cos[t],5 Cos[s] Cos[t],
    5 Sin[t]}],{s,0,Pi,Pi/8},{t,0,2*Pi,Pi/16}]
Flatten[data]
```

A3　エピサイクロイド

```
************************************************
(*
大阪府立大学の入試問題を解説することを想定して作った.
問題は以下である.
*)

[問題]
座標平面上に，原点 O を中心とする半径 2 の固定された円 C と，
それに外側から接しながら回転する半径 1 の円 C' がある.
円 C' の中心が (3, 0) にあるときの C' 側の接点に印 P をつけ，
円 C' を円 C に接しながら滑らずに回転させる.
点 P の描く曲線で囲まれた領域の面積を求めよ.

まず，この問題は，
点 P の軌跡がどんな図形を描くかというイメージがつかみずらい.
それを Mathematica のアニメ -
ション機能を使って軌跡がどのようになるかを視覚でつかませる.
このことを本課題における Mathematica 利用の目的とした.

まず，
問題だけ与えてしばらく経ってから軌跡がどうなるかを見せると良いと思われる.

また，本問題は式変形についてはベクトルなどを用いるため，
黒板を併用する必要がある.
*)

(*
ここからは準備のためあらかじめカ - ネルを起動させておき，
実際生徒には見せないようにする.
Mathematica の特性上，
軌跡を描く際などに実際の解答となり得る式を入力する必要があるからである.
*)


(*準備ここから*)

(*固定円の作図ここから*)
gkoteien = Graphics[Circle[{0, 0}, 2]];
(*固定円の作図ここまで*)



(*回転円の作図ここから*)
gkaitenen[t_] := Graphics[Circle[{3*Cos[t],
    3*Sin[t]}, 1]];
(*回転円の作図ここまで*)

(*点 P の作図ここから*)
tenP[t_] := {3*Cos[t] - Cos[3*t], 3*Sin[t]
    - Sin[3*t]};
gtenP[t_] := Graphics[{RGBColor[0, 0, 0],
    PointSize[0.03], Point[tenP[t]]}];
(*点 P の作図ここまで*)

(*軌跡の作図ここから*)

gkiseki[t_] :=
Graphics[{{RGBColor[1, 0, 0], Line[Table[tenP[x],
    {x, 0, t, 0.1}]]}}];
(*軌跡の作図ここまで*)

(*準備ここまで*)

(*これより，軌跡がどのように描かれるかをアニメ - ションで見せる.*)

Do[{
Show[{
gkoteien,
gkaitenen[t],
gtenP[t],
gkiseki[t]},
PlotRange -> {{-5, 5}, {-5, 5}},
Axes -> True,
AxesLabel -> {x, y},
AspectRatio -> Automatic]
}, {t, 0, 2*Pi, 0.1}]

(*ここから，面積を求めるための説明をはじめる.*)


(*[対称形なので面積は第 1 象限を 4 倍すればいい.] と以下の図を見せる.*)
\
(*FilledPlot で作図を試みたが，ParametricPlot の時が例になく，断念.*)


(*面積*)
(*[x を y について 0 から 4 まで積分するということは] と以下の式を黒板などで\
導いて,*)
S :=
Integrate[4*(3*Cos[t] - Cos[3*t])*(3*Cos[t] - 3*
    Cos[3*t]) , {t, 0, Pi/2}]

(*ある程度の時間が経ったら，解答の表示*)
S
```

$$12\ \pi$$

A4　単位円と三角比

```
************************************************
・単位円と三角比
(θ は文字コードに変換されるので適宜変えてもらえるとありがたい)
```

単位円の上をで点を動かすことによって、三角比(sin θ,cos θ)について考えてみる。

まず、単位円は、

```
g1 = ParametricPlot[{Cos[x], Sin[x]}, {x, 0,
    2Pi}, AspectRatio -> 1,
PlotRange -> {{-1.1, 1.1}, {-1.1, 1.1}}]
```

で描くことができる。

つぎに、単位円上の点は、

```
g2 = Graphics[{PointSize[0.03], RGBColor[1,
     t/(2Pi), 0],
Point[{Cos[t], Sin[t]}]}, AspectRatio -> 1,
     Axes -> True,
PlotRange -> {{-1.1, 1.1}, {-1.1, 1.1}}]
```

で描くことができる。

cos θの長さは

```
g3 = Graphics[{RGBColor[0, 0, 1], Line[{{0,
    Sin[t]}, {Cos[t], Sin[t]}}],
Text["cos θ", {Cos[t]/2, Sin[t] + 0.1},
    {Cos[t]/2, Sin[t] + 0.1}]},
AspectRatio -> 1, Axes -> True, PlotRange ->
    {{-1.1, 1.1}, {-1.1, 1.1}}]
```

sin θの長さは

```
g4 = Graphics[{RGBColor[1, 0, 0], Line[{{Cos[t], 0},
     {Cos[t], Sin[t]}}],
Text["sin θ", {Cos[t] + 0.1, Sin[t]/2}, {Cos[t] +
     0.1, Sin[t]/2}]},
AspectRatio -> 1, Axes -> True, PlotRange ->
     {{-1.1, 1.1}, {-1.1, 1.1}}]
```

原点から単位円上の点までの線分と偏角θは

```
g5 = Graphics[{RGBColor[0.3, 0.8, 0.5], Line[{{0, 0},
     {Cos[t], Sin[t]}}],
Circle[{0, 0}, 0.1, {0, t}],
Text["θ", {Cos[t/2]/5, Sin[t/2]/5}, {Cos[t/2]/5,
    Sin[t/2]/5}]},
        AspectRatio -> 1, Axes -> True,
PlotRange -> {{-1.1, 1.1}, {-1.1, 1.1}}]
```

で描くことができる。

これらを偏角θを変化させてアニメーションにしてやると

```
Do[Show[g1, g2, g3, g4, g5], {t, 0, 2Pi, 0.1}];
```

となる。
これにより、偏角θの変化によってどのようにcos θ,sin θが変化するかがイメージ
しやすくなる。

ちなみに、横軸に偏角θをとってcos θ,sin θのグラフを描いてやると

cos θのグラフは

```
g6 = Plot[Cos[x], {x, -1, 5Pi/2}, PlotRange ->
    {-1.1, 1.1},
AxesLabel -> {"θ", "cos θ"}]

g7 = Graphics[{PointSize[0.03], RGBColor[1, t/(2Pi),
     0], Point[{t, Cos[t]}]}],
PlotRange -> {{-1, 5Pi/2}, {-1.1, 1.1}}]

g8 = Graphics[{RGBColor[0, 0, 1], Line[{{t, 0}, {t,
    Cos[t]}}], Text["cos θ", {t, Cos[t]/2}]}]
```

偏角θの変化によるアニメーションにしてやるには、

```
Do[Show[g6, g7, g8], {t, 0, 2Pi, 0.1}];
```

sin θのグラフは

```
g9 = Plot[Sin[x], {x, -1, 5Pi/2}, PlotRange ->
    {-1.1, 1.1}, AxesLabel -> {"θ", "sin θ"}]

g10 = Graphics[{PointSize[0.03], RGBColor[1,
     t/(2Pi), 0], Point[{t, Sin[t]}]},
PlotRange -> {{-1, 5Pi/2}, {-1.1, 1.1}}]

g11 = Graphics[{RGBColor[1, 0, 0], Line[{{t, 0},
     {t, Sin[t]}}], Text["sin θ", {t, Sin[t]/2}]}]
```

偏角θの変化によるアニメーションにしてやるには、

```
Do[Show[g9, g10, g11], {t, 0, 2Pi, 0.1}];
```

これら３つのアニメーションを並べて表示してみよう。
ちなみに、ここからはエラーがたくさん出てくるが、結果には影響しないので気
にせず進めること。

```
p1 = Show[g1, g2, g3, g4, g5]

p2 = Show[g6, g7, g8]

p3 = Show[g9, g10, g11]

Do[{Show[GraphicsArray[{p1, p2, p3}]]}, {t, 0,
    2Pi, 0.1}];
```

見易くするために全画面表示にして、
一番上のグラフの表示を大きくしてやってからもう一度
```
Do[{Show[GraphicsArray[{p1, p2, p3}]]}, {t, 0,
     2Pi, 0.1}];
```
を実行してやるとよい。

こうすることにより、より一層イメージができたのではないだろうか。

A5　フーリエ展開

****
「フーリエ級数を目で見るとどうなるか」です。

周期が２πの２つの関数（鋸歯状波と矩形波）について、０次から30次までのフーリエ級数を計算してグラフにします。
アニメーションとして見ると興味深い動きをしています。

```
f[x_] := x

n = 30;
re[x_] := Mod[x+Pi, 2Pi] - Pi
co[x_] := Table[Cos[i x], {i, 1, n}]
si[x_] := Table[Sin[i x], {i, 1, n}]
a0 = 1/Pi Integrate[f[z], {z, -Pi, Pi}];
a = Cancel[1/Pi Integrate[f[z] co[z], {z, -Pi,
     Pi}]];
b = Cancel[1/Pi Integrate[f[z] si[z], {z, -Pi,
     Pi}]];
fouri[i_, x_] :=
a0/2 + Take[a, i].Take[co[x], i] +
Take[b, i].Take[si[x], i]

Do[
Plot[Evaluate[fouri[j, x]], {x, -2Pi, 2Pi},
PlotRange->{-3.5, 3.5}],
{j, 0, n, 1}]
Plot[f[re[x]], {x, -2Pi, 2Pi},
PlotRange->{-3.5, 3.5}];

Clear[f]
f[x_] := -1 /; x < 0
f[x_] := 1 /; x >= 0

a0 = 1/Pi (Integrate[-1, {z, -Pi, 0}] +
Integrate[1, {z, 0, Pi}]);
a = Cancel[1/Pi (Integrate[-co[z], {z, -Pi, 0}] +
Integrate[co[z], {z, 0, Pi}])];
b = Cancel[1/Pi (Integrate[-si[z], {z, -Pi, 0}] +
Integrate[si[z], {z, 0, Pi}])];

Do[
Plot[Evaluate[fouri[j, x]], {x, -2Pi, 2Pi},
PlotRange->{-2, 2}],
{j, 0, n, 2}]
Plot[f[re[x]], {x, -2Pi, 2Pi},
PlotRange->{-2, 2}];
```

A6　区部求積法

```
*****************************************************
```

コンピュータと言えば，高速の計算処理という勝手な思い込みから無限級数ができればいいなと思い，グラフ描画も用いて作りました．作り終えてから過去のものをみていると，一般化しているしていないなど違うところもあるのですが似たようなものがあったので急きょ積分公式を追加しました．最後の公式はどうすればきれいになるかとかなり苦戦しましたが，驚くほどきれいにはなりませんでした．公式として暗記できるのかと聞かれれば何とも言えないものしかできませんでした …．

```
/* 高校数学の範囲の中で Mathmatica を用いた教材を考えるにあたり，
Mathmatica のグラフ描画機能および計算処理機能を生かしたいと考えました.\
そこである区間における二次関数の定積分に関して区分求積法が成立することを紹介していきましょう．*/
/* まず f (x) := x^2 と定義して y = f (x) のグラフをみてみましょう．*/
f[x_] := x^2;
graph = Plot[f[x], {x, -1/2, 3/2}, Axes -> True,
  AxesLabel -> {"x", "y"}]
/* [0, 1] における定積分とは下のグラフで放物線と x 軸，直線 x = 1 で囲まれた面積を考えることをいいます．*/
line1 := Graphics[Line[{{1, 0}, {1, f[1]}}]];
Show[graph, line1]
/* この積分計算自体は手でカリカリ計算できるのですが，Mathmatica では以下で導かれます．*/
S = Integrate[f[x], {x, 0, 1}]
/* それでは区分求積法とはどのようなものなのか考えていきましょう.\
区分求積法とは簡単にいえば領域を長方形により分割したときの長方形の面積の和による近似のことで，
まず区間を 3 分割したものを考えていきましょう．*/
line2 := Graphics[{Line[{{0, f[1/3]}, {1/3, f[1/3]}}],
    Line[{{1/3, f[2/3]}, {2/3, f[2/3]}}],
    Line[{{2/3, f[1]}, {1, f[1]}}]}];
line3 := Graphics[{Line[{{0, 0}, {0, f[1/3]}}],
    Line[{{1/3, 0}, {1/3, f[2/3]}}], Line[{{2/3, 0},
         {2/3, f[1]}}],
    Line[{{1, 0}, {1, f[1]}}]}];
Show[graph, line2, line3]
/* 上のグラフで表される 3 つの長方形の面積の和により定積分の近似計算ができます．今回の場合を計算すると，*/
T = 1/3*(f[1/3] + f[2/3] + f[1])
/* よって実際の定積分の値との誤差は */
T - S
/* そこで次に一般の自然数 n に対して，n 分割したときのグラフ，面積を n の関数として定義してみましょう．*/
a[n_] := Graphics[
   Table[Line[{{(i - 1)/n, f[i/n]}, {i/n, f[i/n]}}],
      {i, 1, n}]];
b[n_] := Graphics[{Table[
     Line[{{(i - 1)/n, 0}, {(i - 1)/n, f[i/n]}}],
        {i, 1, n}],
    Line[{{1, 0}, {1, f[1]}}]}];
s[n_] := (1/n)*Sum[f[i/n], {i, 1, n}];
/* n = 10 のときのグラフおよび近似面積（長方形面積の和），誤差を考えると，*/
Show[graph, a[10], b[10]]
s[10]
s[10] - S
/* Mathmatica なら 100 分割，1000 分割した場合のグラフも計算も次のようにして簡単に得られます．*/
Show[graph, a[100], b[100]]
s[100] - S
Show[graph, a[1000], b[1000]]
s[1000] - S
/* ここから推測できるように s[n]
  は n を大きくするにつれて S に近づいている．そこで分割を無限大にまで大きくする，つまり n に関して極限を計算してみると，*/
Limit[s[n], n -> Infinity]
/* やはり s[n] の極限は S と等しくなったため，
区間 [0, 1] における f (x) =
 x^2 の定積分は区間求積法により求まる．それでは一般の関数 g (x) :=
  ax^2 + bx +
   c の場合は成立するのでしょうか ?? それを確かめるために以下のようにして計算してみましょう．本当に同じになるでしょうか?? */
g[x_] := a*x^2 + b*x + c;
Integrate[g[x], {x, 0, 1}]
```

```
t[n_] := (1/n)*Sum[g[i/n], {i, 1, n}];
Limit[t[n], n -> Infinity]
/* やはり一般の２次関数についても区間 [0, 1] において
区間求積法は成立しました．最後に任意の区間 [p, q]
   においても成立するのでしょうか ?? このときは和の計
算で i がどこからどこまでなのかが重要なポイントになり
ます．*/
Factor[Integrate[g[x], {x, p, q}]]
u[n_] := ((q - p)/n)*Sum[g[p + ((q - p) i)/n], {i,
     1, n}];
Factor[Limit[u[n], n -> Infinity]]
/* こうして任意の閉区間 [p, q] において２次関数 g[x] =
 ax^2 + bx + c に対して区間求積法は成立することが示
されました．
    過去に似たようなものもありましたが，関数や区間を一
般化しても成り立つことや高校数学で学ぶ一般的な区間求積
法の公式に立ち戻れること，
および難しい組み込み関数を使わずに証明できるように留意
しました．また区間求積法のイメ -
 ジがつかみやすいように分割されたグラフも一般化し表記
しました．*/
```

A7　Taylor の定理

```
**********************************************
(x) が [x0,x] で Cn 級で (x0,x) で n+1 回微分可能の時、
f(x) = f(x0) + f'(x0)/1! (x-x0) + f''(x0)/2!
     (x-x0)^2 + ...+ f(n)(x0)/n! (x-x0)^n + Rn+1
ただし Rn+1 = f(n+1)(xc)/(n+1)! (x-x0)^(n+1)
となる xc(x0 < xc < x) が存在する。
f(x) が [x,x0] で無限回微分可能な場合、n →∞とした無
限べき級数を Taylor 展開と呼ぶ。
また、その n 次までの部分和を n 次 Taylor 多項式と呼ぶ
(上の剰余項 Rn+1 を無視したもの)。

Taylor 展開を Mathematica で表現すると次のようになる。

Clear[f, x, x0, n];
Sum[(D[f[x], {x, i}]/. x->x0)/i! (x-x0)^i, {i, 0, n}]

f,xo,n を実際に与えてみる。
f[x_] := Sin[x];
x0 = 0;
n = 10;
Sum[(D[f[x], {x, i}]/. x->x0)/i! (x-x0)^i, {i, 0, n}]

x0 に近似値を与えて、多項式の係数を近似値として求めて
みる。
f[x_] := Sin[x];
x0 = 0.0;
n = 10;
Sum[(D[f[x], {x, i}]/. x->x0)/i! (x-x0)^i, {i, 0, n}]

余計な部分を取り除いて式を簡単化する。
f[x_] := Sin[x];
x0 = 0.0;
n = 10;
Cancel[Sum[(D[f[x], {x, i}]/. x->x0)/i! (x-x0)^i,
   {i, 0, n}]]

以上の操作をどのような f,x,xo,n が与えられても実行出来
るように、新しい関数 taylor を定義する。
taylor[f_, x_, x0_, n_] :=
Sum[(D[f[x], {x, i}]/. x->x0)/i! (x-x0)^i, {i, 0, n}]
いろいろな引数を試してみる。
Clear[g, a, b, m];
taylor[g, a, b, m]
taylor[g, a, b, 5]
taylor[Log, x, 1, 5]

元の関数と Taylor 展開した多項式を同じグラフに描いてみ
る。
ここでは sin 関数について調べる。
taylor[f, x, 0, 30]

x0 = 0 の周りでは奇数時の項しか存在しないことが分かる。

f[x_] := Sin[x];
taylor[f, x, 0, 3]
Plot[Evaluate[{f[x],taylor[f, x, 0, 3]}],
   {x, -Pi, Pi}];

いくつかの次数のグラフを重ねる。

f[x_] := Sin[x];
taylor[f, x, 0, 7]
Plot[Evaluate[
{
f[x],
taylor[f, x, 0, 1],
taylor[f, x, 0, 3],
taylor[f, x, 0, 5],
taylor[f, x, 0, 7]
}
],
{x, -2Pi, 2Pi}];

分かりやすく色分けする。
f[x_] := Sin[x];
taylor[f, x, 0, 7]
Plot[Evaluate[
{
f[x],
taylor[f, x, 0, 1],
taylor[f, x, 0, 3],
taylor[f, x, 0, 5],
taylor[f, x, 0, 7]
}
],
{x, -2Pi, 2Pi},
PlotRange->{-2, 2},
AxesLabel->{"x", "y"},
PlotStyle->{GrayLevel[0], Hue[1/8], Hue[3/8],
   Hue[5/8], Hue[7/8]}];

もっと多く描く。
f[x_] := Sin[x];
taylor[f, x, 0, 19]
Plot[Evaluate[
{
f[x],
taylor[f, x, 0, 1],
taylor[f, x, 0, 3],
taylor[f, x, 0, 5],
taylor[f, x, 0, 7],
taylor[f, x, 0, 9],
```

```
taylor[f, x, 0, 11],
taylor[f, x, 0, 13],
taylor[f, x, 0, 15],
taylor[f, x, 0, 17],
taylor[f, x, 0, 19]
}
],
{x, -3Pi, 3Pi},
PlotRange->{-2, 2},
AxesLabel->{"x", "y"},
PlotStyle->{GrayLevel[0], Hue[1/20], Hue[3/20],
   Hue[5/20], Hue[7/20], Hue[9/20], Hue[11/20],
   Hue[13/20], Hue[15/20], Hue[17/20], Hue[19/20]}];
```

別の場所を中心に x0=π/4 とする。

```
taylor[Sin, x, Pi/4, 30]

f[x_] := Sin[x];
x0=Pi/4;
taylor[f, x, x0, 5]
Plot[Evaluate[
{
f[x],
tatlor[f, x, x0, 0],
taylor[f, x, x0, 1],
taylor[f, x, x0, 2],
taylor[f, x, x0, 3],
taylor[f, x, x0, 4],
taylor[f, x, x0, 5]
}
],
{x, -7Pi/4, 9Pi/4},
PlotRange->{-4, 4},
AxesLabel->{"x", "y"},
PlotStyle->{GrayLevel[0], Hue[0/6], Hue[1/6],
     Hue[2/6], Hue[3/6], Hue[4/6], Hue[5/6]}];
```

A8　複素数の累乗

```
**********************************************
(**)(1 + I)^2

(1 + I)^3

((1 + I))^4

(1 + I)^5

(1 + I)^6

(1 + I)^7


g0 = ListPlot[{{1, 1}, {0, 2}, {-2, 2}, {-4,
    0}, {-4, -4}, {0, -8}, {8, -8}},
  PlotRange -> {{-5, 10}, {-10, 3}}, AxesOrigin ->
       {0, 0},
  AspectRatio -> Automatic, PlotStyle ->
      PointSize[0.03],
  GridLines -> Automatic]

  g1 = Show[
   Graphics[{Thickness[0.01], {Line[{{-2, 2},
       {8, -8}}],
     Line[{{1, 1}, {-4, -4}}], Line[{{0, 2},
         {0, -8}}],
     Line[{{-4, 0}, {0, 0}}]}}, GridLines ->
         Automatic,
   AspectRatio -> Automatic, AxesOrigin ->
        {0, 0}]]
   ga = Show[g0, g1]
   a = Re[(1 + I)^t]
   b = Im[(1 + I)^t]
   ParametricPlot[{a, b}, {t, 0, 10}, AxesOrigin
        -> {0, 0}, AspectRatio -> Automatic,
            GridLines -> Automatic]
   ParametricPlot[{a, b}, {t, -10, 0}, AxesOrigin
        -> {0, 0},  AspectRatio -> 1, GridLines
            -> Automatic,
   PlotRange -> {{1, -0.4}, {0.2, -0.6}}]
```

複素数の累乗が複素平面でどういう振る舞いをするのかを説明しました．まず，
複素数の累乗の計算を行ってそれを複素平面にプロットしました．ここでは一例として

```
1 + i
```

を計算しました．そして原点とその点を結んでその線分の角度が 45 度ずつ増えていること，長さが Sqrt[2] 倍ずつ増えているということを視覚的にしめしました．
最後に，((1 + i))^t
を考えて，t を 0 から増やしていった場合と減らしていった場合に複素数が描く軌道をしめしました．

2自由度PID制御系の近似微分を考慮した最適パラメータ調整指針

田口秀文*

Optimal Parameter Tuning subject to Approximate Derivative in Two-Degree-of-Freedom PID Control Systems

Hidefumi TAGUCHI*

ABSTRACT

This material studies effects of the approximate derivative on the optimal tuning of two-degree-of-freedom PID controllers. The optimal parameter values are recalculated for the PID controllers using the approximate derivatives where the derivative gains are 10, 100 and 1000. The results are evaluated by step responses and frequency responses, and it is found that the effects divide in the case of 2 pieces · (a) the maximal order of s in the denominator of the plant transfer function is 1 (e.g. "1st order time-lag + pure delay") and (b) the maximal order of s is over 2 (e.g. "integrator + 1st order time-lag + pure delay"). In case (a), the effects of the approximate derivative are small and can be neglected. In case (b), we have to use the optimal parameters considering the derivative gain of the approximate derivative.

Keywords : optimal parameter, approximate derivative, PID control, two-degree-of-freedom

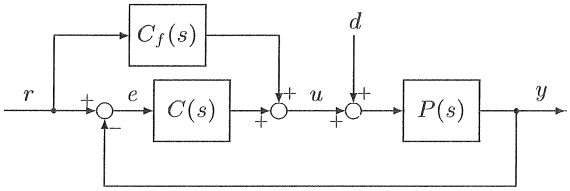
1. はじめに

目標値応答と外乱応答を同時に良好にできる制御系として，2自由度PID制御系が知られている[1]．筆者らは周波数領域における評価関数を用いたパラメータ調整法を提案し，最適値を示した[2),(3),(4)]が，PIDのD動作，すなわち微分演算に関しては純粋な微分動作が行なわれるものと仮定していた．一方，微分演算を現実に適用する場面では，多くの場合に近似微分が用いられる．そこで研究速報[5]において，近似微分を考慮した評価関数を用いて2自由度PID制御系のパラメータの最適値を求め直した後，純粋な微分を仮定して筆者らがすでに求めた最適パラメータ値（以下ではこれを「標準パラメータ値」と呼ぶ）を用いた場合の時間応答との比較によって，近似微分がパラメータ調整に及ぼす影響について報告した．

しかしながら，紙数の都合から研究速報[5]では，パラメータ表の一部と時間応答波形の大部分を割愛せざるを得なかった．そこで，本資料ではそれらの省略した部分を含めて，完全な形でパラメータ表と時間応答波形を示す．さらに，近似微分の影響の裏づけを与えるために，新たに周波数応答の観点からの考察を加える．

これらのまとめとして，2自由度PID制御系において近似微分を用いる場合に，その最適パラメータの調整指針を示す．

*機械工学科 准教授



$$C(s) = K_P \left\{ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D D(s) \right\}$$

$$C_f(s) = -K_P \{ \alpha + \beta T_D D(s) \}$$

図1 2自由度PID制御系（フィードフォワード型）

2. 2自由度PID制御系の最適パラメータ調整法[2),(3),(4)]

図1に2自由度PID制御系を示す．ここで，$D(s)$ は近似微分であり，

$$D(s) = \frac{s}{1 + (T_D/\delta)\, s} \tag{1}$$

で表わされる．δ は一般に微分ゲインと呼ばれる．

$C(s)$ と $C_f(s)$ に現れる5個のパラメータ K_P，T_I，T_D および α，β を最適に設定するために，周波数領域における評価関数

$$J[\lambda, \mu;\, H(s)] = \int_0^\infty \left| \lambda(\omega) \left\{ \frac{d^\mu H(s)}{ds^\mu} \right\}_{s=j\omega} \right|^2 d\omega \tag{2}$$

$$\text{ただし，} \quad \lambda(\omega) = \omega^{1/4}, \quad \mu = 2 \tag{3}$$

を考え，つぎのように2段階に分けてパラメータ調整を

行なう．

ステップ1　外乱応答が望ましくなるように $C(s)$ を調整する．具体的には，$J[\lambda,\mu;\, G_{ed}(s)/s]$ が最小となるように基本パラメータ K_P，T_I，T_D を調整する．ここで，$G_{ed}(s)$ は外乱から偏差への閉ループ伝達関数である．

ステップ2　$C(s)$ を固定した上で，目標値応答が望ましくなるように $C_f(s)$ を調整する．具体的には，K_P，T_I，T_D をステップ1の最適値に固定したままで，$J[\lambda,\mu;\, G_{er}(s)/s]$ が最小となるように2自由度化パラメータ α，β を調整する．ここで，$G_{er}(s)$ は目標値から偏差への閉ループ伝達関数である．

3.　近似微分がパラメータ調整に与える影響

3.1　検討する制御対象　制御対象として，

(i) 1次遅れ ＋ むだ時間

$$P(s)=\frac{Ke^{-Ls}}{1+Ts} \tag{4}$$

(ii) 2重1次遅れ ＋ むだ時間

$$P(s)=\frac{Ke^{-Ls}}{(1+Ts)^2} \tag{5}$$

(iii) 3重1次遅れ ＋ むだ時間

$$P(s)=\frac{Ke^{-Ls}}{(1+Ts)^3} \tag{6}$$

(iv) 積分 ＋ むだ時間

$$P(s)=\frac{Re^{-Ls}}{s} \tag{7}$$

(v) 積分 ＋ 1次遅れ ＋ むだ時間

$$P(s)=\frac{Re^{-Ls}}{s(1+Ts)}\ ,\quad R=K/T \tag{8}$$

(vi) 積分 ＋ 2重1次遅れ ＋ むだ時間

$$P(s)=\frac{Re^{-Ls}}{s(1+Ts)^2}\ ,\quad R=K/T \tag{9}$$

(vii) 減衰係数 0.5 の2次遅れ ＋ むだ時間

$$P(s)=\frac{Ke^{-Ls}}{1+Ts+T^2s^2} \tag{10}$$

の7種類を考える．

(i) と (iv) はそれぞれ定位性プロセス，無定位性プロセスの代表的なモデルとして古くから用いられてきたものである．(ii)，(iii) は (i) を発展させた「多重1次遅れ＋むだ時間」モデル，同様に (v)，(vi) は (iv) を発展させた「積分＋多重1次遅れ＋むだ時間」モデルである．また，(vii) は振動的プロセスとしての「2次遅れ＋むだ時間」モデルである．なお，(ii) は $P(s)=\dfrac{Ke^{-Ls}}{1+2Ts+T^2s^2}$ と変形できるので「減衰係数 1.0 の2次遅れ＋むだ時間」モデルとみなすこともできる．

3.2　近似微分を考慮した最適パラメータ値　微分ゲイン δ を 10，100 および 1000 として近似微分を考慮した評価関数を定義し，2. の調整方法によって上記の7種類の制御対象について最適パラメータ値を求め直した．その結果を表1 ～ 表7に示す．表の中で，δ が ∞ のときは純粋な微分，すなわち $D(s)=s$ となる場合であり，これが従来から求められている標準パラメータ値である．

これらの表から，全体的につぎのような傾向が読み取れる．すなわち，δ が小さくなるにつれて，

- 基本パラメータの比例ゲイン K_P は小さくなる
- 基本パラメータの積分時間 T_I は大きくなる
- 基本パラメータの微分時間 T_D は小さくなる
- 2自由度化パラメータの α は大きくなる
- 2自由度化パラメータの β は小さくなる

ことがわかる．さらに詳細に見ると，

(a) 制御対象の伝達関数の分母の次数が s に関して1次となる場合，すなわち，(i) の「1次遅れ＋むだ時間」系と (iv) の「積分＋むだ時間」系

(b) 制御対象の伝達関数の分母の次数が s に関して2次以上となる場合，すなわち，(ii) と (iii) の「多重1次遅れ＋むだ時間」系，(v) と (vi) の「積分＋多重1次遅れ＋むだ時間」系および (vii) の「減衰係数 0.5 の2次遅れ＋むだ時間」系

の二つのグループに特徴が分かれている．(a) のグループでは，近似微分として求め直した値と標準パラメータ値とはあまり変わらず，その変化幅は6%以内に収まっている．特に $\delta=1000$ のときの値は標準パラメータ値とほぼ等しくなっている．これに対して，(b) のグループでは，近似微分を考慮した最適パラメータ値は標準パラメータ値と大きく異なっており，K_P と T_I の変化幅が総じて大きく，標準パラメータ値の 99%増となっている場合も見受けられる．

3.3　時間応答における影響　微分演算として $\delta=10$ の近似微分を用い，制御対象の定数を $K=1.0$，$T=1.0$，$L=0.2$ として，ステップ入力に対する時間応答波形をシミュレーションで求めた．その結果を図2 ～ 図8に示す．

(a) のグループの図2と図5では，近似微分を考慮した最適パラメータ値の場合に，標準パラメータ値の場合と比べてやや良好な応答波形が得られているが，これらの間に大きな違いは見られない．つまり，近似微分の微分ゲイン δ に合わせてパラメータ値を求め直してみても，制御系の応答はほとんど変わらないことがわかる．

表1　近似微分を考慮して求め直した最適パラメータ値
$\left(P(s)=\dfrac{Ke^{-Ls}}{1+Ts}\right)$

δ	L/T	$K_P{\cdot}K$	T_I/T	T_D/T	α	β
∞	0.1	12.57	0.22	0.041	0.64	0.66
	0.2	6.32	0.40	0.081	0.61	0.64
	0.4	3.21	0.69	0.157	0.56	0.61
	0.8	1.68	1.09	0.298	0.47	0.54
1000	0.1	12.57	0.22	0.041	0.64	0.66
	0.2	6.31	0.40	0.081	0.61	0.64
	0.4	3.20	0.69	0.157	0.56	0.61
	0.8	1.67	1.09	0.298	0.47	0.54
100	0.1	12.50	0.22	0.041	0.64	0.66
	0.2	6.28	0.40	0.080	0.61	0.64
	0.4	3.19	0.69	0.156	0.56	0.61
	0.8	1.66	1.09	0.296	0.47	0.54
10	0.1	11.90	0.22	0.039	0.65	0.65
	0.2	5.98	0.41	0.076	0.62	0.63
	0.4	3.03	0.70	0.149	0.57	0.59
	0.8	1.58	1.10	0.282	0.47	0.52

表2　近似微分を考慮して求め直した最適パラメータ値
$\left(P(s)=\dfrac{Ke^{-Ls}}{(1+Ts)^2}\right)$

δ	L/T	$K_P{\cdot}K$	T_I/T	T_D/T	α	β
∞	0.1	47.58	0.40	0.19	0.66	0.84
	0.2	15.18	0.72	0.31	0.64	0.81
	0.4	5.52	1.19	0.47	0.60	0.76
	0.8	2.34	1.74	0.64	0.52	0.67
1000	0.1	47.39	0.40	0.19	0.66	0.84
	0.2	15.14	0.72	0.31	0.64	0.81
	0.4	5.51	1.20	0.47	0.60	0.76
	0.8	2.34	1.74	0.64	0.52	0.67
100	0.1	45.78	0.40	0.20	0.66	0.84
	0.2	14.75	0.73	0.32	0.65	0.82
	0.4	5.41	1.20	0.47	0.61	0.76
	0.8	2.31	1.75	0.64	0.52	0.67
10	0.1	33.27	0.47	0.21	0.70	0.86
	0.2	11.67	0.80	0.32	0.67	0.83
	0.4	4.63	1.26	0.45	0.62	0.77
	0.8	2.08	1.77	0.61	0.53	0.67

表3　近似微分を考慮して求め直した最適パラメータ値
$\left(P(s)=\dfrac{Ke^{-Ls}}{(1+Ts)^3}\right)$

δ	L/T	$K_P{\cdot}K$	T_I/T	T_D/T	α	β
∞	0.1	12.76	0.98	0.86	0.64	0.79
	0.2	6.65	1.44	0.89	0.62	0.77
	0.4	3.58	1.93	0.94	0.57	0.73
	0.8	1.98	2.43	1.04	0.50	0.65
1000	0.1	12.63	0.99	0.86	0.64	0.79
	0.2	6.61	1.44	0.89	0.62	0.77
	0.4	3.57	1.93	0.94	0.57	0.73
	0.8	1.98	2.43	1.04	0.50	0.65
100	0.1	11.59	1.05	0.85	0.65	0.80
	0.2	6.33	1.47	0.88	0.62	0.77
	0.4	3.49	1.94	0.94	0.57	0.73
	0.8	1.95	2.43	1.03	0.50	0.65
10	0.1	6.74	1.45	0.79	0.68	0.80
	0.2	4.56	1.70	0.83	0.64	0.77
	0.4	2.87	2.05	0.88	0.59	0.73
	0.8	1.73	2.46	0.97	0.50	0.65

表4　近似微分を考慮して求め直した最適パラメータ値
$\left(P(s)=\dfrac{Re^{-Ls}}{s}\right)$

δ	$K_P\ R{\cdot}L$	T_I/L	T_D/L	α	β
∞	1.25	2.39	0.414	0.66	0.68
1000	1.25	2.39	0.414	0.66	0.68
100	1.25	2.40	0.411	0.67	0.68
10	1.19	2.46	0.392	0.67	0.68

表5　近似微分を考慮して求め直した最適パラメータ値
$\left(P(s)=\dfrac{Re^{-Ls}}{s(1+Ts)}\ ,\ R=K/T\right)$

δ	L/T	$K_P{\cdot}R$	T_I/T	T_D/T	α	β
∞	0.1	41.31	0.42	0.22	0.67	0.85
	0.2	12.04	0.81	0.38	0.66	0.84
	0.4	3.93	1.55	0.62	0.66	0.82
	0.8	1.50	2.87	0.90	0.66	0.78
1000	0.1	41.12	0.42	0.22	0.67	0.85
	0.2	12.00	0.82	0.38	0.67	0.84
	0.4	3.92	1.55	0.62	0.67	0.82
	0.8	1.49	2.88	0.90	0.66	0.78
100	0.1	39.46	0.43	0.22	0.67	0.86
	0.2	11.60	0.83	0.39	0.67	0.84
	0.4	3.83	1.57	0.62	0.67	0.82
	0.8	1.47	2.90	0.90	0.67	0.79
10	0.1	26.71	0.52	0.25	0.72	0.88
	0.2	8.50	0.97	0.41	0.71	0.86
	0.4	3.07	1.76	0.62	0.70	0.83
	0.8	1.28	3.12	0.87	0.69	0.79

表 6　近似微分を考慮して求め直した最適パラメータ値
$\left(P(s)=\dfrac{Re^{-Ls}}{s(1+Ts)^2}\ ,\ R=K/T\right)$

δ	L/T	$K_P\ R$	T_I/T	T_D/T	α	β
∞	0.1	5.72	1.17	1.30	0.67	0.81
	0.2	2.97	1.95	1.33	0.67	0.80
	0.4	1.60	3.01	1.41	0.67	0.79
	0.8	0.88	4.57	1.55	0.67	0.77
1000	0.1	5.63	1.19	1.30	0.67	0.81
	0.2	2.94	1.96	1.33	0.67	0.80
	0.4	1.59	3.02	1.40	0.67	0.79
	0.8	0.88	4.58	1.55	0.67	0.77
100	0.1	4.97	1.33	1.28	0.68	0.82
	0.2	2.76	2.05	1.32	0.68	0.80
	0.4	1.54	3.08	1.40	0.67	0.79
	0.8	0.86	4.63	1.54	0.67	0.77
10	0.1	2.49	2.33	1.18	0.74	0.84
	0.2	1.79	2.80	1.24	0.72	0.82
	0.4	1.19	3.64	1.32	0.70	0.80
	0.8	0.74	5.07	1.46	0.69	0.77

表 7　近似微分を考慮して求め直した最適パラメータ値
$\left(P(s)=\dfrac{Ke^{-Ls}}{1+2\zeta Ts+T^2s^2}\ ,\ \zeta=0.5\right)$

δ	L/T	$K_P{\cdot}K$	T_I/T	T_D/T	α	β
∞	0.1	40.69	0.41	0.22	0.66	0.85
	0.2	11.45	0.74	0.40	0.64	0.84
	0.4	3.39	1.17	0.67	0.57	0.80
	0.8	1.06	1.38	1.06	0.35	0.69
1000	0.1	40.50	0.41	0.22	0.66	0.85
	0.2	11.40	0.74	0.40	0.64	0.84
	0.4	3.38	1.17	0.67	0.57	0.80
	0.8	1.06	1.38	1.06	0.35	0.69
100	0.1	38.82	0.42	0.22	0.66	0.85
	0.2	10.99	0.75	0.40	0.64	0.84
	0.4	3.28	1.17	0.68	0.57	0.80
	0.8	1.03	1.37	1.06	0.35	0.69
10	0.1	25.90	0.50	0.25	0.71	0.88
	0.2	7.76	0.85	0.43	0.68	0.86
	0.4	2.45	1.22	0.71	0.59	0.81
	0.8	0.81	1.31	1.06	0.33	0.70

一方，(b) のグループの図 3，図 4 および図 6 ～ 図 8 では，標準パラメータ値のままでは応答が振動的になってしまうのに対して，近似微分を考慮した最適パラメータ値を用いることによって応答波形が大きく改善されている．この傾向は，むだ時間 L が小さくなるほど強く現れることを確認している．

3.4　周波数応答における影響　制御対象の定数をそれぞれ 3.3 と同じく $K=1.0$，$T=1.0$，$L=0.2$ として，周波数応答（一巡伝達関数についてのゲイン曲線と位相曲線）を比較検討する．標準パラメータ値とした場合と近似微分を考慮した最適パラメータ値とした場合との周波数応答の比較を図 9 ～ 図 15 に示す．これらの図から，ゲイン余裕 g_m と位相余裕 φ_m を読み取った結果を表 8 に示す．

(a) のグループの図 9 と図 12 では，標準パラメータ値とした場合と近似微分を考慮した最適パラメータ値とした場合の周波数応答波形はほとんど重なっている．ゲイン余裕 g_m と位相余裕 φ_m は両者の場合でほとんど違いはなく，プロセス制御（定値制御）における安定度の目安として一般に推奨されている値，すなわち

- $g_m = 3 \sim 10$ [dB]
- $\varphi_m = 20$ [deg] 以上

の範囲にほぼ収まっている．

これに対して，(b) のグループの図 10，図 11 および図 13 ～ 図 15 では，標準パラメータ値とした場合と近似微分を考慮した最適パラメータ値とした場合とで周波数応答に差異が現れている．特に一巡伝達関数のゲイン曲線が，標準パラメータ値の場合と近似微分を考慮した最適パラメータ値の場合とでは重ならず，異なる曲線となっている．

表 8 に現れているように，これら (b) のグループの 5 種類の制御対象では，標準パラメータ値のままではゲイン余裕 g_m と位相余裕 φ_m はともに小さな値となってしまい，上記の推奨値から逸脱してしまう．一方，近似微分を考慮した最適パラメータ値とした場合には，g_m と φ_m がともに改善されて上記の推奨値の範囲内となっている．この近似微分を考慮したことによるゲイン余裕 g_m と位相余裕 φ_m の改善が，時間応答波形の変化を裏づけていると考えることができる．

4.　おわりに

本資料では，2 自由度 PID 制御系のパラメータ調整において，近似微分が及ぼす影響について考察した．その結果，制御対象の伝達関数の分母の次数が s に関して 1 次となる場合と 2 次以上となる場合とで，大きく異なる傾向が見出された．次数が 1 次となる場合，すなわち，制御対象が「1 次遅れ＋むだ時間」系と「積分＋むだ時間」系では，

表 8 標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値とのゲイン余裕と位相余裕の比較

	ゲイン余裕 g_m [dB]		位相余裕 φ_m [deg]	
	標準パラメータ値	近似微分を考慮した最適パラメータ値	標準パラメータ値	近似微分を考量した最適パラメータ値
$P(s)=\frac{e^{-0.2s}}{1+s}$	2.7	3.1	33	36
$P(s)=\frac{e^{-0.2s}}{(1+s)^2}$	1.7	3.3	9	22
$P(s)=\frac{e^{-0.2s}}{(1+s)^3}$	1.1	4.5	8	25
$P(s)=\frac{e^{-0.2s}}{s}$	2.6	3.1	27	29
$P(s)=\frac{e^{-0.2s}}{s(1+s)}$	0.8	5.1	6	24
$P(s)=\frac{e^{-0.2s}}{s(1+s)^2}$	0.3	4.8	2	19
$P(s)=\frac{e^{-0.2s}}{1+s+s^2}$	1.0	3.3	6	19

- 近似微分の微分ゲインの変化は，2 自由度 PID 制御系の 5 個のパラメータの最適値に本質的な影響を与えないこと
- 近似微分が用いられる場面でも，標準パラメータ値（純粋な微分を仮定して求めた文献 [2, 3, 4] のパラメータ値）をそのまま使ってさしつかないこと

を明らかにした．

一方，次数が 2 次以上となる場合，すなわち，制御対象が「多重 1 次遅れ＋むだ時間」系，「積分＋多重 1 次遅れ＋むだ時間」系および「減衰係数 0.5 の 2 次遅れ＋むだ時間」系では，

- 近似微分が用いられる場合，標準パラメータ値のままでは応答波形が振動的になってしまうこと
- 近似微分の微分ゲイン δ を考慮して最適パラメータ値を求め直すと，制御系の応答性が大きく改善されること

を明らかにした．

これらのことから近似微分を用いる場合には，制御対象が「1 次遅れ＋むだ時間」系あるいは「積分＋むだ時間」系であれば純粋な微分を仮定した標準パラメータ値のままでよいが，他のタイプの制御対象となるときには近似微分の微分ゲイン δ を考慮に入れてパラメータ調整を行う必要があることが明確になった．

参考文献

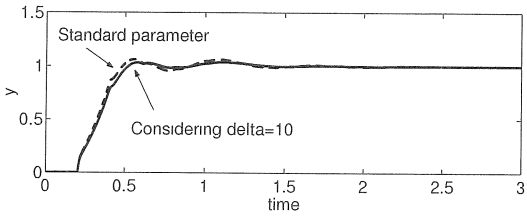
(1) 荒木光彦：「2 自由度制御系–I —PID・微分先行型・I-PD 制御系の統一的見方などについて—」，システムと制御，Vol.29，No.10，pp.649–656，1985.

(2) 田口，土居，荒木：「2 自由度 PID 制御系の最適パラメータ」，計測自動制御学会論文集，Vol.23，No.9，pp.889–895，1987.

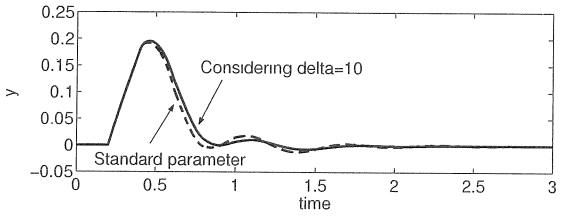
(3) 荒木，田口：「2 自由度 PID 制御装置」，システム/制御/情報，Vol.42，No.1，pp.18–25，1998.

(4) 荒木，田口：「2 自由度 PID コントローラのチューニング法」，日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会シンポジウム：自動制御系の調整方法，1998.

(5) 田口秀文：「2 自由度 PID 制御系の最適パラメータ値への近似微分の影響」，システム制御情報学会論文誌，Vol.20，No.6，pp.268–270，2007.

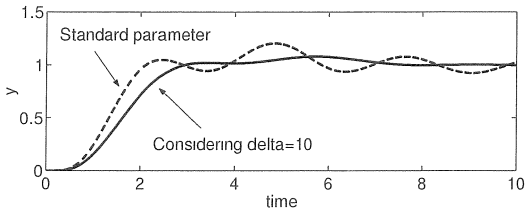


(a) 目標値応答

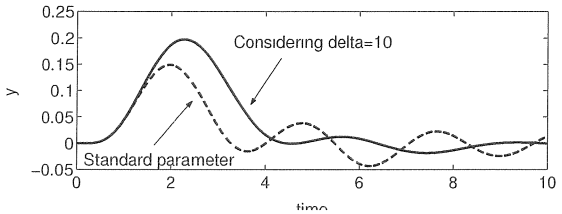


(b) 外乱応答

図 2　標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の時間応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{1+s}\right)$

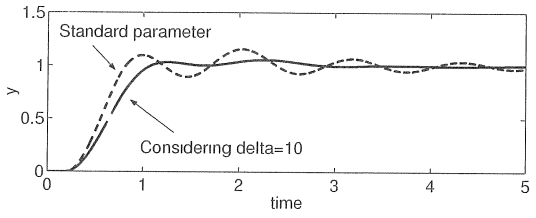


(a) 目標値応答

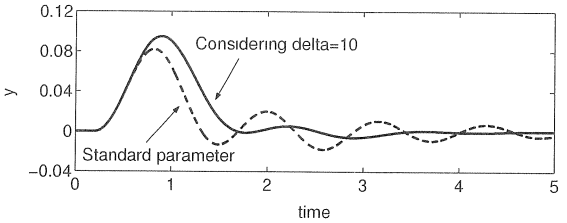


(b) 外乱応答

図 4　標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の時間応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{(1+s)^3}\right)$

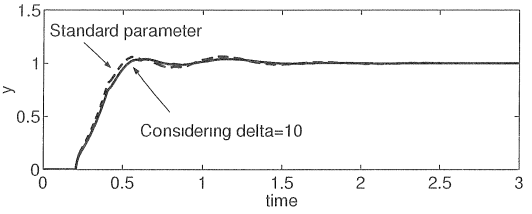


(a) 目標値応答

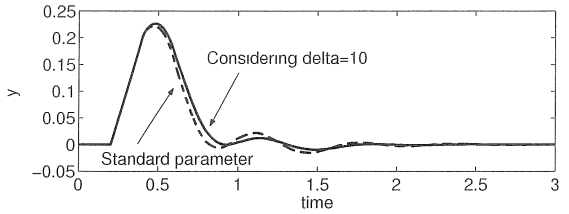


(b) 外乱応答

図 3　標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の時間応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{(1+s)^2}\right)$

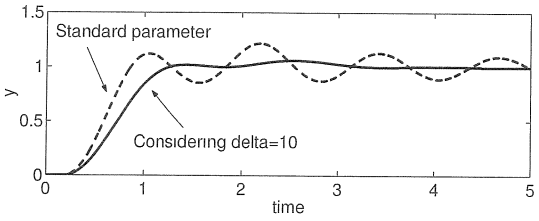


(a) 目標値応答

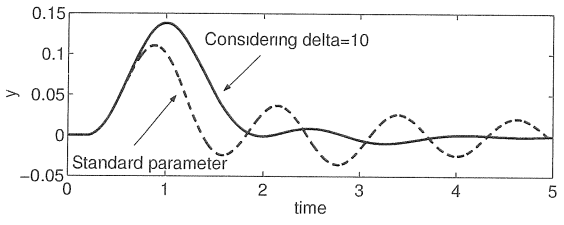


(b) 外乱応答

図 5　標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の時間応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{s}\right)$

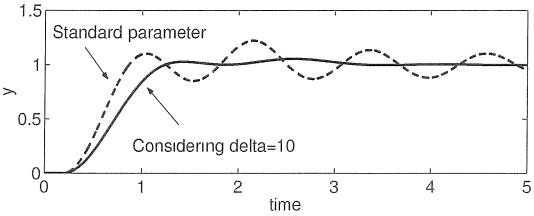


(a) 目標値応答

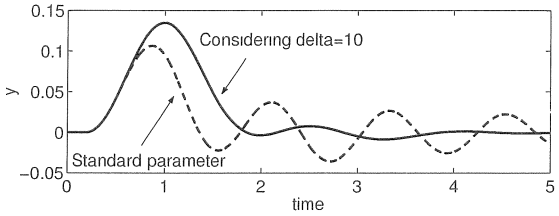


(b) 外乱応答

図 6　標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の時間応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{s(1+s)}\right)$

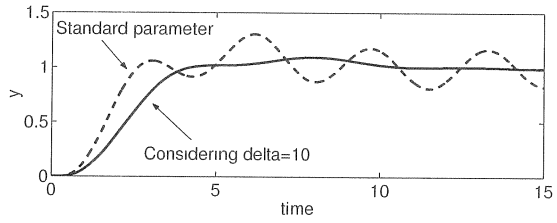


(a) 目標値応答

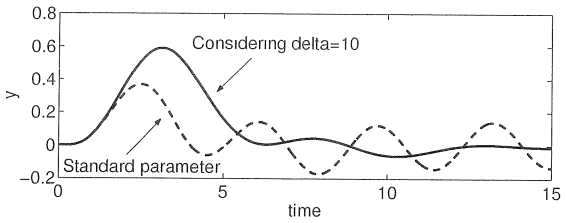


(b) 外乱応答

図 8　標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の時間応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{1+s+s^2}\right)$



(a) 目標値応答



(b) 外乱応答

図 7　標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の時間応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{s(1+s)^2}\right)$

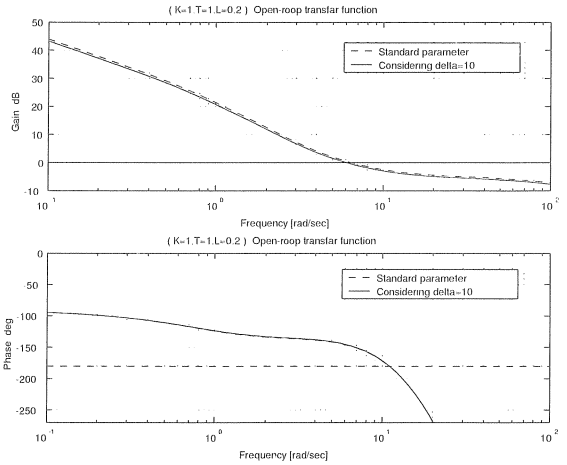


図 9　標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の周波数応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{1+s}\right)$

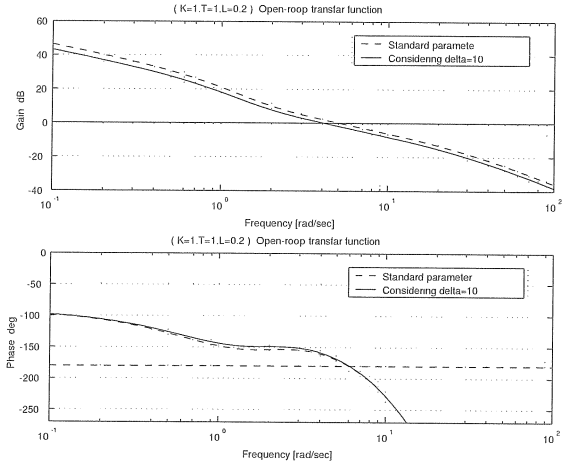


図10 標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の周波数応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{(1+s)^2}\right)$

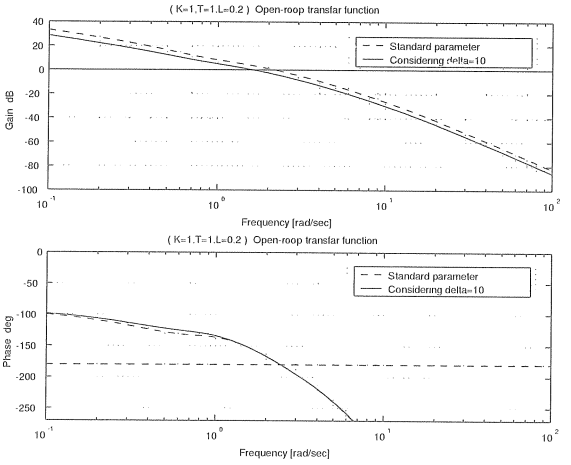


図11 標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の周波数応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{(1+s)^2}\right)$

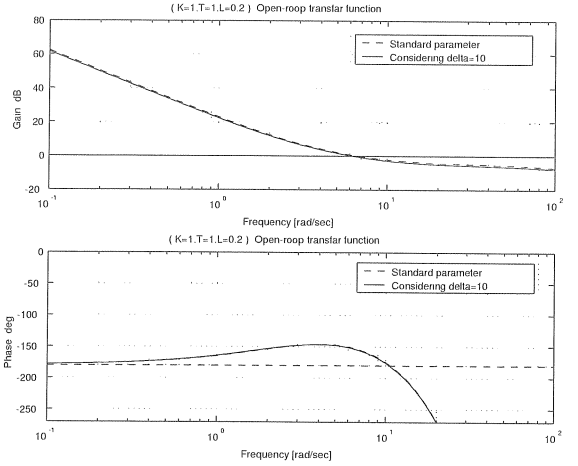


図12 標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の周波数応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{s}\right)$

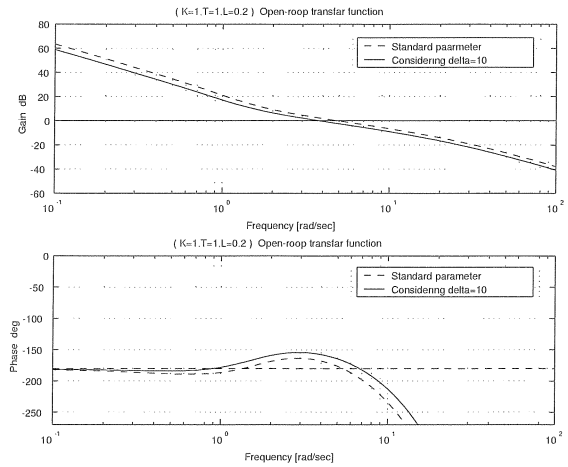


図13 標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の周波数応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{s(1+s)}\right)$

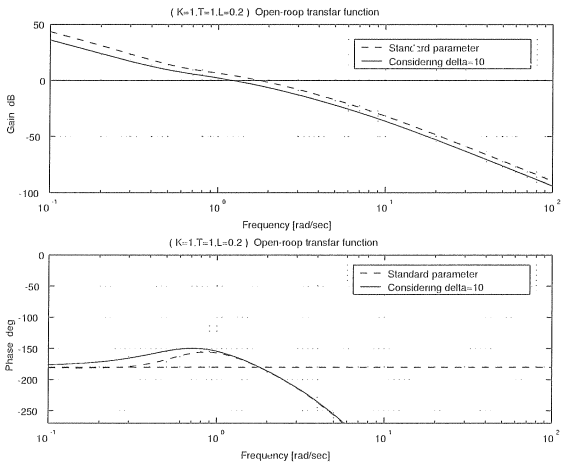


図14 標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の周波数応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{s(1+s)^2}\right)$

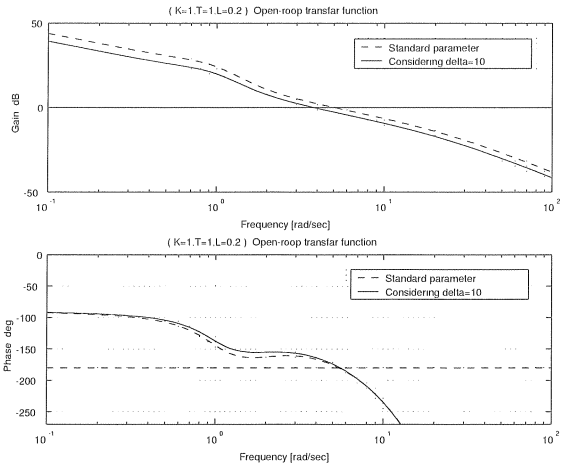


図15 標準パラメータ値と近似微分を考慮した最適パラメータ値の周波数応答の比較 $\left(P(s)=\dfrac{e^{-0.2s}}{1+s+s^2}\right)$

※※※※　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ものとする．本誌に掲載される論文，資料は，原則として，投稿者より提出された写真製版用(Camera Ready)の原稿を用いて印刷する．

2.　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，旧教職員，非常勤講師および在学生とする．ただし，共著の場合は前記投稿者1名を含めばよい．

3.　投稿方法

『研究紀要』は，オフセット印刷で発行するため，投稿者は，後述の「5．投稿上の注意」以下をよく参照の上，原稿を作成し，投稿すること．投稿締め切り日は厳守され，締め切り日以降の原稿差し替えは認められない．提出部数は1部（図・表・写真を含む）とする．

4.　原稿の査読（校閲）

研究成果を発表する論文として，また教育・研究に有用な資料として，体裁を整えるために，学内学識経験者による査読を行う．査読者の選定は編集委員が作成した「査読者名簿」から行われることを原則とする．

査読の結果によって，変更，削除などが要求され，修正再提出が依頼されることがある．著者による修正が不可能な場合は，掲載を見送ることがある．資料相当と思われる論文は資料へ，論文相当と思われる資料は論文への変更を要求されることもある．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．

5.　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，資料に関係なく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．

＜ 5－1 ＞　フォーマット

ワードプロセッサなどを利用して写真製版用の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に示すフォーマットの中から最適なものを選択する．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サイズの白紙に鮮明に印刷
(b)上下の余白：上 25 mm　下 24 mm
(c)左右の余白：各 16 mm
(d)段の間隔：8 mm
(e)文字の大きさ，片段の行数，文字数などは，下記「表1」の通り

表1　投稿紀要のフォーマット(論文，資料)

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．超過の場合は10ページ以内．それ以上は認めない．
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	

なお，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．

＜ 5-2 ＞ 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注意すること．

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 (横書特例)	・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行目中央に記入する．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．
・表題の後に1行あけて著者名を略さずに記入すること．共著者名も，同じ行に略さずに記入する．
・英語表題は，著者名の後に1行あけて記入すること．2行以上にわたる場合は，適当な配置で記入する．また，表題に使われる各単語の頭文字は，大文字にする．ただし，冠詞・接続詞・前置詞を除く．
・英語表題の後に1行あけて，英語表記での著者名を記入する．英語表記の著者名では，名(First Name)の頭文字を大文字，姓（Family name）は全て大文字とする．
・表題・著者名では段組を行わず，かつ，中央揃えとする．

[2] 英文（他の外国語の文）

・表題は，原稿の2行目中央に記入する．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．また，各単語の頭文字は，大文字にする．ただし，冠詞・接続詞・前置詞を除く．
・表題の後に1行あけて著者名を略さずに記入する．このとき，名（First Name）の頭文字を大文字，姓（Family name）は全文字を大文字とする．
・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，英語表題を記入する．そして，さらに1行あけて，著者名を記入する．
・表題・著者名では段組を行わず，かつ，中央揃えとする．

[3] 和文（縦書）

・表題は，原稿の3行目から記入する．このとき，表題の上部には，4字程度の余白をとる．
・著者名は，8行目に略さず記入する．著者名の下部には，4字程度の余白をとる．

・英語表題，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
の形で記入する．

(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．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．

(注)著者の所属機関の表記法は，以下を参照のこと．

○著者が本校に属する場合：学科・職名の順で記載．例）■　　，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語程度の英文要旨が必要となる．ただし，和文（縦書）の論文，および，資料に関しては英文要旨を必要としない．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となる．

・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．このとき，フォントはゴシック体で全て大文字で記述する．

・「**ABSTRACT**」から1行あけて，英文要旨の本文を記述する．要旨を記述する際，左右に2文字分程度の空白をとる．

(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．

・同じ行に続けて5つ以内の英文キーワードを記述する．文字スタイルは，標準（Normal）とする．

・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．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は，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．特例を除き，本文は2段組とする．

※英語表題，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．

＜ 5-3 ＞ 本文

本文は，章（チャプター），節（セクション）に分け，それぞれに節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（チャプター）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．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

一つの文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．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，改行した方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，文章が若干しか書けない場合など)．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，「2.1.1」，「2.1.2」や「(a)」，「(b)」，「(c)」など．

＜ 5－4 ＞ 数式

数式には，「(1)」，「(2)」，のように通し番号を付ける．また，長い数式等が存在し，1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．

＜ 5－5 ＞ 図（写真も含む），表

写真製版用原稿として，鮮明な白黒の図，表を作成する．不鮮明なものや、カラーの図，表は修正・再提出が求められる．網点（塗りつぶし）は，15-20%に設定する．図・表の説明文（caption）はセンタリングし、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) 図について

・図として用いられるものは，製図用具等で墨入れをした原図，あるいは，コンピュータ等で作図し解像度300dpi以上のプリンターで出力したものとする．また，これらの上質なコピーの使用でも構わない．

・本文への添付については，各図を本文と一緒に印刷するか，本文中の該当箇所に貼り付けること．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．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部に書く．図の大きさは，左右(または上下)どちらかの1段の中に収まる方が望ましいが，図の性質上，2段にわたる必要がある場合は，2段利用しても構わない．

(b) 表について

・表として用いられるものは，上述「(a) 図について」の場合と同じである．

・本文への添付については，各表を本文と一緒に印刷するか，本文中の該当箇所に貼り付けること．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．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部に書く．表の大きさは，左右(または上下)どちらかの1段の中に収まる方が望ましいが，表の性質上，2段にわたる必要がある場合は，2段利用しても構わない．

(c) 写真について

・鮮明な仕上がりサイズのプリントを，該当箇所に貼り付けるとともに、写真の現物も提出する．
写真は図として扱い(上述の「(a) 図について」に従う)，図と一緒にして通し番号を付ける．

＜ 5－6 ＞ 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，ゴシック体で「**謝辞**」、または「**Acknowledgement(s)**」という見出しをつけることが望ましい．(節番号はつけない．)
助成金，装置の借用，資料の提供などはここに記す．

＜ 5－7 ＞ 参考文献 (引用文献)

(a) 参考文献の書き方

本文中で引用する参考文献は，最終節の文末の後に1行あけ，段の中央にゴシック体で「**参考文献**」または「**REFERENCES**」と記述し，次の行から引用する文献を本文中と同じフォントで記載する．(節番号はつけない．) なお，和文，英文以外の論文は，使用した言語で「参考文献」を意味する単語を記述する．

列挙する参考文献には，本文中に現われる順に通し番号を付け，左詰めで書くようにする．参考文献は，原則として，著者名，題目(表題)，論文誌名(雑誌名や出版社)，巻・号・ページ，発表年月日(発売年月日)の順に記述する．

（参考文献の記載例）すべて架空のものです.

(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，神戸五郎：「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, No. 5, pp. 555-561, 1999.
(8) Taro Kobe: "Design Considerations for New Circuit Topology", Proceedings of IEEE-International Symposium on Power Electronics Circuit (SPEC'98), 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", IEE 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．また，引用文献中の文章等をそのまま引用する場合は引用符，「　」や“　”，でくくるか，横書の場合は左端，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．本文と引用箇所の間に 1 行空白を入れても構わない．

一般に公表されていない委員会報告等は文献としてあげない．また，掲載は決定しているが未発行の場合には，巻，ページ等の代わりに「印刷中」もしくは「in press」と書くこと．

6. 投稿に際して

編集作業中の整理のため，原稿の裏面上端に，「ページ番号／全ページ数」，「論文タイトル」および「第一著者名」を鉛筆で記入する．準備が整えば，一つの封筒に必要なものを全て入れ，封筒の表には，主に連絡を取る代表の著者の名前と論文名を記し，各科の編集委員に投稿する．

また，著者には，抜き刷り(別刷)を 30 部配布する．これを越える部数の抜き刷りは自費とする．

7. 著作権

神戸高専研究紀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 17 年度に改正され、平成 18 年度から施行されるものとする。
(平成 18 年 3 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。

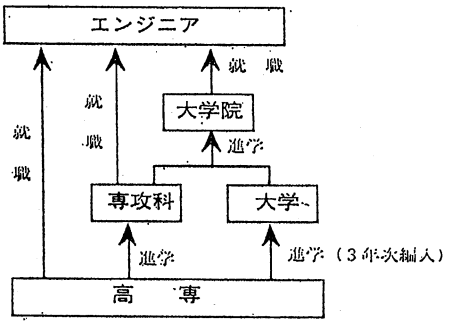


図1　高専卒業からエンジニアまでの経路

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47号　編集委員

中西　宏　（図書館長）	熊野智之　（機械工学科）	下代雅啓　（電気工学科）
笠井正三郎（電子工学科）	田中　守　（応用化学科）	亀屋恵三子（都市工学科）
本田敏雄　（一般科）	乾あさ子　（図書館）	萩庭恵美　（図書館）

研　究　紀　要　第 47 号　（非売品）

発　行　日　　平成21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20年度 第319号（広報印刷物規格A-5類）