

目 次

論 文

PEFC の物質輸送・電気化学反応連成解析に関する研究 ―低水素濃度燃料使用時の PEFC 出力特性―	山本 高久, 石丸 和博 ……	1
携帯電話の会話途切れに伴う脳神経反応の計測と脳内信号源の推定	東 義隆, 川野 常夫 ……	9
設計図交換によるものづくり教育の試み	石崎 繁利, 尾崎 純一, 齋藤 茂, 中辻 武, 英 崇夫 ……	15
加古川河口右岸に形成されるワンド内の物理環境	巽 光, 宇野 宏司 ……	21
活性汚泥の減圧浮上濃縮に関する研究	奥 友晃, 宮明 大輝, 澤井 正和, 林 公祐, 鈴木 隆起, 赤対 秀明 ……	27
講義映像を利用した学習支援システムの開発	赤松 浩, 本川 正祥 ……	33
基礎―地盤―構造物系モデルを用いた地震応答の片寄りに関する研究	藤田 麗, 山下 典彦 ……	37
調和振動荷重による半無限地盤を含む水平成層地盤の P-SV 波の振動・伝播特性	江本 浩樹, 山下 典彦, 森 源次 ……	43
各種水素拡散火炎形態の違いによる燃焼特性	谷川 涼一, 吉本 隆光 ……	49
船用ディーゼルエンジンの吸気ガス条件及び各種燃料の変化による燃焼と排ガス特性への影響について	中嶋 聡, 吉本 隆光 ……	55
コーヒーを化学する	渡辺 昭敬, 小泉 智恵子, 戸田 丈博, 原田 光嗣, 中田 里絵 ……	61
逐次最小二乗法を用いたフィードバック制御系の一設計法	小林 洋二, 渡邊 勉, 橋間 弘明 ……	67
西神工業団地通勤交通における公共・私的交通分担に関する研究	橋本 渉一, 川端 慧, 藤井 暢彦 ……	71
銀の固相拡散接合における数値的検討	横尾 友洋, 朝倉 義裕 ……	77
高専生の学習動機について	上垣 宗明 ……	83
ラム波直交スキャンによるFRP積層板の衝撃損傷検査	渡邊 優太, 和田 明浩 ……	89

資 料

加古川流域の地表被覆状況の経年変化調査	稲葉 愛, 中尾 幸一 ……	95
神戸高専学園都市移転から20年	中尾 幸一, 赤対 秀明 ……	99

CONTENTS

PAPERS

- Study on Coupling Analysis of Mass Transfer and Electrochemical Reaction for Polymer Electrolyte Fuel Cell -PEFC Performances under Low Hydrogen Concentration Condition-
Takahisa YAMAMOTO, Kazuhiro ISHIMARU 1
- Measuring Neuromagnetic Brain Responses and Estimating MEG Dipole Sources Due to Interrupted Hearing of Mobile Phone
Yoshitaka AZUMA, Tsuneo KAWANO 9
- Attempt on “Monodukuri Education” by Exchange of Drawings
Shigetoshi ISHIZAKI, Jun-ichi OZAKI, Shigeru SAITO,
Takeshi NAKATSUJI, Takao HANABUSA 15
- Physical Conditions in Wando at Right Bank of the Kakogawa River Mouth
Hikaru TATSUMI, Kohji UNO 21
- Study on Decompression of Flotation Thickening of Activated Sludge
Tomoaki OKU, Daiki MIYAAKE, Masakazu SAWAI,
Kousuke HAYASHI, Takayuki SUZUKI, Hideaki SHAKUTSUI 27
- Development of Education System with Video Image of Lecture
Hiroshi AKAMATSU, Masayoshi MOTOKAWA 33
- A Study on Asymmetry of Seismic Response of Foundation-Soil-Structure System
Rei FUJITA, Norihiko YAMASHITA 37
- Characteristics of P-SV Wave Motions by Harmonic Loading on Gound Surface And Their Relations with Soil Layered Structures
Hiroki EMOTO, Norihiko YAMASHITA, Genji MORI 43
- Combustion Property with Difference in Various Types of Hydrogen Diffusion Flame
Ryoichi TANIGAWA, Takamitsu YOSHIMOTO 49
- Characteristics of Exhaust Gas and Combustion on the Intake Condition and the Various Fuels in a Marine Diesel Engine
Satoshi NAKAZIMA, Takamitsu YOSHIMOTO 55
- Chemical analysis of Coffee
Akihiro WATANABE, Chieko KOIZUMI, Takehiro TODA,
Mitsugu HARADA, Rie NAKATA 61
- A Design Method of Feedback Control Systems with the Recursive Least-Squares Method
Yohji KOBAYASHI, Tsutomu WATANABE, Hiroaki HASHIMA 67
- Sharing of Public and Private Commuter Traffic at Seishin Industrial, High-Tech Park
Shoichi HASHIMOTO, Kei KAWABATA, Nobuhiko FUJII 71
- Numerical Analysis of Solid State Diffusion Bonding of Silver
Tomohiro YOKOO, Yoshihiro ASAKURA 77
- The Research on the Students' Motivation
Muneaki UEGAKI 83
- Impact Damage Inspection of FRP Laminates with Lamb Wave Cross-Scanning
Yuta WATANABE, Akihiro WADA 89

RESEARCHES AND FINDINGS

- The Investigation of the Secular Change of Land Cover on the Kakogawa River Basin
Ai INABA, Kouichi NAKAO 95
- Change of KCCT in 20 Years after the Removal to Gakuentoshi
Kouichi NAKAO, Hideaki SHAKUTSUI 99

PEFC の物質輸送-電気化学反応連成解析に関する研究 －低水素濃度燃料使用時の PEFC 出力特性－

山本高久* 石丸和博**

Study on Coupling Analysis of Mass Transfer and Electrochemical Reaction for Polymer Electrolyte Fuel Cell

－ PEFC Performances under Low Hydrogen Concentration Condition －

Takahisa YAMAMOTO* and Kazuhiro ISHIMARU**

ABSTRACT

This article elucidated the effect of low hydrogen concentration fuel on polymer electrolyte fuel cell (PEFC) performances, experimentally and numerically. A numerical simulation model for PEFC was developed in this study ; the model combined PEFC performance model developed in author's past studies and three dimensional computational fluid dynamics (CFD) model. Power generation performances, i-V characteristics, was measured using a standard cell with low hydrogen concentration condition. As the results of numerical simulation and comparison with experimental data, the numerical model was able to estimate PEFC performance reasonably. Further analysis of low hydrogen concentration fuel made clear the relationship among local concentration over-voltage, hydrogen concentration and fuel flow rate quantitatively. These results and the numerical model can contribute optimizations of not only PEFC operating condition but also design of serpentine channel.

Keywords: Polymer Electrolyte Fuel Cell, concentration overvoltage, CFD, low hydrogen concentration fuel gas

1 はじめに

固体高分子型燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cell) は、最適使用温度が常温から 90 °C と他の燃料電池と比べて最も低く、また、高い電流密度を得られるなど、優れた性能を有しており、新たなエネルギー変換装置として注目を集めている。近年では、昨今の世界的なエネルギー需要の増大を鑑み、燃料ガスに純水素ではなく低質な燃料ガス(水素濃度が低い)を用いる事が検討されている。そこで著者らは炭化水素燃料の改質により得られた低質な燃料ガスを直接 PEFC に使用できないか実験的に検討するとともに、1 次元の PEFC 出力解析モデルの開発を行ってきた。その結果、常に燃料ガスが PEFC 内を流動し、流路内の濃度境界層を極小にするような燃料供給法を採用した場合、低水素濃度燃料でも純水素を用いた PEFC の出力特性に準ずる特性が得られることを明らかにした^(1,2)。また、出力解析モデルにより低質な燃料ガスを使用する上での最適な運転条件を見いだした⁽³⁾。しかしながら、低質な燃料ガスを更に高効率で利用するためには、燃料ガスの供給流量、

運転温度などの運転条件のみでなく、PEFC のガス流路の形状最適化を考える必要がある。

PEFC の性能解析およびガス流路の最適化に関する研究は、これまでも多くの研究者によって行われてきた。たとえば Um らは 3 次元数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics) 解析により PEFC 内の化学種輸送を解析している⁽⁴⁾。また Wang らは同様に CFD 解析を大型の燃料電池システムへの適用を試みている^(5,6)。しかしこれら既往の研究では低質な燃料ガスを使用したときの PEFC 性能解析を対象としておらず、また、そのような条件下にてどの程度の予測精度が得られるかなどの検討が不十分である。

そこで本研究では著者らがこれまでに作成してきた PEFC の出力解析モデルを拡張し、ガス流路形状およびそこの物質輸送を考慮した PEFC 出力モデルを作成する。そのモデルの妥当性を検証した上で、低質な燃料ガス使用時の PEFC 内の水素濃度分布および電流密度分布を明らかにし、ガス流路形状と PEFC 性能との相関を明らかにする。

2 PEFC および実験装置

図 1 に今回使用した日本自動車研究所 (JARI) が開発した標準セルを示す。この標準セルは、作業性、再現性、信頼

* 機械工学科 准教授

** 岐阜工業高等専門学校機械工学科 教授

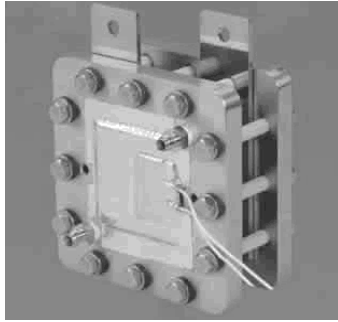


図1 PEFC(単セル)の写真

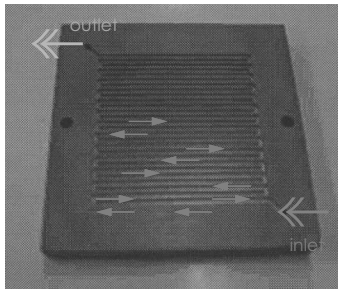


図2 サーペンタイン流路

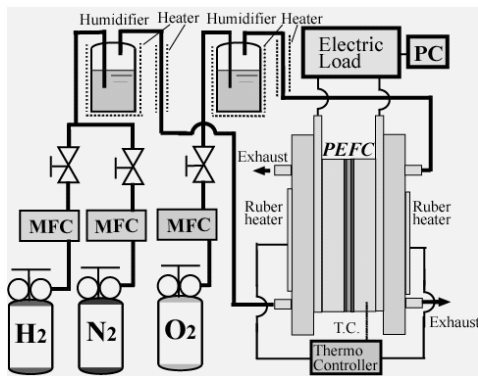


図3 実験装置概略図

性に優れ、安定した統一的な電池評価を行うことが可能である。このセルに用いられるアノード(燃料極)、カソード(酸素極)、固体高分子膜を接合一体化した膜電極接合体には、電解質膜として Nafion112 が用いられている。アノード側触媒には 0.51 mg-Pt/cm^2 が、カソード側触媒には 0.52 mg-Pt/cm^2 の白金触媒が用いられている。電極面積は $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ である。電極へ燃料ガスおよび酸素を供給するため、セパレータの電極機材と接する面にこれらガス流路を形成している。燃料ガス側、酸素側ともにこの流路は1本のサーペンタイン型流路をなしており、狭隙間の溝幅 1 mm 、山幅 1 mm 、流路間隔 1 mm となっている(図2)。なお、セルの締付け力は $40 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ としている。

図3に実験装置概略図を示す。セルのアノード側には水素およびこれに窒素を含有させた燃料ガスの供給系、カソード側には酸化剤としての純酸素および窒素の供給系を

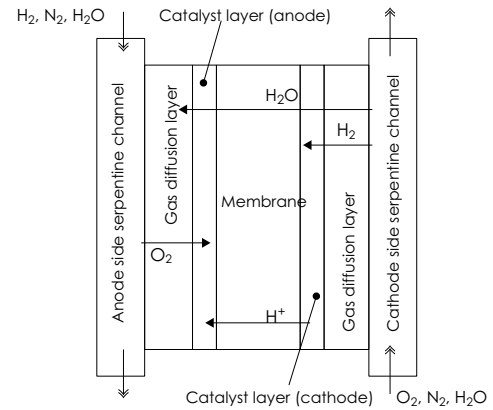


図4 PEFC 出力モデルの概略図

有する。それぞれのガス流量はマスフローコントローラによって所望の流量に制御され、加湿装置によって加湿された後、セルへ供給される。これは電解質膜には電極膜で生成したプロトンを通過させるために水分が必要なことによるものである。この時、加湿装置は燃料ガス、酸化剤それぞれ 80°C 、 70°C に加熱・温調される。また、セルまでの流路も加湿された水分の凝縮を防ぐため、同様の加温・温調を行う。酸化剤の流量については燃料供給量の化学量論比以上となるよう、全ての条件において 150 sccm (Standard cc/min) に設定する。なお、燃料ガスは下部から、酸化剤は生成される水を効率よく排出するため上部から供給する。単セルでの実験では、セパレータや締付け板などの構成部材の熱容量が発熱量に比べて大きいため、外部からの加熱が必要になる。本実験装置では、ラバーヒータをセルの両面にある締付け板に取り付け、セルを 80°C に加温・温調する。このときのセルの参照温度はカソード側のセパレータ中心部より計測する。その他詳細は文献⁽³⁾を参照されたい。

3 数値解析モデル

図4はPEFCセルの構造の概略図である。この図に示すようにセルは固体高分子膜、触媒層、拡散層、セパレータで構成されており、これの一体化したものを膜電極接合体(Membrane Electrode Assembly)と呼ぶ。モデル化に際してはアノード側およびカソード側に供給されるガスは、それぞれ水素・窒素、酸素・窒素の混合ガスとし、十分に加湿が行われている状態であると仮定した。本研究で作成した出力モデルは文献⁽³⁾を基にしている。ここではその概略を述べる。

3.1 電流密度

アノード側に供給された水素は電気化学反応が生じる触媒層へ移動する。このとき水素はガス拡散層を通過し、水素濃度は触媒層に向かって減少する濃度分布となる。こ

でガス拡散層内の水素濃度勾配が一定とすると、電流密度は以下の式により求められる。

$$i = nF f_a D_{H_2} \frac{C_{H_2}^g - C_{H_2}^e}{l} \quad (1)$$

ここで n は反応に関わる電子数、 F はファラデー定数、 f_a はアノード側拡散層内の有効空隙率、 D_{H_2} は水素の拡散係数、 C_{H_2} は水素濃度、 l は拡散層厚さである。また、上付き添え字 g , e はそれぞれセパレータ流路と拡散層との界面、電極触媒と拡散層との界面を意味している。

3.2 操作電圧

操作電圧 V は起電力から各過電圧を差し引くことにより求められる⁽⁷⁾。

$$V = E - \eta_{act}^a - \eta_{act}^c - \eta_{conc}^a - \eta_{conc}^c - \eta_{ohm}^m \quad (2)$$

ここで E は起電力、 η_{act} は活性化過電圧、 η_{conc} は濃度過電圧、 η_{ohm}^m はセルの抵抗過電圧である。また、上付き添え字 a はアノード側、 c はカソード側を意味している。

3.2.1 起電力

起電力 E は Nernst の式より算出される。

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln [P_{H_2}^a \cdot (P_{O_2}^c)^{0.5}] \quad (3)$$

ここで E_0 は基準起電力、 R はガス定数、 T は温度、 $P_{H_2}^a$ はアノード側の水素の分圧、 $P_{O_2}^c$ はカソード側の酸素の分圧である。

3.3 活性化過電圧

カソード側の活性化過電圧 η_{act}^c は Butler-Bolmer 式に対して Tafel 近似を行うことにより求められる。

$$\eta_{act}^c = \frac{RT}{\alpha_2^c F} \ln \frac{i}{A_e i_0^+} \quad (4)$$

ここで α_2^c は移動係数であり、Parthasarathy らが求めた実験式により算出した⁽⁸⁾。

$$\alpha_2^c = C_\alpha + 2.3 \times 10^{-3} (T - 303.15) \quad (5)$$

C_α はモデルパラメータであり Parthasarathy らにより提唱されている 0.98 とした。式 (4) 中の A_e は、電極触媒の単位面積あたりの有効触媒面積であり、単位白金あたりの表面積 A_s 、単位面積あたりの白金触媒担持量 m_{PT} より次式にて求められる。

$$A_e = m_{PT} A_s \quad (6)$$

本解析では Marr らによる触媒のデータを用いて解析を行った⁽⁹⁾。式 (4) 中の i_0^+ は酸素交換電流密度を表しており、本研究では吉川ら⁽¹⁰⁾ の手法により次のように求めた。本モデルの標準酸素濃度時の酸素交換電流密度を $i_{0,e}^{ref+}$ とすると、電解質内の酸素濃度 $C_{O_2}^f$ 、電解質内の標準酸素濃度 $C_{O_2}^{f,ref}$ を用いて

$$i_0^+ = i_{0,e}^{ref+} \left(\frac{C_{O_2}^f}{C_{O_2}^{f,ref}} \right) \quad (7)$$

と表される。電解質内の酸素濃度は触媒層内の酸素濃度 $C_{O_2}^g$ を用いて次式の様に近似できる。

$$C_{O_2}^f = 0.07 C_{O_2}^g \quad (8)$$

また、電解質内の標準酸素濃度はカソード側の圧力 P^c より

$$C_{O_2}^{f,ref} = \frac{P^c}{\exp \left(14.1 - \frac{666}{T} \right)} \quad (9)$$

にて算出することができる。標準酸素濃度時の酸素交換電流密度は Parthasarathy らが提案している実験式

$$\log_{10}(i_0^{ref+}) = 3.507 - \frac{4001}{T} \quad (10)$$

にて求めることができるが、本解析で対象としている PEFC の電解質膜と必ずしも同じではないため、モデル定数 k_{i0} を用いて

$$i_{0,e}^{ref+} = k_{i0} \cdot i_0^{ref+} \quad (11)$$

により補正した。

3.4 濃度過電圧

アノードおよびカソードの濃度過電圧 η_{conc} は限界電流密度より算出することができる。

$$\eta_{conc}^a = -\frac{RT}{\alpha^a 2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{L(H_2)}} \right) \quad (12)$$

$$\eta_{conc}^c = -\frac{RT}{\alpha_1^c 2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{L(O_2)}} \right) \quad (13)$$

ここで、 α^a , α_1^c は移動係数、 $i_{L(H_2)}$, $i_{L(O_2)}$ はそれぞれアノード側とカソード側の限界電流密度を示している。限界電流密度は式 (1) において濃度勾配が最大となったときに得られるので次式の様に表される。

$$i_{L(H_2)} = 2F f^a D_{H_2} \frac{C_{H_2}^g}{l} \quad (14)$$

$$i_{L(O_2)} = 4F f^c D_{O_2} \frac{C_{O_2}^g}{l} \quad (15)$$

ここで、 f^a , f^c はアノード、カソードの有効空隙率を表している。

3.5 抵抗過電圧

抵抗過電圧 η_{ohm}^m は電解質膜の厚さ t^m 、電解質膜のイオン伝導度 σ_e^m から

$$\eta_{ohm}^m = \frac{t^m}{\sigma_e^m} i \quad (16)$$

にて求めることができる。電解質膜のイオン伝導度は Springer の計算より

$$\sigma^m = (0.00514\lambda - 0.00326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (17)$$

にて与えられる。本解析の電解質の性能は Springer の用いた電解質とは異なるため、本モデルにおける電解質膜の

イオン伝導度 σ_e^m は比例定数 k_σ を用いて次式にて算出できる。

$$\sigma_e^m = k_\sigma \sigma^m \quad (18)$$

なお, λ は含水量であり, 水の活量 ξ^a の関数として表される。

$$\lambda = 0.043 + 17.8(\xi^a) - 39.8(\xi^a)^2 - 36.0(\xi^a)^3, \quad (\xi \leq 1) \quad (19)$$

$$\lambda = 14.1 + 1.4(\xi^a - 1), \quad (\xi > 1) \quad (20)$$

ここで水の活量 ξ^a は水のモル分率 $x_{H_2O}^a$, アノード側圧力 P^a , 飽和水上気圧 $P_{H_2O(sat)}^a$ より次式にて算出される。

$$\xi^a = \frac{\xi_{H_2O}^a P^a}{P_{H_2O(sat)}^a} \quad (21)$$

以上のモデルを連成することにより, PEFC の出力を解析する事ができる。本解析にて用いたモデル定数を表 1 に示す。

表 1 モデル定数

effective porosity of anode	f^a	0.020
effective porosity of cathode	f^c	0.043
transfer coefficient of anode	α_a	0.10
transfer coefficient of cathode	$\alpha_{1,c}$	0.09
fitting parameter of activation overvoltage	C_a	0.98
fitting parameter of ion conductivity	k_σ	0.60
fitting parameter of current density	$k_{i,0}$	1.00

3.6 燃料ガス流動解析モデル

燃料電池内の電気化学反応による水素濃度の低下, およびそれに伴う電流密度分布の低下を 3 次元的に明らかにするために, 電気化学反応-ガス流動連成解析モデルを作成した。以下にその詳細を示す。

3.6.1 支配方程式

流動解析においては, ガスに関する 3 次元の連続の式およびナビエ-ストークス方程式を考えた。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = -S_c \quad (22)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + (\mu \nabla \mathbf{U}) + S_u \quad (23)$$

$\mathbf{U}$ および μ は燃料ガスの速度ベクトルおよび粘性係数であり, 生成項 S_c は電気化学反応による水素の消費を意味している。他方, ナビエ-ストークス方程式の生成高 S_u はガス拡散層を多孔質体として扱い, そこで失われる見かけの運動量を表している。

$$S_u = -\frac{\mu}{K} f_a^2 \mathbf{U} \quad (24)$$

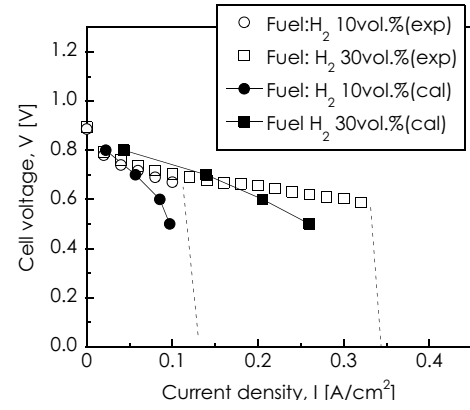


図 5 ターフェルプロット (fuel flow rate 200 sccm, Cathode O₂ 100mol%)

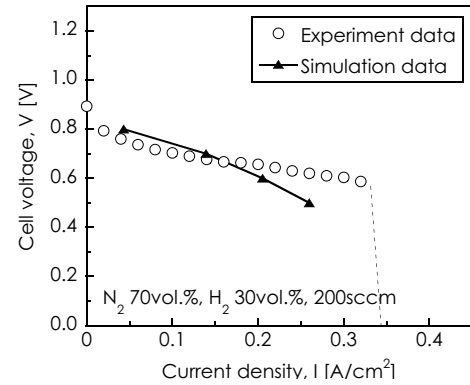


図 6 ターフェルプロット (fuel flow rate 200sccm, Anode H₂ 30mol%, N₂ 70mol%)

ここで K , f_a はガス拡散層の浸透率, 空隙率である。化学種の輸送方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} Y_i) = \nabla \cdot (D_{i,eff} \nabla Y_i) \quad (25)$$

下付添え字 i は化学種を表している。 $D_{i,eff}$ はセパレータ流路およびガス拡散層中でのガスの有効拡散係数であり,

$$D_{i,eff} = D_i \quad (\text{separator channel}) \quad (26)$$

$$D_{i,eff} = D_i \cdot f_a^r \quad (\text{GDL}) \quad (27)$$

にて算出される。本解析ではブラッグマンモデルにより屈曲率 $\tau = 1.5$ とした。電気化学反応による水素の消費量は, ファラデー定数 F ならびに式 (1) の電流密度 i により次式で求められる。

$$S_c = \frac{i}{2F} \quad (28)$$

4 結果および考察

4.1 PEFC 出力モデルの検証

PEFC 温度を 333 K, 水素濃度を 10, 30, 100 mol%, 供給流量を 200sccm (Standard cc per minuite) としたときの

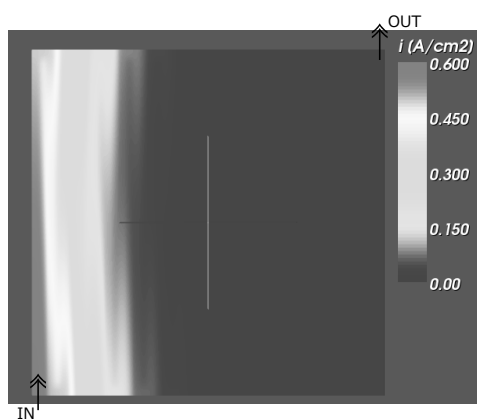


図7 アノード側 MEA 上の水素濃度分布 (H_2 30mol%, 100sccm)

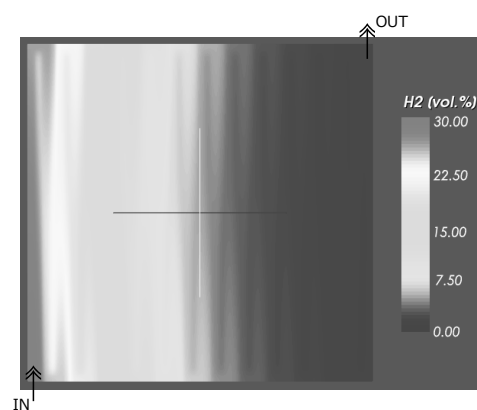


図10 アノード側 MEA 上の水素濃度分布 (H_2 30mol%, 200sccm)

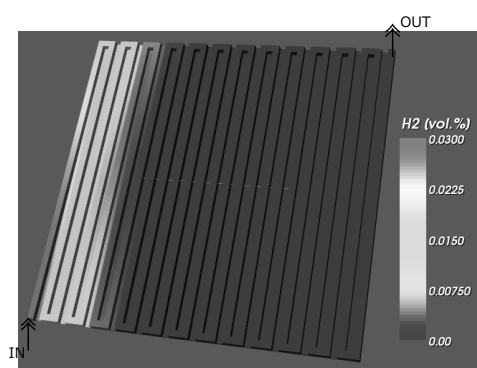


図8 アノード側サーペンタイン流路内水素濃度分布 (H_2 10mol%, 200sccm)

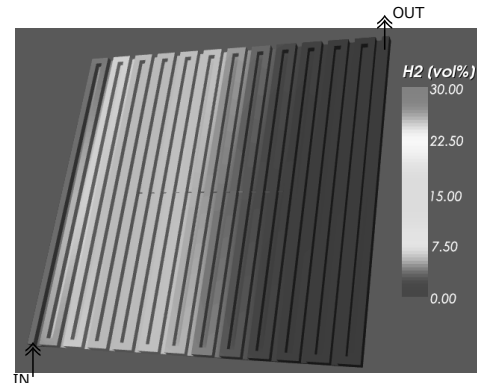


図11 アノード側サーペンタイン流路内水素濃度分布 (H_2 10mol%, 200sccm)

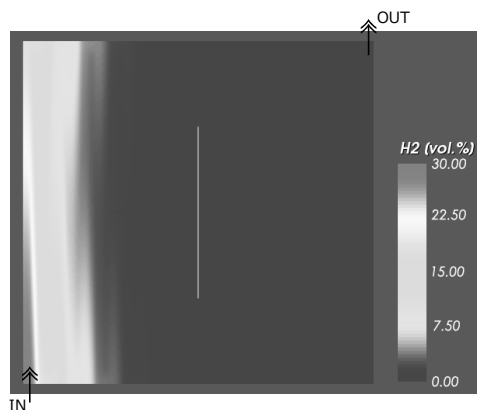


図9 電流密度分布 (H_2 10mol%, 200sccm)

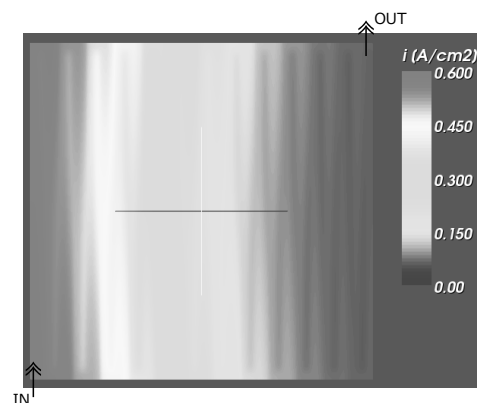


図12 電流密度分布 (H_2 10mol%, 200sccm)

ターフェルプロット (電圧-電流密度曲線図) を図 5, 6 に示す。PEFC の性能はオームの法則に則り、操作電圧と電流密度とにはトレードオフの関係が存在する。従って実験結果を見ると、いずれの実験条件においても操作電圧の低下とともに電流密度は増加している。また、ある一定以上の電流密度では、急峻な操作電圧の減少が現れることが分かる。これは PEFC の内部抵抗および濃度過電圧の影響であることが知られており、それ以上の電流密度条件では稼働が出来ないことを示している。PEFC 出力モデルは高電流

密度条件において、この濃度過電圧の影響を過大に評価する傾向が明らかになった。しかしながら、全実験条件においてこれら操作電圧と電流密度とのトレードオフをよく再現していることが確認でき、本解析モデルは PEFC の出力特性を予測可能であるといえる。以降、この解析モデルを用いて、各実験条件下における PEFC 内の水素濃度分布および電流密度分布を明らかにする。

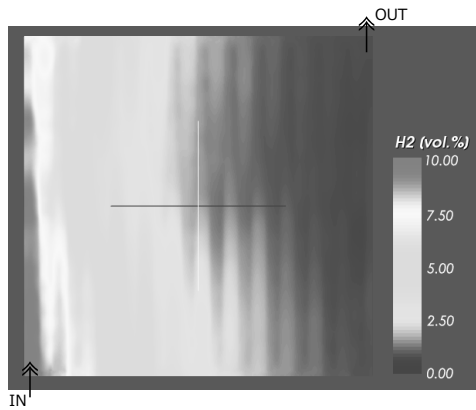


図 13 アノード側 MEA 上の水素濃度分布 (H_2 10mol%, 200sccm)

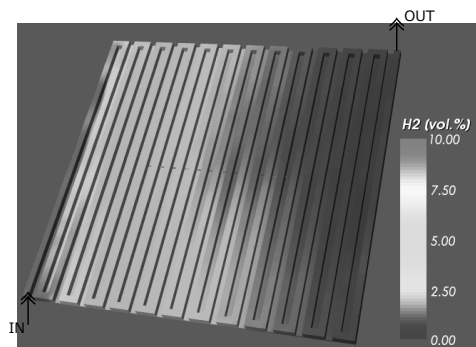


図 14 アノード側燃料流路内の水素濃度分布 (H_2 10mol%, 200sccm)

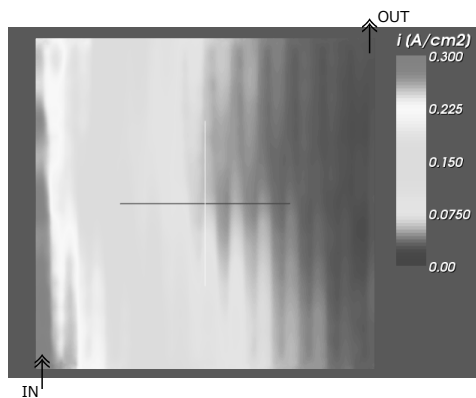


図 15 電流密度分布 (H_2 10mol%, 200sccm)

4.2 水素濃度分布および電流密度分布

図 7—9 は、水素濃度 30mol%、燃料供給量 100sccm のときの MEA 上および流路内水素濃度分布と電流密度分布である。図中左下方から燃料は供給され、電気化学反応により消費されつつサーペンタイン流路をすすみ、右上方から流出する。水素濃度分布に着目すると、ガス拡散層の影響によりサーペンタイン流路よりも MEA の方が広範囲に水素が輸送・拡散されていることが分かる。ガス拡散層は水素をサーペンタイン流路から均一に MEA に供給する役割を果たすものであり、本解析結果はその効果を出力モデル

により評価できること示唆するものである。他方、この実験条件下では、水素供給量が少なく、サーペンタイン流路上流ではほぼ全ての水素が消費されてしまい、PEFC 内のほとんどの領域で局所的な濃度過電圧になっていることが明らかになった。同条件で燃料供給量のみ 200sccm とした時の水素濃度分布および電流密度分布を図 10—12 に、水素濃度 10%、燃料供給量 200sccm の結果を図 13—15 に示す。水素濃度 30mol% に着目すると、燃料流量の増加によりサーペンタイン流路後流域まで水素が輸送・拡散され、これにより濃度過電圧が抑制されていることが確認できる。次いで水素濃度 10mol% に着目すると、供給濃度の低下に伴い電流密度は全体として低下するものの、本燃料供給量では水素が PEFC 内の広範囲に輸送されており、局所的な濃度過電圧が抑制されていることが明らかになった。

PEFC への過剰な燃料供給は、PEFC で全て使われることなく流出し、すなわち損失となる。本出力モデルにより PEFC 内の水素濃度分布および電流密度分布、局所濃度過電圧の状況を詳細に明らかにする事ができ、今後、PEFC サーペンタイン流路やガス拡散層の設計や運転条件の最適化に応用できると考えられる。

5 まとめ

本研究では PEFC 出力モデルを作成し、その上で低水素濃度燃料使用時における PEFC サーペンタイン流路内水素濃度分布および電流密度分布を数値解析により明らかにした。以下に得られた知見を列記する。

- 水素はサーペンタイン流路よりガス拡散層を介して MEA に供給される。このときガス拡散層は水素をより広範囲に、かつ、均一に MEA に供給することを解析結果より確認した。これは出力モデルはガス拡散層の影響を定量的に評価できることを意味する。
- 水素濃度分布と局所濃度過電圧との相関を定量的に評価するとともに、各条件における局所濃度過電圧の発生を明らかにした。

PEFC への過剰な燃料供給は、PEFC で全て使われることなく流出し、すなわち損失となる。本出力モデルにより PEFC 内の水素濃度分布および電流密度分布、局所濃度過電圧の状況を詳細に明らかにする事ができ、今後、PEFC サーペンタイン流路やガス拡散層の設計や運転条件の最適化に応用できると考えられる。

参考文献

- (1) 石丸和博, その他:「窒素含有水素燃料を用いた固体高分子型燃料電池の性能特性に関する研究」, 岐阜高専研究紀要, 第 41 号, pp.47-52, 2006.

- (2) 石丸和博, その他: 「固体高分子型燃料電池への不純物ガス含有水素燃料の利用方法に関する研究」, H19 日本機械学会東海支部講演会, Vol.1, Paper No.132, 2007.
- (3) 山本高久, その他: 低水素濃度燃料使用時の固体高分子型燃料電池の性能解析, 神戸高専研究紀要, 第3号, pp.1-6, 2009.
- (4) Um S., et al.: "Three-Dimensional Analysis of Transport and Electrochemical Reactions in Polymer Electrolyte Fuel Cells", J. Power Sources, Vol.124, pp.40-51, 2004.
- (5) Wang Y., et al.: "Ultra Large-Scale Simulation of Polymer Electrolyte Fuel Cells", J. Power Sources, Vol.153, pp.130-135, 2006.
- (6) Wang F.B., et al.: "Numerical Prediction of Concentration and Current Distributions in PEFC", J. Power Sources, Vol.145, pp.546-554, 2005
- (7) 井上元ら: 固体高分子形燃料電池における出力特性のモデル化に関する研究, 化学工学論文集, Vol.29, No.2, pp.546-554, 2003.
- (8) Parthasarathy A., et al.: "Temperature Dependence of the Electrode Kinetics of Oxygen Reduction at the Platinum/Nafion Interface - a Microelectrode Investigation, J. Electrochem. Soc., Vol.139, No.5, 2530-2537, 1992.
- (9) Cutis Marr, Xianguo Li: "Composition and performance modeling of catalyst layer in proton exchange membrane fuel cell", J. Power Sources, Vol.77, No.1, pp.17-27, 1999.
- (10) 吉川大雄ら: 自動車用固体高分子型燃料電池の性能評価, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.66, pp.3218-3225, 2000.

携帯電話の会話途切れに伴う 脳神経反応の計測と脳内信号源の推定

東 義隆* 川野常夫**

Measuring Neuromagnetic Brain Responses and Estimating MEG Dipole Sources Due to Interrupted Hearing of Mobile Phone

Yoshitaka AZUMA* Tsuneo KAWANO**

ABSTRACT

This paper describes brain responses to silent interruptions of speech sound through mobile phone. Degraded voices including the interruptions through the phone are measured and they are found to often occur particularly if the phone for receiving is in the running car. The brain responses to the interruptions are measured with magnetoencephalography (MEG) and tried to estimate dipole sources in the brain. The results revealed that the neural response in the left and right temporal cortices to the offset of the speech sound was larger than that to the onset, while both responses were almost same to the interruptions of tone bursts and pure tones. In the dipole analyses, one dipole was found to exist in the parietal cortex when the speech sound was interrupted. These results suggest that listening to voice with a mobile phone would reduce resources for auditory perception and attention.

Keywords: mobile phone, speech interruption, brain response, dipole source, MEG

1. はじめに

携帯電話はコミュニケーションをはかるツールとして広く普及している。これに伴い、特に自動車運転中の携帯電話使用に関する安全性の問題が取り上げられてきた。運転と電話による会話の同時作業が運転パフォーマンスに及ぼす影響を初めて実験的に検討したのは Brown らである¹⁾。彼らは被験者に自動車で2つの障害物の隙間を通り抜けるハンドル操作を行わせたが、運転中の電話行為によって判断が鈍り、知覚機能が低下することや会話の応答性が悪くなることを結論として述べている。

また、運転者の精神的作業負担は携帯電話のタスクに比例して大きくなること、さらに、携帯電話による会話によって引き起こされる注意散漫は、知覚や判断操作、事象およびイベントの検出機能、状況の認知などの機能を低下させることがあり、自動車運転時の事故の危険性が高くなることなどが報告されている²⁾³⁾。

一方、携帯電話を用いた会話には時々ノイズなどが含まれるが⁴⁾、これらは会話音質を低下させるものである。自動車の中では電波受信の状態が悪いため、音質がさらに悪くなる⁵⁾。このように、会話音声にノイズが含まれる場合には、相手の会話を理解することが困難となることが予想される。従って、運転中の携帯電話使用時において、ノイズを含む会話音声を電話で聞く場合には、運転者の負担を大きくする可能性もあり、このため自動車事故の増加につながる懸念

される。ゆえに、無線通信におけるノイズの低減は人間工学的な課題であるとされている⁶⁾。しかし、携帯電話による会話に含まれるノイズの実状についてはまだ明らかにされていない。また、会話中のノイズに伴う認知負荷についてもまだ不明な点が多い。

本研究では、第1に携帯電話を走行中の自動車内で用いた場合の音質低下およびノイズの発生について検討することを目的とする。第2に、音質の低下した会話音声を携帯電話で聴く際の聴覚認知負荷についても検討する。

2. 音質低下の測定

2.1 実験方法

携帯電話を走行中の自動車内で用いた場合に、会話の音質低下を測定する実験を行った。

800MHzと1.5GHzのそれぞれの周波数帯域において TDMA (Time Division Multiple Access : 時分割多元接続) サービスを提供する携帯電話事業者2社の2つの携帯電話を用いて、会話音質の低下を測定した。会話は建物6Fの実験室に設けた1.5GHzの発信側の携帯電話から、約5km離れた自動車内の800MHzの受信側の携帯電話に対して行った。2つの携帯電話は異なる基地局のもとで使用し、それぞれの基地局からの伝達パワーは約30W (公称値) であった。測定は自動車の走行中および停車中の2条件について行い、走行中の車の速度は40km/h前後とした。

男性実験者 (45 歳) によって発音された短母音[u]と長母音[u:]を聴覚への入力信号とした。それらはマイクで録音するとともに、発信側の携帯電話から受信側

* 機械工学科 助教

** 摂南大学

の携帯電話へ伝達された。また、発信側の電話への入力信号および、受信側の電話からの出力信号をそれぞれ PC で録音した。母音からなる一回の会話時間は約 20 秒とした。会話は自動車の停車中および走行中の場合に対して、午後 2 時前後にそれぞれ 10 回繰り返し行った。測定時の電波の受信状況は比較的良好であった。

2.2 実験結果

図 1 は 1 つ目の音質低下タイプ、すなわち、携帯電話経由による音声伝達のスペクトルの乱れを示している。図 1 (a) および図 1 (b) はそれぞれ、発信側の携帯電話に入力された音声信号（長母音[u:]）のソナグラム、およびこの信号が受信側の携帯電話から出力された場合のソナグラムを示している。

図 1 (a) は長母音[u:]の入力信号における典型的なソナグラムを示している。これに対して図 1 (b) の出力信号では、▼で示す付近から突然スペクトルが乱れている様子がわかる。すなわち、スペクトルが乱れた後半の信号は[u:]として認知することが出来ないことを示唆する。スペクトルの乱れが生じる区間は停車中の場合には全測定時間の 2.3%であり、走行中の場合には 5.5%であった。

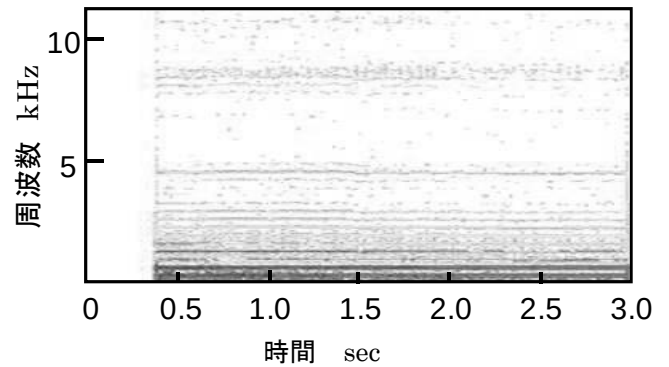
図 2 は 2 つ目の音質低下タイプ、すなわち携帯電話経由による音声の伝達遅れを示している。図中の上側の波形は発信側の携帯電話に入力された音声信号（短母音 [u]）を示しており、下側の波形は受信側の携帯電話からの出力信号を示している。この場合、受信側の携帯電話は自動車内に設けず、発信側の携帯電話と同じ建物の中に設け、入力信号および出力信号は 1 つの PC に同時に入力して解析を行った。音声伝達における遅れは図に示すように約 370ms であった。このような伝達遅れは携帯電話会話中に常に生じており、30 回の測定で遅れの平均時間は $317 \pm 34 \text{ms}$ であった。

図 3 は 3 つ目の音質低下タイプ、すなわち、携帯電話経由による会話音声の途切れを示している。上側の波形は発信側の携帯電話に入力された音声信号（短母音 [u]）を示しており、下側の波形は受信側の携帯電話から出力された信号を示している。出力信号における途切れは図に示すように明らかである。すなわち、信号が突然カットされていることがわかる。この場合、途切れの持続時間は約 300ms であった。

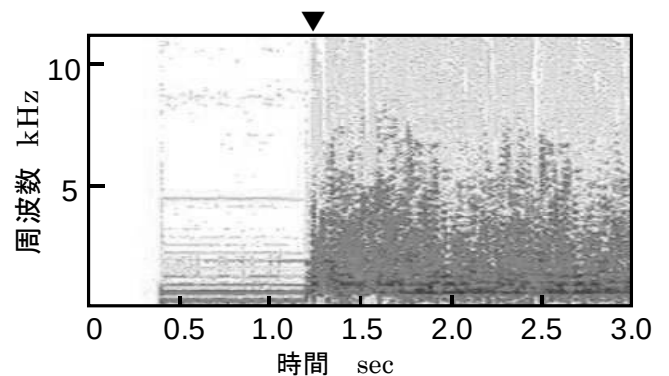
図 4 に途切れ時間と頻度の関係をヒストグラムで示す。図からわかるように、停車中よりも走行中の方が、会話はより長い時間途切れ、途切れの頻度がより高くなっている。走行中には 1 分あたり平均 7.6 回の頻度で途切れ、測定された途切れの平均時間は $424.4 \pm 336.6 \text{msec}$ であった。また、停車中には 1 分あたり平均 4.3 回の頻度で途切れ、平均時間は $232.1 \pm 114.2 \text{msec}$ であった。

2.3 考察

携帯電話による会話音声は 3 つの音質低下タイプ、すなわち、スペクトルの乱れ、伝達遅れ、途切れによって影響を受けることが明らかとなった。これら 3 つ



(a) 携帯電話に入力された音声信号のソナグラム



(b) 携帯電話から出力された音声信号のソナグラム

図 1 音声伝達のスペクトルの乱れ

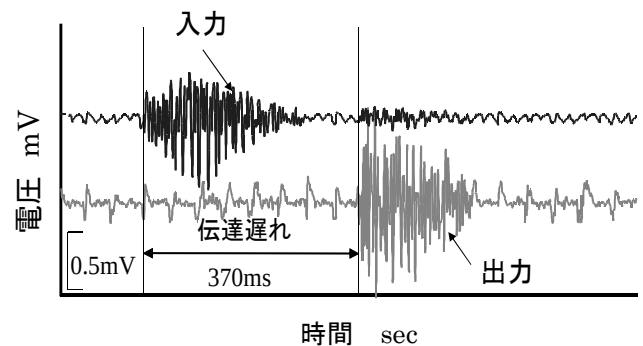


図 2 音声の伝達遅れ

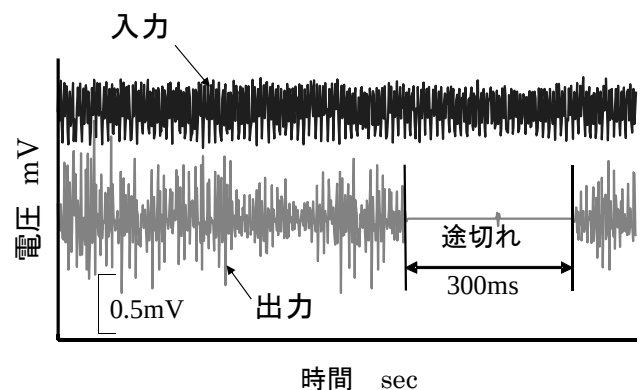


図 3 音声の途切れ

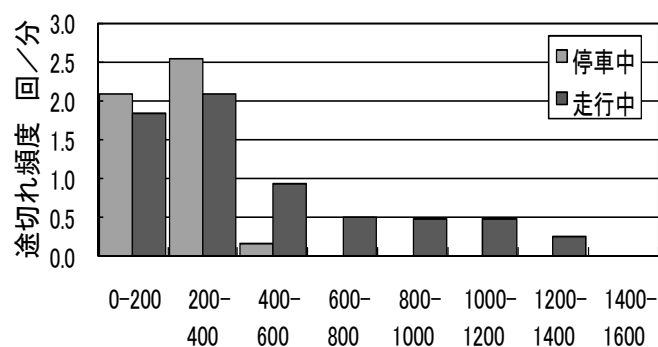


図4 途切れ時間と頻度

の音質低下タイプのすべてが会話の解釈を妨害するという点で共通の特性をもっている。つまり、音質低下によるスペクトルの乱れの区間は、相手の話す内容が理解できないという点で途切れによる場合と共通し、音声伝達における時間遅れは、その遅れの間が無音になるという点で途切れの場合と共通する。従って、次節では会話時に突然生じる途切れに着目し、それに伴う聴覚認知負荷について検討する。

3. 脳神経反応の計測

3.1 MEG 波形から見た脳神経反応

会話音声の途切れに伴う聴覚認知負荷を調べるために、脳神経活動の計測を行う。MEG (magnetoencephalography: 脳磁図)⁷⁾を用いて、非侵襲に脳磁場の計測を行い、脳活動を定量的に評価する。

実験で被験者に提示する聴覚刺激として、男性アナウンサーによる NHK ニュースの音声を取り上げる。刺激は12種類で、それぞれ1分間で異なるニュース内容とした。そのうち6種類は、1分間あたりランダムに10箇所の途切れを含むが、途切れが音声の無音区間に重なることはない。

途切れ音声の作成には、音声編集ソフト (GoldWave ver. 4.26) を用いた。

途切れの長さは前節で述べた音質低下の測定に基づいて、1000ms, 500ms または 200ms の3通り設定するが、1分あたりの10箇所の途切れ長さは統一した。

残りの6種類の音声は途切れることはなく、途切れ音声に対するコントロール刺激として用いる。

実験中は、途切れのある音声6種類と、途切れのないコントロール音声6種類の計12種類が片耳からランダムな順序で聞こえてくる。従って、1回の実験時間は12分とした。なお、被験者1人あたり、左耳および右耳についてそれぞれ実験を行った。

実験の被験者は11名の男性とした。彼らはすべて右利きで、神経病歴の無い22歳～50歳である。MEGによる脳磁場の計測に際して、事前に同意を得た。

計測に先立ち、頭の座標系を MEG 装置に対応させるため、図5に示すように左右の耳梁前点および鼻根点に相当する被験者頭皮の所定の位置に、それぞれ HPI (Head Position Indicator: 頭部位置計測) コイルを取り付けた。座標軸として、右耳梁前点 (1) と左耳

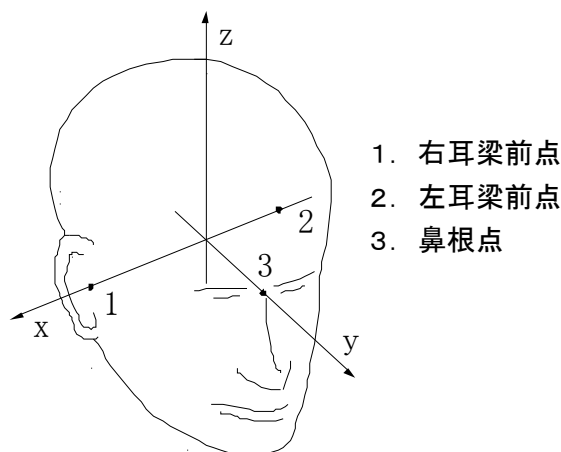


図5 頭部座標系

梁前点 (2) を結ぶ x 軸、x 軸に垂直で鼻根点 (3) 前方を向く y 軸、および xy 平面に垂直な z 軸があり、コイルの座標を3次元座標計測装置 (Polhemus inc., USA) によって計測した。この計測によって、被験者の頭の球モデルを定義する。

実験で使用した全頭型脳磁計は122チャンネルの SQUID (Superconducting Quantum Interference Device: 超伝導量子干渉素子) を有する超高感度なヘルメット型磁気計測装置 (Neuromag-122)⁸⁾で、この装置を用いた MEG 計測によって非侵襲に人間の脳神経活動を計測する。

SQUID による MEG 計測システムとしては、刺激音声およびトリガ信号を出力する PC がある。また、磁気シールドルーム内には検出コイルや SQUID があり、シールドルーム外のデータ収録装置 (Neuromag) により MEG 信号の簡単な処理と記録を行う。また、MR 画像への転写などを行うワークステーションも設置されている。

被験者は図6に示すように磁気シールドルーム内に設けられた MEG 装置のヘルメットを装着し、シートに楽な状態で着席した。ヘルメットの底にはグラジオメータ (1次微分型センサコイル) とそれぞれに対応した SQUID が配置されている。MEG 計測開始時には磁気シールドルームのドアを閉じて、中に被験者のみを残したが、実験者はテレビ画面とインターフォンを通じてシールドルーム内の被験者と適宜連絡を取った。また、磁気雑音を避けるため、あらかじめ被験者から磁気雑音の原因となりうる金属などをすべて除去するようにした。さらに、前に述べたように、コイルに電流を流して SQUID のセンサ (装置座標系) と被験者頭部 (頭部座標系) の相対位置関係を確認した。音声はスピーカー (@Eartone) から出力され、長さ1mのプラスチックチューブを通して被験者の左あるいは右耳に呈示した。ここで、背景脳活動を抑えるため、被験者には目前に表示される小さな視覚ターゲットを固視するように指示し、その間、音声 (約 65dB: SPL) を注意して聞くように教示した。

MEG データの解析は大きく分けて波形の処理と信号源の解析である⁹⁾。ここでは、波形の処理を行った。

刺激に対して MEG で計測した原波形には、刺激による誘発反応以外にも、背景脳活動や外界ノイズなどによる磁場が含まれている。誘発反応の信号強度はそれらのノイズに対して 1/10～100 でしかないため、直接には観察できない。そのため、誘発反応を原波形から抽出する必要がある。

このことから、MEG 信号を 0.01～100Hz のバンドパスフィルタにかけ、498Hz でサンプリングした。その後、途切れる音声と途切れない音声の各刺激に対する反応をそれ以外のノイズを含んだ信号から取り出すために、波形の加算平均を行った。同じ刺激に対する誘発反応を 50 回以上記録し、各反応を刺激の開始時点で

揃えて平均を取った。背景脳活動などは刺激時点に対しランダムに発生する信号と考えられ、多数加算した場合の期待値はゼロになる。一方、誘発反応は刺激に対しほぼ一定の時間間隔（潜時）で発生すると考えられるため、加算により増強される。この作業で、刺激に対し時間的に同期して発生している磁場成分を抽出した。なお、強さが過度に大きいノイズ等は、加算平均後の波形にも影響する。そのため、ある程度（3pT）以上大きな信号を含む試行は例外データとして、加算平均から除外した。

これらの平均値をさらに 1～50Hz のバンドパスフィルタにかけ、磁場の強さのピークを求めるために、各潜時における磁束密度（磁場の強さ）の Root Mean Square (RMS)¹⁰⁾ を式 (1) により計算した。

図 7 (A) に脳神経反応の結果を示す。会話音声の途切れ時間が 1000ms の場合で、左耳刺激による結果である。聴覚反応領域の右側頭葉で 17 個のセンサを選択し、同様に左側頭葉で 18 個のセンサを選択して磁束密度の計算を行った。RMS の平均は全被験者に対して、同実験条件のもとで計算するが、offset 後の潜時 90～150ms および onset 後の潜時 90～150ms において、途切れのある場合と途切れない場合に対する磁場のピークを、それぞれ比較した。

$$\text{磁束密度(磁場の強さ)} = \sqrt{\frac{\sum_i x_i^2(t)}{n}} \dots\dots\dots (1)$$

(単位: テスラ T)

$x_i(t)$: センサ i の時刻 t における磁束密度

n : センサの数

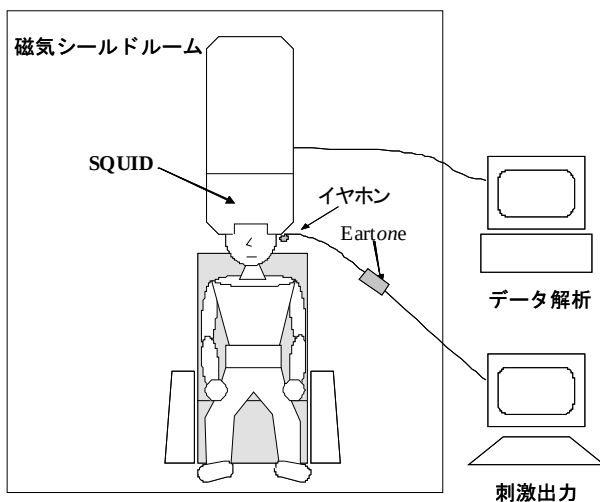


図 6 全頭型脳磁計 (MEG) による脳神経反応計測

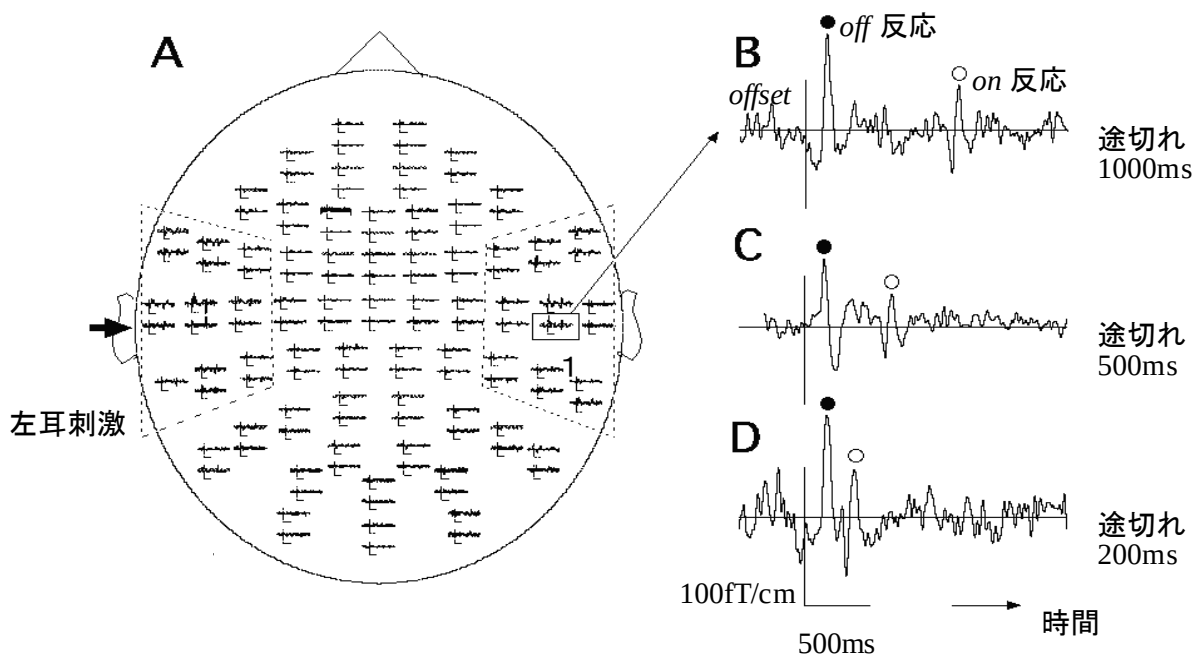


図 7 会話音声(ニュース音声)の途切れに伴う脳神経反応の平均例

ここで、時間信号である MEG 波形をセンサ位置に対応させてレイアウトしている。頭部の鳥瞰図に対応しており、上方が前部である。使用した MEG 装置は 61 点の計測点をもち、各々の計測点では垂直方向の磁場を直交する経線と緯線方向に微分するグラジオメータ（コイル）がある。このため、2 個のグラジオメータの信号が対になっている。各センサにおいて、縦軸は磁束密度（磁場の強さ）を表し、横軸は時間を表す。また、垂直棒は *offset* を表し、棒の長さは 100fT/cm に対応する。また、水平棒の長さは 500ms に対応している。音声の途切れ時をトリガとし、トリガの前 300ms の平均をベースライン¹¹⁾として後の反応を計測した。左側頭葉および右側頭葉のいくつかのセンサにおける信号で、突出したピークがみられた。点線で囲った部分はそれぞれ、磁場発生源評価のためのセンサの集合である。右側頭葉の選択したセンサの拡大図を図 7 (B) に示す。図において、(●) と (○) でマークされた 2 つのピークは約 1000ms の間隔で分かれている。

図 7 (C) および図 7 (D) は同センサにおける同被験者の結果を示しているが、途切れ時間をそれぞれ 500ms および 200ms と設定した場合である。図 7 (C) では約 500ms の間隔で分かれる 2 つのピークが見られ、図 7 (D) においては約 200ms の間隔で分かれる 2 つのピークが見られた。これらの結果は音声の途切れ時点、すなわち *offset* に関して 50 回以上の加算平均を行っているが、前のピーク (●) と後のピーク (○) はそれぞれ、*off* 反応、*on* 反応と呼ばれる。図 7 (B) ~ 図 7 (D) のそれぞれにおいて、*off* 反応のピークは *on* 反応のピークよりも大きくなっていることがわかる。これらの平均結果をさらに 0.5~30Hz のバンドパスフ

ィルタにかけ、*off* 反応および *on* 反応のピークの大きさを RMS の計算によって定量化した。

図 8 は途切れ時間 1000ms ((A), (D)), 500ms ((B), (E)) および 200ms ((C), (F)) の途切れに対する左側頭葉 ((A), (B), (C)) および右側頭葉 ((D), (E), (F)) の RMS を 1 被験者について平均した結果を示している。これらの図における点線は、実際には途切れのないトリガの平均、すなわち、被験者が途切れのない音声を聴いている間の神経活動の平均を表しており、連続した線は途切れた会話音声を聴いている場合を表す。RMS が 0 以下になっている部分が存在するが、連続した線のベースラインと点線の波形のベースライン（トリガの前 300ms の平均）を 0 に揃えたためである。各図において 2 つの線の比較から、途切れのない連続した音声を聴くよりも、途切れた音声を聴く方が、*offset* と *onset* の両方で、脳がより活動している。右側頭葉 ((D), (E), (F)) の結果すべてにおいて、*off* 反応のピークは *on* 反応のピークより大きくなり、t 検定による有意差がみられた ($p < 0.01: 1000, 500, 200 \text{ msec}$)。

一方、左側頭葉 ((A), (B), (C)) においても *off* 反応の平均値は *on* 反応の平均値よりも大きくなるが、右側頭葉における場合と比較すると、*off* 反応と *on* 反応の差は、より小さくなった。 ($p > 0.1: 1000\text{ms}, p < 0.03: 500\text{ms}, p > 0.1: 200\text{ms}$)。また、左側頭葉における反応は被験者によってばらつきがあった。すなわち、被験者によっては *off* 反応が *on* 反応より小さくなる例があり、*off* 反応と *on* 反応の両方がほとんど小さくなる例もみられた。

以上をまとめると、左耳が刺激された場合、右側頭葉では *off* 反応が *on* 反応より大きくなるが、左側頭葉では *off* 反応と *on* 反応の有意差がみられなかった。

3.2 脳内信号源からみた脳神経反応

本節では、MEG データの解析において、会話音声の *offset* に対する脳神経反応の信号源を、電流双極子による複数双極子モデルによって評価した。

誘発反応を MEG 原波形から抽出するため、会話音声に対する実験中の MEG 信号を 1~20Hz のバンドパスフィルタにかけ、その後トリガ信号のタイミングで加算平均を行った。各実験における加算平均の回数は 50 回以上とした。なお、大きな電氣的アーチファクト (3pT 以上) を含む箇所については自動的に平均から除外した。

off 反応は 3 つの電流双極子、すなわち、左脳における 1 つの電流双極子と右脳における 2 つの電流双極子を用いて等磁場線図によってモデル化した。ここで、潜時 116ms における左脳の等磁場線図は、図 9 (A) に示すように、左側頭葉において右下向きの矢印で示す電流双極子によって説明出来る。図において、実線は磁場の湧き出しを表し、点線は磁場の吸い込みを表す。なお、磁場の等高線間隔は 20fT である。また、矢印の方向は電流双極子の向きを表し、矢印が大きいほど電流が大きいことを意味する。同様に、右脳の等磁

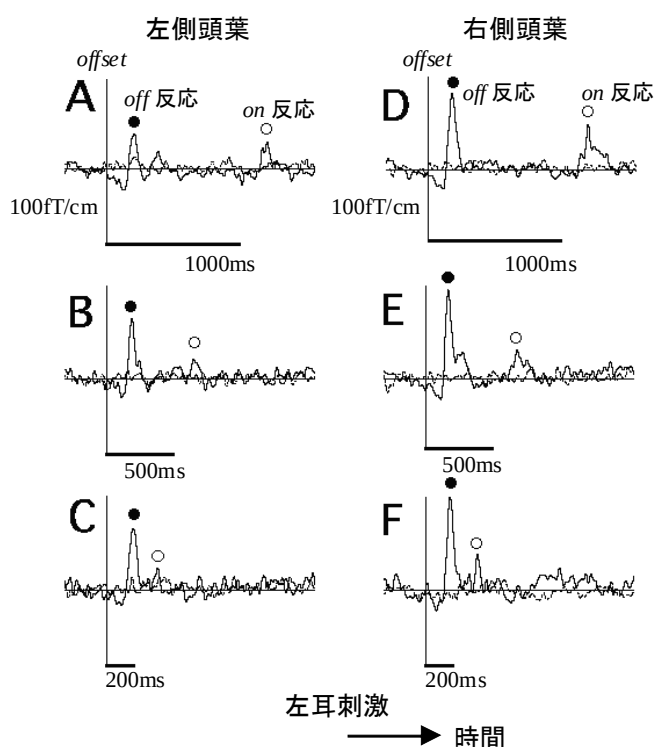


図 8 磁場の強さの平均例

場線図は図 9 (B) に示すように、右側頭葉において左下向きの電流双極子によって説明出来る。脳後部のより高いところ、すなわち、右頭頂葉に位置するもう 1 つの電流双極子は、図 9 (C) に示している

推定された電流双極子位置の解剖学的部位の特定を行うため、電流双極子を MR 画像に転写した結果を図 10 に示す。図 10 (A) ～図 10 (C) はそれぞれ MR 画像の断層像であるが、それぞれ前額断 (A)、水平断 (B)、矢状断 (C) と呼ばれる。また、図中の白い丸印は電流双極子の位置を表し、丸印から伸びる線は電流の向きを示している。図からわかるように、1 つの電流双極子は右頭頂葉(下頭頂小葉)に位置している。ここで、図 10 (C) において、右側頭葉(上側頭回)における電流双極子も同時に観測できた。上側頭回は聴覚連合野に位置し、言語機能と関連があることが知られている¹²⁾。

図において、2 つの双極子が見られるのは、右側頭葉における電流双極子と右頭頂葉における電流双極子の x 座標値が互いに近くなっているためである。

被験者 8 人のうち 7 人について、会話音声(ニュース音声)に対する off 反応は 3 つの電流双極子によって同様に説明出来る。すなわち、途切れの長さや刺激を呈示する耳に関わらず、電流双極子の潜時と位置は被験者間で類似していた。残りの 1 人については左側頭葉(上側頭回)の電流双極子および右側頭葉(上側頭回)の電流双極子の 2 つが推定されたが、右頭頂葉(下頭頂小葉)における電流双極子は推定されなかった。

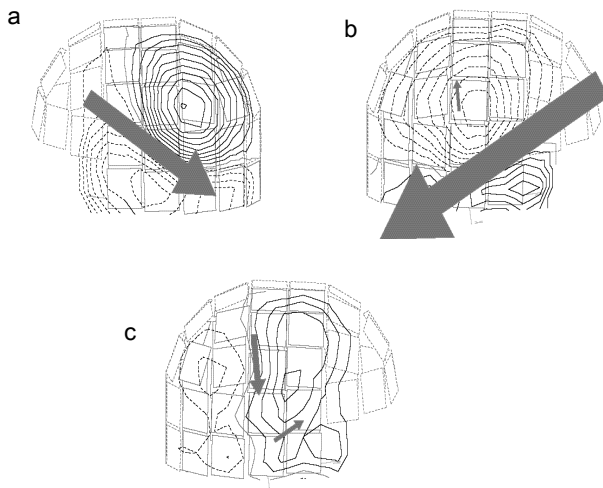


図 9 複数双極子モデルによって評価した等磁場線図および等価電流双極子

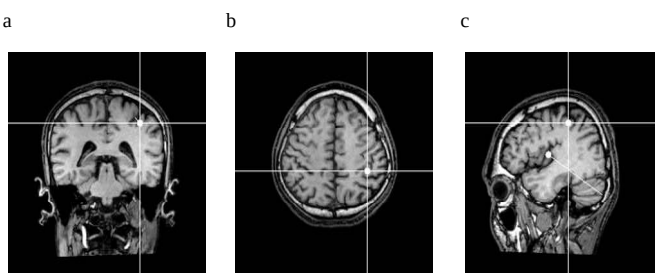


図 10 MR 画像に転写した電流双極子の位置

4. まとめ

本研究では、はじめに 2 つの携帯電話間の会話における会話音質の低下を測定した。次に、音質低下の中で途切れに着目し、被験者の左あるいは右耳に呈示した会話音声突然途切れる際の脳神経活動を MEG で計測した。

結果をまとめると、携帯電話を経由した会話音声は頻繁に途切れる。また、右側頭葉において、会話音声の途切れは onset よりも offset 時に、より脳を活動させることがわかった。このことは、途切れが聴覚神経システムに負担を与えることを示唆する。ゆえに、他のイベントを検出するための知覚資源の割り当てが少なくなると考えられる。従って、自動車運転中に途切れを含む会話音声を携帯電話で聞く場合には、自動車事故を誘発する危険性があることを示唆する。

参考文献

- (1) Brown, I.D., Tickner, A.H. : Interference between concurrent tasks of driving and telephoning, *Journal of Applied Psychology*, 53, pp.419-424.,1969
- (2) Alm, H. and Nilsson, L. : The effect of a mobile telephone task on driver behavior in a car following situation, *Accident Analysis and Prevention*, 27, pp.707-715.,1995
- (3) Enderes, T., Khoo, S.C., Samaras, K. : Impact of statistical multiplexing on voice quality in cellular networks, *ACM*, 8, pp.28-35.,2000
- (4) Dahl, M., : Acoustic echo and noise canceling using microphone arrays, *Proceedings of the 1996 4th International Symposium on Signal Processing and its Applications, Part 1*, pp.379-382.,1996
- (5) R. J. Zatorre, M. Bouffard, P. Ahad, P. Belin: Where is 'where' in the human auditory cortex. *Nature Neurosci.*, 5(9), pp.905-909.,2002
- (6) Pantev, C., Eulitz, C., Hampson, S., Ross, B., : The auditory evoked "off" response: source and comparison with the "on" and the "sustained" responses, *Ear Hear*, 17(3), pp.255-265.,1996
- (7) Hämäläinen, M., : Magnetoencephalography-theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain, *Reviews of Modern Physics*, 65-2, pp.413-497.,1993
- (8) 外池光雄, 磁計測技術と医療福祉応用, 産業技術総合研究所, AIST TODAY, pp.24-29.,2001
- (9) R. Hari: Neuromagnetic responses of the human auditory cortex to on- and offsets of noise bursts. *Audiology*, 26(1), pp.31-43.,1987
- (10) 金桶吉起, 柿木隆介, MEG と fMRI を併用する脳機能計測—その有用性と危険性, 計測と制御, 第 42 巻, 第 5 号, pp.374-378., 2003
- (11) 栗城真也, 竹内文也, MEG による高次脳機能解析, 計測と制御, 第 42 巻, 第 5 号, pp.385-390., 2003
- (12) Zatorre, R., Belin, P., and Penhune, V.B., Structure and function of auditory cortex: music and speech, *Trends in Cognitive Sciences*, 6-1, pp.37-46., 2002

設計図交換によるものづくり教育の試み

石崎繁利* 尾崎純一* 齋藤 茂** 中辻 武** 英 崇夫***

Attempt on “Monodukuri Education” by Exchange of Drawings

Shigetoshi ISHIZAKI* Jun-ichi OZAKI* Shigeru SAITO** Takeshi NAKATSUJI**

Takao HANABUSA***

ABSTRACT

The requiring subject concerning creative design and manufacture has been started in Kobe City College of Technology since 1995. Ten works are manufactured by ten groups composed from 3 to 4 students according to the fed theme in this subject. This class has practiced three processes of Plan→Do→Check between 1995 and 2006 by the same group. However, the drawings were exchanged after the process of Plan and the Do process was done in 2007. We investigated eight items for the student. As a result, it was confirmed that there was an effect to improve student's ability by five items. On the other hand, it has been understood to decrease by three items which contain the ability concerning students' communications.

Keywords: creative design and production, monodukuri, exchange, drawing

1. はじめに

神戸市立工業高等専門学校機械工学科では3年生の後期授業に「創造設計製作」という科目がある。この科目は本校機械工学科の学生が1年から3年前期までに学んできた設計製図および機械実習などの経験を生かしたもののづくり教育のひとつである。創造設計製作は1995年から開講されており、開講当時はロボットコンテストのテレビ放映の影響で学生のアイデアを生かしたもののづくり教育に関心が高まっていた。創造設計製作では学生は与えられた課題に従い、作品の設計から製作、さらにレポート作成やプレゼンテーションなどに取り組んでいる。このようなものづくりを通して学生の問題設定力や問題解決力などの技術者として必要な能力を向上させることがこの科目の目的である。

1995年度から2006年度までの創造設計製作は、各班でアイデアを出して課題を満たす作品の設計製図から製作、評価までを同じ班が一貫して行っていた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。この一貫方式では意欲的にものづくりに取り組む学生とそうでない学生に分かれ、ものづくり工程が後半になるほどその

傾向が顕著に表れていた。そこで筆者らはものづくりの工程が進んでもすべての学生が意欲的にものづくりに取り組むように工夫したいと考えていた。さまざまな検討の末、2007年度の創造設計製作において各班が設計製図した図面を別の班に渡して製作してもらうという設計図交換方式のものづくり教育を試みた⁽⁴⁾。設計図交換方式は従来の創造設計製作と比較して学生は自らの班が設計製図した作品と他の班が設計製図した作品に携わる。そのため、2つの作品の組立図および部品図を見ることができる。さらに設計図交換方式は一貫方式と比較して3倍の学生とのコミュニケーションが必要になる。このようなことから機械系のものづくりに必要な問題設定力や問題解決力だけでなく、コミュニケーション力なども効果的に身に付けることができると考えた。

本研究では設計図交換によるものづくり教育において学生に対して5段階自己評価によるものづくり能力を調べた。なお、今回調査したものづくり能力とは問題設定力、問題解決力、コミュニケーション力、計画力、構想力、設計製図力、レポート作成力、創造力の8つである。一方、我々は数値として表わすことはできなかったが、設計図を交換することでもものづくり過程が後半に進んでも学生のものづくり意欲を高く維持できることを確認した。2008年度以降は分担方式のものづくり教育を実践し

* 機械工学科 准教授

** 機械工学科 教授

*** 徳島大学 名誉教授

ている^{(6)~(10)}。しかし、設計図交換によるものづくり教育について実践例に関する報告は少ない^{(4) (11)}。そこで本稿では2007年度の設計図交換によるものづくり教育の実践内容について報告する。

2. 一貫方式と設計図交換方式のものづくり教育

図1は従来のものづくり教育と設計図交換によるものづくり教育の違いを示す。図1(a)は従来のものづくり教育である。各班が設計製図したものを製作し、製作した作品の評価までを一貫してひとつの班で行う方式である。一貫方式ではものづくりのPlan→Do→Check工程をすべて同じ班で取り組むため、ひとつの作品について十分な時間をかけてものづくりを学ぶことができる。一方、図1(b)は設計図交換方式における担当する作品とものづくり工程の関係を示している。1班が設計製図した作品①の図面を2班が受取り、図面どおりに作品①を製作する。そして2班が製作した作品①の評価を設計製図した1班が行う。設計図交換方式では他の班に図面を渡して製作してもらうため、図面の不備があると作品が製作できない。そのため、学生はPlan工程の組立図および部品図の作図に多くの時間をかける必要がある。なお、2007年度の創造設計製作では1クラス38名を10班にわけた。そのため、3名の班が2つ、4名の班が8つとしてもものづくり教育を実践した。

作品番号	Plan	Do	Check
①	1班	1班	1班
②	2班	2班	2班
③	3班	3班	3班
⋮	⋮	⋮	⋮
⑩	10班	10班	10班

(a) 一貫方式のものづくり

作品番号	Plan	Do	Check
①	1班	2班	1班
②	2班	3班	2班
③	3班	4班	3班
⋮	⋮	⋮	⋮
⑨	9班	10班	9班
⑩	10班	1班	10班

(b) 設計図交換方式のものづくり

図1 一貫方式と設計図交換方式

3. 設計図交換方式の授業計画

2007年度に実施した設計図交換方式による創造設計製

作の授業計画を表1に示す。14週間の授業計画において役割分担を考えてPlan期間、Do期間、Check期間にわけた。Plan期間は1週目から7週目までとした。なお、1週目のオリエンテーションでは授業概要およびテーマ説明、班分けを実施した。また、1週目と7週目に学生の自己評価による能力調査を行った。なお、Plan期間において学生達は、班のアイデアを実際に製作可能な図面に仕上げる。このとき3次元の立体を確実にイメージさせるため、必ずペーパークラフトを作るように指導した。次にDo期間は6週目から13週目までの8週間である。Do班はPlan班が設計製図した図面を理解して部品加工や組立てを行う。最後にCheck期間は12週目から14週目までの3週間である。Check班はPlanした作品が設計図どおりに製作できているかについて評価する。

PlanからDoの引継ぎおよびDoからCheckの引継ぎのためにそれぞれ2週間設けた。PlanからDoへの引継ぎ2回目となる7週目に設定したPlan説明会では、製作を担当するDo班が設計製図に不備がないかチェックする。一方Plan班は、指摘された箇所を次週までに修正して組立図と部品図をDo班へ渡す。図面を渡した班は、他の班が製図した図面を受け取ることになる。なお、このとき各班がDo班に渡した図面は、設計製図の課題として評価する。14週目の報告会では各班がPlanした作品とDoした作品について報告した。作品報告会終了後、最終の自己評価による能力調査を行った。なお成績は、レポート70%、作品30%の割合で評価した。

表1 授業計画

各週の実習内容	Plan/Do/Check
1. オリエンテーション(授業概要説明)	Plan1
2. 各自作品イメージ図作成	Plan2
3. 各班動作機構の決定と概略図の提	Plan3
4. ペーパークラフトによる作品製作	Plan4
5. ペーパークラフトによる作品製作	Plan5
6. 製作予定作品説明会	Plan6 → Do1
7. 各自組立図、部品図の完成	Plan7 → Do2
8. 機械工場において作品製作(1)	Do3
9. 機械工場において作品製作(2)	Do4
10. 機械工場において作品製作(3)	Do5
11. 機械工場において作品製作(4)	Do6
12. 機械工場において作品製作(5)	Do7 → Check1
13. 機械工場において作品製作(6)	Do8 → Check2
14. 作品報告会	Check3

4. ものづくり課題の作品例と授業風景

2007年度創造設計製作の課題および作品製作条件は次

のとおりである。

〔創造設計製作の課題〕

A点(100, 100, 50)とB点(200, 200, 150)の2点間を常にボールが通過する作品を製作する。なお、必ず指定されたDCモータおよびカムとてこを使用することとした。なお、DCモータは2つまでとした。

〔作品製作条件〕

- ① 作品の大きさ…300mm×300mm×200mm以内
- ② 使用するボール…ビー玉
- ③ 供給電源…直流安定化電源
- ④ 材料…市販されているアルミニウム材料を使用すること。
- ⑤ その他…既製品の使用は認めない。ただし、モータ、歯車、ねじは除く。

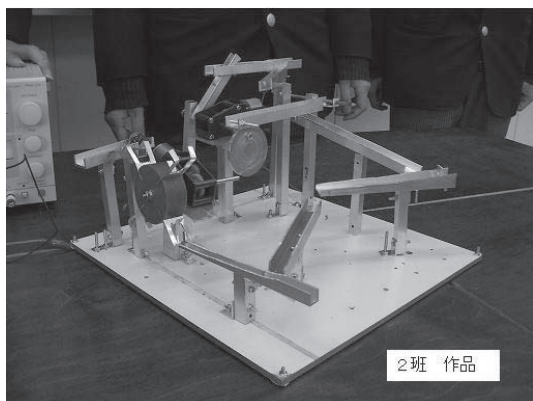


図2 2007年度の作品例

図2は2007年度に製作された作品の写真である。作品は厚さ×横×縦の大きさが5mm×300mm×300mmのアルミニウム板上に製作されている。手前が座標(0, 0, 0)であり、後方が(300, 300, 0)の座標である。したがってA点が手前、B点が後方である。A点とB点を常にボールが通過するように2つの上昇機構が設けられている。左側にある円盤状の上昇機構とその右後方にあるカムとてこを使った上昇機構である。



図3 2007年度の作品報告会

図3は2007年度の作品報告会における写真である。場所は機械工学科の製図室である。班ごとにPlan班として設計製図した作品とDo班として製作した作品について報告を行った。当初はPlan班として設計製図した作品についてのみ報告させる予定であった。しかし、設計図交換によるものづくり教育を実践した1年目の授業であったため、予想以上に作業の遅れが生じた。そのため、Do班としての作業に追われてCheck班としての役割が果たせなかった班が目立った。これらを考慮して作品報告会では各班が携わった2つの作品について報告させた。



図4 14週目の自己評価による能力調査

図4は14週目に実施した自己評価による8項目の能力調査を実施している写真である。創造設計製作を受講している38名全員が調査に取り組んだ。なお、この調査は1週目、7週目、14週目の3回実施している。

5. 自己評価調査項目について

2007年度に実施した設計図交換方式の授業においてもものづくり能力を5段階の自己評価で調査した。調査対象は機械工学科3年の1クラスであり、2007年度学生数は38名の学生であった。なお、調査したものづくり能力は以下の8項目である。

問題設定力…課題の条件を満たす作品を完成させるためにこれまでの経験を生かして、作業前に問題を設定する能力のこと。

問題解決力…ものづくりの各工程で生じる問題を解決する能力のこと。

コミュニケーション力…ものづくりにおいて不可欠な図面の作図および理解、作品の製作のために情報伝達をする能力のこと。

計画力…ものづくりの各工程において計画的に作業をする能力のこと。

設計製図力…正しく図面を作図する能力および正確に図面を理解する能力のこと。

レポート作成力…Plan→Do→Checkのすべての工程において常に記録を取り、どのようにものづ

くりが実践されたかを論理的に報告書にまとめる能力のこと。

創造力 … 世の中に存在しないものを創りだす能力のこと。

構想力 … ものづくりの各工程において創造力とは異なり、実現可能なことに基づいて考えを組み立てる能力のこと。

6. ものづくりに関する能力調査

6. 1 自己評価において能力が向上した項目

設計図交換方式のものづくりは、従来の一貫方式と比較して異なる角度からものづくりについて考える機会が増えると期待できた。この教育効果を調べるため、問題設定力、問題解決力、設計製図力、コミュニケーション力、レポート作成力、計画力、構想力、創造力の8項目について学生による自己評価を実施した。その結果を図5に示す。問題設定力、問題解決力、設計製図力、レポート作成力、創造力の5項目で向上していることがわかる。この中で問題解決力とレポート作成力は1-7週目の調査と比較して8-14週目の値が高くなっている。これより、問題解決力とレポート作成力は主にDoからCheckの工程で自信をつけていることがわかる。また、1週目と7週目を比較すると創造力の数値は平均値が0.2以上高くなっている。しかし、その他の4項目では1-7週目に能力向上は実感している学生は少ない。そのため、Plan期間において能力向上が実感できる課題を設定するなど授業改善が必要である。

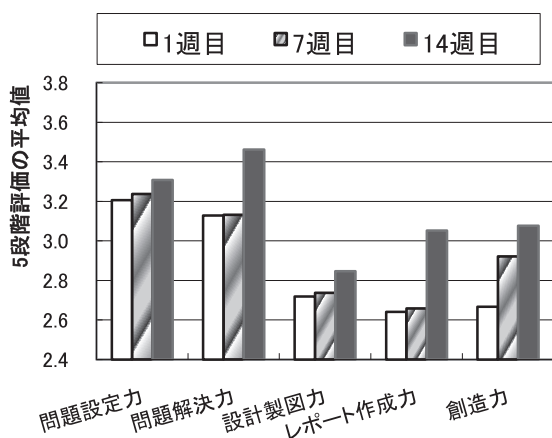


図5 自己評価において向上した調査項目

図6は問題解決力において1週目と14週目の5段階評価の分布を比較したものである。横軸が5段階評価の値で縦軸が学生の人数を示している。1週目の調査では3と評価した学生が22名と最も多かった。しかし、14週目の調査では4と評価した学生が21名と最も多くなってい

る。一方で1週目は5と評価した学生は4名であったが、14週目には1名と減少した。これは実際のものづくりにおいて生じた問題をすべて解決することは難しいと実感したためであると考えている。

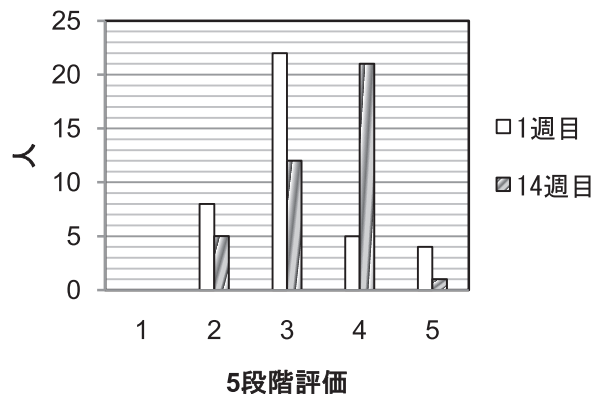


図6 問題解決力に関する自己評価の推移

6. 2 自己評価において能力が低下した項目

図7は学生の自己評価が低下した3項目の調査結果を示す。コミュニケーション力、計画力、構想力、計画力の3項目において学生は1週目と比較して14週目の能力が低下したと感じている。計画力と構想力が低下した主な原因は、今回の創造設計製作では10班のうち1班も作品が完成しなかったことにある。そのため、計画力は授業が進むにつれて当初各自で考えていたよりも低いと判断している。また構想力は1週目から7週目のPlan期間には向上していると判断していたが、その後14週目に作品が未完成になったことで低下している。Plan期間では各自の構想どおり作業が進んでいたが、Do期間にさまざまな問題が生じたことが提出されたレポートにおいて報告されている。

しかし、コミュニケーション力が低下した原因は作品が未完成となったためではない。従来の一貫方式では、学生は1つの作品のものづくりを同じ班の3名から4名で行う。一方、設計図交換方式では学生は2つの作品のものづくりを自らの班を含む3つの班と交流しながら進めることになる。そのため、従来の一貫方式と比較すると設計図交換方式は、ものづくりを通して3倍の学生とのコミュニケーションが生じる。事前の自己評価調査においてコミュニケーション力が最も高く、学生は自信を持っていた。その後、設計図交換方式のものづくりを通して学生は、技術的な内容の正しい情報伝達に苦労していた。つまり、学生はさまざまなものづくりの場面で技術的な内容を正確に理解することや他人に理解してもらうことの難しさを体験した。その結果、授業終了時の調査においてコミュニケーション力は平均値で0.4以上も下がった。しかし、提出されたレポートや報告会において「実社会のシミュレーションのようで良い経験となっ

た。」というコメントが目立った。このことから筆者らは学生に対して実社会で必要となるコミュニケーション力を正しく認識させることができたと肯定的に考えている。

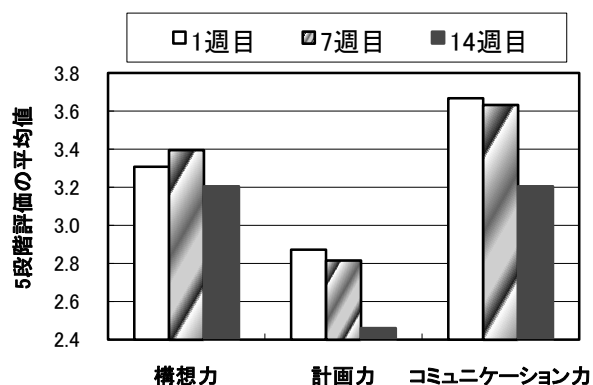


図7 自己評価において低下した調査項目

図8はコミュニケーション力に関して1週目と14週目の5段階評価の分布を比較したものである。1週目の調査では3と評価した学生が15名と最も多く、次に12名の学生が5と評価していた。しかし、14週目の調査では2または4と評価した学生がともに11名となり、5と評価した学生は6名に減少した。この結果から実際のものづくりを通して情報を正確に伝えることが難しいと感じた学生の具体的な自己評価の値の変化を知ることができた。

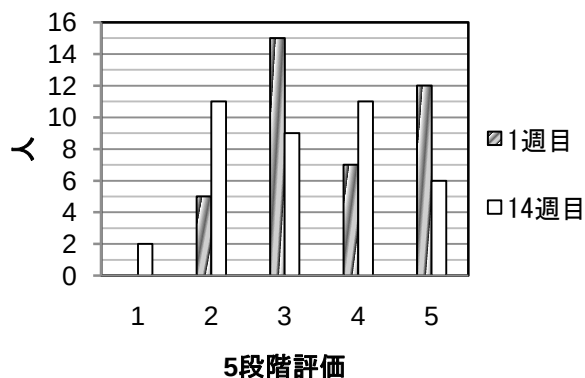


図8 コミュニケーション力に関する自己評価の推移

7. 結言

設計図交換によるものづくり教育を実践した。さらに学生に対して8項目の能力に関する5段階の自己評価について調査した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 一貫方式と比較すると設計図交換方式は、学生が2つの作品においてもものづくりに携わる。また、Plan→Do→Checkの過程で自らの班を含む3つの班と交流する。そのため、密度の高いものづくり教育が実践できる。

- (2) 事前の調査において学生はコミュニケーション力に自信を持っていたことがわかった。一方で創造設計製作において伸ばしたい能力は創造力が一番であり、26%の学生が回答していた。

- (3) 8項目の能力に関する自己評価においてPlan期間、Do期間、Check期間にわけると、Do期間において最も学生の自己評価結果に変化が生じた。

- (4) 学生の自己評価が向上した5項目は、問題設定力、問題解決力、設計製図力、レポート作成力、創造力である。特に問題解決力とレポート作成力は、平均値が0.3以上の向上が見られた。

- (5) 一方、学生の自己評価が低下した3項目は、コミュニケーション力、構想力、計画力である。この中でコミュニケーション力と計画力は、平均値が0.4以上の低下が見られた。

従来の一貫方式よりも設計図交換によるものづくり教育は、3倍のコミュニケーションが生じる。事前の自己評価調査においてコミュニケーション力が最も高く、学生は自信を持っていた。しかし、設計図交換方式のものづくりを通して学生は、技術的な内容を正しく情報伝達することが容易でないことを知った。つまり、学生はさまざまなものづくりの場面で技術的な内容を正確に理解することや他人に理解してもらうことの難しさを体験した。授業終了時の調査においてコミュニケーション力は最も下がったが、実社会で必要となるコミュニケーション力を認識させることができた。したがって、設計図交換方式によるものづくり教育が実社会で問題となっている技術者のコミュニケーション力を改善することに有効であると考えている。

参考文献

- (1) 石崎繁利：物作りによる創造教育とその評価，日本機械学会第75期通常総会講演論文集(IV)，pp. 346-347, 1998
- (2) 石崎繁利：神戸市立高専におけるものづくり教育に関する考察，精密工学会秋季大会学術講演会論文集，pp. 737-738, 2005
- (3) 石崎繁利，尾崎純一，英崇夫：DCモータを用いたものづくり教育，工学・工業教育研究講演会講演論文集，pp. 660-661, 2007
- (4) 石崎繁利，尾崎純一，英崇夫：強制的な設計図交換によるものづくり教育，工学・工業教育講演会講演論文集，pp. 68-69, 2008
- (5) Shigetoshi ISHIZAKI, Jun-ichi OZAKI, Takao HANABUSA: Problem-Based Learning in Department of Mechanical Engineering, *International Conference on Engineering Education & Research*, pp. 369-375, 2009
- (6) 石崎繁利，尾崎純一，齋藤茂，中辻武，英崇夫：一

貫方式と分担方式によるものづくり教育, 高専教育, 33, pp. 589-594, 2010

(7) 石崎繁利, 尾崎純一, 齋藤茂, 中辻武, 英崇夫: 分担方式によるものづくり教育の試み, 工学教育, 58, 2, pp. 64-69, 2010

(8) 石崎繁利, 尾崎純一, 齋藤茂, 中辻武, 英崇夫: 機械系ものづくり教育における学生の意欲と集中度, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 437-438, 2009

(9) 石崎繁利, 齋藤茂, 尾崎純一, 武縄悟, 英崇夫: ものづくり教育における学生の意欲に関する調査, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会講演論文集, 4-12, 2010

(10) Shigetoshi ISHIZAKI, Jun-ichi OZAKI, Shigeru SAITO, Satoru TAKENAWA, Takeshi NAKATAUJI: An Attempt of Problem Based Learning by Sharing Method, Proceedings of *International Conference on Engineering Education & Research*, 2010

(11) 伊藤恒平, 松井洋, その他: ロールプレイ方式を導入したものづくり教育の一例, 工学教育, 57, 2, pp. 57-59, 2009

加古川河口右岸に形成されるワンド内の物理環境

巽 光* 宇野 宏司**

Physical Conditions in Wando at Right Bank of the Kakogawa River Mouth

Hikaru TATSUMI* Kohji UNO**

ABSTRACT

Wando is a semi-closed water area which is different from the hydraulic characteristics of the river. It served as spawning place and nursery ground of fish juveniles. However, the dead water zone like *wando* decreased by the river improvement works. As a result, habitat environment of the aquatic organisms is threatened, especially in urban area. Maintenance and creation of *wando* is working in various regions of Japan now. It is necessary to comprehend physical conditions such as wind, tidal current and salinity field.

In this study, field observations were carried out to understand physical conditions of *wando*. Study site is at the right bank of the Kakogawa River mouth.

The change of salinity of pore water at a depth of 50cm was not able to be confirmed neither in the river nor in *wando*. However, salinity just below the river bed has decreased by the rain. On the other hand, the change of salinity was not confirmed in *wando*. As a result, it has been understood that the *wando* forms steady salinity field.

Keywords: *wando*, dead water zone, salinity, field observation, maintenance and creation

1. はじめに

ワンドとは河川本流と何らかの形でつながっている、本流と水理条件の異なる静水に近い半閉鎖性水域のことであり、平水時に開口部のない「たまり」と区別される。ワンドには安定して水が供給されることによって一年中水がある恒久的水域になっているものもあれば、湧き水や伏流水変動により一年の一時期だけ湛水しているものもある。ワンドは止水性が強く、河川本流と異なる環境をもたらすため、河川に生息する魚類の産卵場所や稚魚の育成場を提供するなど貴重な自然空間となっている。また、滞留による洪水リスクの低減や、ヨシなどの植生による水質浄化も期待されている¹⁾²⁾。特に、河川感潮域に形成されるワンドは、潮流の影響などによって水の交換や塩水の浸入など、特異な生息環境を生み出すことから、干潟や砂州と同様に重要な存在として注目されている³⁾。

これまで我が国では低水護岸を設置して直線化する河川改修が多く行われてきた。その結果、流速と水深の分布が単調な空間のみ残り、ワンドのような多様な

空間を有する止水域は減少し、そこに棲む生物の生息環境も脅かされるようになった。1997年の新河川法制定以来の河川整備⁴⁾では、治水・利水・環境の多機能を同時に満足することが求められるようになったが、一つの機能を一つの構造物で担うことは難しいとされている。河川のさまざまなかたち、流れと土砂と地形、植生からなる河川そのもので多くの機能を担っている状態、これを河川景観と呼ぶが、その管理・整備を行っていくという考え方が重要になっている。ワンドの保全・創造には、まずワンドの有する環境機能について把握する必要がある、これまでも多くの観測事例が報告されているが、十分な知見が得られるには至っていない。

このような社会的背景を踏まえ、本研究では、加古川河口右岸に形成されるワンドを対象に、ワンド内の物理環境、特に間隙水中の塩分変動特性についての実態把握を目的とした現地調査を行った。

2. 調査方法

2.1 調査地点 加古川は総延長96km、流域面積1730km²に及ぶ県下最大の一級河川であり、瀬戸内海に流れ込む。河口付近には絶滅危惧Ⅱ類に指定されてい

* 専攻科 都市工学専攻

** 都市工学科 准教授

るハクセンシオマネキ (*Uca lactea*) が生息し、渡り鳥の飛来地としても貴重な自然空間となっている。また、河川敷に咲く菜の花の一大群落は播磨の春の風物詩であり、ウインドサーフィンのメッカとしても有名な場所である。

本研究では、図-1 に示す加古川河口右岸に形成されるワンドにおいて、以下の現地調査を行った。

2.2 連続モニタリング調査 中期的な間隙水中の塩分挙動の把握を目的として、加古川本川・ワンドに簡易的な観測井を設け、水位・塩分(河床から約0.5m深)の計測を1分間隔で行った。また、河床のごく表層付近の塩分挙動の把握を目的として、水温塩分計を直接埋設する方法でも同様の計測を行った。なお、計器設置時の人的攪乱の影響をなるべく抑えるため、各計測は計器設置から1時間後に開始している。

2.3 1 潮汐間集中調査 河川感潮域は潮汐流の浸入により複雑な物理環境を形成する。そこで、潮汐流がワンドに浸入することにより、塩分や流速がどのような挙動を示すのかをより詳細に把握するため、水位

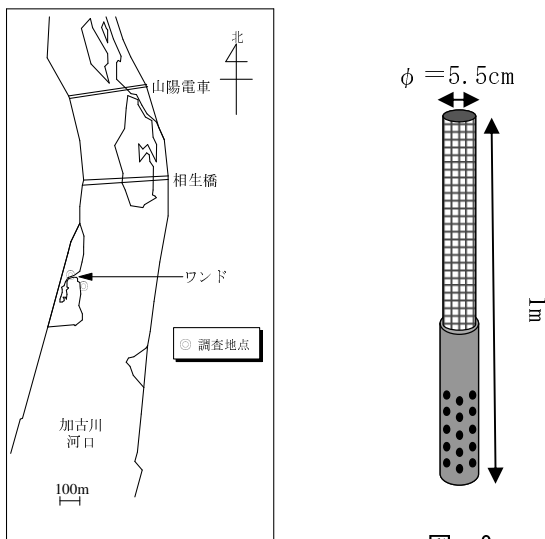


図-3
観測井概要図

図-1 加古川河口図



図-2 計測器設置点

表-1 各計測器の名称

計測項目	計測器名称
水位	HOB0 U20
塩分	OMPACT-CT
流速	INFINITY-EM
風向・風速	KADEC21
表層流	GPSmap 60CSx
波高	COMPACT-WH

{ワンド・みお筋とも計測間隔 1sec}, 塩分{ワンド・みお筋表層・みお筋底層/1sec}, 流速{みお筋/0.5sec}, 風向・風速{ワンド地上 5m/1sec}, 表層流{ワンド表層/10sec}, 波高{本川/0.25sec}の計測を行った。図-2 に加古川河口右岸における計測器設置点を、表-1 に使用した計測器の名称を示す。

2.4 観測井の諸元 図-3に観測井の概要図を示す。観測井には直径 5.5cm, 長さ 1~2m の塩化ビニール製のパイプを用い、地中に打設した。底部には、間隙水が浸透するように複数の穴を設けた。また、パイプ内への砂の侵入を防ぐため、パイプ中にはメッシュを巻いた⁵⁾。

2.5 表層・底層の塩分測定方法 表層塩分は水位変化に対応できるようにみお筋上にポールを立て、水位に応じて浮きを昇降するようにした。塩分計をこの浮きの底面に吊るし、表層から約 20cm 深で計測を行った。底層塩分はポール付近の河床直上で計測を行った。

3. 調査結果

3.1 各地点の試料 底質は本川・ワンドとも地表から約 30cm 地点で採取した。粒度試験(JIS A 1204)⁶⁾により粒径加積曲線を作成し中央粒径 D_{50} を求めた。均等係数 U_c ・淘汰係数 S_0 については式(1), (2)により求めた。

$$U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$S_0 = \sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}} \quad (2)$$

ここに D_{60} : 60%通過粒径

D_{10} : 10%通過粒径

D_{75} : 75%通過粒径

D_{25} : 25%通過粒径 である。

また、定水位透水試験(JIS A 1218)⁶⁾により透水係数 k を算出した。加古川本川とワンドの底質特性値(表-2)を比較すると底質中央粒径には大きな差が見られる。均等係数・淘汰係数から加古川本川は粒径が均質化しているのに対し、ワンドでは粒径が不均質で粒度分布幅が大きいものとなっていることがわかる。また、ワ

表-2 各地点の試料

	加古川本川	ワンド
中央粒径 D_{50} (mm)	0.24	0.041
均等係数 U_c	3.11	17.86
淘汰係数 S_0	1.54	2.17
透水係数 k (cm/s)	2.5×10^{-2}	2.86×10^{-4}

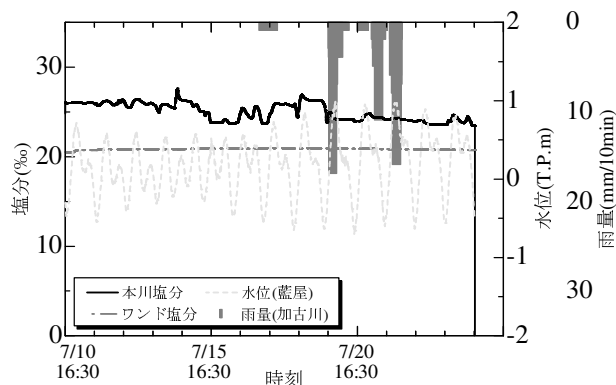


図-4 塩分の経時変化(連続モニタリング)

ンドは加古川本川に比べ、底質の透水係数が非常に小さいことがわかった。

3.2 連続モニタリング調査 図-4に2009年7月10日から7月24日の塩分の経時変化を示す。この期間、ワンドでの観測井内の塩分は降雨・潮汐流の影響を受けず、塩分が一定に保たれている。加古川本川においては塩分の変化が見られるが、降雨が始まる前にもわずかに塩分が低下しており、通常の降雨によるワンド内および河川底質の間隙水の塩分変化の影響は小さいと考えられる。

次に、本川における潮汐流の影響を考慮するため、塩分・水位の時系列データにおいて10分間平均での変化量を調べたところ、一次近似式は

$$\Delta S = 0.3261\Delta H - 0.0012 \quad (3)$$

となった。ここに、 ΔS :塩分変化量、 ΔH :水位変化量である。相関係数は $R=0.20$ と低く、水位変化と土壌間隙水中の塩分変化の間に有意な相関は見られなかった。この原因として、観測点が河口から1km地点であるために、沖側からの塩分供給が卓越していることが考えられる。

土壌間隙水中の塩分変動については、特にワンド内で見られなかったため、次に水温塩分計を地盤内に直接埋設することにより、表層近くの間隙水塩分の計測を行った。図-5に2009年8月6日から8月11日の塩分の経時変化を示す。本川の塩分は降雨によって塩分が減少している。しかし、ワンドについては、今回の観測でも塩分変動が見られず、ワンドの間隙水中の塩分はこの程度の降雨に対しては常に一定に保たれる

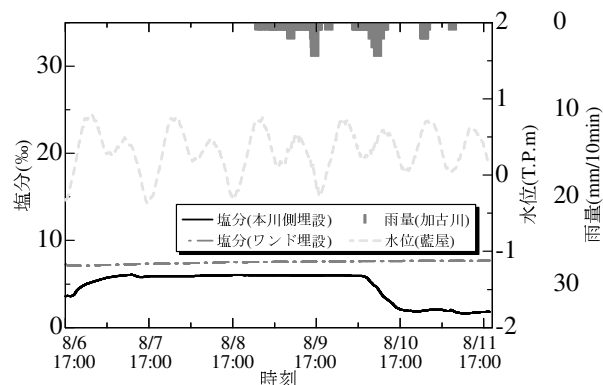


図-5 塩分の経時変化(連続モニタリング)

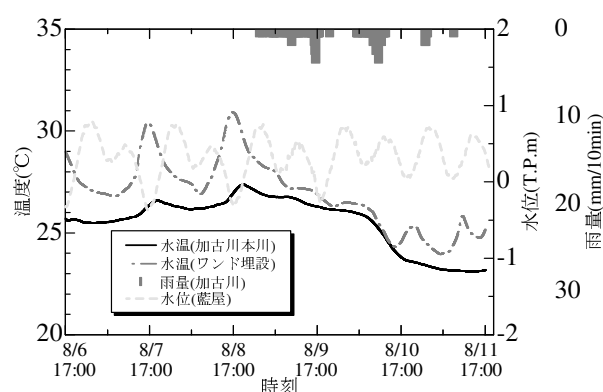


図-6 水温の経時変化(連続モニタリング)

ということが確認できた。表-2よりワンドの透水係数は加古川本川のものと比べて非常に小さく、ワンド内の底質においては、降雨や潮汐流による間隙水の交換が起こりにくいと考えられる。

図-6に2009年8月6日から8月11日の水温の経時変化を示す。ワンドでは日較差が3~4°Cであるのに対し、本川は1~2°Cの変動しか見られず、加古川本川はワンドに比べて水温変化が小さいことがわかる。各地点の水温に注目すると、干潮時に最大になり、水位が上昇すると水温が下がっている。つまり、潮汐による影響を受けていることがわかる。本川側はワンドよりも地盤高が低く、干出時間が短いためそれほど大きな変動は見られなかったものと考えられる。ただし降雨時には、干潮時でも日射による加熱がないため、両者とも温度の変動は見られない。

3.3 1 潮汐間集中調査 [河川水中の塩分挙動]

図-7に2010年8月29日、9月11日の河川水中の塩分挙動を示す。両日とも水位と塩分の連動する様子が見られ、ワンド内に潮汐流の浸入が確認できる。河川水降下による塩分の減少は全体図(図-7上)では確認しにくいので、拡大すると(図-7下)、9月11日13時前後においてわずかな塩分の減少が見られる。また、

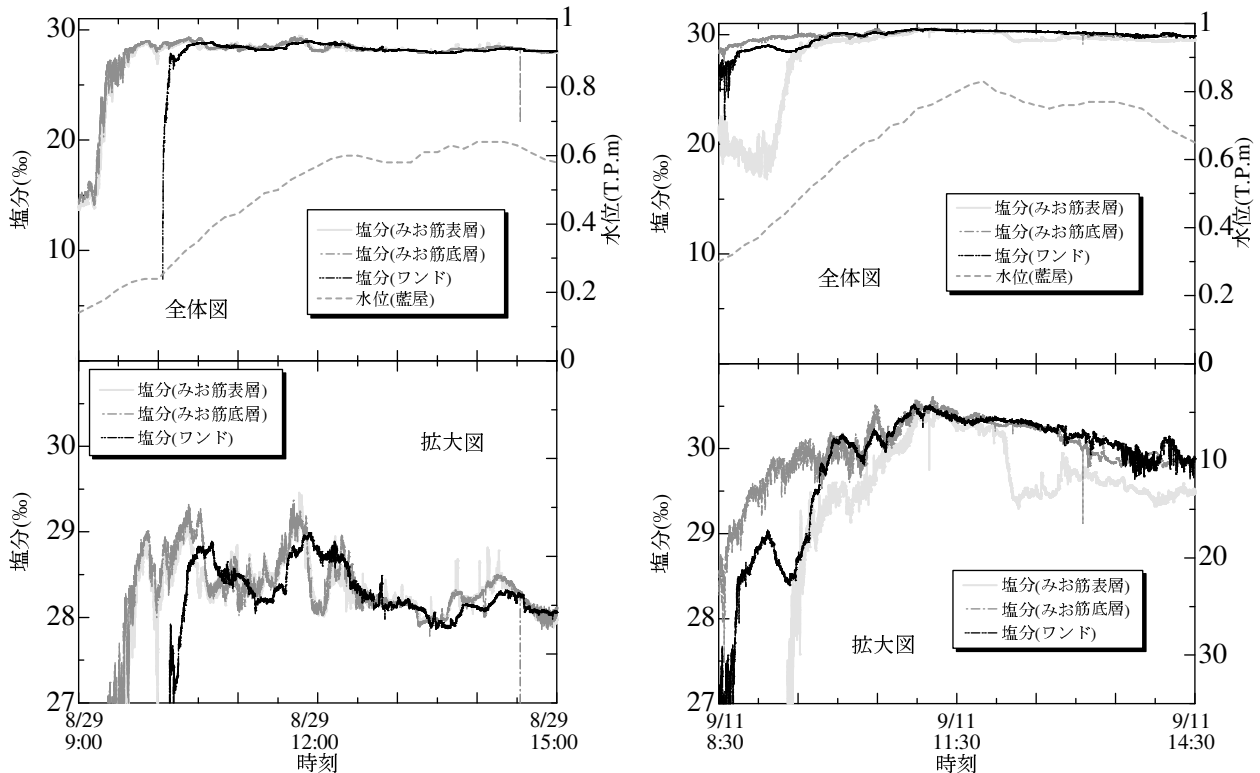


図-7 河川水中の塩分挙動

みお筋の表層と底層で塩分差を確認したところ、8月29日においては、ほとんど差はなく9時から11時にかけてわずかに表層の塩分が小さい程度に留まった。9月11日においては、9時から11時にかけて表層と底層で大きな塩分差が生じており、8月29日と比較すると塩分差が顕著であった。ただし、水深が十分ではなかったため、塩水楔の形成によるものとは考えにくく、底層からの高塩分水の供給によるものと思われる。

ワンド内での塩分は河床上で計測したため、満潮付近以降はみお筋底層のものと似た塩分挙動を示すが、それ以前ではタイムラグが生じている。これは、干出時にワンド内のたまりの残留した水が混合するためであると考えられる。

【表層流移動】 図-8に浮きによる表層流の観測結果を示す。8月29日においては、一定の場所で動かずに、14:45頃から調査対象としているワンドへと進入し、河川本流へと流れず滞留した。9月11日においては、上げ潮時はみお筋からワンド奥へと進入し、一定の場所で動かなくなり、水位が下がり始める14:30頃から調査対象とするワンドへと動き、その場で留まった。これらの結果から、上げ潮時はみお筋に沿って遡上するような移動が確認できた。一方、下げ潮時はワンド奥から河川の方へと流れるが、一度ワンド内に進入すると滞留する傾向が強いことがわかった。

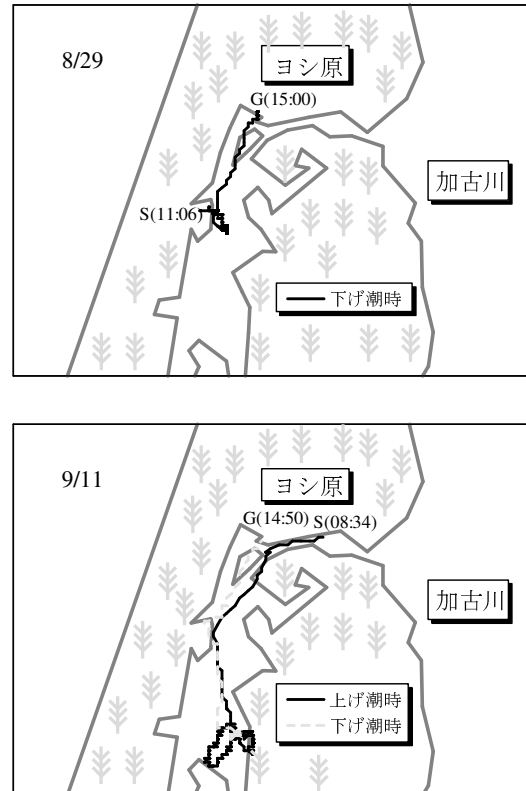


図-8 浮きによる表層流の観測結果

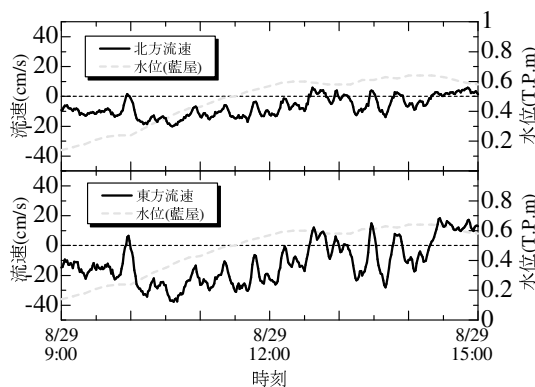


図-9 流速時間変化(みお筋)

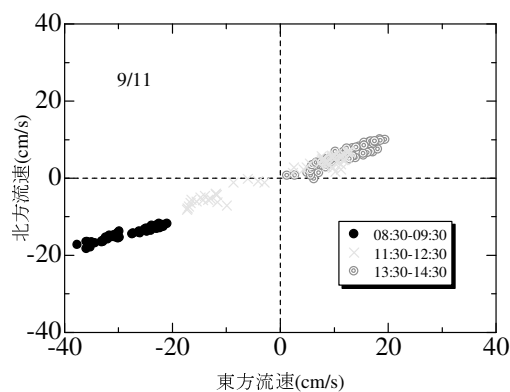
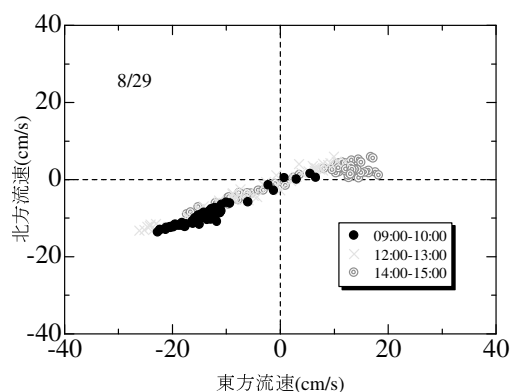


図-10 時間別の出現流向流速

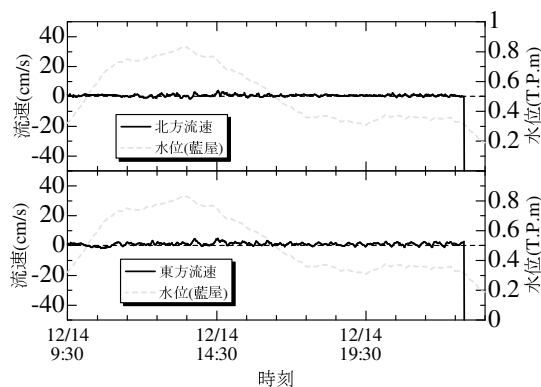


図-11 流速時間変化(ワンド)

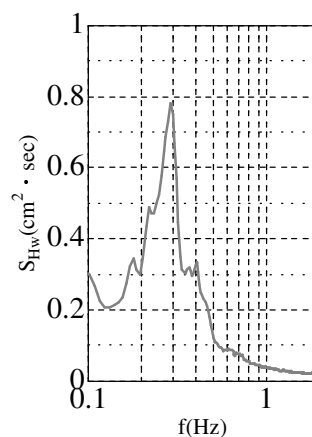


図-12 波高データのスペクトル解析結果

表-3 波の分類

種類	周期
表面張力波	0.07 秒以下
重力波	数秒から 20 秒
長周期波	30 秒程度

〔みお筋流速〕 図-9 にみお筋に設置した流速計のデータを示す。8月29日、9月11日ともに、上げ潮時では流速が速く、満潮付近になると流速が遅くなる傾向が見られ、みお筋上では潮汐による流速変化が見られることがわかる。図-10 に時間別出現流向流速の変化を示す。上げ潮時は南西方向へと流れる傾向が強いが、満潮付近では卓越した流れの方向は見られない。下げ潮時には上げ潮時と逆方向の流れが卓越しており、このことから上げ潮時には本川からワンドへの潮汐流が卓越し、下げ潮時はワンドから本川への流れが卓越する傾向がうかがえる。

図-11 に過去に得られたワンド内の流速(2008年12月14日)を示す。図-9と比較すると、みお筋の最大流速は約45cm/sであるのに対し、ワンド内での最大流速は約7cm/sと緩やかな流れとなっている。この時のみお筋上の流速は計測できていないが潮位変化

を比較すると 2008 年 12 月 14 日の方が 2010 年 8 月 29 日、9 月 11 日より大きくなっており、流速も速かったものと予想される。その状況下においても、ワンドの流速は緩やかであったことから、ワンド内の流動はみお筋に比べても静穏であると言える。

【遡上する波浪】 図-12 に波高計データをスペクトル解析したものを、表-3 に周期による波の分類⁷⁾を示す。周波数 f は 0.25~0.3Hz で卓越していることから、波の周期は 3~4 秒となる。表-3 から、この範囲は主に重力波に分類される。重力波は風波とうねりによるものが主であり、加古川河口は風の影響が強く、遡上する波は風波が卓越していることがわかった。

4. まとめ

加古川河口の本川・ワンドの物理環境を現地調査することにより以下のことがわかった。

- ・土中間隙水中の塩分変動を把握するために、本川とワンドで底質表層から 30cm 地点と底質表層付近で計測したところ、ワンドにおいてはいずれの深さにおいても塩分の増減はほとんど見られなかった。また、台風などの出水時も塩分の減少は見られず、安定した塩分場を形成していることがわかった。
- ・一方、本川では、底質表層から 0.5m 地点では降雨による間隙水中の塩分変動が確認できなかったが、底質表層付近では台風による出水で塩分の減少が確認できた。
- ・1 潮汐間集中調査では、表層と底層の塩分は似た変動傾向を示すが、干出時のワンド内のたまりの残留水の影響を受けるため、わずかに底層の塩分が濃くなる傾向が見られた。
- ・ワンド内の流動場の傾向として上げ潮時は河川から

みお筋を経てワンド内へと流入するが、下げ潮時はこれと逆方向の流れが卓越するのではなく、局所的な風の影響を受けて、ワンド奥へと滞留する向きの流れが卓越していた。

- ・得られた波高計のデータをスペクトル解析すると、周期が 3~4 秒の波が卓越しており、遡上してくる波の多くは風波であることがわかった。

【参考文献】

- 1) 有田正光, 池田裕一, 中井正則, 中村由行, 道奥康治, 村上和男: 水圏の環境, pp. 180-198, pp. 276-311, pp. 324-371, 東京電機大学出版局, 1998.
- 2) (財)河川環境管理財団 大阪研究所: わんどの機能と保全・創造~豊かな河川環境を目指して~, pp. 151-156, pp. 177-206, 1999.
- 3) 湯谷賢太郎, 内田哲夫, 佐々木寧, 田中法夫: 潮流流および洪水流による人工ワンドへの土砂流入と環境への影響, 水工学論文集, 第 52 巻, pp. 697-702, 2008.
- 4) 国土交通省河川局 <http://www.mlit.go.jp/river/>
- 5) 辻本哲郎: 河道砂州の水・物質循環機構と植生の影響, 河川整備基金助成事業, pp. 1-29, 2004.
- 6) 土質試験—基本と手引き— (第一回改訂版), pp. 27-38, pp. 91-102, 社団法人 地盤工学会, 2001.
- 7) 平山秀夫, 辻本剛三, 島田富美男, 本田尚正: 環境・都市システム系 教科書シリーズ 9 海岸工学, pp. 19-22, pp. 80-98, コロナ社, 2003.

活性汚泥の減圧浮上濃縮に関する研究

奥友晃*, 宮明大輝**, 澤井正和***, 林公祐****, 鈴木隆起*****, 赤対秀明*****

Study on Decompression of Flotation Thickening of Activated Sludge

Tomoaki OKU*, Daiki MIYAAKE**, Masakazu SAWAI***, Kousuke HAYASHI****,
Takayuki SUZUKI***** and Hideaki SHAKUTSUI*****

ABSTRACT

In the decompression method, the sludge solids are floated and thickened with the fine air bubbles generated by decompressing the sludge. The disposal coast of this method is lower compared with other methods, however, the processing efficiency is not good. In the present study, in order to improve the processing efficiency of decompression method, the method by supplying the sludge after decompression in the test tank is investigated instead of the method by supplying the sludge before decompression as existing method. As the results, it is found that the good processing was confirmed (1) in the test tank 16 kPa~51 kPa ata in "the sludge supply after decompression", (2) 21 kPa~ 51 kPa ata in "the sludge supply before decompression". The height of supernatant liquor increases with time progress, dramatically, and close to the certain height in both methods. The completion time of processing by "the sludge supply after decompression" is shorter than "the sludge supply before decompression" in the range of $P_v = 21 \text{ kPa} \sim 33 \text{ kPa}$. On the other hand in the range of more than $P_v = 33 \text{ kPa}$, it is opposite. Finally, the final thickened sludge thickness for total height is 16 % of supernatant thickness.

Keywords : sludge, decompression, thickened sludge, microbubble

1. 緒言

一般に、家庭から排出される下水は地域ごとの下水処理場へ集められ、沈殿、生物反応、固液分離等の工程を経て処理される。分離された固形物である汚泥は脱水後、焼却、埋め立て、コンポスト化などの処理が行われる。固液分離の工程では、汚泥の含水率を 2~3% 程度濃縮すると、汚泥の容積は 1/3~1/4 になる⁽¹⁾ため、固液分離の工程以降の施設容量を小さくできる。このため、固液分離の工程において汚泥を効率よく濃縮・分離することは、処理コスト面から非常に重要である⁽²⁾。

汚泥の濃縮法の一つである浮上濃縮法は、汚泥に気泡を付着させて見かけ密度を水よりも小さくし浮上分離濃縮する方法であり、効率や経済性に優れているために、広く用いられている。

浮上濃縮法は、加圧浮上濃縮法、常圧浮上濃縮法、減圧浮上濃縮法に分類される。加圧浮上濃縮

法⁽¹⁾は、加圧状態で溶解した空気を大気圧に開放することで $100 \mu\text{m}$ 以下の超微細気泡の形で気泡化させて固形物に付着させる。また、常圧浮上濃縮⁽¹⁾は、薬品を添加することにより気泡と固形物を電気化学的に吸着させる。これらに対して、減圧浮上濃縮法は汚泥を含む容器内を減圧して、汚泥中に微細気泡を発生させる方法であるが、処理能力が低いため、非常に小規模な污水处理場でわずかに実績がある程度である。しかし、容器内上部の空間を減圧するだけで良いため、同規模における他の方法よりも比較的小さな動力で分離処理ができる。そのため処理能力が改善され中規模以上の下水処理場へ適用できれば、大幅なコスト削減が期待できる。これまで、給泥した容器内を減圧する従来の方法（減圧前給泥法）についての汚泥濃縮特性が明らかにされている⁽³⁾。一方、この減圧前給泥法に対して、容器を減圧した後に汚泥を急激に供給する減圧後給泥法により、既存の濃縮法より汚泥濃縮特性の改善が見込めることが提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、本方法による汚泥の濃縮特性については明らかではない。

そこで本研究では、減圧浮上法の中でも減圧後給泥法に着目し、実験的に汚泥の浮上状況、汚泥が排除された脱離液高さ、濃縮完了時間などの濃

* 専攻科 機械システム工学専攻
** 機械工学科
*** テクノプラン
**** 神戸大学 助教
***** 機械工学科 講師
***** 機械工学科 教授

縮特性を明らかにすることを目的とする。また、比較のために減圧前給泥法についても濃縮特性を検討する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置 Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。実験装置は(1)試験部、(2)減圧部、(3)給泥部からなる。

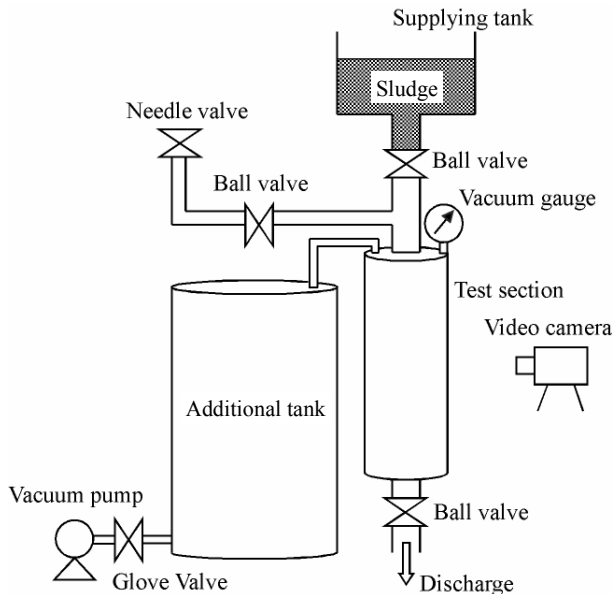


Fig. 1 Experimental apparatus

(1) 試験部 Fig. 2 に試験部を示す。内径 120 mm、厚さ 5 mm、高さ 500 mm、容量 6.6 L の透明アクリル管を用いた。フランジで上下から棒ねじ(同一方向 8 箇所)で挟み込み、機密性を高めた。フランジは、厚さ 10 mm のアクリル板を使用し、上部のフランジには給泥用の塩ビ管(φ40 mm)、真空ポンプの空気吸入用のニップル、真空計(長野計器 AC10-133)を取り付けた。下部の穴は排泥用に塩ビ管(φ65 mm)を接合した。また、配管は塩化ビニル管の VP 管を使用した。給泥・排泥ラインにはボールバルブを使用し、大気開放ラインにはニードルバルブとボールバルブを組合わせた。汚泥の濃縮状況はビデオカメラ(Sony, DCR-PC 3000, 25 fps)により撮影した。

(2) 減圧部 試験部内の減圧には真空ポンプを用いた。真空ポンプは、佐藤真空株式会社 DS-20 II を使用した。排気速度は 20 L/min、到達圧力は 100 Pa である。

Fig. 3 に補助真空タンクを示す。アクリル管(内径 240 mm、厚さ 5 mm、高さ 950 mm、容量 43 L)をアクリル板(上部)と鉄板(下部)で挟み、ボルトで固定した。アクリル管側面に試験部と真空ポンプにシリコンホースを繋ぐため、ニップルを 2 箇

所取付けた。補助真空タンクの効果により試験部内圧力は実験中ほぼ設定値一定に維持され、汚泥の発泡による圧力の回復を防ぐことができる。

(3) 給泥部 試験部上部に給泥タンク(最大容量約 20 L)を設置した。ポリ容器に採取した汚泥をタンク上部より供給する。

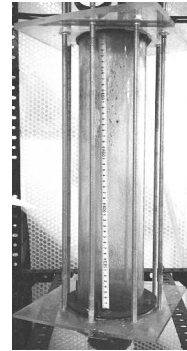


Fig. 2 Test section



Fig. 3 Additional tank

2.2 実験方法 以下に減圧後給泥法の実験手順を示す。

- ① バルブの開閉の確認を行う。
給泥バルブ：閉 大気開放バルブ：閉
排泥バルブ：閉 真空ポンプ用バルブ：開
- ② 真空ポンプを作動し、設定圧力まで圧力を下げ、真空ポンプ用グローブバルブを閉める。
- ③ 上部の汚泥タンクに汚泥(約 8 L)を入れる。
- ④ 給泥バルブを開き、減圧槽に給泥する。給泥量が多いと、汚泥タンクの水面まで旋回流が発生し、空気を吸い込むため注意を要する。
- ⑤ 高さ 350 mm で給泥バルブを閉じ、密閉状態にする。
- ⑥ 浮上状況をビデオカメラで撮影する。
- ⑦ 汚泥濃縮が完了後、大気開放バルブを開ける。
- ⑧ 槽内圧力が大気圧になったのを確認後、排泥バルブを開けて排泥する。

なお、減圧前給泥法では、減圧槽内が大気圧状態で高さ 350 mm まで給泥した後、手順①→②→⑥→⑦→⑧の順に行う。

2.3 実験条件 試験部内の圧力 P_v は 11 ~ 71 kPa (絶対圧力)で実験を行った。また、実験に用いた汚泥は神戸市内の下水処理場における最終沈殿池より直接採取した活性汚泥で、汚泥採取時の温度は 22.5 °C ~ 25 °C、MLSS(Mixed Liquor Suspended Solid)は 2120 ~ 2260 ppm、DO(Dissolved Oxygen)は 2.4 ~ 2.8 ppm であった。ここで、MLSS とは⁽⁶⁾、混合液中の浮遊物質を示す微生物量を中心にした量である。単位は 1 L 中の乾燥重量(mg)である。DO とは⁽⁷⁾、水中に溶解している分子状酸素量のことである。酸素量の溶解量

は気圧、水温などに影響される．なお、汚泥の性状が変化しないよう、採取日のみ実験に使用した．減圧後給泥法、減圧前給泥法の実験時における汚泥条件は、減圧後給泥法：MLSS=2260 ppm，DO=2.8 ppm で、減圧前給泥法：MLSS=2130 ppm，DO=1.6 ppm であった．

3. 実験結果および考察

3.1 浮上濃縮の状況 Figs. 4(a) ~ (f)に減圧後給泥法による、試験部内圧力 P_v に対する浮上濃縮状況を時間ごとに示す．なお、試験部内圧力は絶対圧であり、それぞれ $P_v = 11 \sim 71$ kPa の場合である． $P_v = 11$ kPa (Fig. 4 (a))の場合、汚泥は浮上しているものの、脱離液の透明度は低い．これは、 P_v が非常に低いため、汚泥に対して気泡径が大きく、気泡が汚泥粒子に付着し難いと考えられる．また、給泥中に、ほとんど発泡が終わってしまい、汚泥中に溶解している空気量が減少しているため、汚泥の浮上分離濃縮が活発に行われなかったことも考えられる．今後、これらを定量化するために、汚泥の粒径(以下、汚泥径)や気泡径および発泡量の計測を時間ごとに行い、検討する必要がある． $P_v = 16 \sim 51$ kPa (Figs. 4(b) ~ (d))の場合、汚泥中に微細気泡が発生することで、時間の経過とともに濃縮層厚さが減少、すなわち汚泥が濃縮されている様相が確認できる．脱離液も透明度があり浮上分離が良好に行われていることが分かる． $P_v = 61$ kPa (Fig. 4(e))の場合、汚泥は時間の経過とともに一旦、重力沈降を起こしているが、その後、底から浮上している．これは、 P_v が比較的高い場合には、汚泥の浮上に必要な発泡量に達するまで時間がかかるため、一旦、重力沈降したと考えられる． $P_v = 71$ kPa (Fig. 4(f))の場合、汚泥は浮上せず、重力沈降を起こしている．これは、汚泥が浮上に必要な発泡量を得られなかったためであると考えられる．

次に Figs. 5(a) ~ (e)に減圧前給泥法による試験部内圧力 $P_v = 16 \sim 51$ kPa における浮上濃縮状況を示す．圧力が低い場合($P_v = 16$ kPa, Fig. 5(a))には、時間の経過とともに一旦重力沈降を起こした．これは、減圧後給泥法での P_v が低い場合と同様に、発生した気泡が汚泥粒子に対して大きいとすれば、気泡の浮上速度が増加し、吸着性能が低下したと考えられる．また、 $P_v = 21 \sim 51$ kPa (Figs. 5 (b) ~ (e))の場合、時間の経過とともに、汚泥は比較的良好に浮上分離濃縮していることが確認できるが、脱離液の透明度が減圧後給泥法に比べやや劣っている．

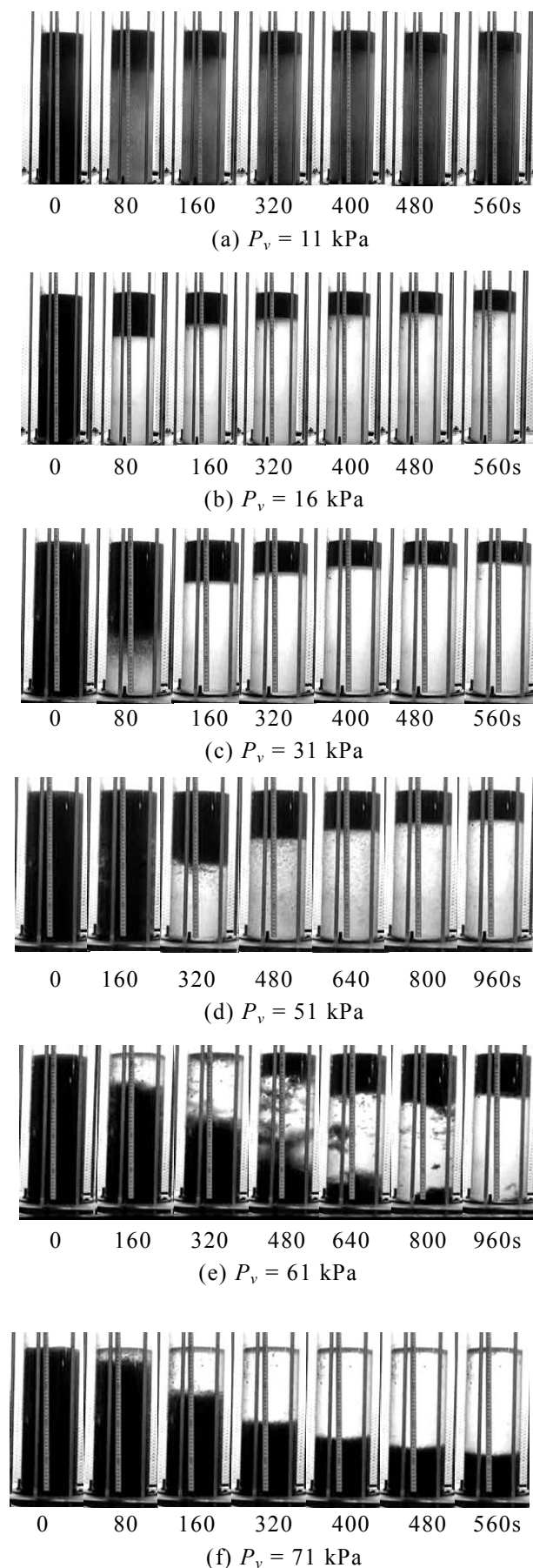


Fig. 4 Process of thickening sludge
(The sludge supply after decompression)

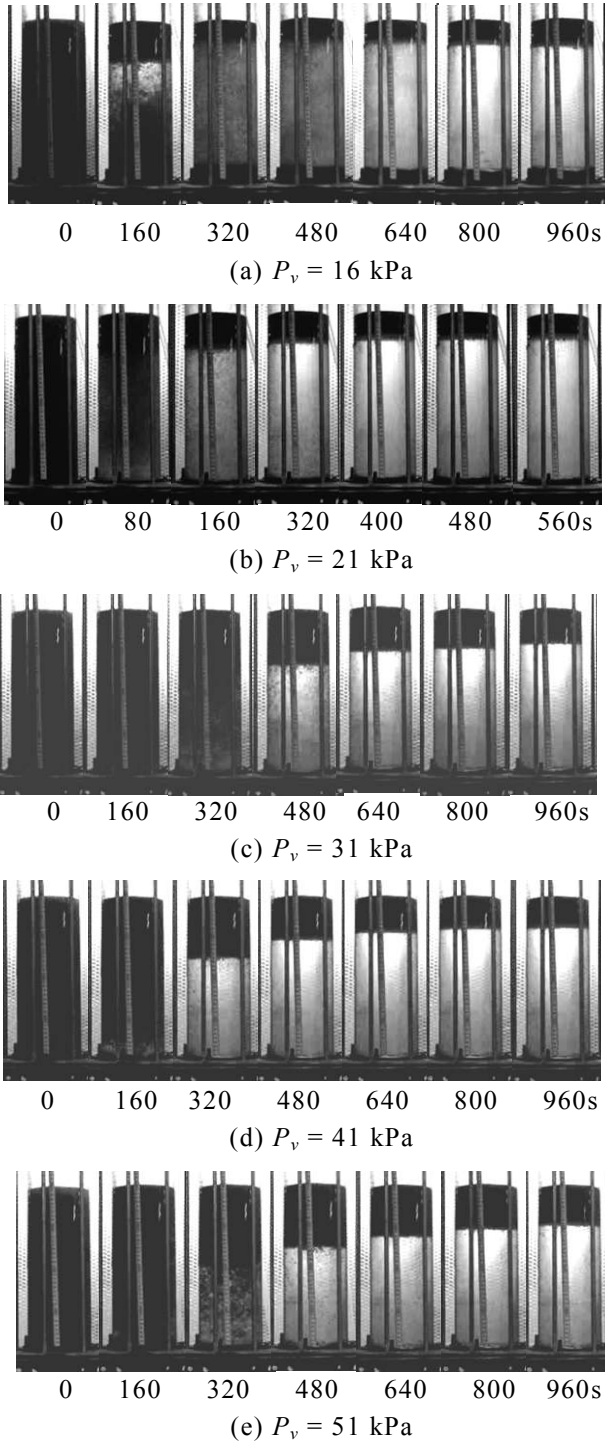


Fig. 5 Process of thickening sludge
(The sludge supply before decompression)

3.2 無次元脱離液高さ 給泥完了直後の容器底部から汚泥の最上部までの高さを初期汚泥高さ H_0 、分離途中の容器底部から脱離液の最上部(濃縮汚泥の最下部)までの高さを脱離液高さ H とする。また、 $H_0 - H$ を濃縮層厚さ H_c 、 H/H_0 を無次元脱離液高さ H_s^* 、 H_c/H_0 を無次元濃縮層厚さ H_c^* 、20 秒毎の H_c^* において 3 点の変化率が 1% 以内に収まった最終的な無次元濃縮層厚さを $(H_c^*)_b$

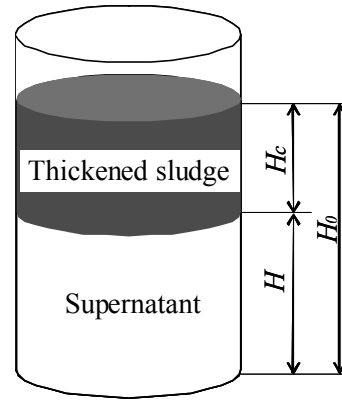


Fig. 6 Definition under thickening

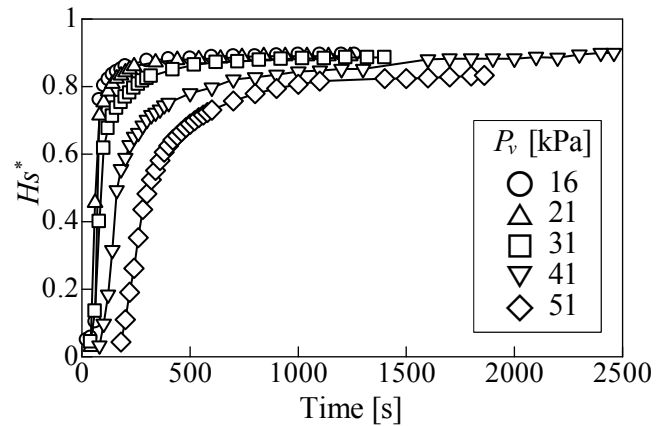


Fig. 7 Height of supernatant liquor
(Sludge supply after decompression)

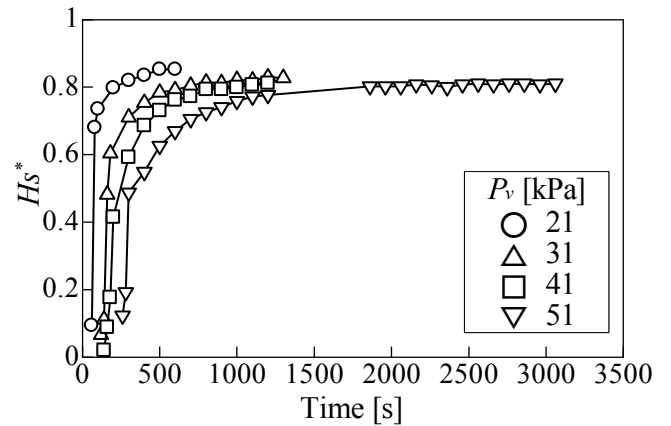


Fig. 8 Height of supernatant liquor
(Sludge supply before decompression)

と定義する。なお、本節以降では良好に浮上分離濃縮した $P_v = 16 \sim 51$ kPa の場合の結果のみを用いる。

3.2.1 圧力による影響 Figs. 7, 8 に減圧後給泥法、減圧前給泥法それぞれの無次元脱離液高さ H_s^* の時間変化を示す。時間は汚泥の供給を完了し、

ボールバルブを閉じた直後から測定した。いずれの場合も、浮上分離濃縮の定性的変化は同様であり、 H_s^* は時間の経過とともに急激に増加し、その後緩やかに増加しほぼ一定となる。これは浮上分離濃縮の変化は、汚泥中に溶解している気体の発泡量に依存し、気体の発泡が急激に起こった後、その後減少するためであると考えられる。また、 P_v によらず最終的な H_s^* は比較的近い値となっている。なお、 H_s^* が急激に増加するまでに時間遅れが存在するが、これは汚泥供給直後の減圧槽内の汚泥は乱れた状態であるため、気泡が汚泥粒子に付着し難かったことが、汚泥浮上の時間遅れの原因であると考えられる。

以上をまとめると、汚泥の浮上が起こる P_v の範囲内であれば、汚泥は減圧されると微細気泡の発泡が起こり、急激に脱離液高さが増加する。そして、濃縮が行われ緩やかに脱離液高さが増加した後、濃縮完了となり、最終的な無次元脱離液高さは試験部内圧力によらず、ある値の近傍(この場合、 $H_s^* = 0.8$)に近づくと言える。

3.2.2 給泥法の影響 Fig. 9 に給泥法の違いによる無次元脱離液高さ H_s^* を示す。なお、それぞれの給泥法で使用した汚泥は採取日が異なるため、第2・3節で述べたように汚泥条件が異なり、定量性は有していない。

2つの給泥法を比較すると、 H_s^* の変化は定性的に同じであることが分かる。また、同一圧力において、減圧後給泥法の濃縮時間や脱離液高さなどの濃縮特性は減圧前給泥法よりも良好であることが確認できる。そのため、減圧後給泥法の有効性が示唆されるが、汚泥条件が一致していないため、今後、同条件において、定量的に比較・検討する必要がある。

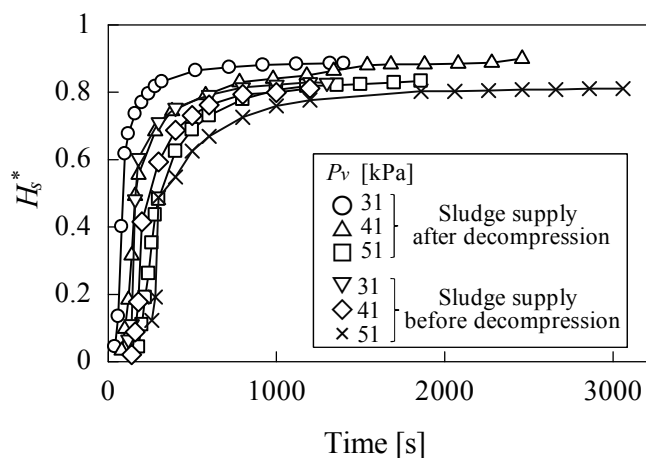


Fig. 9 Comparison of height of supernatant liquor between the sludge supply after decompression and the sludge supply before decompression

3.3 濃縮完了時間 Fig. 10 に両給泥法における各試験部内圧力 P_v に対する濃縮完了までの時間を示す。なお濃縮完了の定義は、時間経過に対する無次元脱離液高さの変化が、最終測定点3点において、その変化率が1%以内となるまでの時間とした。なお、減圧前給泥法の $P_v = 21$ kPa 未満に関しては、重力沈降が起こったため測定できなかった。

3.3.1 圧力の影響 Fig. 10 において圧力による濃縮完了時間の影響を比較する。いずれの給泥法の場合も、濃縮特性の様相は同様であり、試験部内圧力が低いほど濃縮完了時間は短くなった。これは、試験部内圧力が低いほど、汚泥の発泡量が多くなることや、給泥後から発泡が起こるまでの時間が短いためであると考えられる。

3.3.2 給泥法の影響 Fig. 10 において給泥法による濃縮完了時間の影響を比較すると、濃縮完了時間が約 $P_v = 33$ kPa 未満では減圧後給泥法の方が短く、また、約 $P_v = 33$ kPa 以上では減圧前給泥法の方が短いことが確認できる。また、本実験においては、減圧前給泥法において $P_v = 21$ kPa の場合が最も短いことが確認できた。これらのことより、濃縮完了時間が短い最適な給泥法を選択する場合には、圧力に応じて選択する必要があることが考えられる。

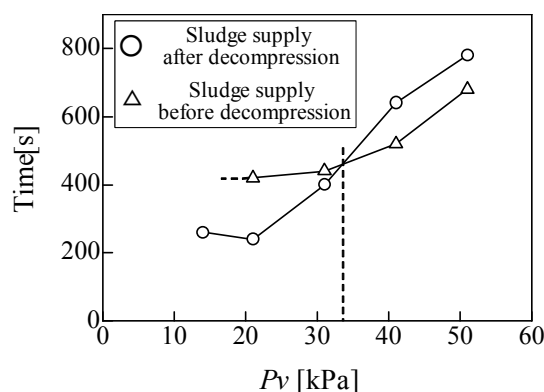


Fig. 10 Completion time of thickening

3.4 最終無次元濃縮層厚さ Fig. 11 にそれぞれの給泥法に対する最終無次元濃縮層厚さ $(H_c^*)_b$ を示す。減圧前給泥法においては、試験部内圧力によらず、 $(H_c^*)_b = 0.16$ 程度であった。一方、減圧後給泥法においては、試験部内圧力 $P_v > 51$ kPa では、同様に $(H_c^*)_b = 0.16$ 程度であることが確認できる。しかし、 $P_v < 51$ kPa では、 $(H_c^*)_b = 0.10$ 程度であり、急激に $(H_c^*)_b$ が減少していることが確認できる。発泡量の総量が給泥法や試験部内圧力に関係なく一定であれば、最終濃縮層厚さは、ほぼ同じであると考えられるため、 $P_v > 51$ kPa に

においては妥当な結果であると考えられる。

それに対して $P_v < 51 \text{ kPa}$ で $(H_c^*)_b = 0.10$ となった理由について検討する。減圧後給泥法の場合、Fig. 1 に示すように装置の構造上、汚泥給泥部にはボールバルブを設置し、絞り構造となっている。よって、給泥の際、試験部内外の大きな圧力差により汚泥が急激に試験部に吸込まれ、圧力変化による流速の増加やバルブ部の機械的な衝突に伴い汚泥粒子の細分化したと考えられる。そのため、最終的に浮上した汚泥が密となることで、 $(H_c^*)_b$ は小さくなったと考えられる。よって、汚泥粒子の大きさが同じなら圧力と給泥法によらず、最終無次元濃縮層厚さはほぼ同じになると考えられる。今後、圧力の違いによる汚泥径と気泡径および発泡量について測定する必要がある。

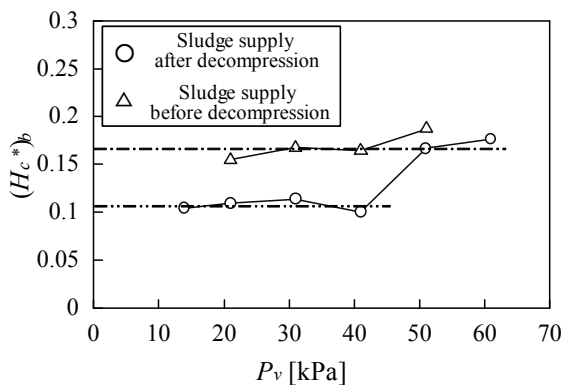


Fig. 11 Completion height of supernatant liquor

4. 結論

本研究では、減圧濃縮法における汚泥の濃縮特性の調査を目的とし、実機の運転に必要な基礎データを得るために、減圧後給泥法と減圧前給泥法により、経過時間ごとの脱離液高さを測定した。その結果、本実験範囲内で以下の結論を得た。

- (1) 本実験装置では、減圧後給泥法の場合、試験部内圧力 P_v が $P_v = 16 \text{ kPa} \sim 51 \text{ kPa}$ では浮上分離濃縮が良好に行われた。また、 $P_v = 11 \text{ kPa}$ より低いと、脱離液の透明度が下がった。逆に $P_v = 71 \text{ kPa}$ より高いと汚泥が浮上しなかった。それに対して、減圧前給泥法の場合、 $P_v = 21 \text{ kPa} \sim 51 \text{ kPa}$ では比較的良好に浮上分離濃縮が行われたが、脱離液の透明度が減圧後給泥法に比べやや劣っている。また、 $P_v = 16 \text{ kPa}$ では時間の経過とともに一旦重力沈降を起こした。
- (2) 無次元脱離液高さは給泥法に関らず急激に増加した後、緩やかに増加し、その後、一定になった。
- (3) 濃縮完了時間は、約 $P_v = 33 \text{ kPa}$ 以下では減圧後給泥法の方が短く、その中でも $P_v = 21 \text{ kPa}$

が最も短い。また、約 $P_v = 33 \text{ kPa}$ 以上では減圧前給泥法の方が短い。よって、圧力に応じて濃縮完了時間が最短となる給泥法を選択する必要があることが分かった。

- (4) 最終無次元濃縮層厚さ $(H_c^*)_b$ は給泥法に関らず、 $(H_c^*)_b = 0.16$ 程度となった。ただし、減圧後給泥法で圧力が低い場合には汚泥が機械的に細分化され $(H_c^*)_b = 0.10$ 程度になった。

参考文献

- (1) 鈴木宏:「下水汚泥処理の維持管理」, 東京都下水サービス株式会社, 2005.
- (2) Takeshi Kumagai, et al.: "Influences of Drugs on the Oxygen Uptake Rate and Biosorption of Activated Sludge", Biological & pharmaceutical bulletin 29(1), pp.183-186, 2006.
- (3) 藤崎一裕:「資源処理技術」, Vol. 46, No.1 pp.19-23, 1999.
- (4) 奥友晃, 澤井正和, 望月修一, 林公祐, 鈴木隆起, 赤対秀明:「汚泥減圧浮上濃縮装置の開発」, 日本混相流学会年会講演会 講演論文集, E334, pp.384-385, 2010.
- (5) 澤井正和, 畠山修一郎, 諸岡隆良, 神澤正樹:「汚泥の処理装置」, 特許第 3782428 号, 2006.
- (6) 三好康彦著:「汚水・排水処理ー基礎から現場までー」, 株式会社オーム社, pp.134-135, 2009.
- (7) タクマ環境技術研究会:「絵とき下水・汚泥処理の基礎」, 株式会社オーム社, pp.113, 2005.

講義映像を利用した学習支援システムの開発

赤松 浩* 本川 正祥**

Development of Education System with Video Image of Lecture

Hiroshi AKAMATSU* Masayoshi MOTOKAWA**

ABSTRACT

Automatic camera tracking system has been developed for taking pictures of lectures. The pictures are able to use for studying at home, in train, or bus by using mobile devices. The camera tracking system is composed of a digital video camera, WiiRemote, Gainer mini, PC, and servo motors. In the system, an IR-LED on a blackboard is detected by WiiRemote and then the position of the IR-LED is send to the PC. After Gainer mini as an I/O module receive a command from the PC, servo motors control a stage of video camera aiming at the IR-LED. Using the system, pictures of lectures can be taken without cameraman.

Keywords: WiiRemote, WiimoteLib, Gainer mini, Visual C#2008, automatic camera tracking system

1. はじめに

スマートフォンやモバイル機器はビジネスマンを中心に普及してきたが、今では高専の学生でも所有できるようになってきた。これらのガジェットは、高解像度のディスプレイと動画再生機能を有しており、学習用ツールとして用いない手はない。本研究では、講義の動画映像を利用し、モバイル機器を用いることで時間と場所に制限されない学習支援システムを開発した。

学習支援システムとは言うものの、実際には単に普段の講義をデジタルビデオカメラで撮影したものである。しかし、講義は教員が言葉と身振りで行うものであり、さらに熱意さえも映像を通して伝えることができる。参考書やノートに比べて“生きた教材”となりうると考えられる。また、半期 15 週あるいは通期 30 週の講義を数年間分蓄積すれば、立派な教材ライブラリが完成し、学年を超えて予習と復習に活用できる。学生の基礎学力向上に役立つはずである。

またこのシステムは学生側だけでなく、教員側にもメリットがある。自身の講義映像を第三者の目で見ることであれば、説明のスピード、明確さ、字の大きさ、あるいはちょっとした癖などを自覚することができる。さらに、ベテラン教員や講義能力の高い教員の講義映像を研究すれば、自身の講義方法の向上につながるはずである。

本論文では、上記のような学習支援システムを実現するための、自動追尾機能を備えた無人カメラシステムのしくみと作製例を述べる。

2. 無人カメラシステム

講義映像の撮影は、市販のデジタルビデオカメラで

行う。ただし、再生機器であるモバイル端末のディスプレイは数インチと小さいため、教室の後ろから黒板の全景を撮影したものでは板書文字を視認することはできない。文字をディスプレイ上で認識するには、カメラをズームアップした状態で撮影する必要がある。

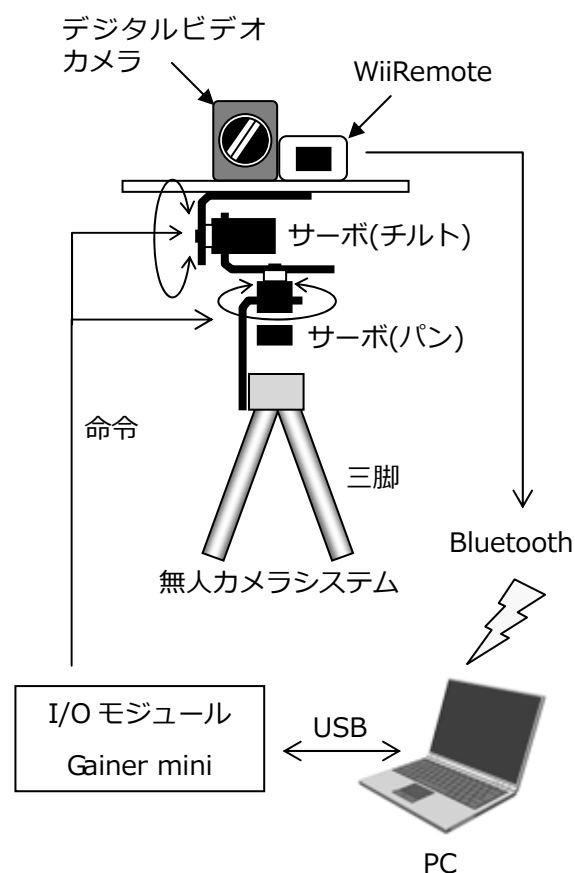


図 1 無人カメラシステムの概略

* 電気工学科 准教授

** 本科 電気工学科



図2 WiiRemote の外観

この場合、教員の動きに対してカメラを上下左右に振らなければならないが、カメラマンを配置せずに自動で行いたいと考えた。

以上の検討から、本研究で採用した無人カメラシステムの概略が図1に示すものである。このシステムは、デジタルビデオカメラ、WiiRemote、二つのサーボモーター、Gainer mini、およびノート PC で構成される。以下に、各パートの説明を行う。

2.1 WiiRemote

WiiRemote とは、任天堂の家庭用ゲーム機“Wii”のコントローラである。これは、内部に加速度センサーと図2に示す赤外線受光センサーを搭載したデバイスである。加速度センサーの搭載により、“振り下ろす”や“水平に保つ”などのより直感的な操作を行うことが可能となった。また、前方からの赤外線を検出し、相対的な位置を計算することで、ガンシューティングのようなポインティング操作も行える。

WiiRemote が得た加速度データおよび赤外線データは、Bluetooth によって通信することができる。したがって WiiRemote は、Wii 本体だけでなくパソコンの入力デバイスとしても使用することが可能なのである。

無人カメラシステムにおいては、WiiRemote を赤外線の検出に利用した。WiiRemote とデジタルビデオカメラは、同一のカメラステージに固定された状態である。黒板にマグネット式の小型赤外線 LED を貼り付け、そこからの赤外線を WiiRemote の受光センサーで受け止める。それにより、赤外線検出窓上での赤外線源の x および y 座標を得ることができる。この座標点が、検出窓の座標原点に移動するようにカメラステージを回転させることで、つねにカメラが黒板上の赤外線源に追従することが可能である。

2.2 サーボモーター

カメラステージをパン・チルト動作させるため、サーボモーター(S03T/2BBMG/JR, GWS 社)を二つ使用した。サーボモーターは特別なものではなく、ビデオカメラと WiiRemote を加算した質量を回転できるトルクがあれば十分である。カメラ台の直下にはチルト用モーター、その下にパン用モーターを設置してある。サーボモーターへの回転の指令は、ノート PC に接続した



図3 Gainer mini の外観

Gainer mini から行わせた。なお、サーボは Gainer mini の MODE8 で制御する。MODE8 にてサーボに命令を送るには、 $p\ n\ x\ x\ *$ というコマンドを入力する。 n はサーボ番号、 xx は 16 進数で指定した目標角度である。ここでは、パンおよびチルトサーボにそれぞれ 6 および 7 番を与えたので、パンサーボを目標値 01 へ向けるには、 $p601*$ と入力すればよい。

2.3 Gainer mini

Gainer(株式会社アールティ)とは、図3に示すようにパソコンと USB にて接続できるフィジカルコンピューティング用 I/O モジュールである。これにより、各種センサーからの情報をパソコンに取り込んだり、パソコンからアクチュエーターの制御を行うことが可能である。本実験で用いたものは、Gainer の小型版である Gainer mini である。

Gainer mini の出力ポートには前述のパン・チルト用サーボモーターが接続されている。WiiRemote からノート PC へ送信された赤外線源の情報を処理し、モーターを駆動する信号が Gainer mini と介して二つのモーターに送られる。Gainer mini を操作するプログラムは、マイクロソフトの Visual C# 2008 を利用した。

2.4 ライブラリ WiimoteLib

Visual C#2008 にて WiiRemote を操作するには、専用のライブラリが必要である。本研究では、Brian Peek 氏による WiimoteLib を使用した⁽¹⁾。これは、.NET 環境で利用できる API のオープンソースプロジェクトであり、プログラミング言語に依存しないことが特徴である。このライブラリがサポートしている主な機能として、各センサーの値取得、バイブレーター出力、あるいは複数の WiiRemote 接続などがあり、工夫次第で様々な応用が考えられる。

3. カメラ台の制御

3.1 制御フローチャート

カメラ台のパン・チルト回転を制御するフローチャートおよびカメラステージの動きを図4に示す。黒板の任意の位置に貼り付けたマグネット式赤外線 LED から発生した赤外線を、WiiRemote の検出窓が捉える。検出領域上での x, y 座標が PC へ通信されると、検出点を

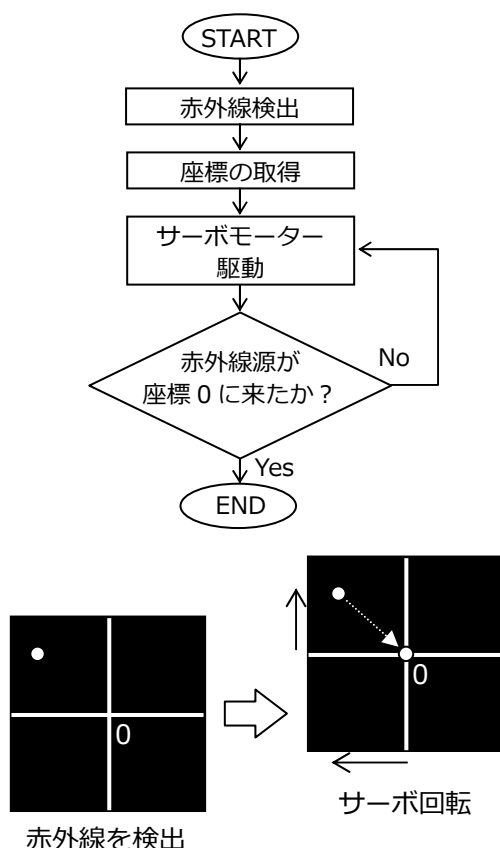


図4 カメラ台制御のフローチャート

原点へ移動させるように 0.7 度ずつサーボモーターが回転する。この回転を繰り返し、検出点が原点に到達したところで制御が完了する。なお赤外線 LED が教員の影に入ったときは、ステージを原点に移動させるよう制御する。

3.2 Visual C#プログラム

項数の関係から、プログラムの詳細を記述することはできない。参考文献(2)に WiiRemote からの赤外線検出、(3)に Gainer mini によるサーボ制御が解説されているので参考にされたい。

ここでは、無人カメラシステムの要である赤外線の自動追尾のプログラム内容を説明する。リスト 1 に、プログラム中で使用するグローバル変数を示す。x1 および y1 は、それぞれ検出した赤外線源の x, y 座標を格納する変数である。x_angle および y_angle は、それぞれパンおよびチルトのサーボ角度を代入する変数である。サーボは、図 5 に示すように 0 度から 180 度まで回転することができ、0 度が 0、180 度が 256 に相当する。プログラム実行時は、パンおよびチルトともに 90 度である 128 を代入している。また、文字配列の send_comX および send_comY は、サーボモーターへの命令文を代入するものである。

次に赤外線受光センサーの原点調整を行った。WiimoteLib の初期状態では、赤外線検出窓の座標は図 6(a)のように左上が原点となっている。感覚的に原

リスト1 グローバル変数

```
//グローバル変数
int x1; //赤外線源の x 座標
int y1; //赤外線源の y 座標
int x_angle; //パン角度の変数
int y_angle; //チルト角度の変数
string send_comX; //パンサーボへ命令
string send_comY; //チルトサーボへ命令
```

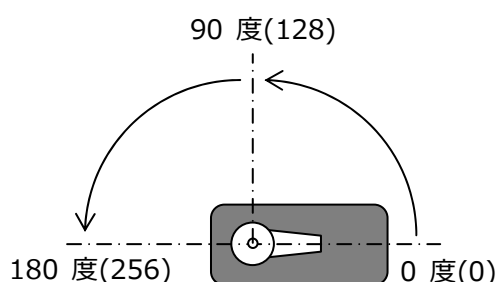


図5 サーボモーターの回転角度

点は中央にある方がプログラムしやすいため、同図(b)のように変更した。また、WiiRemote から出力される座標値に 200 を乗ずることで±100 の整数値とした。

リスト 2 は、検出した赤外線源を座標原点に移動させるプログラムである。精度上の問題から、赤外線源の座標をぴったりと(0, 0)に移動させることは難しい。今回は、制御にある程度の幅を持たせるため、原点から x および y にそれぞれ±10 の正方形領域を設け、この領域に赤外線源の座標を入れるように if 文によって制御した。If 文にある代入演算子の“+=”あるいは“-=”は、現在のサーボ角度を 0.7 度ずつ増大あるいは減少して x_angle および y_angle に代入している。

目標角度が決定すると、各サーボへ回転の指令を送る。文字列の合成を利用し、2.2 で示した“pnxx*”という命令をシリアルポート経由で Gainer mini に送信

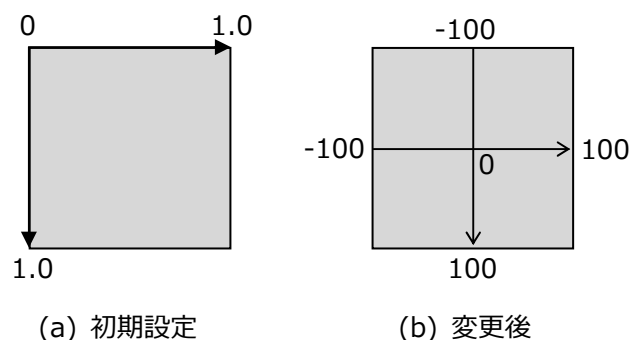


図6 検出窓の座標変換

リスト2 カメラ台の回転制御プログラム

```

//検出点の変位方向を探る
if(x1 < -10 || x1 > 10 || y1 < -10 || y1 > 10){
    if(x1 < 0){
        x_angle += 1;} //IR が左にあるとき
    else{
        x_angle -= 1;} //IR が右にあるとき
    if(y1 < 0){
        y_angle -= 1;} //IR が下にあるとき
    else{
        y_angle += 1;} //IR が上にあるとき

//サーボへの命令文(y 方向も同様)
send_comX = "";
send_comX += "p";
send_comX += string.Format("6{0:X2}",
                             x_angle);
send_comX += "*";

//サーボへ指令(シリアルポート経由)
if(serialPort1.IsOpen){
    try{
        serialPort1.Write(send_comX);}
    catch{
        MessageBox.Show("通信エラー");}
}
}

```

する。これにより Gainer mini のポート 6 および 7 に接続されたサーボモーターが回転する。赤外線源の座標が変化する度にこの if 文が実行されるので、for 文や while 文でループを作成する必要はない。

4. 無人カメラ台の運転

図7は、試作した無人カメラシステムである。また、完成したプログラムをコンパイルし、実行した際のユーザーインターフェース画面を図8に示す。“Connect”ボタンをクリックすると、WiiRemoteとPCとの通信が始まる。また、“Unconnect”をクリックすればその通信が切断される。“Serial”ボタンをクリックすれば、Gainer miniとのシリアル通信がスタートし、赤外線源を検出すれば自動追尾を開始する。

試作したシステムではサーボモーターの回転を 0.7 度きざみで行っているため、赤外線源の追尾がスローペースであった。追尾のスピードを上げるには、リスト2の代入演算子部分を“+=2”などに変更する必要がある。

5. まとめ

本研究では、講義映像を利用した学習支援システム

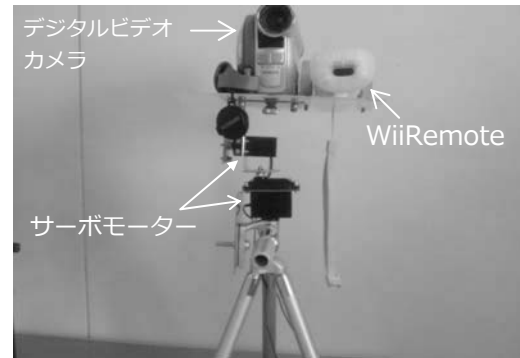


図7 試作した無人カメラシステム



図8 無人カメラの実行画面

のための無人カメラシステムを開発した。カメラマンなしにカメラをパン・チルト回転させるため、赤外線源と WiiRemote を併用した自動追尾機構を作製した。赤外線の検出およびパン・チルト用サーボモーターの制御には、Visual C#2008 を利用し、WiiRemote の制御には WiimoteLib ライブラリを用いた。

試験運転の結果、無人カメラ台は正確に赤外線源を捉え、赤外線を移動させると自動で追尾を実行した。しかし、サーボモーターの回転速度を遅く設定したため、緩やかな追尾となった。今後は、追尾速度および追尾精度の向上を行う。

参考文献

- (1) 「BrainPeek.com」 < <http://www.brianpeek.com/> > (2010/10/20 アクセス)
- (2) 白井暁彦, 小坂崇之, くるくる研究室, 木村秀敬: 「WiiRemote プログラミング」, オーム社 2009
- (3) 中川ゆき: 「GAINER mini で Web カメラのパン・チルト雲台を作ろう」, エレキジャック, September, pp. 85-99, 2009

基礎－地盤－構造物系モデルを用いた地震応答の 片寄りに関する研究

藤田麗* 山下典彦**

A Study on Asymmetry of Seismic Response of Foundation-Soil-Structure System

Rei FUJITA* Norihiko YAMASHITA**

ABSTRACT

The P- Δ effect is caused by the weight and lateral deformation of the structure. This paper studies the P- Δ effect in order to establish the seismic design method. Assuming the non-linear restoring force-displacement relationships, three degree of freedom model corresponding to sway-rocking behavior take into account the non-linear characteristic for soil. The non-linear response analysis show the Acc.-Disp. Response Spectrum (ADRS) and asymmetric response. These results are compared with the results of individual model to establish the influence of P- Δ effect.

Keywords: Asymmetric response, P- Δ effect, Foundation-Soil-Structure System

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、高速道路などの土木構造物が倒壊してしまうなどの大きな被害があった。当時、鋼構造物は弾性域内で設計されていたが、想定されていた地震動よりも大きな地震動だったため大被害となった⁽¹⁾。それ以降、各種基準が見直されるようになり、道路橋示方書においても性能規定型耐震設計法が採用されるようになった。しかし、対象となる構造物によって差異が見られるため、コンクリート構造物、鋼構造物の塑性域内での動的挙動や終局強度を精度良く評価する手法の開発が必要であるとされている。

また、地震動などの力の作用によって構造物の変形が一方方向に進み、元に戻らず塑性変形する「応答の片寄り」が生じる場合がある。「応答の片寄り」について、研究をしている丸橋ら⁽²⁾によると兵庫県南部地震のような直下型地震に対して、起こりやすいとされている。しかし、その原因やメカニズムについての研究は少ない。「応答の片寄り」が起こる原因の1つとして、重力による復元力低下の影響を与えるP- Δ 効果が考えられる。P- Δ 効果とは、背が高く重い構造物の場合には無視できない。なぜなら、塑性域内において水平復元力が完全弾塑性の場合、重力の影響により剛性が負となり、構造物の最大変形量が増大するおそれがあるからである。よって、P- Δ 効果の影響も考慮しながら「地

震応答の片寄り」について検討する必要がある。

そこで、本研究の目的として向井ら⁽³⁾の最大応答変位と必要耐力を結びつける片寄り係数を導入することにより、地震応答の片寄りについて検討する。解析するモデルとしては、構造物の道路橋脚を1質点系とした、水平方向に振動する1自由度モデル(以下、水平1自由度モデル)とP- Δ 効果を考慮した1自由度モデル(以下、回転1自由度モデル)、さらにそれぞれの1自由度モデルに浅い基礎を考慮した3自由度モデル(以下、水平3自由度モデルと回転3自由度モデル)とした。この4つのモデルを用いることによって、P- Δ 効果などの影響による非線形モデルの応答の片寄りについて検討する。

2. 運動方程式⁽⁴⁾

2.1 1自由度モデル 図1(a)に示すようなP- Δ 効果を考慮した回転1自由度モデルの運動方程式は次式のようになる。

$$\ddot{\phi} + 2h \frac{2\pi}{T} \dot{\phi} + \frac{M(\phi)}{mH^2} - \frac{g}{H} \phi = -\frac{\ddot{u}_G}{H} \quad (1)$$

ここに、 m は1質点系の質量、 h は減衰定数、 T は固有周期、 $M(\phi)$ は復元力モーメント、 ϕ は橋脚の回転角(橋脚を剛体と仮定し部材角と等しい)、 H は橋脚高さ、 g は重力加速度、 $\ddot{u}_G$ は水平方向の入力地震動である。

さらに、水平1自由度モデル及び回転1自由度モデルを支えているバネをそれぞれ k, k_R とし $k = k_R/H^2$

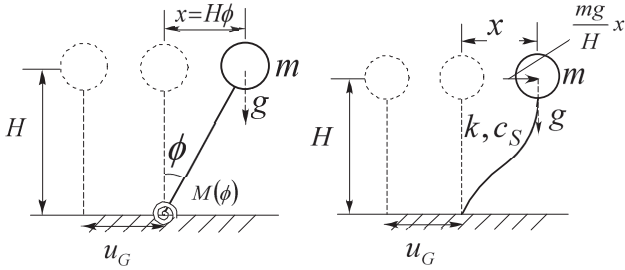
* 専攻科 都市工学専攻

** 都市工学科 教授

の関係を用いると式(1)から図1(b)に示すような水平1自由度モデルの運動方程式は次式ようになる。

$$m\ddot{x} + c_s\dot{x} + kx - \frac{mg}{H}x = -m\ddot{u}_G \quad (2)$$

ここに、 c_s は減衰係数、 k はバネ剛性、 mgx/H はP-Δ効果による復元力の低下量である。



(a)回転1自由度モデル (b)水平1自由度モデル
図1 1自由度モデルの座標系

図2において $Q(x)=0$ になる時、つまり構造物の復元力とP-Δ効果による付加的な層せん断力が等しくなったときに倒壊(終局状態)となる。

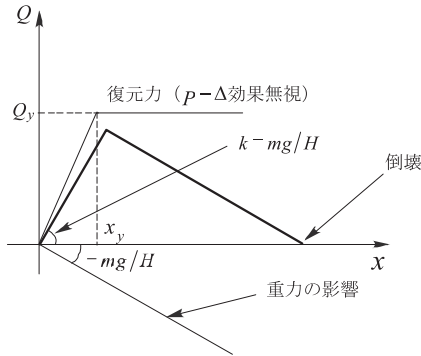
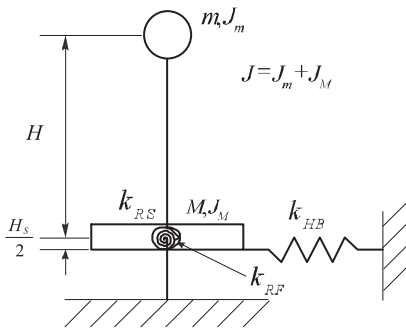


図2 P-Δ効果の影響

2.2 3自由度モデル 上部構造物の回転運動、基礎の水平運動及び回転運動としP-Δ効果を考慮した回転3自由度モデルを図3(a)に示す。このモデルの振動する座標系を図3(b)とした。



(a)回転3自由度モデル

このときの運動方程式は次式ようになる。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{I_1\}\ddot{u}_G - [M]\{I_2\}\ddot{\phi}_G \quad (3)$$

ここに、

$$[M] = \begin{bmatrix} mH^2 & mH & mH^2 \\ mH & m+M & mH \\ mH^2 & mH & mH^2 + J \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{RS} - mHg & 0 & -mHg \\ 0 & k_{HB} & -k_{HB}H_s/2 \\ -mHg & -k_{HB}H_s/2 & k_{RF} - mHg + k_{HB}H_s^2/4 \end{bmatrix}$$

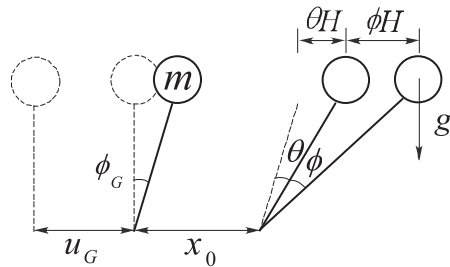
$$[C] = \begin{bmatrix} c_{RS} & 0 & 0 \\ 0 & c_{HB} & 0 \\ 0 & 0 & c_{RF} \end{bmatrix}$$

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} \phi \\ x_0 \\ \theta \end{Bmatrix}, \quad \{I_1\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \{I_2\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

m, M は上部構造物および基礎の質量、 $J = J_m + J_M$ は回転慣性で、 J_m, J_M は上部構造物および基礎の回転慣性、 k_{RS}, k_{HB}, k_{RF} は上部構造物の回転バネ剛性、基礎底部水平および回転バネ剛性、 ϕ, x_0, θ は上部構造物の回転角、基礎の水平変位および回転角、 $\ddot{u}_G, \ddot{\phi}_G$ は入力地震動である。 $[C]$ は、対角項のみだけで評価した減衰を考慮している。 c_{RS}, c_{HB}, c_{RF} は上部構造物の減衰係数、基礎の水平および回転の減衰係数であり、式(4)のように求める。

$$c_{RS} = 2h_1H\sqrt{mk_{RS}}, c_{HB} = 2h_2\sqrt{Mk_{HB}}, c_{RF} = 2h_3\sqrt{Jk_{RF}} \quad (4)$$

また、水平3自由度モデルについては3自由度モデルの回転と水平バネの関係を上部構造物に用いて運動方程式を誘導する。



(b)回転3自由度モデルの座標系

図3 基礎-地盤-構造物系のモデル化

2.3 地盤の復元力特性⁽⁵⁾ 基礎とその周辺地盤のすべりを考慮した円形基礎をモデルとして考える．このモデルは，土は引っ張りに抵抗しないとし，さらにモール・クーロンの破壊基準に従うと仮定した非線形バネをもつウィンクラーモデルの考えを採用した．よって，基礎の復元力特性として基礎底部水平バネの復元力特性は図4 (a)に示す完全弾塑性型，基礎底部回転バネの復元力特性は図4 (b)に示すようにトリリニア型とした．

基礎底部水平のバネ剛性 $k_{HB}^{(1)}$ (図4 (a)のO-A)は，

$$k_{HB}^{(1)} = Ga \frac{8}{2-\nu} \quad (5)$$

とする．このときの降伏変位 x_{HB_y} は，

$$x_{HB_y} = \begin{cases} \frac{c + \frac{W}{3a^2} \tan \phi}{k_{b\theta}}, & \theta < \theta_y^{(1)} \\ \frac{c + \frac{W}{3a^2} \tan \phi}{k_{b\theta}} \sqrt{\frac{\theta_y^{(1)}}{\theta}}, & \theta \geq \theta_y^{(1)} \end{cases} \quad (6)$$

となる．バネ剛性 $k_{HB}^{(2)}$ (図4 (a)のA以降)は，

$$k_{HB}^{(2)} = 0 \quad (7)$$

となる．

基礎底部回転のバネ剛性 $k_{RF}^{(1)}$ (図4 (b)のO-A)は，

$$k_{RF}^{(1)} = Ga^3 \frac{8}{3(1-\nu)} \quad (8)$$

とする．このときの降伏角 $\theta_y^{(1)}$ は，

$$\theta_y^{(1)} = 0.37 \frac{W}{k_{bn} a^3} \quad (9)$$

となる．

バネ剛性 $k_{RF}^{(2)}$ (図4 (b)のA-B)は，

$$k_{RF}^{(2)} = \frac{1}{4 + \sqrt{2}} k_{RF}^{(1)} \quad (10)$$

とする．このときの降伏角 $\theta_y^{(2)}$ は，

$$\theta_y^{(2)} = 8\theta_y^{(1)} \quad (11)$$

となる．

バネ剛性 $k_{RF}^{(3)}$ (図4 (b)のB以降)は，

$$k_{RF}^{(3)} = 0 \quad (12)$$

によって決定する．

ここに，

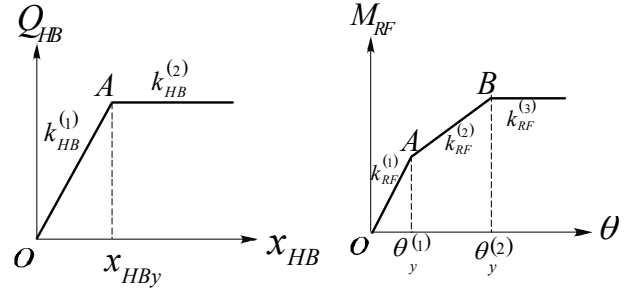
$$W = (m + M)g, \quad G = \frac{\gamma S^2}{g} \quad (13)$$

a は基礎半径， G はせん断剛性， ν はポアソン比， H_S は基礎の厚さ， W は上部構造物および基礎の全重量， c は粘着力， ϕ は内部摩擦角， γ は土の単位体積重量，

V_S はせん断速度である．また $k_{bn}, k_{b\theta}$ は地盤反力係数であり，

$$k_{bn} = \frac{4k_{RF}^{(1)}}{\pi a^4} \quad k_{b\theta} = \frac{k_{HB}^{(1)}}{\pi a^2} \quad (14)$$

で求まる．



(a) 基礎底部水平 (b) 基礎底部回転

図4 地盤の復元力特性

3. 解析条件

運動方程式の数値積分は，Newmark β 法 ($\beta = 1/6$) により行い，時間刻みを0.001秒とした．入力地震動は，1940年に発生したインペリアルバレイ地震のエルセントロ (短周期成分が卓越するランダム波であるランダム位相型) と1995年に発生した兵庫県南部地震の神戸海洋気象台 (断層面に直交する方向でやや短周期以上で卓越するパルス波である長周期パルス型) のNS成分とした．丸橋ら⁽²⁾によると実地震動は波形の周期やスペクトル特性が複雑であると考え，単純波を用いている．そこで，実地震動の継続時間を400分割し，加速度の各時間間隔の平均値とする単純化した波形の単純波も用いた．

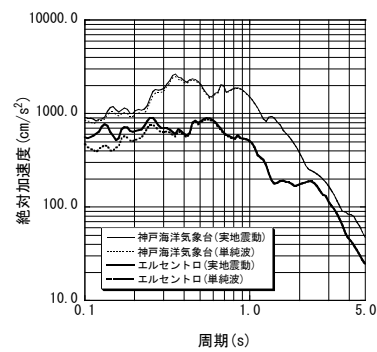


図5 絶対加速度応答スペクトル

図5に神戸海洋気象台とエルセントロの実地震動と単純波の加速度5%減衰の絶対加速度応答スペクトルを示す．これにより，地震動の特性を見る．短周期側で実地震動に比べて単純波は小さくなっているため，単純化することによって実地震動の高周波成分の波がなくなっていることがわかる．そこで，実地震動と単

純波にどのくらい片寄りがあるのか評価するため、最大加速度の絶対値と正負の最大値の比率である片寄り比率を調べたものが表1である。最大加速度の絶対値は、両方とも実地震動に比べて単純波が9割程度となっている。片寄り比率では、神戸海洋気象台は実地震動に比べて単純波が小さくなっているが、エルセントロでは実地震動に比べて単純波が大きくなっている。

表1 入力地震動の片寄り比率

		最大加速度の絶対値 (cm/s^2)	片寄り比率
エルセントロ	実地震動	341.7	1.30
	単純波	311.7	1.54
神戸海洋気象台	実地震動	818.0	1.42
	単純波	757.7	1.35

直径10m×高さ4mの浅い基礎(直接基礎)を持つ道路橋脚を対象とし、基礎-地盤系の各定数としては表2に示したものをを用いた。 h_1 , h_2 , h_3 はそれぞれ上部構造物の減衰定数、基礎水平および回転の減衰定数である。橋脚は表3に示す9つのケースを用いた。また、上部構造物の質量 m は式(15)のように求める。

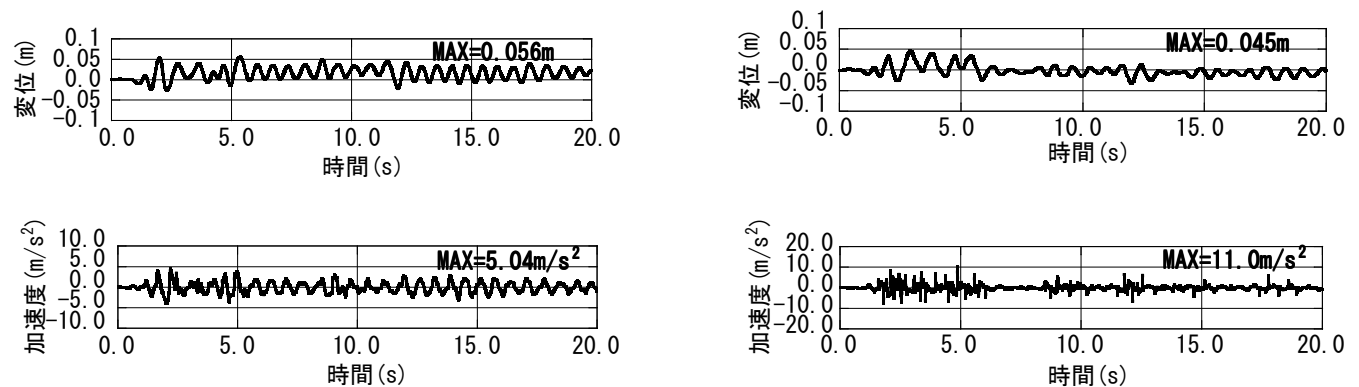
$$m = (W_u + W_p/3)/g \quad (15)$$

表2 基礎-地盤系の各定数

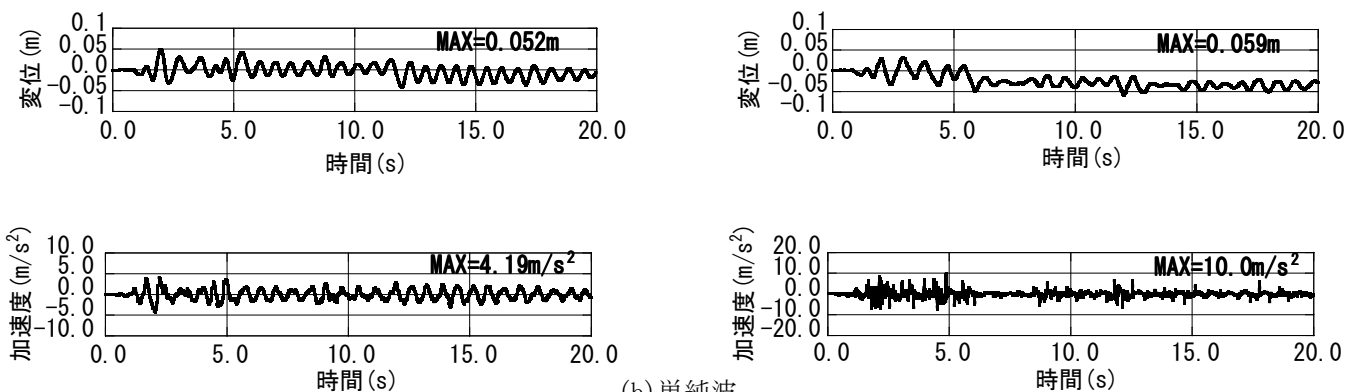
$M(\text{KNsec}^2/\text{m})$	542.9	$\gamma(\text{KN/m}^3)$	17.6
$J(\text{KNsec}^2 \cdot \text{m})$	4195.4	$V_s(\text{m/s})$	500
$H_s(\text{m})$	4	ν	0.3
$a(\text{m})$	5	$c(\text{KN/m}^2)$	0
h_1, h_2, h_3	0.05, 0.1, 0.1	$\phi(^{\circ})$	30

表3 上部構造物の各定数(基礎固定時)

橋脚種別	3径間固定橋脚			単純固定橋脚			単純可動橋脚		
ケース	A	B	C	D	E	F	G	H	I
橋脚高さ $H(\text{m})$	10.0	15.0	20.0	10.0	15.0	20.0	10.0	15.0	20.0
橋桁重量 $W_u(\text{KN})$	8820.0	8820.0	8820.0	2940.0	2940.0	2940.0	0.0	0.0	0.0
橋脚重量 $W_p(\text{KN})$	3099.7	5255.7	7901.7	2536.2	4042.5	5794.7	2254.0	3436.9	4741.2
固有周期 $T(\text{sec})$	0.34	0.50	0.65	0.28	0.47	0.67	0.15	0.31	0.50



(a) 実地震動



(1) 水平1自由度モデル

(2) 水平3自由度モデル

図6 上部構造物の応答波形(ケースC, エルセントロ)

4. 解析結果

4.1 時刻歴応答波形 表1より, 実地震動よりも単純波の方が片寄り比率が大きかったエルセントロについて実地震動と単純波にどのような違いがあるのか比較をする。

例として表3のケースCを用い, 水平1自由度モデルと水平3自由度モデルの実地震動と単純波の上部構造物の変位と加速度の時刻歴応答波形を図6に示す。

実地震動と単純波の変位と加速度を比較する。変位を比較すると, 水平1自由度モデルでは, 実地震動には見られないが単純波の方で, 12秒以降から片寄りが見られる。水平3自由度モデルでは, 実地震動においても若干ではあるが6秒以降に片寄りが見られ, 単純波にも6秒以降から片寄りが見られる。さらに単純波は実地震動よりも片寄りが大きくなっている。これにより, 単純波は実地震動よりも片寄りが生じやすいと考えられる。加速度を比較すると, 水平1自由度モデルと水平3自由度モデル両方とも実地震動と単純波に大きな違いは見られなかった。

4.2 加速度-変位応答スペクトル エルセントロについて表3のケースCを用いた加速度-変位応答スペクトルを図7に示す。上段が実地震動, 下段が単純波の応答を示しており, 実線が線形, 点線が非線形である。

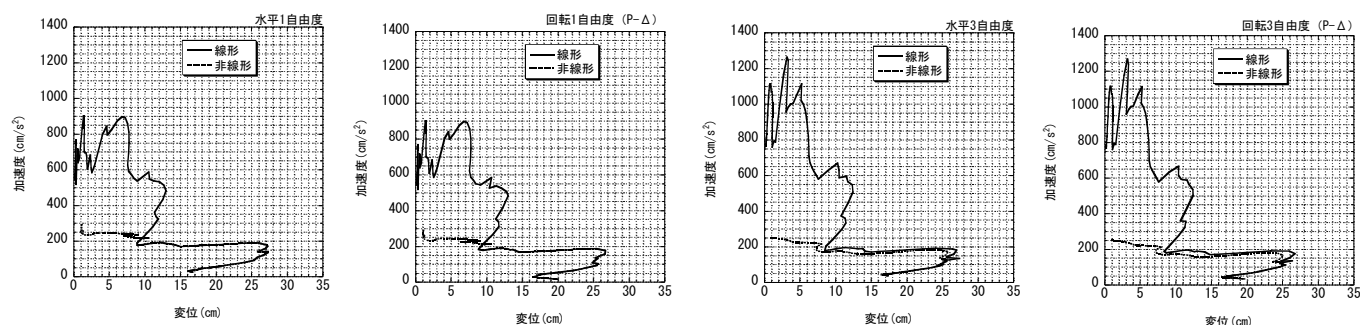
実地震動と単純波を比較して, 1自由度モデルでは実地震動が最大応答変位 27cm に対して単純波は 28cm と大きくなっている。

3自由度モデルでは, 実地震動が最大応答変位 26cm に対して単純波は 28cm と大きくなっている。特に, 3自由度モデルでは応答変位が 5cm までの間に単純波の加速度応答スペクトルが変位応答スペクトルに対して大きくなっている。よって実地震動と比較して単純波は応答変位が大きくなることがわかる。

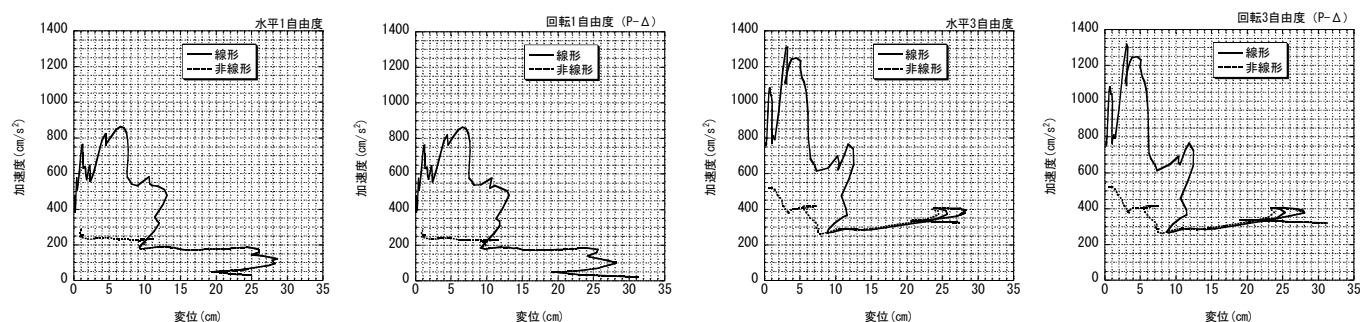
P- Δ 効果を考慮した場合には, 考慮していない場合よりも実地震動も単純波も変位応答スペクトルが若干ではあるが大きくなる傾向がある。

4.3 片寄り係数と残留塑性率の関係 向井ら⁽³⁾は, 構造物に塑性変形が生じた場合, その応答が左右均等に振れるとは考えづらいつし, その左右の応答変位の大きさが異なることを「片寄り」と呼び, 塑性時における構造物の左右の応答の片寄りを考慮した片寄り係数 d を導入することにより, 最大応答変位と必要耐力を結び付けている。

図8に表3の9ケースを用いた各モデルの片寄り係数と残留塑性率の関係を示す。各モデルによって, ばらつきはあるが実地震動と比較して単純波は残留塑性率が大きくなっている。さらに, 神戸海洋気象台ではエルセントロと比べて片寄り及び残留塑性率が大きくなっている。つまり, 神戸海洋気象台はエルセントロよりも片寄りの影響があることが考えられる。そこで, 神戸海洋気象台について片寄りの検討するために上部構造物の変位波形の違いを見る。

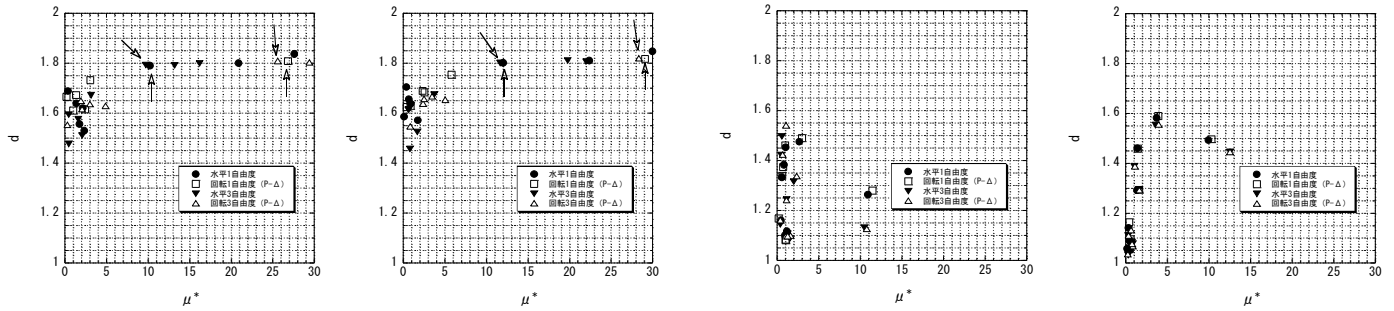


(a) 実地震動



(b) 単純波

図7 加速度-変位応答スペクトル(ケースC, エルセントロ)



(a) 神戸海洋気象台(実地震動) (b) 神戸海洋気象台(単純波) (c) エルセントロ(実地震動) (d) エルセントロ(単純波)

図8 片寄り係数 d と残留塑性率 μ^* の関係

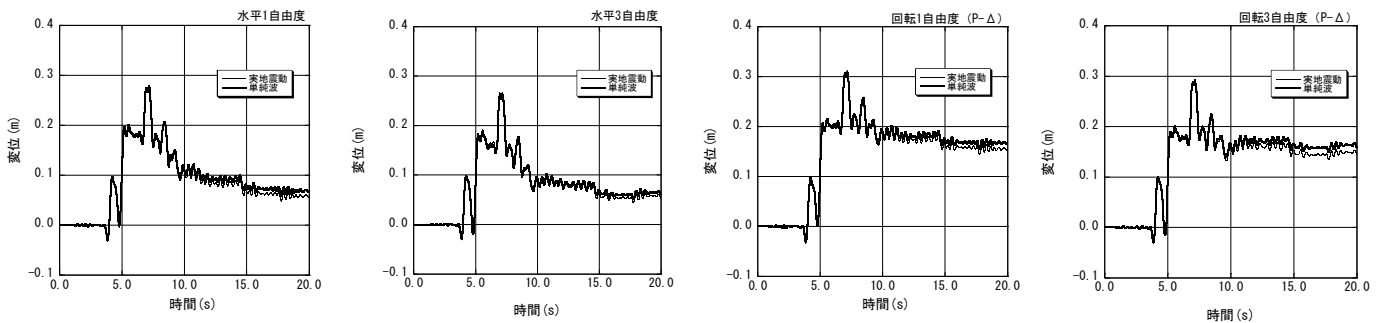


図9 上部構造物の変位応答波形(ケース A, 神戸海洋気象台)

表4 各モデルの上部構造物の変位(cm)

	水平1自由度	水平3自由度	回転1自由度	回転3自由度
実地震動	5.9	5.6	15.4	14.7
単純波	6.9	6.7	16.7	16.3

例として図8 (a), (b)の矢印で示している背が低く質量が重いケース A を用いた各モデルの変位を図9に示し、表4に各モデルの上部構造物の残留変位を表す。図9、表4より、実地震動と比較して単純波の変位が大きくなっている。1自由度モデルと3自由度モデルを比較すると、3自由度モデルの方が変位は小さい。これは、基礎を考慮しているため変位が小さくなったと考えられる。P-Δ効果を考慮した場合には、実地震動及び単純波ともに変位が大きくなっている。

5. まとめ

1自由度モデルと3自由度モデルを用いて解析を行い、P-Δ効果などの影響による非線形モデルの応答の片寄りについて検討を行った。これらの結果を以下にまとめる。

(1) 実地震動と比較して単純波の加速度－変位応答スペクトル、残留塑性率及び残留変位が大きくなることにより、入力地震動と応答の片寄りの関係を検討する上で単純化は有効である。

(2) 片寄り係数と残留塑性率の関係から神戸海洋気象台はエルセントロに比べて片寄りと残留変位が大きくなる。P-Δ効果は片寄りには影響しないが残留変位には影響する傾向がある。

地震応答の片寄りは入力地震動によって影響を受ける。

参考文献

- (1) 土木学会ホームページ, 土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言解説第3章,
<http://www.jsce.or.jp/committee/earth/chap3.html>
- (2) 丸橋奈々子, 市之瀬敏勝: 完全弾塑性モデルの地震応答の片寄り, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, pp. 75-80, 2006.
- (3) 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎: 地震動を受けるRC構造物の限界応答変形量を保障するのに必要な耐力算出法とその精度検証, 日本建築学会構造系論文集, 第532号, pp. 137-143, 2000.
- (4) 河野健吾: 上部構造物のP-Δ効果を考慮した基礎－地盤－構造物系の動的相互作用に関する研究, 神戸市立工業高等専門学校都市工学科卒業研究報告書, 2005.
- (5) 山下典彦, 原田隆典: 基礎－地盤－構造物系の非線形動的相互作用を考慮した応答スペクトルに関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 591-598, 2001.

調和振動荷重による半無限地盤を含む水平成層地盤の P-SV 波の振動・伝播特性

江本浩樹* 山下典彦** 森源次***

Characteristics of P-SV Wave Motions by Harmonic Loading on Ground Surface And Their Relations with Soil Layered Structures

Hiroki EMOTO* Norihiko YAMASHITA** Genji MORI***

ABSTRACT

In order to establish a harmonic wave method to estimate the depth of the soil layer, this paper has examined some of the basic relationships between the depth of the relatively harder soil thin layer and the characteristics of the P-SV wave propagation in layered media and their dynamic response due to the vertical harmonic point load applied on the ground surface. In this examination, the P-SV wave field has been simulated by the finite element method in soil layered media. It has been found from this numerical investigation that the depth of the relatively harder soil thin layer can be estimated from the information of the change of the phase velocity on ground surface at the resonant frequency of the soil layer.

Keywords: harmonic wave, P-SV wave, finite element method

1. はじめに

地盤を伝播する波には、実体波である疎密波やせん断波、そして地盤の表面のみを伝わるレイリー波などが存在する。その中でもレイリー波は、波長が長いほど、より地盤深部のせん断波速度を反映する分散性を持った波である。このレイリー波の性質を利用した地盤構造推定法に表面波探査法がある。しかし、起振点近傍では実体波やレイリー波が混在する波となっている。その為、現在の表面波探査法では、レイリー波を容易に観測できる様に、実体波がレイリー波に比べて距離減衰が大きいという性質を利用して、受振器を起振点より遠方に設置する必要がある。これによって表面波探査法を実施するには、広いスペースが必要となり、住宅地などといった建物が密集した地域では実施が難しい。

また、表面波探査法の測定方法は（１）起振機と２～３個の受振器を用いる測定方法（２）インパルス振源と多数の受振器を用いる測定方法が提唱されているが、（１）の測定方法は信頼性の点からあまり実施されておらず、（２）の測定方法が主流となっている。しかし、（２）の測定方法は、多数の受振器を用いる点から測線長が長くなる傾向にあり、測定方法からも実施に広いスペースを必要とする事が、表面波探査法の問題

点であるといえる。

本研究では、表面波探査法を省スペースで実施する為に（１）起振機と２個の受振器を用いた測定方法（２）起振点近傍での混在した波の位相速度を用いた測定方法、これら２つの有効性を検証する事を目的としている。具体的には、起振機により発生させた波を、地表面の起振点近傍に設置した２個の受振器によって測定し、測定した波形から位相速度を求める。この位相速度と起振機により発生させた調和振動荷重の周波数の関係から地盤構造を推定する事が可能であるかを有限要素法による解析より検証した。解析は、硬い層（埋設管を模擬したもの）が地盤内に存在する場合、どのような位相速度の周波数特性を示すのかを調べる為に、表層が１層からなる１層の水平成層地盤と、表層地盤中に硬い層がある３層の水平成層地盤を２次元平面ひずみ要素によりモデル化し、行った。さらに、３層の水平成層地盤にある硬い層の深さ位置を変えた解析モデルについても解析を行い、硬い層の深さ位置の違いが位相速度の周波数特性に与える影響についても検証した。

2. 理論

2.1 表面波探査法の概要 地盤を伝播する波には実体波である疎密波（以下 P 波）、せん断波（以下 S 波）や地盤の表面のみを伝わるレイリー波などが存在する。P 波、S 波のそれぞれの伝播速度を V_S 、 V_P とす

* 専攻科 都市工学専攻

** 都市工学科 教授

*** 古野電気株式会社

れば、それらは式（１）で表される．

$$\left. \begin{aligned} V_P &= \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \\ V_S &= \sqrt{\frac{G}{\rho}} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 E はヤング率、 ρ は質量密度、 G はせん断弾性係数、 ν はポアソン比である．

レイリー波は、実体波よりも距離減衰が小さいという性質がある．さらにレイリー波は、図 1 に示すように地盤内を伝播する時、波長が長い（低周波数）ほど、より深部の地盤の S 波速度を反映する分散性を持っている．表面波探査法では、このようなレイリー波の性質を用いて S 波速度構造を求めている．

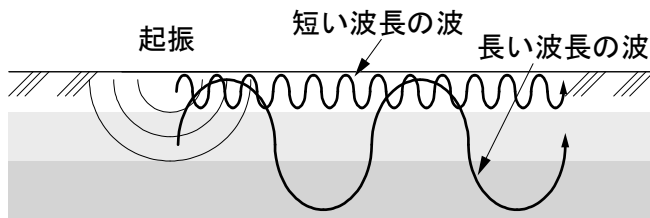


図 1 表面波探査法の原理

本研究では、図 2 に示すような起振機と 2 個の受振器を用いた測定方法による表面波探査法を対象としている．この測定方法は、起振機によって地表面に調和振動荷重を作用させ、これより生じる地表面の変位を 2 個の受振器によって検出し、位相速度を算出する．この起振機で発生させる調和振動荷重の周波数を変え、各周波数での位相速度を算出する事で地盤の S 波速度構造を求める．本研究では、受振器を起振点近傍に設置する事で、実体波やレイリー波の混在する波の位相速度の周波数特性に着目している．

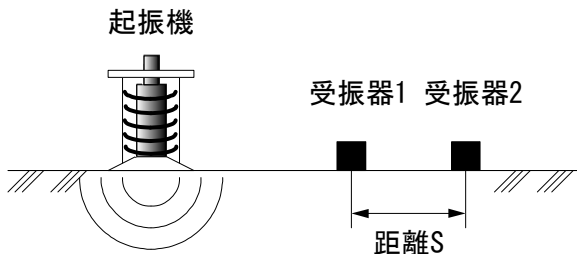


図 2 表面波探査法の測定方法のイメージ

2. 2 数値解析で用いた運動方程式 一般化した有限要素法の全体系の運動方程式は、式（２）で表される．

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (2)$$

ここで $[M]$, $[C]$, $[K]$ は質量・減衰・剛性マトリクス、また $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$ は解析モデルの節点の加速度・速度・変位ベクトルである． $\{f\}$ は外力ベクトルである．

この質量・剛性マトリクスは、式（３）で表される要素ごとの質量・剛性マトリクスを自由度が対応するように全体系のマトリクスに埋め込んだものである．

$$\left. \begin{aligned} [m]^e &= \int_V \rho [N]^T [N] dV \\ [k]^e &= \int_V [B]^T [D] [B] dV \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで、式（３）内の積分は、要素の体積積分を表している． $[N]$ は変位関数マトリクスと呼ばれ、 $[B]$ は $[N]$ を座標で微分したものである． $[D]$ は応力とひずみの関係を表す応力-ひずみマトリクスと呼ばれる．

本研究の様に、地盤を有限要素法により解析する際、本来は 3 次元問題として扱うべきであるが、コンピュータの容量との関係で、2 次元の平面ひずみ問題として扱う．その際、 $[D]$ は式（４）となる．

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

また、本研究の減衰マトリクスは、減衰を評価する為のレイリー減衰マトリクスと、解析モデルの仮想境界面での波の反射を防ぐ為の粘性境界マトリクスを足し合わせたものである．

2. 2. 1 粘性境界の導入 有限要素法を用いて解析する場合には、ある領域で解析モデルを切断する必要がある．しかし、解析モデルを切断する事によって、外力を与えた際に解析モデルの仮想境界面で波の反射が生じる．この反射の影響をできるだけ取り除く為、図 3 に示すような半無限性を持つ地盤などを解析の対象とする際には、粘性境界を導入する必要がある．

仮想境界面が図 4 に示すように x 軸と θ 傾いている場合を考える⁽²⁾．境界上の応力を接点 i , j が半分ずつ分担すると仮定すると、節点速度ベクトルと節点力ベクトルは式（５）の関係になる．

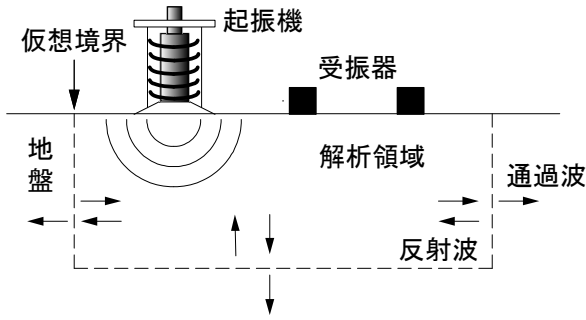


図3 半無限性を持つ地盤

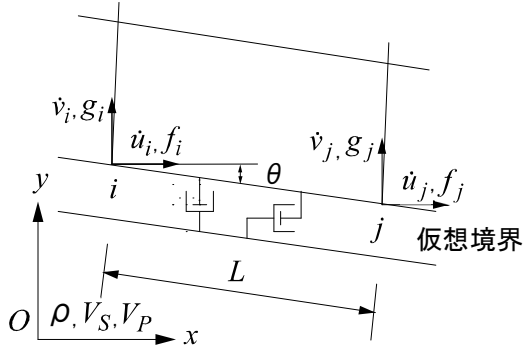


図4 仮想境界上の節点速度と節点力

$$\begin{Bmatrix} f_i \\ g_i \\ f_j \\ g_j \end{Bmatrix} = \frac{\rho L}{2} \begin{bmatrix} V_H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_V & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_V \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{v}_i \\ \dot{u}_j \\ \dot{v}_j \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここに

$$V_H = V_S \cos \theta + V_P \sin \theta \quad (6)$$

$$V_V = V_P \cos \theta + V_S \sin \theta$$

式(5)を簡略化して表示すると、式(7)となる。

$$\{f\} = [C_V] \{\delta\} \quad (7)$$

よって粘性境界を解析に導入する為に、式(7)の粘性境界マトリクス $[C_V]$ を、その自由度番号に対応して式(2)の全体系の減衰マトリクスに加えた。

2.2.2 粘性境界の検証 粘性境界を導入したプログラムによる解析モデルの仮想境界面での反射波の有無を確認する為に、数値解析を行った。ここで、粘性境界なしモデルとは、解析モデルの仮想境界面の節点自由度を x 、 y 方向全て拘束としたもの、粘性境界ありモデルとは、解析モデルの仮想境界面に粘性境界を導入したモデルである。解析モデルは、横80m×縦40mの地盤モデルとし、1要素は10m×10mの2次元平面ひずみ要素とした。外力としては、加振が終了した後も自由振動を生じさせない様な図5に示す0.5秒間のベル型外力を用いた。これを解析モデルの地表面の左

端から40mの位置に水平方向に与え、起振点の時刻歴水平加速度波形を数値解析により求めた。表1に解析に用いた地盤の材料定数を示す。また、時間刻み Δt は0.00025秒、解析ステップ数は4000、減衰定数は0とした。

表1 地盤の材料定数

	ヤング率 (kN/m ²)	ポアソン 比	質量密度 (t/m ³)
各要素	1400000	0.4	2.0

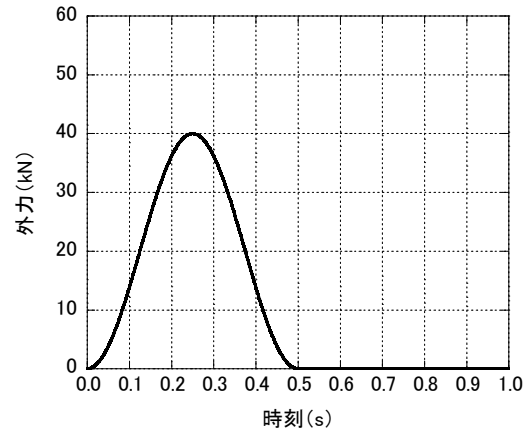


図5 ベル型外力

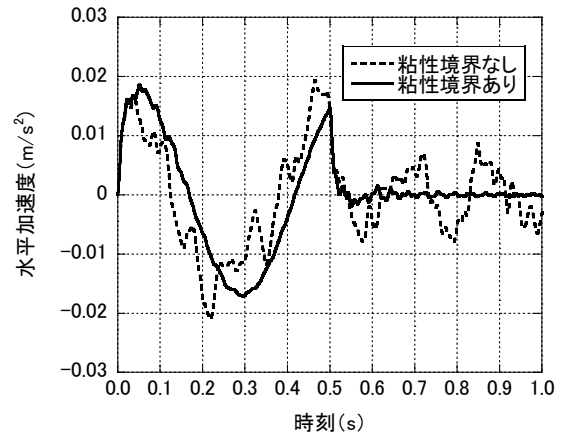


図6 時刻歴水平加速度波形

図6に粘性境界の有無による時刻歴水平加速度波形を示す。粘性境界なしモデルの解析結果は反射波の影響がかなり顕著に表れているが、粘性境界ありモデルでは反射波の存在を確認する事はできなかった。以上の事から、粘性境界を導入する事によって解析モデルの仮想境界面での波の反射を抑制できている事が確認できた。

2.2.3 レイリー減衰の導入 レイリー減衰とは、減衰マトリクス $[C]$ が質量マトリクス $[M]$ と剛性マトリクス $[K]$ に比例するものとして減衰を評価する方法である。ここで α 、 β は定数である。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (8)$$

また、式(8)の α 、 β は減衰定数や固有円振動数と以下の関係がある。

$$h_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (9)$$

ここに h_i と ω_i はそれぞれ第 i 次モードの減衰定数と固有円振動数である。

一般には、固有値解析により求めた第一次及び第二次モードの減衰定数 h と固有円振動数 ω から連立方程式を立て、定数 α 、 β の値を決める。しかし、固有値解析によって固有円振動数を求めるには、多くの手順を必要とし、計算量が膨大となる。そこで、今回の解析では金井の式⁽³⁾を用いて固有円振動数を求めた。

まず基盤層上に厚さ h の表層がある地盤を考える。

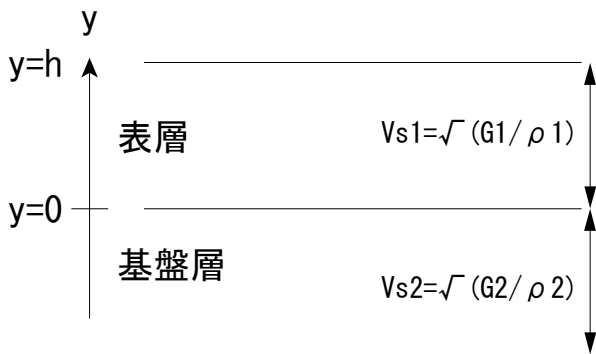


図7 表層と基盤層からなる地盤

表層のS波速度を V_{s1} 、基盤層のS波速度を V_{s2} とする時、金井の式によれば、表層の i 次の固有円振動数は式(10)で表される。

$$\omega_i = \frac{\pi V_{s1}}{2h} (2i-1) \quad (10)$$

しかし、今回の解析モデルのような表層が3層からなる地を、表層が1層からなる表層単層地盤と仮定するには無理がある。そこで、表層3層の各層のS波速度から各層厚による重みつき平均⁽⁴⁾をとる事によって求まるS波速度 V_{av} を式(11)によって求め、これを表層が1層からなる地盤に置き換えた際のS波速度とした。

$$V_{av} = \sum_{j=1}^N \frac{V_{sj} h_j}{h} \quad (11)$$

2.3 位相速度の算出方法 起振点近傍での地表面の時刻歴変位波形をフーリエ変換し位相角を求め、地点ごとの位相角の差から位相速度を求めた。図1に示すような地表面を考えた時、起振点から距離 x の地表面を位相速度算出点とし、その点から前後に距離 Δx 離れた地表面の時刻歴変位波形から位相角を求め、その位相角の差から式(12)により位相速度を算出した。また、 Δx を0.8m、位相速度算出点を起振点より

1mとし位相速度を算出した。

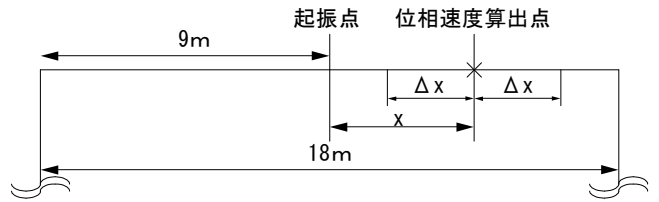


図8 位相速度算出点のイメージ

$$\text{位相速度} = \frac{4\pi\Delta x}{\text{位相角差}} \quad (12)$$

3. 数値解析モデル

数値解析に用いた解析モデルを図9に示す。CASE1は1層地盤を模擬したものである。CASE2は1層地盤に $V_s=1500\text{m/s}$ の硬い層を深さ3mの地点に設定したもので、CASE3及びCASE4はこの硬い層の位置を深さ方向に4m、5mとした。また、モデルの境界面での波の反射を避ける為に粘性境界を設置し、基盤の半無限性を考慮する為に深さ方向に17mまで基盤の物性値の要素を設置した。外力は解析モデルの地表面の左端から9mの位置に鉛直方向に与えた。解析に用いた各種パラメータを表3に、解析モデルの材料定数を表2に示す。また、外力は図10に示すような最大振幅20kNの調和振動荷重を1~99Hz用いた。

表2 各種パラメータ

時間刻み Δt	0.0005 (s)
ステップ数	4000
要素	2次元平面ひずみ要素
要素サイズ	横20 (cm) × 縦20 (cm)
要素数	11250個(横90個×縦125個)

表3 材料定数

(a) CASE1

	$V_p(\text{m/s})$	$V_s(\text{m/s})$	$\rho(\text{t/m}^3)$	ν
1層目	490	200	1.8	0.4
2層目	980	400	2.0	0.4

(b) CASE2, CASE3, CASE4

	$V_p(\text{m/s})$	$V_s(\text{m/s})$	$\rho(\text{t/m}^3)$	ν
1層目	490	200	1.8	0.4
2層目	3674	1500	2.1	0.4
3層目	490	200	1.8	0.4
4層目	980	400	2.0	0.4

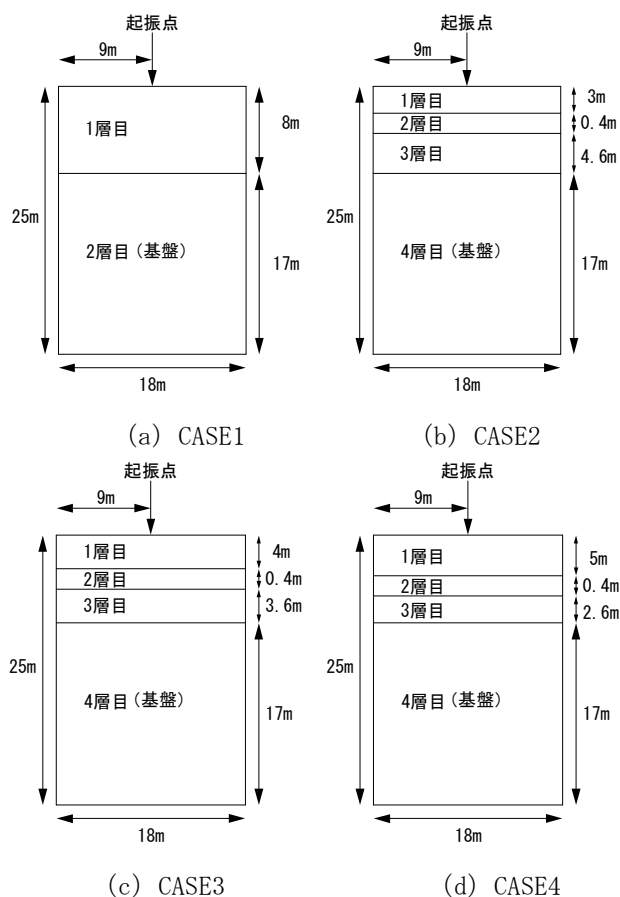


図9 解析モデル例

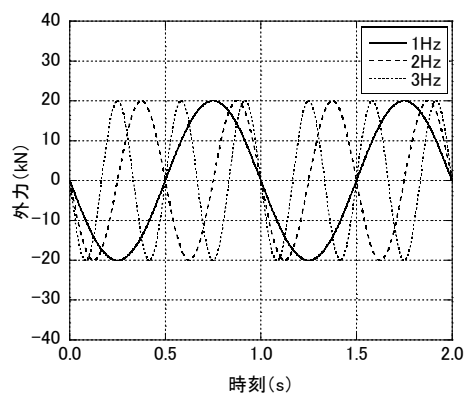
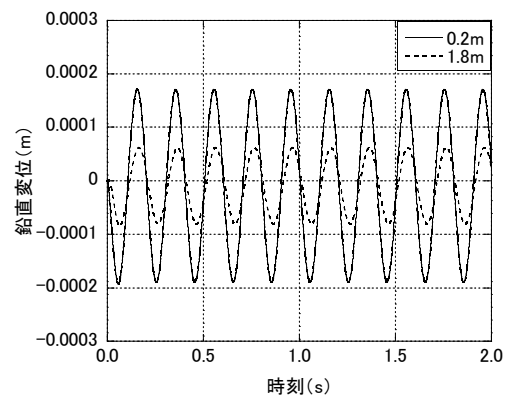


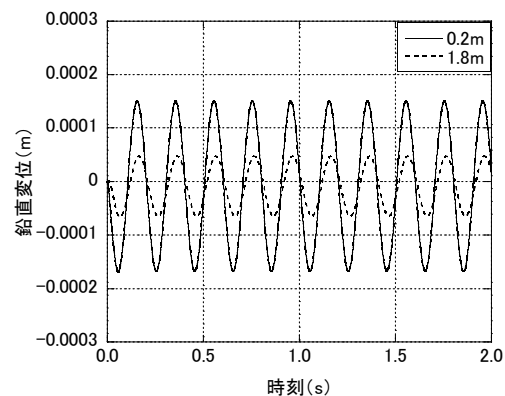
図10 解析に用いた外力波形例

4. 数値解析結果

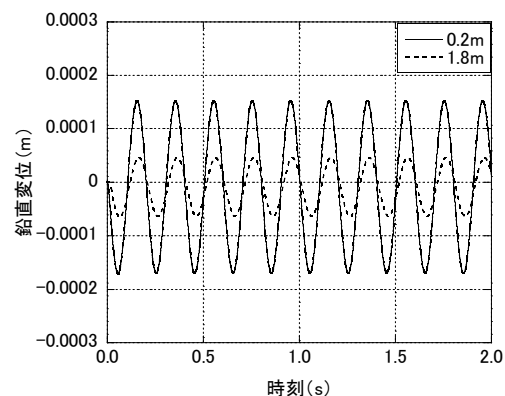
各 CASE で 99 回 (1~99Hz)，計 396 回の解析を行った．図 11 に，5Hz の調和振動荷重を作用させた時の，起振点から右に距離が 0.2m 地点と 1.8m 地点の時刻歴鉛直変位波形を CASE ごとに示す．全ての CASE の 0.2m 地点と 1.8m 地点の時刻歴鉛直変位波形を比較すると，1.8m 地点の時刻歴鉛直変位波形が，0.2m 地点のそれに比べて波が遅れている様子が分かる．これが 2 地点の時刻歴鉛直変位波形の位相差である．



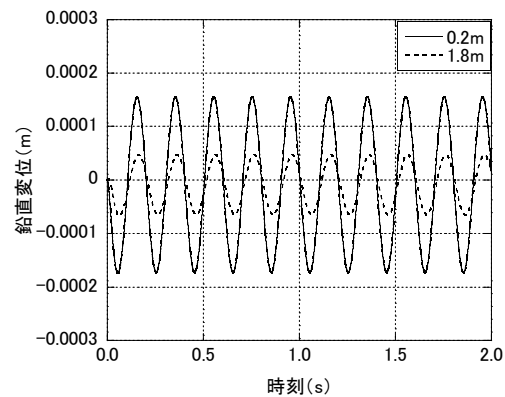
(a) CASE1



(b) CASE2



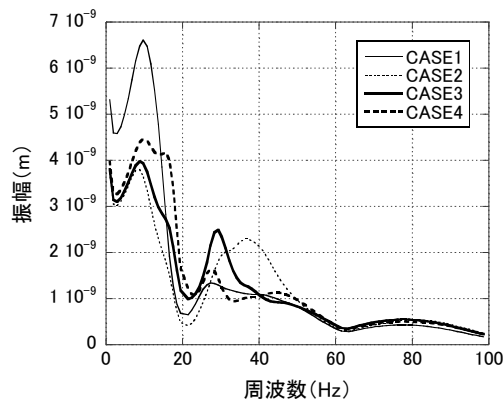
(c) CASE3



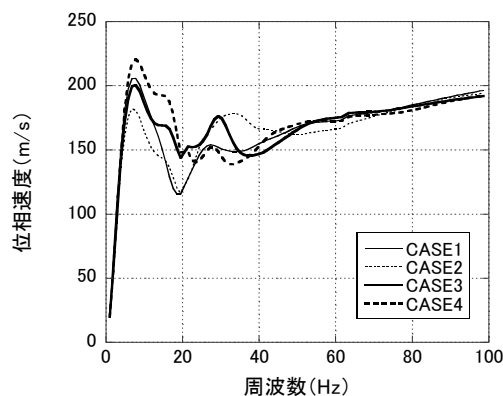
(d) CASE4

図11 時刻歴鉛直変位波形 (5Hz)

図 1 2 に振幅と位相速度の周波数特性を示す。振幅の周波数特性を見ると、全ての CASE で約 10Hz で振幅が大きく増幅される地盤の卓越振動数が確認出来る。硬い層を含まない CASE1 では卓越振動数が現れた後、なだらかに減少している。しかし、硬い層を含む CASE2, CASE3, CASE4 では約 36, 29, 28Hz で再び大きなピークが現れているのが確認出来る。その後は、CASE1 と同様になだらかに減少している。



(a) 振幅



(b) 位相速度

図 1 2 周波数特性

次に、位相速度の周波数特性について見てみると、全ての CASE で振幅の周波数特性よりも小さい 6~8Hz で位相速度が大きくなっている事が確認出来た。また、硬い層が含まれる CASE2, CASE3, CASE4 では振幅の周波数特性で現れたピーク周波数と同様の約 36, 29, 28Hz で再びピークが現れている。その後は全ての CASE において 1 層目のせん断波速度 $V_s=200\text{m/s}$ に近づくような傾向を示している。

以上の事から、振幅と位相速度の周波数特性でのピーク周波数には高い相関がある事が言える。さらに地盤内に硬い層が存在すると、振幅と位相速度が増加する周波数を確認出来た。この周波数は、硬い層が深いほど小さくなる傾向が見られた。また、位相速度は高周波数に近づくほど表面のせん断波速度に近づく事が分かった。

5. まとめ

表面波探査法を省スペースで実施する為に (1) 起振機と 2 個の受振器を用いた測定方法 (2) 起振点近傍での実体波とレイリー波が混在した波の位相速度を用いた測定方法、これら 2 つの有効性を検証した。以下にその結果を示す。

- (1) 地盤内に硬い層（埋設管等を模擬したもの）がある場合、硬い層がない場合に比べて位相速度が大きくなる周波数が表れた。
- (2) 3 層の水平成層地盤モデルの硬い層の深さ位置を変えた場合、位相速度の特異なピーク点は、硬い層の位置が深いほど、低い周波数で表れる傾向を示した。
- (3) 全ての CASE において、高周波数に近づくほど位相速度は地表面の S 波速度に近づいていく傾向が見られた。

以上から、表面波探査法を省スペースで実施する為に用いた測定方法で、地盤構造によって位相速度の周波数特性が異なる事を確認でき、有効性を検証する事ができた。

参考文献

- (1) 鈴木晴彦, 林宏一, 信岡大: 表面波を用いた地震探査—人工振源を用いた基礎的研究—, 物理探査学会第 102 回学術講演会論文集, pp62-65, 2000
- (2) 土木学会編: 動的解析の方法, p12, pp117-118, 技報堂出版, 1989
- (3) 地盤工学会: 地盤技術者のための FEM シリーズ ② 弾塑性有限要素法がわかる, pp54-57, 丸善, 2003
- (4) 土岐憲三: 土木学会編 新体系土木工学 11 構造物の耐震解析, p102, 技報堂出版, 1985
- (5) 春海佳三郎, 大槻明: 有限要素法入門, pp34-38, 共立出版, 2006
- (6) 精木紀男, 正木和明, 荏本孝久, 岩楯徹広, 中島芳久, 高坂隆一: 建築と土木技術者のための地震工学・振動学入門, pp1-6, 吉井書店, 1997
- (7) 土木学会編: 地震動・動的特性, pp3-5, 技報堂出版, 1989
- (8) 大原資生: 耐震工学, pp5-7, 森北出版, 1995
- (9) 田中喜久昭, 長岐滋, 井上達雄: 弾性力学と有限要素法, pp18-20, 大河出版, 1995

各種水素拡散火炎形態の違いによる燃焼特性

谷川 涼一*

吉本 隆光**

Combustion Property with Difference in Various Types of Hydrogen Diffusion Flame

Ryoichi TANIGAWA * Takamitsu YOSHIMOTO **

ABSTRACT

In recent years, we have to think over seriously the efficient use of the heavily consumed energy. The mechanisms of stability and holding about the flame have been studied. It is found that the parameters for holding the IDF, the micro flame and the radial horizontal jet diffusion flame are fuel velocity, co-flowing velocity, nozzle diameter (curvature of nozzle), concentration of fuel etc. The flame structure and lifting mechanism are simulated by using the PHOENICS. The results of numerical computation are compared with the experimental data. The results are obtained as follows. (1) The flame base of the IDF is constantly formed at airy side. (2) The flame base of the radial horizontal jet diffusion flame is lifted bulging outward after it moves closely to a spout with an increase in the jet velocity. (3) When the flow rate of the fuel is very small, the flame structure becomes spherical shape. The factors about structure and

Keywords: IDF, Radial horizontal jet diffusion flame, Micro flame, Numerical calculation, Hydrogen diffusion flame

1. 緒言

内燃機関、ガスタービンなど様々な場面で燃焼技術は用いられている。近年、再生可能エネルギーとしてのバイオマスガスの開発に伴い、低カロリー燃料の燃焼技術も求められている。そのために多種多様の燃焼における火炎安定機構の解明が今まで以上に重要課題となっている。

拡散燃焼は、火炎の安定範囲が広く操作が容易である。しかし、低カロリー燃焼においては、火炎の安定範囲が狭くなるために取り扱いが難しくなる。拡散火炎の安定性には、火炎が形成される火炎基部の構造が影響する。火炎基部についての研究は現在も盛んであるが、不明な点が多い。そこで、様々な条件下における拡散火炎の挙動を調べる必要がある。

塩島らの過去の研究で、純水素及び低カロリー燃焼を想定した希釈水素燃料を用いて正逆拡散火炎を形成し、火炎の安定因子について実験しており、正拡散火炎については、数値計算で解析的に検討されている^{(1),(2)}。その中で、正拡散火炎の安定因子には、ノズル口径(曲率)および火炎基部でのガス流れ状態が大きく影響していることが明らかにされている。

そこで、燃料噴出方法によって火炎形態は異なるので、汎用 CFD ソフト PHOENICS⁽³⁾を用いて各種火炎について数値計算を行い、火炎基部でのガス流れ状態について実験及び数値計算結果を比較・検討する。本報では、燃料と空気の噴出口を入れ替えた逆拡散火炎、水平方向へ放射状に燃料を噴出して形成する放射状水平噴流拡散火炎⁽⁴⁾および微小口径ノズルにより形成されるマイクロフレイムについての火炎内での燃焼特性を報告する。

2. 実験装置・計算方法・計算条件

2.1 同軸流拡散火炎におけるノズルと配管図

Fig.1 にフローシート、Fig.2 にノズル断面図を示す。燃料(水素)及び N₂, CO₂, 空気を流量計で流量調整し、正拡散火炎(NDF)では二重管の内側のノズルから燃料を噴出させて噴流拡散火炎を形成する。逆拡散火炎(IDF)では同軸中心の周囲ノズルから燃料を噴出させ噴流拡散火炎を形成し、内側のノズルから流量計で流量を調整した空気を噴出させ、火炎を形成する。また、マイクロフレイムは Fig.1 に示される NDF 用実験装置を用いる。

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

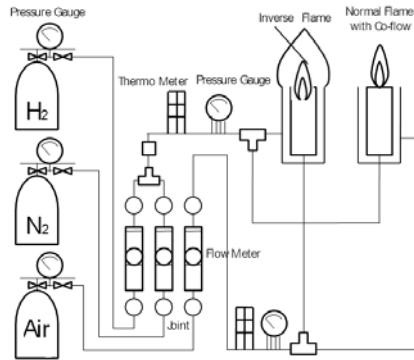


Fig.1 Flow sheet for experimental equipments of NDF and IDF

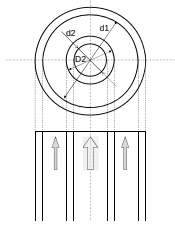


Fig.2 Schematic configuration of nozzle of NDF and IDF

2.2 放射状水平噴流拡散火炎におけるノズルと配管図

Fig.3 に放射状水平噴流拡散火炎のフローシートを示す。流量計で各種燃料及び空気、窒素の流量を調整し、燃料噴出ノズルから噴出させ、火炎を形成する。

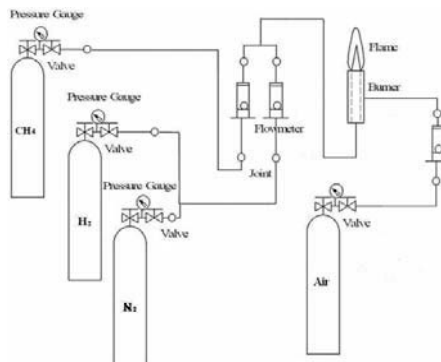


Fig.3 Flow sheet for experimental equipments of the radial horizontal diffusion flame

Fig.4 にノズル設計図を示す。ノズルスリット幅は 1.0[mm], 0.5[mm]の二種類のノズルを用いた。

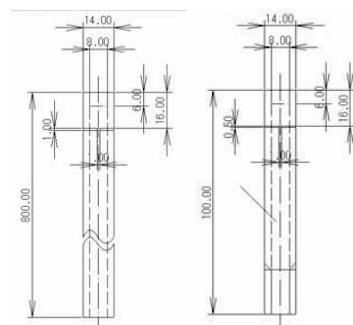


Fig.4 Schematic configuration of nozzles of the radial horizontal diffusion flame

2.3 火炎内温度分布測定器

火炎の温度測定には 0.1[mm]の R 型熱電対 (Pt-PtRh13%) を用いる。温度分布がどのようにになっているかに重点をおいて測定を行う。

2.4 計算方法

PHOENICS は、連続の式、運動方程式、エネルギー方程式を一般化し計算する。圧力・速度連成には SIMPLE 法を用いる。CHEMKIN から物性を参照し、化学種の生成速度係数はアレニウスの式より求める。2 次元円筒座標系(半径方向—軸方向)を用いて定常計算を行うため、 y (半径方向)、 z (軸方向)の支配方程式を用いる。化学反応は水素燃焼の素反応式 16 式(Table 1)を考慮し、層流計算にはLAMINARモデル、乱流計算にはk-εモデルを使用する。以下に化学反応速度係数を求めるアレニウスの式を示す。ただし、 K_f :化学種の生成速度係数、 R :ガス定数、 T :絶対温度とする。

$$K_f = AT^n \exp(-E/RT) \text{ [unit: mol, cal, s, cm, K]} \quad (1)$$

Table 1 Chemical reaction equations and parameter of Arrhenius equation

Elemental reactions					A	n	E
H	+	O ₂	=	OH + O	2.24E+	0	7030
O	+	H ₂	=	OH + H	1.74E+	0	3960
H ₂	+	OH	=	H + H ₂	2.19E+	0	2160
O	+	OH	=	H ₂ + O	5.75E+	0	3270
H	+	H + H ₂	=	H ₂ + H ₂	9.20E+	-0.6	0
H	+	H + N ₂	=	H ₂ + N ₂	1.00E+	-1	0
H	+	H + O ₂	=	H ₂ + O ₂	1.00E+	-1	0
H	+	H + H ₂	=	H ₂ + H ₂	6.00E+	-1.2	0
O	+	O + N ₂	=	O ₂ + N ₂	2.62E+	-0.8	0
O	+	H + M	=	H ₂ + M	1.17E+	0	0
H	+	O ₂ + M	=	HO + M	2.70E+	-0.8	0
H	+	HO	=	OH + OH	2.50E+	0	7950
H	+	HO	=	O ₂ + H ₂	2.50E+	0	2910
H	+	HO	=	H ₂ + O	5.00E+	0	4190
O	+	HO	=	OH + O ₂	4.80E+	0	4190
O	+	HO	=	H ₂ + O ₂	5.00E+	0	4190

2.5 計算条件

2.5.1 逆拡散火炎の計算条件

①希釈した水素を用いた逆拡散火炎

H₂:N₂=30:70 の希釈した水素を用いた逆拡散火炎の数値計算を行う。計算条件を Table 2, 計算領域を Fig. 5 に示す。

②リム厚と火炎基部安定性の関係

純水素を用いた逆拡散火炎において、実験が困難であるリ

ム厚が極めて薄い場合の数値計算を行う。計算条件を Table 2, 計算領域を Fig. 5 に示す。

Table 2 Computational condition of IDF

INLET1-Air velocity	0.6,5.0,10.0[m/s]
INLET2-Fuel velocity	0.6[m/s]
A(Radius)	2.4[mm]
B(Rim thickness)	0.1,0.2,0.3,0.5,1.5[mm]
MODELS	LAMINAR

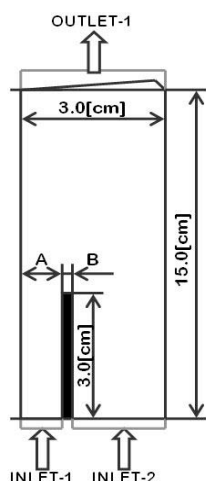


Fig.5 Computational domain of IDF

2.5.2 放射状水平噴流拡散火炎の計算条件

希釈した水素を用いた放射状水平噴流拡散火炎の数値計算を行う。計算条件を Table 3, 計算領域を Fig.6 に示す。

Table 3 Computational condition of radial horizontal jet diffusion flame

INLET1-Fuel velocity	0.5~15.0[m/s]
INLET2-Air velocity	0.1[m/s]
C(Slit width)	0.5,1.0[mm]
MODELS	k- ϵ

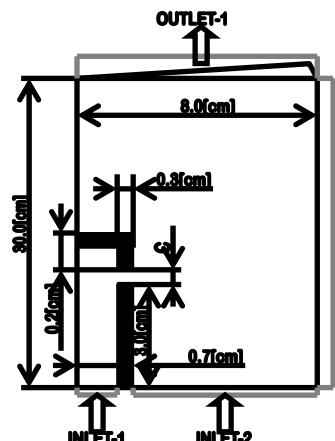


Fig.6 Computational domain of the radial horizontal jet diffusion flame

2.5.3 マイクロフレイムの計算条件

純水素を用いた正拡散火炎におけるマイクロフレイム(ノズル直径 1[mm]以下で形成される火炎)の数値計算を行い、実験結果と比較する。計算条件を Table 4, 計算領域を Fig. 7 を示す。

Table 4 Computational condition of micro flame

INLET-Air velocity	0.5~[m/s]
INLET-Fuel velocity	0.1[m/s]
A(Radius)	0.18,0.34,0.51,0.94[mm]
B(Rim thickness)	0.15[mm]
MODELS	LAMINAR

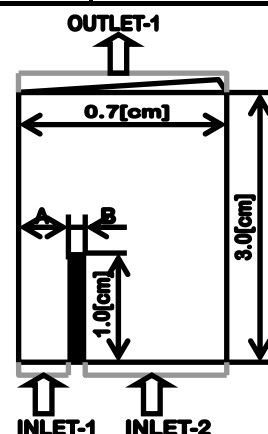


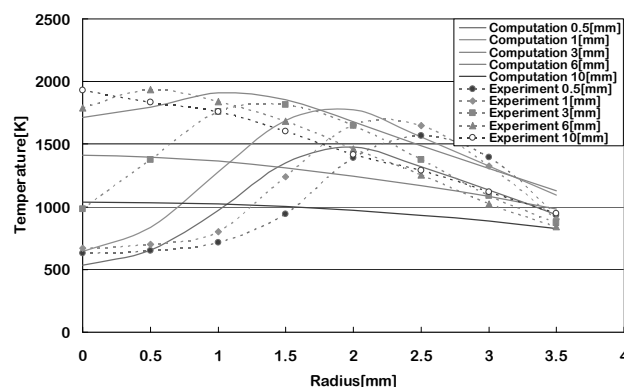
Fig. 7 Computational domain of micro flame

3. 実験結果

3.1 逆拡散火炎

3.1.1 希釈水素を用いた逆拡散火炎

Fig.8 に各断面のノズル半径方向の温度分布を示す。破線が実験結果⁽⁵⁾、実線が数値計算結果である。実験において火炎長さが 10[mm]となる燃料流速が 0.6[m/s]だったため、同流速における数値計算を行った結果、ピーク(火炎面)の位置が実験結果よりノズル中心側に寄った。さらに、高さ 6[mm]の断面では温度分布は平坦となり、実験値よりも温度は低く燃え切りが早くなってしまう傾向がある。しかし、火炎形状に関して考えれば、相似的に小さくなっているといえる。これらの結果から、完全なる一致はみられないが火炎挙動・形状の予測は可能となる。

Fig.8 Radius profiles of temperature (H₂:N₂=30:70)

3.1.2 リム厚と火炎基部安定性の関係

Fig.9 に流速 5[m/s]における実験及び解析結果を示す。リムの内側、つまり空気側に基部が形成されている。数値計算結果も同様の結果を示した。

Fig.10 に流速 10[m/s]で形成される火炎において、外側からリム厚を薄くした時の数値計算の OH 質量分率分布及び速度ベクトルを示す。図中の(5)から(4)ではリム厚が比較的厚みの大きい状態から厚みを減らしており、この時はリム厚の減少に対して火炎の安定性は変化していない。これは逆拡散火炎においては、火炎基部がリムの内側の空気側に形成されるために、内側から噴出する空気の影響を受け易いが、外側のリム厚減少は火炎基部の安定性には寄与しない。しかし、図中の(4)から(1)への、リム厚が極めて薄い状態での厚みの減少においては、リム厚が薄くなるにつれて火炎が浮き上がりやすくなっていることがわかる。これは、火炎基部における燃料と酸化剤の混合部(火炎基部より下側)が希薄状態になり、浮き上がりやすくなると考えられる。



Fig.9 Flame behavior
(V=5[m/s], OH mass fraction)

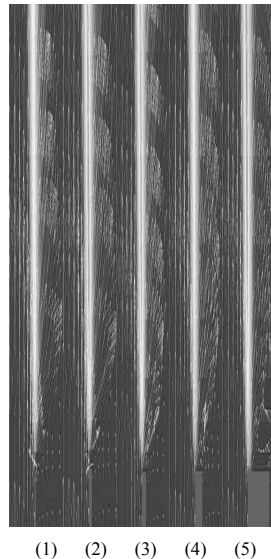


Fig.10 Transition of flame base
(V=10[m/s], OH mass fraction)

3.2 放射状水平噴流拡散火炎

3.2.1 火炎基部の挙動

Fig.11 に水素火炎における噴出速度を上昇させた場合の直接写真, Fig.12 に水素の数値計算による各噴出速度での OH 質量分率分布を示す。火炎基部が噴出口より下部に形成する結果が得られた。鉛直噴出において、火炎基部は空気側に存在していることから、水平噴出の場合も空気側、つまり下部に形成している。噴出速度を上昇させるにつれて火炎基部形成位置が上昇し、火炎形状は半径方向に膨らんでいく。火炎基部が噴出口に達すると、少し火炎基部の位置を下げて浮き上がり、不安定になる現象が見られた。これらは実験結果と数値計算で定性的に一致する。

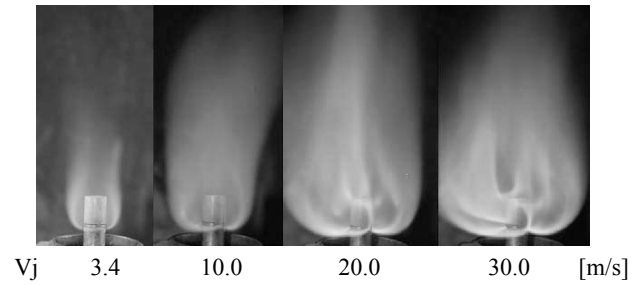


Fig.11 Flame configurations with increasing jet velocity
(Vj: jet velocity) (experiment, H₂:N₂=30:70)

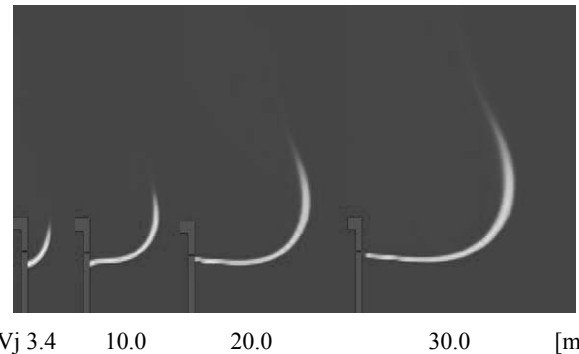


Fig.12 Profiles of OH mass fraction with increasing jet velocity
(Vj: jet velocity)(computation, H₂:N₂=30:70)

3.2.2 実験および数値計算における温度分布の比較

Fig.13 に測定基準を示す。鉛直方向高さを H[mm]、噴出口からの半径方向距離を R[mm]とする。噴出口の下部を H=0[mm]、ノズル管外周面を R=0[mm]、ノズル中央部を R=-7[mm]とする。

Fig.14 に希釈水素火炎(H₂:N₂=50:50)を用いた、スリット幅 0.5[mm]、燃料噴出速度 2.3[m/s]の実測値の温度分布を示す。Fig.15 に数値計算での温度分布を示す。基部がノズル噴射口より下部に形成されるため、ノズル噴射口より低い断面も測定した。実験結果において、下流部では開いた火炎になり、実験の方が数値計算より早く燃え切っている。噴流速度が小さい状態では火炎のサイズが小さいため、循環流による影響は見られなかった。

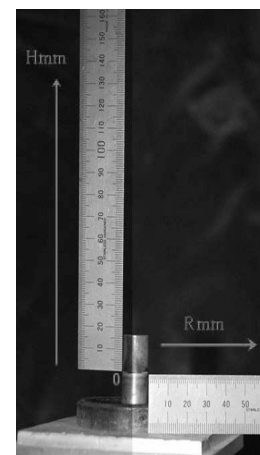


Fig.13 Position of measurement

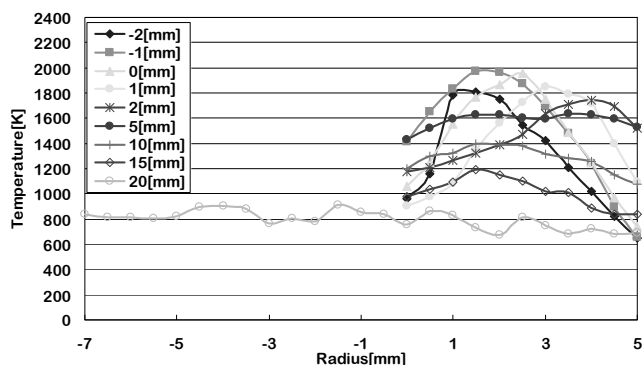


Fig. 14 Radius profiles of temperature
(experiment, H₂:N₂=50:50)

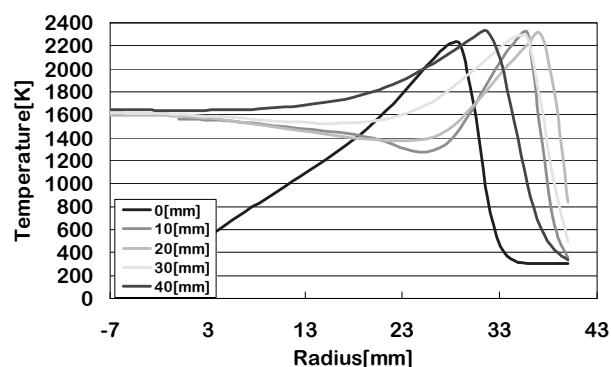


Fig. 17 Radius profiles of temperature (computation)

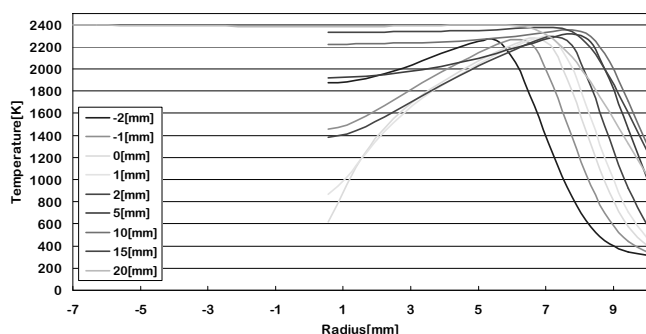


Fig. 15 Radius profiles of temperature
(computation, H₂:N₂=50:50)

3.2.3 循環流の発生とその影響

循環流による影響を考えるため、噴出速度を上げた大きいサイズの火炎で検討する。Fig. 16 にスリット幅 1[mm]、燃料噴出速度 30[m/s]の火炎における数値計算による速度ベクトル図及び等温分布を示す。この図より、火炎面の内側に大きい循環流が形成されていることがわかる。この循環流は、噴流が十分に半径方向に拡散した後、燃焼ガスが上部に流れていく過程で形成される。

Fig. 17 に各断面での半径方向の温度分布を示す。ノズルからの高さ 10[mm]、20[mm]の断面の温度分布で顕著に火炎面より内側に極小値(くぼみ)が発生している。これは、循環流による対流の影響で、くぼみの位置より火炎中心側に熱が運ばれているためだと考えられる。

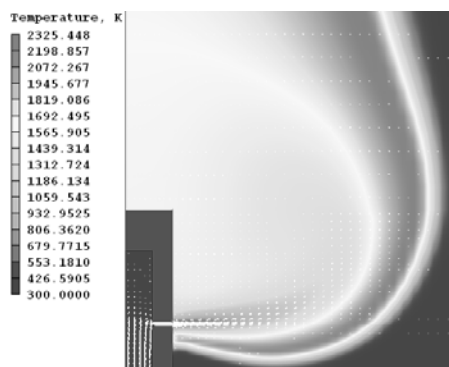
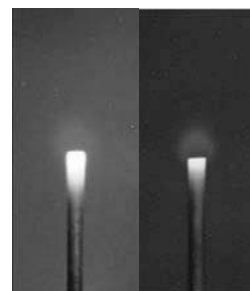


Fig. 16 Contour of temperature with velocity vector

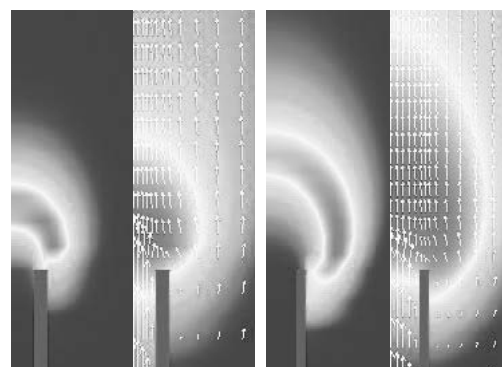
3.3 マイクロフレイムの火炎形状の比較

Fig. 18 にノズル直径 0.51, 0.94[mm]、燃料流速 1.0[m/s]のマイクロフレイムの直接写真⁽⁶⁾、Fig. 19 に同様の条件の数値計算によるOH質量分率分布と速度ベクトル図及び等温分布を示す。拡散火炎において、極めて流量が小さいときは球状の火炎を形成している。火炎基部はノズル先端上面より上流側に存在し、ノズルの中心軸側に火炎基部が寄っている。また、燃料噴出速度を増すと、火炎の下流部は尖った形状の閉じた火炎になり、通常の花火形状に近づいていく。



d=0.51[mm], V=1[m/s] d=0.94[mm], V=1[m/s]

Fig. 18 Flame configurations of micro flame



OH Temperature OH Temperature

d=0.51[mm], V=1[m/s] d=0.94[mm], V=1[m/s]

Fig. 19 Contour of OH mass fraction (left side) and temperature with velocity vector (right side)

Fig.20 は、ノズル口径 0.18[mm],0.34[mm],0.51[mm],0.94[mm] における水素の燃料噴出速度と火炎長さの関係を示したものである。火炎長さは各ノズル口径において燃料噴出速度とともに比例して伸びている。また、実験範囲内で火炎の浮き上がり・吹き飛びには至っていない。

Fig.21 はレイノルズ数 Re と火炎無次元長さとの関係を示したものである。ここで、火炎無次元長さを求める式は

$$l/d \quad (2)$$

$$l : \text{火炎長さ[m]} \quad d : \text{ノズル内径[m]}$$

である。どのノズル口径においても l/d は、レイノルズ数とともに伸び、いずれの線もほぼ一致している。

$$\frac{l}{d} \propto Re \left(= \frac{vd}{\nu} \right) \quad (3)$$

から

$$l \propto \frac{vd^2}{\nu} \quad (4)$$

$$vd^2 : \text{速度} \times \text{断面積} = \text{流量}$$

となり、火炎長さは流量によって決まることがわかる。数値計算でノズル内径 $d=0.94[\text{mm}]$ では実験値とはほぼ一致している。

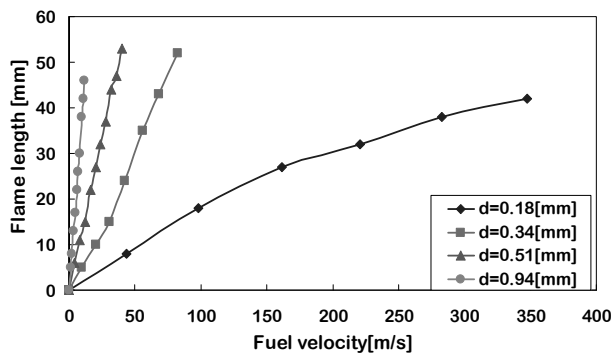


Fig.20 Flame length versus Fuel velocity

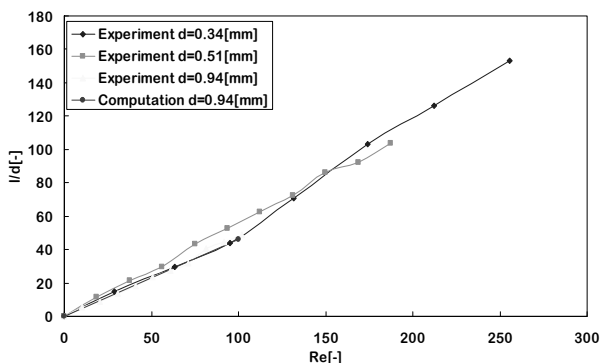


Fig.21 l/d versus Re

4. 結 言

各種火炎における安定要素に関する数値計算を行った。拡散火炎はその燃焼形態、パラメータの違いで大きく特徴が異なるという知見を得た。その結果を以下に示す。

<逆拡散火炎>

- (1) 火炎基部形成位置は正拡散火炎ではリムの外側、逆拡散火炎ではリムの内側、つまり空気側に形成され、空気速度による影響を受けやすい。リム厚が極めて薄い状態では火炎基部における燃料と酸化剤の混合部(火炎基部より下側)が希薄状態になり、浮き上がりやすくなる。

<放射状水平噴流拡散火炎>

- (2) 放射状水平噴流拡散火炎において、火炎基部形成位置は実験及び数値計算で噴射口より下部に形成され、噴射速度上昇とともに噴射口へ近づいた後、少し下部に膨らみながら浮き上がる。

- (3) 数値計算では、放射状水平噴流拡散火炎の温度分布には循環流の影響がみられ、火炎中心軸で温度が上がっている。

<マイクロフレーム>

- (4) マイクロフレームは層流火炎となっており、極めて流量が小さいときは、球状の火炎を形成している。火炎長さは燃料流量に比例して伸び、火炎の大きさは流量に依存している。

参考文献

- (1) Toshimi Takagi, Zhe Xu: "Numerical Analysis of Laminar Diffusion Flames-Effects of Preferential Diffusion of Heat and Species", COMBUSTION AND FLAME 96, pp.50-59, 1994.
- (2) 塩島史哉:「噴流拡散火炎の挙動における数値シミュレーション」, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要第 46 号, pp.43-48, 2007.
- (3) PHOENICS Ver.2008 マニュアル, CHAM 社, 2008.
- (4) 出口幸治:「放射状水平噴流拡散火炎における火炎挙動と安定限界に関する研究」, 第 20 回環境工学総合シンポジウム, 2010.
- (5) 川見唯:「水素逆拡散における燃焼特性」, 産学官フォーラム, 2007
- (6) 久保直志:「逆拡散火炎の安定と挙動に関する実験的研究」, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要第 43 号, pp.7-12, 2004

船用ディーゼルエンジンにおける吸気ガス条件及び各種燃料の変化による燃焼と排ガス特性への影響について

中嶋 聡* 吉本 隆光**

Characteristics of Exhaust Gas and Combustion on the Intake Condition and the Various Fuels in a Marine Diesel Engine

Satoshi NAKAZIMA* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

The diesel engine has the high thermal efficiency and can be powered by the various fuels. However diesel, the contents of exhaust gas from diesel engine (Soot dust, NO_x , SO_x and other toxic substances) cause to the air pollution. The objectives of this study is to investigate experimentally the influence on combustion in the diesel engine by mixing various gas (N_2 , CO_2 , CH_4 and such low-calorie gas as renewable biofuels) and using various fuel (Light oil, Heavy oil). The thermal efficiency, the fuel consumption rate, the species of chemical concentrations and the pressure in the cylinder are measured. The results obtained are as follows. (1)The pressure is raising and the fuel consumption rate can be reduced by mixing air with methane. (2) NO_x concentration of the exhaust gas is decreasing by mixing the air with nitrogen or with carbon dioxide.

Key words : Diesel engine, Exhaust gas, NO_x , Condition of aspiration, Thermal efficiency

1. 緒言

高まる環境問題への取り組みの中、各種内燃機関の排出ガスによる大気汚染は地球環境に大きな影響を及ぼしている。さらに石油自体の枯渇問題が深刻となっており、再生可能エネルギーのような新しいエネルギーが重要視されている。

ところで、ディーゼルエンジンは熱効率が高く、低回転から安定したトルクを得ることが可能なため、船舶や大型自動車など様々な分野で使用されている。さらに近年では、低カロリーバイオ燃料などの再生可能エネルギーを幅広く用いることができることから注目を浴びている。しかし、ディーゼルエンジンの排出ガス中には、ばいじん、窒素酸化物、硫黄酸化物など環境に有害な成分が含まれており、排ガス対策が求められてきている。

本研究では船用ディーゼルエンジンを用いて、燃料や吸気条件を変えた場合において、排ガス成分やエンジンの性能にどのような変化が見られるかを検討する。

そこで、自然吸気状態（通常のエンジンのように大気からの空気を吸入する）を基に、コンプレッサーにより強制的に空気を供給する強制送気状態、強制送気に低カロリーバイオ燃料を想定したメタン及びEGR（排気再循環）を想定した窒素や二酸化炭素を混ぜた状態、また各種燃料（軽油、A重油）において、回転数や吸気量の変化によるエンジン性能（熱効率、燃料消費量、燃焼室内の圧力）ならびに排ガス濃度（ NO_x 濃度、 O_2 濃度）の測定を行い、燃焼特性や排ガス特性への影響について調べ、ディーゼルエンジンを運転するのに最適な条件を求める。

2. 実験装置と方法

2.1 使用機関

供試機関としてディーゼル機関（ヤンマーディーゼル製1600cc 4ストローク2気筒 予燃焼室式エンジン 13.2[kW]/1800[rpm]）を使用した。機関の主要緒元をTable 1に示す。

Table 1 Specification of diesel engine

Form	Yanmar2TL
Bore×stroke[mm]	95×115
Cylinder	2
Compression ratio	18.6
Max power[kW/rpm]	13.2/1800
The length of connecting rod[mm]	230
The length of crank arm[mm]	57.5
Fuel jet timing	10~12°before TDC
Fuel jet pressure[MPa]	16
Valve lift in no compression[mm]	1.1

また、この機関には直流電気動力計（容量11[kW]、回転数550~1650[rpm]、電圧220[V]、電流37[A]）がたわみ軸継ぎ手を介して接続されている。

Fig.1に示すのは実験装置の簡略図である。燃焼用空気を送気するためにコンプレッサー（回転数1000[rpm]、吐き出し空気量850[L/min]、最高圧力0.71[MPa]、電源200[V]；日立製作所製）を用いた。

*専攻科 機械システム工学専攻

**機械工学科 教授

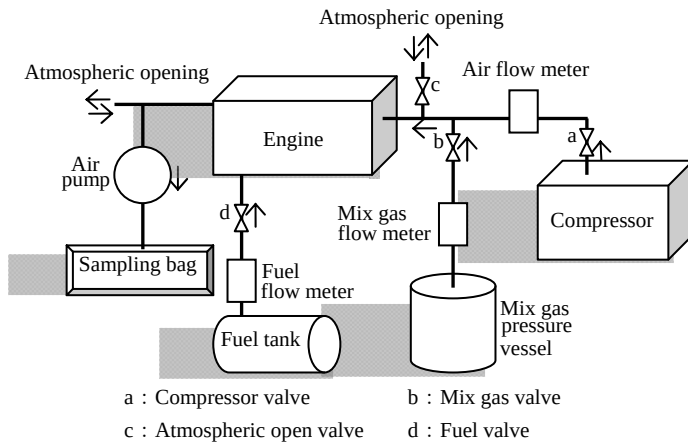


Fig. 1 Flow diagram of engine

2.2 使用機器

排ガス中の NO_x を測定するために NO_x 測定装置（NOA-8000：島津製作所製）、未燃焼成分及び O_2 を測定するために排ガス O_2 計（GD-D8：理研計器製）、 H_2S を測定するために有害ガス検知器（GX-111：理研計器製）を使用した。また、強制送気用の空気、窒素、二酸化炭素及びメタンの流量の計測にはフロート式流量計（KOFLOC製）を用いた。

燃焼室内の圧力を測定するために圧力変換機（PE-200KJ：共和電業製）を用いる。また上死点と下死点の時期を測定するため、エンジン部のフライホイールに白線を塗り、それぞれの死点に合うように黒マークした。そこに光を当て、フォトランジスタにより反射光を読み取り、圧力信号と組み合わせて計測を行った。Fig.2は圧力変換機からコンピュータまでの経路を示した模式図である。

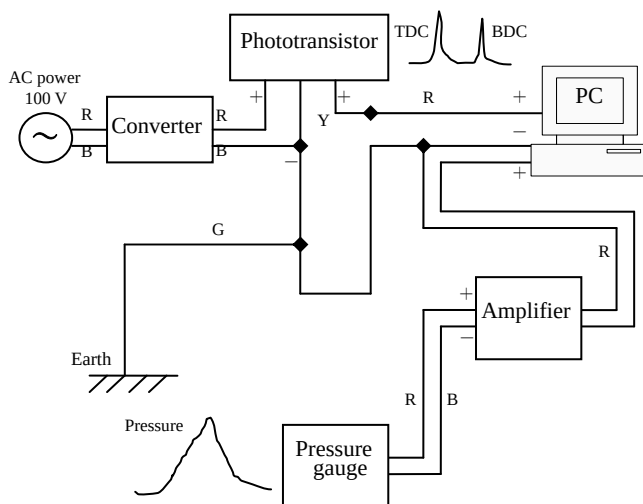


Fig.2 Flow diagram of pressure gauge

2.3 実験条件及び実験方法

ディーゼルエンジンの吸気条件をTable 2に示す。吸気条件は主に、自然吸気状態とコンプレッサーによる強制送気状態に分けられ、混合ガスは強制送気の燃焼空気中に混入させる。

Table 2 Intake condition

Fuel	Light oil, A heavy oil, Methane
Number of revolutions	From 800 to 1800[rpm]
Quantity of forced supply air	800[L/min]
Species of gas added into the combustion air	Methane (CH ₄) Nitrogen (N ₂) Carbon dioxide (CO ₂)
Quantity of N ₂ /CO ₂ mixed into air	From 25 to 100[L/min]
Mixture ratio of methane (CH ₄)	From 0% to 4% of combustion air
Measured components of exhaust gas	NO _x and O ₂

さらに、それぞれの吸気条件において回転数は800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800[rpm]の6種類で実験を行い、燃料は軽油とA重油を使用した。Table 3に燃料の成分及び物性を示す。

Table 3 Fuel property

	A-heavy oil	Light oil
Sulfur content [%]	0.09	0.05 or less
Carbon content [%]	(86.0)	(85.5)
Nitrogen content [%]	(0.020)	(0.005)
Specific gravity 15/4°C	0.85	0.83
Lower calorific value [kcal/kg] (kJ/kg)	10200 (42700)	10300 (43100)
	JIS K2205	JIS K2204

※ () は参考値

また、強制送気の800[L/min]の空気量は4サイクルの供試機関が1000rpm時の排気量より、必要空気量を推定した値である。式(1)のようになる。

$$1600[\text{cc}] \times 1000[\text{rpm}] \times \frac{1}{2} = 800[\text{L/min}] \quad (1)$$

なお、メタンを供給する際は急激な燃焼を避けるため、多量のメタンが一気に燃焼室内に流れないように、徐々に開栓する。

排ガスは、燃焼室出口から真空ポンプにより吸引され、サンプリングバッグ（デュボン製テトラバッグ）に集められた後、各測定機器にて成分を分析する。排ガス中の NO_x 濃度は、酸素濃度が13%時に換算して比較するため、式（2）にて整理する。

$$13\% \text{換算 NO}_x \text{ 濃度} = \frac{21-13}{21-\text{O}_2 \text{ 測定濃度}} \times \text{測定 NO}_x \text{ 濃度} \quad (2)$$

3. 実験結果

以下に実験結果を示す。

3.1 燃焼特性

3.1.1 熱効率

Fig.3とFig.4はそれぞれ、軽油及び重油を使用した時のエンジンの軸出力に対する熱効率を表している。図中の実線、破線はそれぞれ強制送気と自然吸気の熱効率を表している。エンジンの軸出力が低いときの熱効率は徐々に増加していくが、高出力になるにつれ、熱効率は減少する。

高出力時は自然吸気に比べ、強制送気の効率は低下している。これは、コンプレッサーによる強制送気の場合、空気の供給量が不足し、効率が下がっているものと思われる。また、窒素及び二酸化炭素混入により強制送気に比べ熱効率が下がっており、メタン混入により熱効率は上がっていることがわかる。本研究におけるメタンは従来無効エネルギー燃料である低濃度・低カロリーバイオ燃料を想定しているため、全入熱量にメタンの発熱量を含めないため、熱効率は高くなっている。

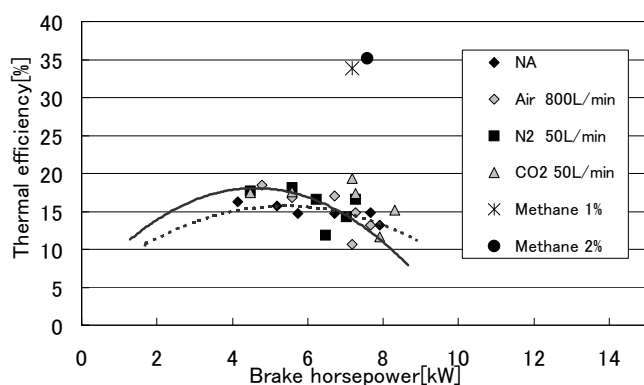


Fig.3 Thermal efficiency of light oil

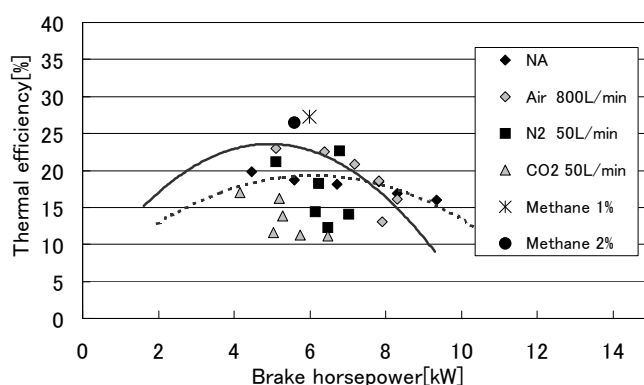


Fig.4 Thermal efficiency of heavy oil

3.1.2 燃料消費量

Fig.5は全入熱中のメタンの熱量割合に対する燃料の消費量を示している。メタン混合により軽油及び重油の消費量の減少がした。ただし、一定以上超えると燃料消費量の減少が不安定となるので、メタンの熱量割合は20～30%が限界である。これは、全空気量に対するメタンの混入割合に置き換えると1～2%である。

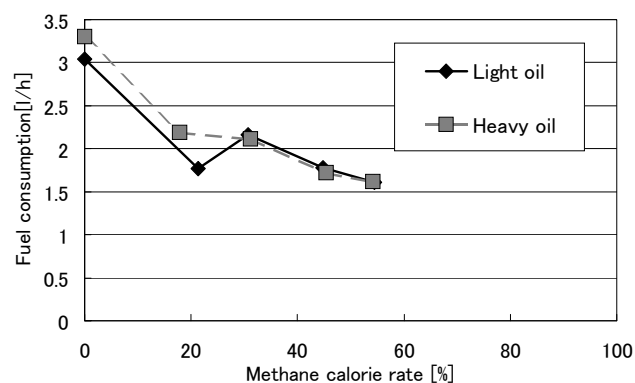


Fig.5 fuel consumption

3.2 圧力線図

3.2.1 燃料による比較

Fig.6とFig.7は1000[rpm]一定での各吸気条件における燃焼室内の圧力を示し、それぞれ軽油と重油の比較である。どちらの燃料においても自然吸気の圧力が最も低くなり、コンプレッサーによる“送気”を行うことで圧力が増加し、特に、メタン混入時の最高圧力は上昇した。また、強制送気と比べ、窒素及び二酸化炭素混入による差異は見られなかった。

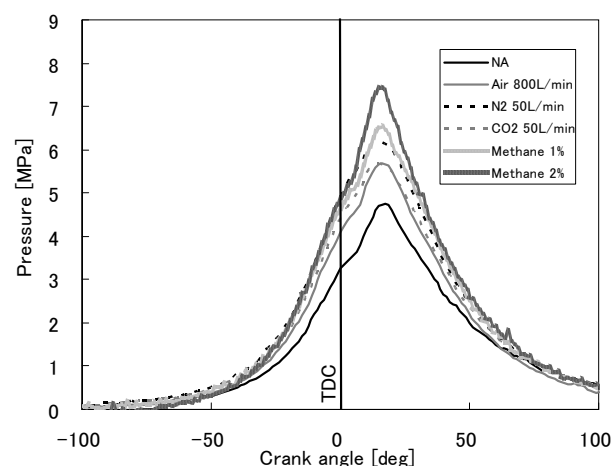


Fig.6 Pressure diagram in case of light oil for 1000[rpm]

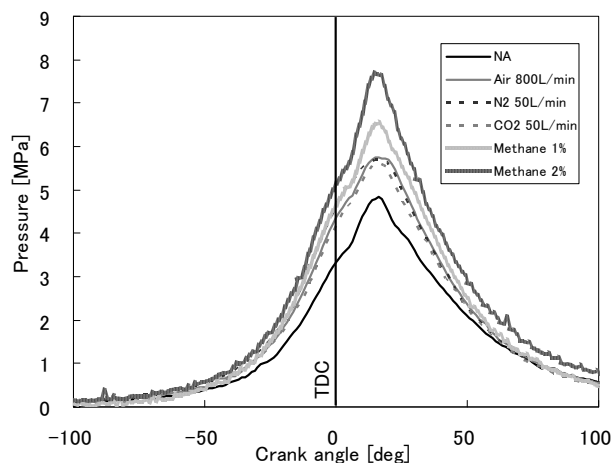


Fig.7 Pressure diagram in case of heavy oil for 1000[rpm]

3.2.2 メタン混入量による比較

Fig.8はメタンの混入割合の変化による燃焼室内の圧力を示す。また、燃料は重油を使用し、1000[rpm]一定とする。メタンの混入割合によって圧力が増加していることがわかる。しかし、メタンの混入割合が4%で9[MPa]近くに圧力が上がっていることから、エンジンにかなりの負担がかかっている事がわかる。

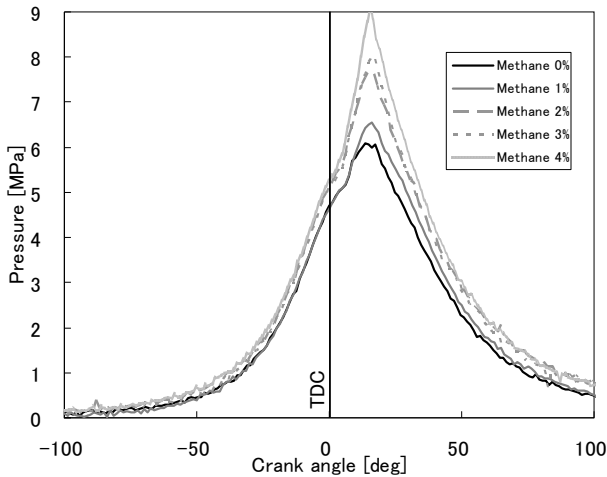
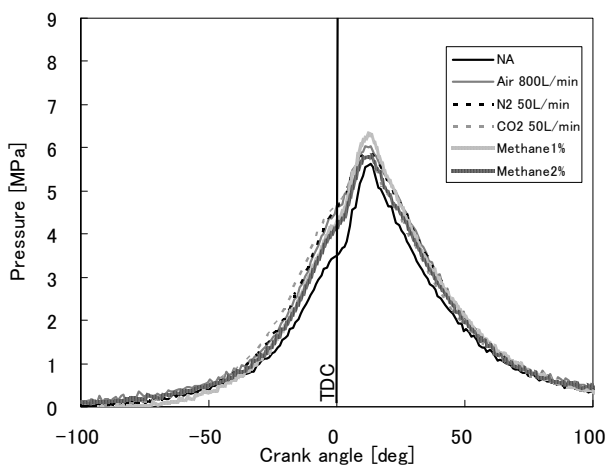


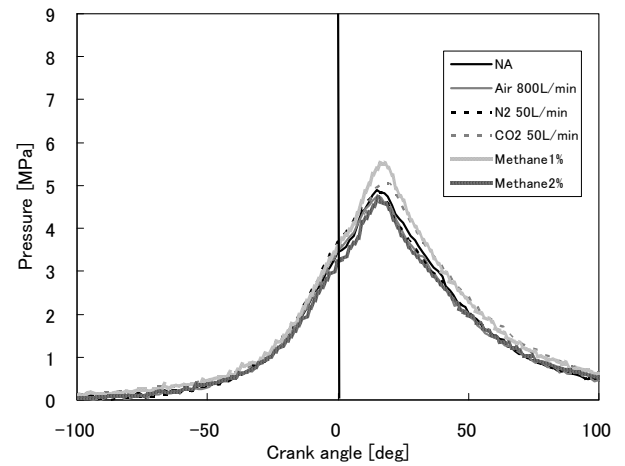
Fig.8 Pressure diagram with increasing mixture ratio of methane for 1000[rpm]

3.2.3 回転数による比較

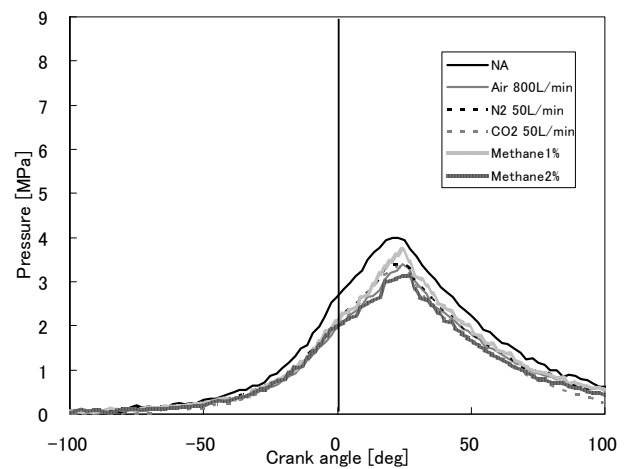
Fig.9は各吸気条件及び回転数における燃焼室内の圧力を示し、(a), (b), (c)はそれぞれ800[rpm], 1200[rpm], 1800[rpm]時の比較である。また、燃料は軽油を使用した結果である。(c)においては自然吸気の圧力が最も高くなっている。これは、熱効率と同じ傾向であり、コンプレッサーによる強制送気ではエンジンの吸気量が不足し、燃焼性が悪くなったためであると思われる。また、回転数が高くなるにつれ、燃焼室内の圧力は低下していくことがわかる。



(a) 800 [rpm]



(b) 1200 [rpm]



(c) 1800 [rpm]

Fig.9 Pressure diagram in case of light oil for each revolution

3.2.4 着火遅れ

Fig.10は各吸気条件におけるエンジンの軸出力に対する着火遅れを表している。図中の実線、破線はそれぞれ自然吸気と強制送気を表している。自然吸気に比べコンプレッサーによる強制送気は着火が遅れているのがわかる。また、窒素及び二酸化炭素混入時は強制送気に比べて着火時期は遅くなり、メタン混入により、着火が早くなる。

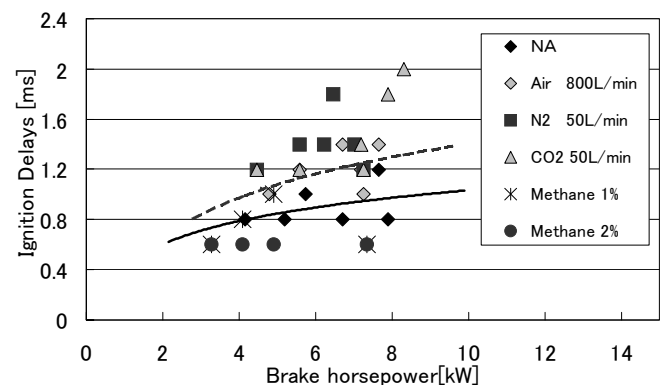


Fig.10 Ignition delays

3.3 P-V線図

3.3.1 燃料による比較

Fig.11とFig.12は各吸気条件におけるP-V線図を示し、それぞれ軽油と重油の比較であり、回転数は1000[rpm]一定とした。メタン混入により最高圧力が上がっていることがわかる。また、燃料の変化による大きな差異は見られなかった。

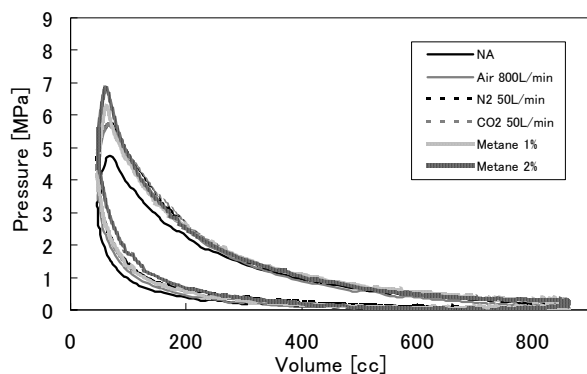


Fig.11 P-V diagram in case of light oil for 1000[rpm]

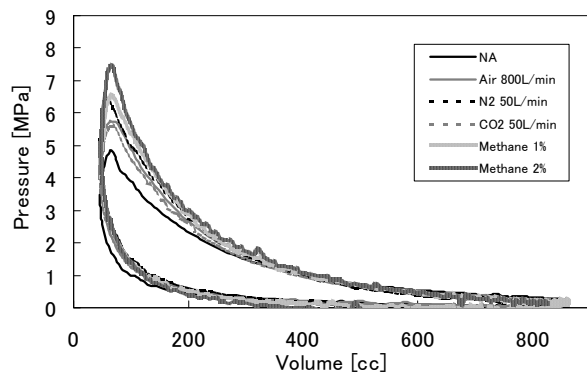


Fig.12 P-V diagram in case of heavy oil for 1000[rpm]

3.3.2 メタン混入量による比較

Fig.13はメタンの混入割合によるP-V線図を示す。また、燃料は重油を使用し、1000[rpm]一定とした。メタンの混入量の増加に伴い燃焼室内の最高圧力が上がっていく。これにより、P-V線図はオットーサイクルに近づいていく。

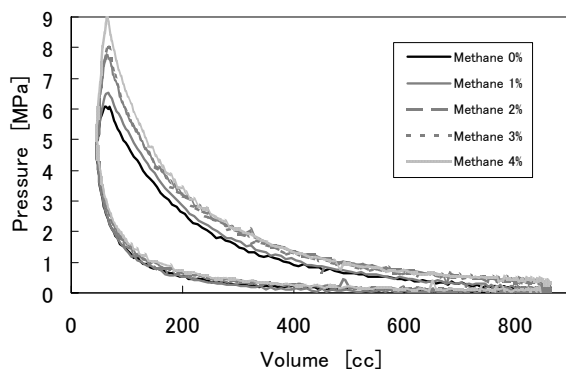


Fig.13 P-V diagram with increasing mixture ratio of methane for 1000[rpm]

3.4 排ガス分析（混合ガスの流量割合による比較）

3.4.1 NO_x濃度

Fig.14は1000[rpm]一定で、混合ガスの流量割合に対するNO_x濃度（13%酸素濃度換算）を各吸気条件及び各燃料で比較したものである。いずれを混入させてもNO_x濃度は減少した。窒素と二酸化炭素は混入量を増やすことで、NO_x濃度は徐々に減少していく。図中のLは軽油、Hは重油を表している。軽油に比べ重油のNO_x濃度が高いことがわかる。これは、重油成分に含まれる窒素分、つまりフューエルNO_xの影響とも考えられる。

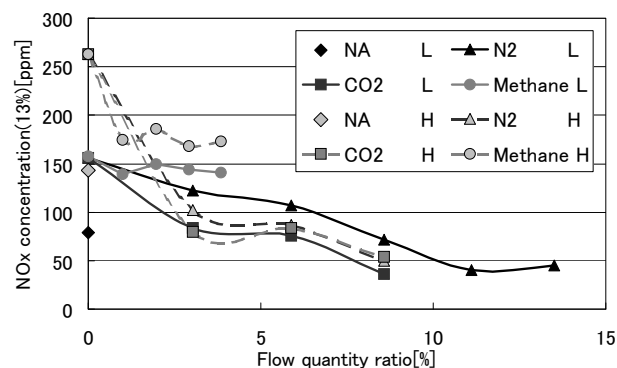


Fig.14 NO_x concentration for flow quantity ratio

3.4.2 H₂S濃度

Fig.15は1000[rpm]一定で、混合ガスの流量割合に対するH₂S濃度を各吸気条件及び各燃料で比較したものである。図中のLは軽油、Hは重油を表している。窒素及び二酸化炭素の混入割合によりH₂S濃度は徐々に減少していく。しかし、メタンの混入割合により増加しているのがわかる。これは、メタンの燃焼により、主燃料である軽油や重油の燃焼が十分でないため、上昇したのだと考えられる。

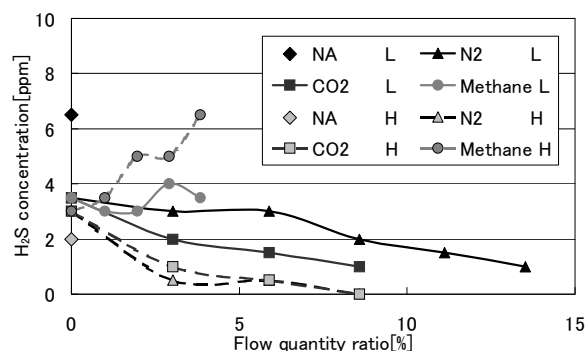


Fig.15 H₂S concentration for flow quantity ratio

3.4.3 未燃焼成分

Fig.16は1000[rpm]一定で軽油を使用した時の混合ガスの流量割合に対するTHC濃度を各吸気条件で比較したものである。強制送気と比べ、窒素及び二酸化炭素の混入時にTHC濃度はほぼ横ばいなのに対し、メタン混入時は徐々に増加していき、3%を越えたところで急激に上昇し、不完全燃焼になっている。これにより、メタンの混合限界は3%であることがわかった。

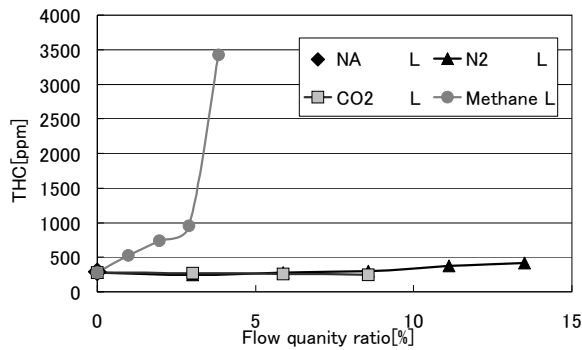


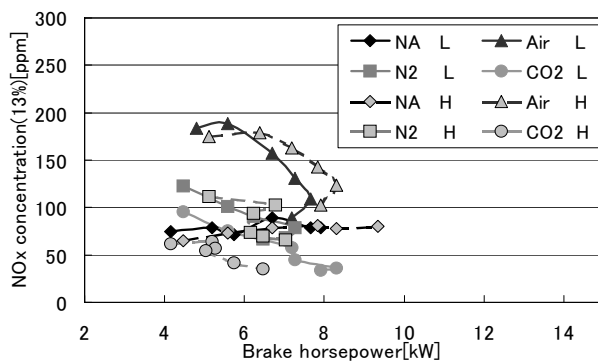
Fig.16 THC concentration for flow quantity ratio

3.5 排ガス分析 (軸出力による比較)

3.5.1 NO_x濃度

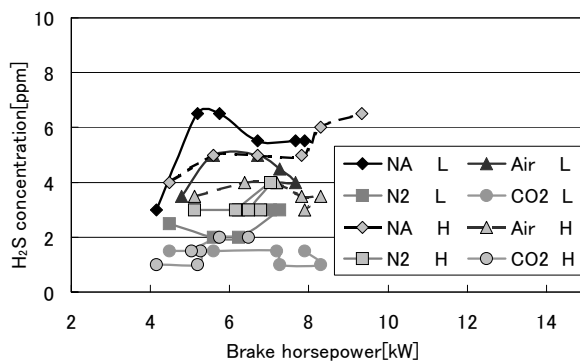
Fig.17はエンジンの軸出力に対する酸素濃度を13%に換算したNO_x濃度を各吸気条件及び各燃料で比較したものである。図中のLは軽油，Hは重油を表している。

自然吸気に比べ強制送気の方がNO_x濃度は高く，コンプレッサーを用いた送気条件の場合，高出力になるにつれて，NO_x濃度が下がる傾向にあることがわかる。また，窒素及び二酸化炭素混入時は全体的にNO_x濃度が低く，NO_x濃度の低減効果が得られる。

Fig.17 NO_x concentration for brake horsepower

3.5.2 H₂S濃度

Fig.18はエンジンの軸出力に対するH₂S濃度を各吸気条件及び各燃料で比較したものである。図中のLは軽油，Hは重油を表している。自然吸気によるH₂S濃度が最も高く，高出力になるにつれ徐々にH₂S濃度は高くなっている。また，二酸化炭素混入時のH₂S濃度は低くなることがわかる。

Fig.18 H₂S concentration for brake horsepower

3.5.3 未燃焼成分

Fig.19はエンジンの軸出力に対するTHC濃度を各吸気条件及び燃料で比較したものである。吸気条件での差異はあまり見られないが，コンプレッサーを用いた吸気条件の場合，高出力・高回転時に大きく上昇していることがわかる。

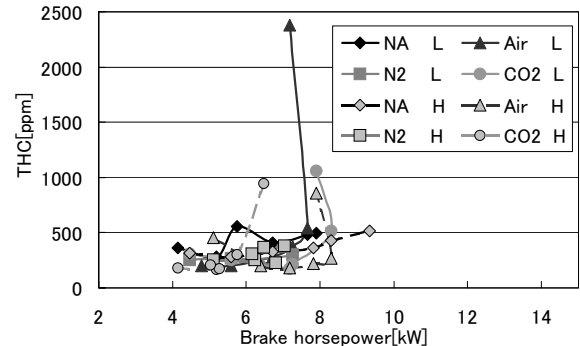


Fig.19 THC concentration for brake horsepower

4. まとめ

- (1) 自然吸気に比べてコンプレッサーを用いた吸気条件では低出力時は熱効率や圧力線図からみても安定な燃焼が行われているが，高出力時は空気の吸気量が不足し，燃焼性が悪くなった。
- (2) 燃料の変化により燃焼特性に大きな差異は見られなかったが，軽油に比べ重油は，窒素分が多く含まれ，NO_x濃度を高くするなどの排ガス成分に影響を与えた。
- (3) 窒素及び二酸化炭素混入により，着火が遅れ，熱効率が下がるなど燃焼性は悪くなるが，NO_x濃度の低減効果があり，EGR等による低NO_x対策への知見が得られた。
- (4) メタン混入により燃焼室内の圧力が上がり，燃料消費量を抑えることができるが，エンジン自体の耐久性や，未燃焼成分などから，本研究でのメタンの混合限界は2～3%である。

参考文献

- (1) 中嶋聡，他：「船用ディーゼルエンジンでの吸気ガス条件の変化による燃焼と排ガス特性への影響について」，第79回マリンエンジニアリング学術講演会論文集，pp.13, 2009.
- (2) T. Yoshimoto, Y. Nishikawa et al., "Influence on Characteristics of Combustion and Exhaust gas for Gaseous Fuel in a Marine Diesel Engine", ISME Busan 2009, CT-1.43, 2009
- (3) S. Nakazima, T. Yoshimoto et al, "Characteristics of combustion and exhaust gas for renewable fuel in diesel engine", RENEWABLE ENERGY 2010, P-Bm-541, 2010.

コーヒーを化学する

渡辺昭敬* 小泉智恵子** 戸田文博** 原田光嗣** 中田里絵**

Chemical analysis of Coffee

Akihiro WATANABE*, Chieko KOIZUMI**, Takehiro TODA**, Mitsugu HARADA** and Rie NAKATA**

ABSTRACT

The simple chemical analyses were performed to the coffee. The acid values of coffee were measured and correlated with a sour taste of coffee. The acid values increased with roast of coffee beans at first then decreased. Absorption spectra of coffee were measured and two peaks were assigned to caffeine and chlorogenic acid. Three colored partitions were appeared with gel permeation chromatography of coffee and absorption spectra of each partition were measured. Thermal analyses (TG and DTA) were performed to coffee beans. The 5 % weight losses of each coffee bean in TG were contained around 100 °C; these behavior should be from chemical reactions with roast.

Keywords: Coffee, Chemical analysis, Acid value, Absorption spectra, TG, DSC

1. 序論

タイトルにはたいそうなことをあげているが、本稿の主眼は、本科の5年生が、高専5年間で学んできた知識、技術を用いて、卒業研究において、コーヒーという物質に対して、どのようなことを研究できるかを模索してきたものをまとめたものである。

コーヒーについて化学的観点からみると、コーヒーは、生豆を焙煎することで初めて特有の味や香りを生じる。これは加熱によって生豆中の成分が化学変化を起こすためである。その結果生成した物質には多種多様のものがあるが、味覚にはクロロゲン酸類が主な働きを示し、色については主に3種の反応が関与していると言われている¹⁾。本研究では、コーヒーへの化学的アプローチとして、味覚に通じる、コーヒーの酸価測定、また、コーヒーの色についてはゲル濾過クロマトグラフィーを用いて成分分離を試みた。最後に焙煎には必要不可欠な熱とコーヒー豆の安定性にどのような関係があるかを調べるために熱分析を行った。以下、各測定について、コーヒーとの関わりについてまとめる。

コーヒーの酸価測定においては、コーヒーの酸味と

酸価の関係に注目し、簡単な滴定により酸価を決定し、それが、酸味の客観的な判断と関係づけられるかどうかの可能性について検証した。コーヒーには多くの成分が含まれるが、特に味覚に関わっていると考えられるクロロゲン酸類は熱に不安定で加水分解によりキナ酸とコーヒー酸を生じる。またそれ以外にも直接、糖類やアミノ酸などと反応して褐色色素の一部に変化することも知られている。これらの焙煎による変化のためクロロゲン酸類の量も焙煎に伴って変化する。味覚については、市販されているコーヒー豆は、酸味の強弱を各店それぞれで表示しているが、酸味の決定はカップテストなどによる主観的な判断によって行われている。一般には豆を浅煎りで仕上げるほど酸味が強く、深煎りにするほど苦味が強くなると言われている。本研究では、実際に感じる酸味(味覚)と実験で得た酸価を比較してバロメーターを示すことを目的とする。さらに生豆から深煎りまでローストの度合いとその時のコーヒーの酸価との関係と、コーヒーを淹れてから時間が経ったものは酸味が増す、という通説に対して酸価の経時変化からの観点で検証した。

コーヒーの色については、コーヒーは褐色を呈する液体ではあるが、豆の種類や焙煎度によって微妙にそ

*応用化学科 准教授

**本科 応用化学科

の色彩は異なる。この褐色の形成はカラメル化、メラード反応およびポリフェノール類の酸化重合の3経路からなっていると考えられている。本研究ではコーヒーの色彩について深く分析を進めるため、コーヒー原液の吸光度を測定した。また、カラムクロマトグラフィーを用いてコーヒー液色素の分離を試み、分離された色素の種類やそれら色素の紫外域のスペクトルを測定して豆による違いについて考慮した。これらの紫外域のスペクトルと、各色素のスペクトルの特徴からコーヒーの色彩の客観的な判断基準の可能性について検討した。

熱化学の応用については、コーヒー豆の焙煎との関係を考えることになるが、コーヒー豆の「焙煎」とは、一般的にコーヒー生豆を火力で煎る操作である。焙煎によりコーヒーの生豆を人為的に加熱することで生豆中に含まれる水分を蒸発させ、化学的な成分変化を引き起こして、それぞれの生豆の特性を最大限引き出し、コーヒー独特の色、香り、風味となる。今日では、コーヒー豆の焙煎メカニズムや焙煎過程での化学的な変化についても少なからず報告されてはいるが解明されていない部分も多く、研究が必要とされている。本研究では、焙煎によるコーヒー豆の熱化学的变化に注目し、コーヒー生豆・焙煎済み市販豆を用いて、熱分析(熱重量測定: TG、示差熱分析: DTA)を行い、焙煎過程での変化を化学的に検証した。

以下、おのおの実験操作を述べ、その後、結果について触れていきたいと思う。

2. 実験操作

2-1. 酸価の測定

コーヒーの酸価は、酸価滴定により決定した。指示薬はフェノールフタレイン、滴定液には 1/500 N-KOH 水溶液を使用した。測定液がもともと淡色を帯びているので、変色点を見間違わないよう注意した。

測定に使用するコーヒー液の調整は、対象のコーヒー豆 20 粒を電動ミルで 30 秒挽き重量測定後に、熱湯 50 ml を一気にに入れて 30 秒攪拌する。これをろ過したものを原液とする。その原液 1 ml を百倍希釈して滴定を行った。

測定に使用した豆は、目的により数種類用意した。酸味と酸価の関係を調べるために、あるコーヒーショップ(天秤珈琲)の酸味の異なる3種類(「サワー」「マイルド」「ストロング」)を用意した。これにより、酸味と酸価の関係が明らかになるはずである。この結果をふまえて、同じ職人がほぼ同じ程度で焙煎した産地別(ケニア、エチオピア、コロンビア、エクアドル)の酸価滴定を行い、産地別に酸価が異なるかをみた。また、焙煎度別によって、酸価がどのように変化する

か比較する場合には、自家製の焙煎器を用いて焙煎し、色によって、大まかに7段階に分類した。²⁾

珈琲の味が時間経過により変化することはよく知られているが、それが酸価と関係があるかどうか調べるために、酸価の経時変化についても測定した。抽出液を3時間、24時間時間放置し多後の酸価を測定し、考察した。

2-2. コーヒーの色彩スペクトル

コーヒー抽出液に対して、分光光度計(日本分光 Ubest-250)を用いて、紫外吸収スペクトルを測定した。抽出したコーヒーでは、吸光度が高すぎるので、500倍に希釈して測定を行った。また、原液の抽出においては、産地別、焙煎度別に用意して測定を行った。

コーヒーの色彩を決める要因を探るべく、コーヒー抽出液にゲル濾過クロマトグラフィーを適用した。使用した充填剤は Sephadex-G25、展開溶媒は水、オープンカラムで行った。分離された着色溶液について紫外可視吸収スペクトルを測定した。

2-3. コーヒー豆の熱分析

熱分析測定として、熱重量測定(TG)ならびに示差熱分析(DTA)をおこなった。装置はセイコー電子株式会社 TG/DTA6200 熱分析システムを用いた。本研究では、実際の焙煎に近づけるために、ガスフローは使用せず空気中で行った。また、資料は電動ミルで粉碎後、10 mg を量りとして測定した。測定したコーヒー豆は産地別に4種類(キューバ、コロンビア、エチオピア、ブラジル)であった。測定条件は 0-500 °C までの温度上昇の変化と 200 °C 保持で 50 分間の時間変化を見た。

3. 結果と考察

3-1. コーヒーの酸価について

本来、有機酸の酸価については、試料 1g を中和するのに必要な水酸化カリウム(KOH)の mg 数を指すのであるが、本研究ではそれに比例する量であるので、滴定に要した KOH 水溶液の体積を酸度とし、その大小で比較することにした。

3種類の酸味の異なるコーヒーについて、酸度を測定した結果を図1に示す。図中には示していないが、測定の誤差は各試料 15 回適定を行って、±1 程度であったので、有意な差が存在するといえる。

又、各試料豆の入手先の味覚チャート³⁾を図2に示す。名前の通り、サワーブレンドがもっとも酸味が強く、ストロングブレンドになるほど苦みが強くなって、逆に酸味は落ちるのであるが、今回の酸度の測定結果は見事にその傾向と一致しているといえる。従って、酸度の測定から、酸味の程度を予測することがで

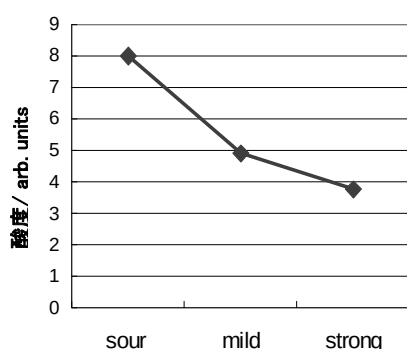


図 1. コーヒーの酸度.



図 2. コーヒーの味覚チャート.

きることが明らかになった。また実際に味を試してみてもサワーブレンドが一番酸味を感じ、ストロングブレンドが一番苦味を強く感じた。ちなみにこのとき使用したブレンド豆の色はサワー、マイルド、ストロングの順に濃くなっており、豆の種類よりも焙煎度合いの影響を強く受けていることが考えられる。

また、同じ度合いで焙煎された産地別の四種類の豆の酸度については、多少の差はあるものの、ほとんど差は見られなかった。このことから酸度に影響しているのは焙煎度合いが関与しているのではないかと考えられる。

自家焙煎した豆について、生豆を 1、もっとも深煎り状態の豆を 7 として、各抽出液について酸度を測定した結果を図 3 に示す。この測定結果を見ると生豆の酸度に比べて中煎りくらいの焙煎度で最も酸度が高くなるのがわかる。その後焙煎が進むにつれて酸度は減少し、やがて生豆の焙煎度を下回る。酸度の増加についてははもともと含まれている酸が加熱されることで化学反応を起こし新たに酸がつくられ酸度が上がるためと考えられる。しかし焙煎が進むにつれてもともとあった酸や新たにつくられた酸が揮発もしくは分

解され、その結果酸度はもともと含まれていた酸の量をも下回ってしまったと予測される。

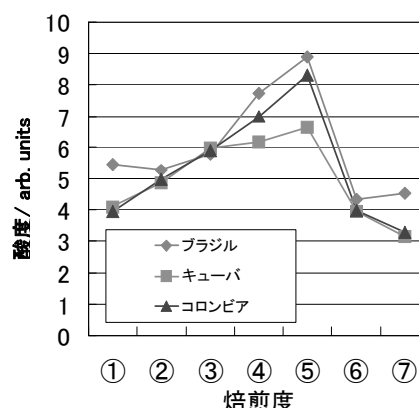


図 3. 焙煎度と酸度.

コーヒーの酸度は時間をおいても入れた直後の酸度とほとんど変化がなかった。この結果だけを見れば、時間が経ってから飲むコーヒーが酸っぱく感じるのは実際に酸の量に変化しているのではないと予想される。酸の量に変化していないのに酸味を感じるのはおそらく、淹れた直後にはあった香り成分などがとんでしまい、その結果酸味がきわだってしまったためと考えられる。

3-2. コーヒーの色彩スペクトル

キューバ産のコーヒーの紫外吸収スペクトルの測定結果を図 4 に示す。ピークが 270 nm と 325 nm 付近の二箇所に見られるが、豆の種類によって多少のピーク比は変わるものの、吸収波長に大きな違いは見られなかった。

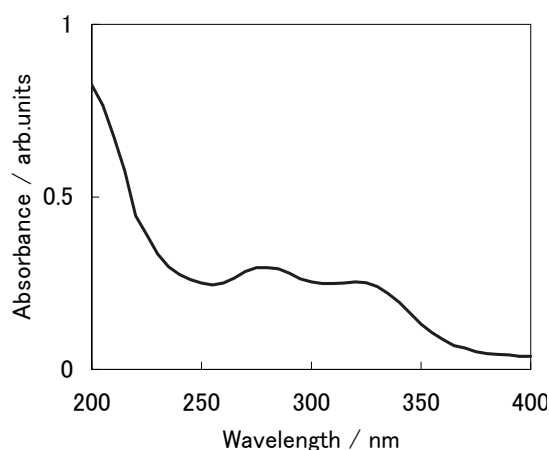


図 4. コーヒーの紫外吸収スペクトル

コーヒーには必ず含まれるクロロゲン酸とカフェイン酸があり、クロロゲン酸はコーヒー酸とキナ酸から成るポリフェノール化合物であるが、すぐに加水分解される。カフェインが 270 nm、カフェイン酸とクロロ

ゲン酸が 325 nm 付近の光を吸収することから、それぞれのピークの原因となっていると考えられる。

また、焙煎度ごとの測定では、吸収ピーク分布に劇的な変化は見られなかった。ただし、強度は焙煎度が進むにつれて大きくなり、さらに進むと逆に小さくなる傾向が見られた。この傾向は酸価測定の際の焙煎度と強い相関があり、酸価の主な原因となる、クロロゲン酸類の増加によるものと推察できる。

コーヒー抽出液をゲル濾過クロマトグラフィーにかけたところ、分子の大きな順に黒褐色、赤褐色、黄褐色の順番で分離され 3 種類の色素に分かれた。文献によると、同様の実験では黒褐色、赤褐色は各 2 成分に分離している⁴⁾ことから、今回の実験条件では展開溶媒の展開速度が速すぎて、分離が不完全であったことが予測される。分離した各褐色溶液の紫外吸収スペクトルを図 5 に示す。又、これらのスペクトルを足しあ

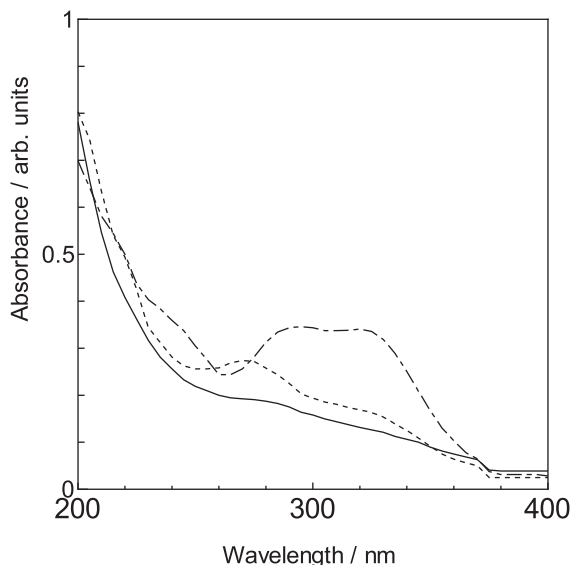


図 5. 褐色溶液の吸収スペクトル.

実線：黒褐色 破線：赤褐色溶液 点破線：黄褐色溶液

わせると、元の原液のスペクトルとほぼ一致したので、コーヒーの色素の全成分が、3つの褐色部分に含まれていると考えられる。ピークの高さから考えて、赤褐色溶液が主にカフェインを、黄褐色がクロロゲン酸類を含んでいると考えられるが、これ以上の詳細な分析には HPLC などと組み合わせて、化学物質一つ一つを分離する必要がある。また黒褐色溶液は、200 nm にかけての吸収はコロイド状の分子にも見られる現象であるので、ろ紙を通り抜けた、コーヒー豆の色がそのまま出てきているとも考えられる。

3-3. コーヒー豆の熱分析

産地の異なる 4 種類の豆についての DTA 測定結果を図 6 (生豆) および図 7 (焙煎豆) に示す。豆の種類

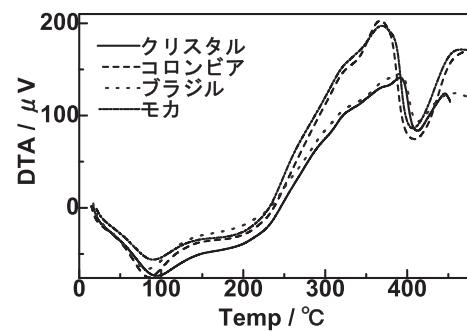


図 6. 生豆の DTA 測定結果

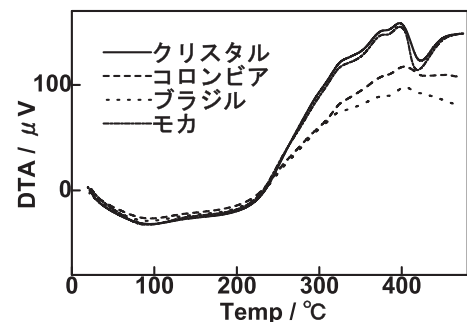


図 7. 焙煎豆の DTA 測定結果.

によって、多少の違いはあるが、変化の傾向はほぼ一致しているといえる。むしろ生豆か焙煎豆の違いが大きく、200℃以上の温度での変化は焙煎前後で大きな変化は見られないが、100℃くらいで大きく変わっている。通常、焙煎は 180-200℃でおこなわれるので、焙煎中の化学変化をこのピークが示しているものと考えられる。

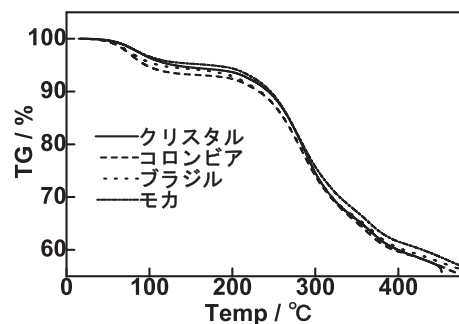


図 8. 生豆の TG 曲線 (温度変化)

図 8 は生豆を 500℃まで上げたときの TG 曲線である。焙煎が 200℃前後でおこなわれることから、焙煎に伴う重量変化は 5-10%程度であることがわかる。また、図 9 は 200℃に保持して重量の時間変化を見たものである。装置の仕様上、最初の 5 分間で 0-200℃まで上昇しているので、その部分の変化については言

及できないが、二段階で重量が減少していることがわかる。最初の重量減少は図 8 における 100 °C 付近の減少割合と一致しているので、おそらく生豆中の水分が蒸発により減少した分と考えられる。続く緩やかな減少が化学変化を伴った重量変化と予想される。従って、時間経過、すなわち焙煎度が進むにつれて、豆の重量は軽くなるのである。

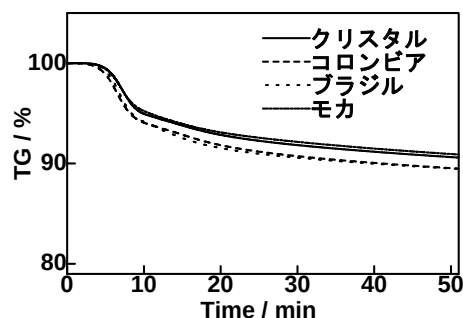


図 9. 生豆の TG 曲線 (時間変化)

4. まとめ

高専5年間で得た知識を元に、コーヒーの化学技術について、どのような分析ができるか、酸価、色化学、熱化学の3つの分野について試行した。定量的な取り扱いをするには HPLC などのさらに高度な分析を要するが、半定量的な性質については言及することができた。

酸価測定では味覚と酸度の相関が見いだせ、また、コーヒーの色の原因物質が大まかに分けて3種類からなること、また熱分析からは、100 °C 前後の化学反応が焙煎に大きく関わっていることなどが明らかになった。

参考文献

- 1) 中林敏郎ら コーヒー焙煎の化学と技術. (1995)
- 2) 田口譲 田口謙の珈琲大全 (2003)
- 3) テンビンコーヒーホームページ
<http://www.coffee-roaster.com/blend/05sour.html#cha>
- 4) 中林敏郎 日食工誌, **22**, 507 (1975)

逐次最小二乗法を用いたフィードバック制御系の一設計法

小林 洋二*, 渡邊 勉**, 橋間 弘明***

A Design Method of Feedback Control Systems with the Recursive Least-Squares Method

Yohji KOBAYASHI*, Tsutomu WATANABE**, and Hiroaki HASHIMA***

ABSTRACT

In this paper, we propose a design method for feedback control systems using the recursive least-squares method. Control performances of the feedback control systems generally deteriorate if characteristic parameters of controlled objects are varied. After describing a compensation algorithm for these parameter variations of a velocity control system using DC motors, we show how to build an instrumentation and control equipment based on the proposed algorithm.

Keywords: parameters identification, recursive least-squares method, input output characteristics

1. はじめに

フィードバック制御系を設計する際には、安定性を保持し、望ましい入出力特性を実現するために制御対象の特性パラメータの不確かさに対する配慮が必要になる¹⁾。例えば、負荷変動によって特性パラメータが変化した場合には、その負荷変動によってフィードバック制御系の定常ゲインや固有角周波数が設計値とは異なってしまい、望ましい入出力特性が実現できなくなる。また、負荷変動によって位相の遅れが生じる周波数帯が変化した場合には、フィードバック制御系の安定性が損なわれる可能性もある。このような問題に対する方策の一つとして、負荷変動や経年変化によって生じた特性パラメータの変化をオンラインで検出し、その変化によって生じる入出力特性の変動分を補償することが考えられる。稼動しているシステムの特性パラメータの変化をオンラインで検出するためには、その入出力信号を用いて逐次的にパラメータ同定を行うことが必要になる。このような同定法にはいくつかの手法があり、よく用いられているものとして逐次最小二乗法²⁾が挙げられる。

一方、オンラインによるパラメータ同定や補償のための操作量の演算を行う制御装置を実装するためには、ディジタルコンピュータを用いることになるが、このような制御システムを構築する場合、割り込みや丸め誤差の処理まで含んだソフトウェアとハードウェアの両面にわたる専門知識が要求される。この障壁を解決する手段として近年では、さまざまな制御演算のプ

ログラムをPC上でブロック線図を描く感覚で作成できるブロック記述型プログラミングツール(Mathworks社のSimulinkなど)が用意されている。さらにハードウェアを意識することなく、PC上でブロック記述型プログラミングツールを用いて作成されたプログラムをコンパイルしたあと、PCからダウンロードして実行することができる計測制御装置(例えばA & D社のAD5430, AD7011など)が商品化され、計測制御装置の開発や設計を容易にしている。

本稿では、直流モータで駆動される速度制御システムにおいて、負荷変動によって特性パラメータが変化する場合を想定する。このとき、逐次最小二乗法を用いて特性パラメータの同定を行い、劣化した入出力特性の補償を行うための操作量を計算し、望ましい入出力特性を維持する制御システムの構築方法を提案する。本稿の構成は以下の通りである。まず、第2章では制御対象の数式モデルについて述べ、問題の設定範囲を明らかにする。第3章において逐次最小二乗法について述べ、第4章で補償のための操作量の計算方法について述べる。第5章では、ブロック記述型プログラミングツールSimulinkと計測制御装置AD5430を用いた計測制御装置の構成について説明し、最後に第6章で簡単な評価実験の方法とその結果について述べる。

2. 制御対象の記述

ここでは、直流モータで駆動される速度制御システムを考え、その入出力特性の数式モデル³⁾を導出する。モータの電機子間電圧を $e_m(t)$ 、電機子に流れる電流を $i(t)$ 、電機子のインダクタンス、抵抗、キャパシタンスをそれぞれ、 L , R , C とする

* 機械工学科 教授

** 機械工学科 (平成21年度卒業)

*** 機械工学科 (平成19年度卒業)

と、モータの電機子の電気回路において次式が成り立つ.

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau = e_m(t) \quad (1)$$

モータのトルク定数を K_t で表すと電流 $i(t)$ とモータが発生するトルク $\mathcal{T}(t)$ の間につぎの関係が成り立つ.

$$\mathcal{T}(t) = K_t i(t) \quad (2)$$

さらに、モータの逆起電力は電機子の角速度に比例するものと考え、電機子のキャパシタンス両端の間の電圧と逆起電圧定数をそれぞれ、 $v_a(t)$ 、 K_e として次式が成り立つ.

$$v_a(t) = K_e \omega(t) \quad (3)$$

最後に、モータの慣性モーメントを J_m 、その回転軸に接続される負荷の慣性モーメントを J_L 、粘性抵抗を D 、回転軸の角速度を $\omega(t)$ とすると、つぎの運動方程式が成り立つ.

$$(J_m + J_L) \frac{d\omega(t)}{dt} + D\omega(t) = \mathcal{T}(t) \quad (4)$$

モータの電気的時定数 L/R は十分小さいと仮定し、 $L/R \simeq 0$ として (1) ~ (4) 式をラプラス変換して伝達関数 $G(s)$ を求めると次式になる.

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{E_m(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (5)$$

$$T = \frac{R(J_m + J_L)}{RD + K_e K_t}, \quad K = \frac{K_t}{RD + K_e K_t}$$

ただし、 $\Omega(s)$ 、 $E_m(s)$ はそれぞれ $\omega(t)$ 、 $e_m(t)$ をラプラス変換した変数を表す.

この式からわかるように、負荷の特性パラメータ J_L や D が変化すると、 $G(s)$ で表される入出力特性も変動してしまう. 制御系設計時に意図した望ましい入出力特性を維持するためには、この入出力特性の変動分を補償することが必要になる.

3. 逐次最小二乗法によるパラメータ同定

ここでは、逐次最小二乗法²⁾を用いて入力信号 $u(t)$ と出力信号 $y(t)$ から (5) 式で表されるシステムの特性パラメータ T と K を求める方法について述べる. 前章で述べた伝達関数を連続時間の線形系として状態方程式と出力方程式で表すと次式になる.

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = ax(t) + bu(t) \\ y(t) = x(t) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $x(t) = \omega(t)$ 、 $u(t) = e_m(t)$ 、 $a = -1/T$ 、 $b = K/T$ である. この式の a 、 b を求めれば、 T 、 K を知ることができる. しかしながら、逐次最小二乗法ではディジタルコンピュータを用いて演算を行うため、(6) 式をサンプリング時間 ΔT ごとに変数の値が変わっていく離散時間の線形系で近似して、そのパラメータを同定することになる. 離散時間で表される線形系の状態方程式と出力方程式は

$$\begin{cases} x(k+1) = a_D x(k) + b_D u(k) \\ y(k) = x(k) \end{cases} \quad (7)$$

となる. ここで、(6) 式の a 、 b と (7) 式の a_D 、 b_D はそれぞれ次式で関係づけられる⁴⁾.

$$a_D = e^{a\Delta T} \quad (8)$$

$$b_D = \int_0^{\Delta T} e^{a\tau} b d\tau \quad (9)$$

A/D 変換器を用いて離散時間の信号に変換された入力 $u(k)$ と出力 $y(k)$ を用いて a_D と b_D を同定するために、まず、未知パラメータのベクトル $\hat{\theta}(k)$ をつぎのように定義する.

$$\hat{\theta}(k) = [a_D(k) \quad b_D(k)]^T \quad (10)$$

ここで、 $a_D(k)$ 、 $b_D(k)$ は逐次最小二乗法によって求める未知パラメータである. 逐次取り込まれる入力信号 $u(k-1)$ と出力信号 $y(k-1)$ を用いてベクトル $\varphi(k)$ を以下のように定義する.

$$\varphi(k) = [-y(k-1) \quad u(k-1)]^T \quad (11)$$

(10)、(11) 式のベクトルを用いて、以下の3つの式を (12)、(13)、(14) の順に繰り返して計算すると、 $a_D(k)$ と $b_D(k)$ はそれぞれ (7) 式の a_D と b_D へ収束する.

$$\epsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k) \hat{\theta}(k-1) \quad (12)$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1) \varphi(k) \varphi^T(k) P(k-1)}{1 + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k)} \quad (13)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1) \varphi(k)}{1 + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k)} \epsilon(k) \quad (14)$$

ただし、行列 $P(k)$ は共分散行列とよばれる行列であり、ここでは2行2列の行列になる. また、 $P(k)$ 、 $\hat{\theta}(k)$ の初期値 $P(0)$ 、 $\hat{\theta}(0)$ は以下のように与える.

$$\hat{\theta}(0) = \hat{\theta}_0, \quad P(0) = \nu I \quad (15)$$

ここで、 $\hat{\theta}_0$ は任意の実数、 ν は任意の正数である.

なお、連続時間線形系の係数 a と b は、(8)、(9) 式から同定した a_D と b_D を用いて次式により計算できる.

$$a = \frac{\log_e a_D}{\Delta T}, \quad b = \frac{b_D a}{e^{a\Delta T} - 1} \quad (16)$$

4. 入出力特性を補償する操作量の計算

ここでは、入出力特性を補償する操作量の計算方法について述べる. まず、(5) 式において負荷のノミナル値 J_L 、 D を用いたときの入出力特性は次式で表されているとする.

$$\Omega(s) = G(s) E_m(s) = \frac{K}{Ts + 1} E_m(s) \quad (17)$$

したがって、 T 、 K はそれぞれノミナル値の負荷を用いているときのシステムの時定数と定常ゲインである.

一方、(5) 式において負荷が J'_L 、 D' に変動したときの入出力特性を次式で表す.

$$\Omega'(s) = \frac{K'}{T's + 1} E_m(s) \quad (18)$$

ここで、 T' と K' は負荷が J'_L 、 D' に変動したシステムの時定数と定常ゲインであり、 $\Omega'(s)$ はこのシステムに $E_m(s)$ を入力

したときに得られる出力を表す．このシステムに入出力特性を補償する入力信号 $E_s(s)$ を加えて，(17) 式と (18) 式の入出力特性を等しくすることを考える．このとき次式が成り立つ．

$$\frac{K}{Ts+1}E_m(s) = \frac{K'}{T's+1}(E_m(s) + E_s(s)) \quad (19)$$

(19) 式を変形すると $E_s(s)$ は，

$$E_s(s) = \frac{\alpha s + \beta}{1 + Ts}E_m(s) \quad (20)$$

$$\alpha = (KT' - K'T)/K', \beta = (K - K')/K'$$

となる．負荷が変動するシステムにおいてこの補償信号 $E_s(s)$ を計算するためには，あらかじめノミナル値を用いたときの特性パラメータ T, K を求めておき，動作中のシステムに対して，逐次最小二乗法を用いてパラメータ T' と K' をオンラインで同定計算し，それらの値と信号 $E_m(s)$ を用いて (20) 式から $E_s(s)$ を計算すればよいことになる．

5. 制御システムの構成

ここでは，前章までで述べたアルゴリズムを用いて，直流モータの角速度制御システムを構成する方法について述べる．この方法では，制御システムを構築する場合に要求されるソフトウェアとハードウェアの専門知識を最小限に抑えるために，PC 上でブロック記述型プログラミングツール Simulink を用いてプログラムを作成し，これをコンパイルしたあと PC からダウンロードして実行することができる計測制御装置 AD5430 を用いている．全体のシステム構成を Fig.1 に示す．この制御システムは，プログラム作成・ダウンロード用の PC，計測制御装置 (AD5430)，発振器 (速度の指令信号発生器)，アナログ信号の加算回路，DC モータ用アンプ (スピードコントローラ)，DC モータ (マブチ FA-130)，タコジェネレータから構成される．

このシステムにおける大まかな処理の流れは以下の通りである．まず，制御演算処理のプログラムを PC 上で Simulink を用いて Fig.2 に示すような形で記述する．そのプログラムをコンパイルしたあと，PC から AD5430 へダウンロードする．このあと AD5430 は，PC から切り離してスタンドアロンでプログラムを実行する計測制御装置として使用できる．AD5430 には，A/D，D/A 変換ボードが搭載され，電圧信号を外部から A/D 変換して取得でき，演算結果は D/A 変換して電圧信号と

して外部の機器へ出力することができる．プログラムの作成から AD5430 が制御演算を開始するまでの手順を以下に示す．

1. Simulink を用いて Fig.2 のようにブロック記述形式のプログラムを作成する．
2. Real Time Workshop(RTW) とよばれるユーティリティを使用して各種の設定を行い，実行モジュールへコンパイルする．
3. モデル定義ユーティリティ(MD) でプログラムの信号の定義付けや AD5430 用の設定を行う．
4. VC-Designer とよばれるユーティリティを用いて AD5430 用のコンソール表示画面を作成する．
5. これらの操作が完了すれば，作成したプログラムを AD5430 に転送する．

これで作成したプログラムが AD5430 で実行可能となる．なお，プログラムを作成する際にブロック記述形式ではなく，C 言語を使用して作成する場合には，S-Function Builder ブロックを用いる．このブロックは Simulink ライブラリの User Defined Functions に収録されている．S-Function Builder ブロックの詳細な取扱いについては，参考文献 5) に詳しく述べられている．

6. 性能評価実験

ここでは，逐次最小二乗法による同定と補償信号を用いて直流モータの速度制御システムを構成したときの性能評価実験の手順と実験結果について述べる．Fig.1 において発振器から矩形波をモータ角速度指令値 $e_m(t)$ としてモータのスピードコントローラに入力する．スピードコントローラはこの信号を PWM 変調し，電流信号へ変換して直流モータに加え，モータを回転させる．モータの角速度 $\omega(t)$ はタコジェネレータにより検出する．モータへの入力信号 $e_m(t)$ とモータの出力信号 $\omega(t)$ は AD5430 の A/D 変換器へ入力され，AD5430 はこれら 2 つの信号を用いて，逐次最小二乗法によってパラメータ同定と負荷変動を補償するための信号 $e_s(t)$ の計算を行う．補償信号 $e_s(t)$ は D/A 変換器を通して出力され，アナログ信号の加算回路によってモータ角速度指令値 $e_m(t)$ と足し合わされる．性能評価実験では，以下の 3 つの場合について角速度指令値 $e_m(t)$ ，角速度 $\omega(t)$ ，補償信号 $e_s(t)$ を計測した．

1. 直流モータの軸に負荷をつながない状態 (Case 1)
2. 負荷変動を与えるために慣性負荷をつないで，補償信号を加えない場合 (Case 2)
3. 負荷変動を与えるために慣性負荷をつないで，補償信号を加えた場合 (Case 3)

それぞれの Case の試行を 3 回ずつ行い再現性を確認した．なお，逐次最小二乗法における初期値は，(15) 式において $\hat{\theta}(0) = 0$ ， $P(0) = 1000I$ とした．

Case 1 ～ Case 3 におけるステップ応答の波形をそれぞれ，Fig.3 ～ Fig.5 に示す．Fig.3 は基準になる応答であり，Fig.4 では，モータの回転軸に慣性負荷を取り付けることによって，角

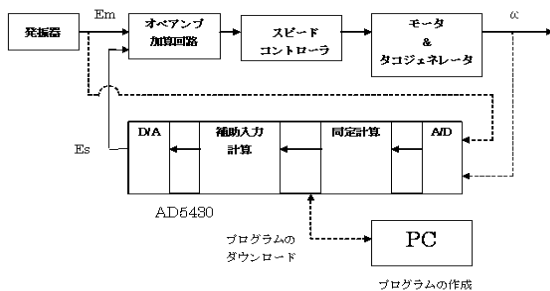


Fig. 1 全体のシステム構成

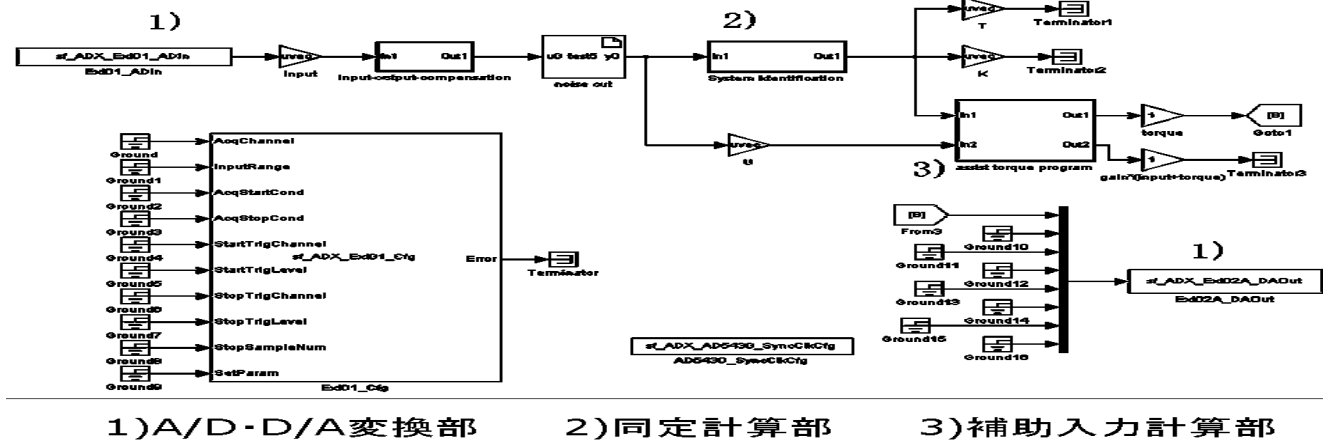


Fig. 2 Simulink のプログラム例

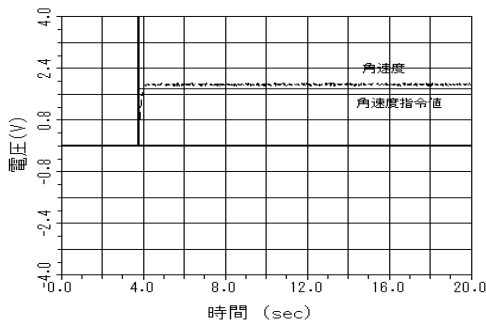


Fig. 3 Case 1 (負荷無し状態) のステップ応答

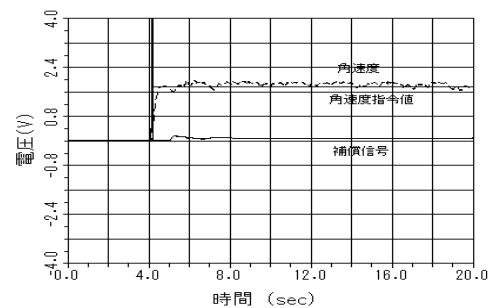


Fig. 5 Case 3 (負荷有り・補償有り状態) のステップ応答

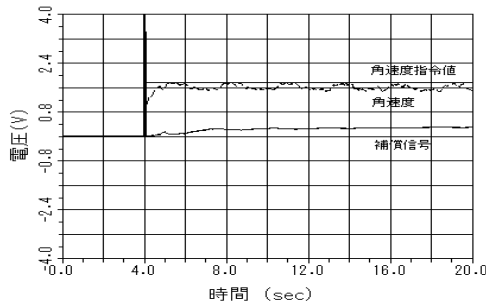


Fig. 4 Case 2 (負荷有り・補償無し状態) のステップ応答

速度の定常値が下がり、振動が生じていることがわかる。(なお、Fig.4 では補償信号の計算値を D/A 変換して表示しているが、スピードコントローラには入力していない。) Case 2 のシステムに本稿で提案した逐次最小二乗法によるパラメータ同定を用いた補償を行うと、Fig.5 に示す応答になる。この図から出力信号に振動は残るものの、定常値は Case 1 のそれに近づいていることがわかる。本稿では、制御対象を (5) 式の一次遅れ系としてパラメータ同定を行っているため、 T 、 K の変動に対しては補償を行うことができるが、二次以上の高次遅れ要素が存在した場合、その補償を行うことはできない。このことが Case 3 において振動が残った理由と考えられる。

7. おわりに

本稿では、逐次最小二乗法を用いた 直流モータの速度制御システムの構成法について述べた。まず、直流モータの速度制御システムを一次遅れ系としてモデル化し、変動するパラメータを明らかにした。つぎに逐次最小二乗法を用いて、入出力特性を基準となるシステムへ近づけるための補償信号の計算方法を述べた。そして、これらの演算をブロック記述型プログラム Simulink と計測制御装置 AD5430 で実現し、簡単な性能評価実験を行った。その結果、負荷が増加した場合においても、定常ゲインを基準となる入出力特性へ近づけることができた。

参考文献

- (1) John C. Doyle, et al.: *Feedback Control Theory*, Dover Publication Inc., pp.45-59, 1992
- (2) 足立修一: MATLAB による制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局, pp.115-119, 1996
- (3) 喜多村, 他: JSME テキストシリーズ 制御工学, 日本機械学会, pp.18 - 20, 2002
- (4) 上滝, 他: 電気学会大学講座 自動制御理論, 電気学会, pp.156-159, 1971
- (5) CYBERNET 編: S-Function Builder ブロックチュートリアル, CYBERNET, 2007

西神工業団地通勤交通における公共・私的 交通分担に関する研究

橋本 渉一* 川端 慧** 藤井 暢彦***

Sharing of Public and Private Commuter Traffic at Seishin Industrial, High-Tech Park

Shoichi HASHIMOTO* Kei KAWABATA** Nobuhiko FUJII**

ABSTRACT

In recent years greenhouse effect gas is demanded to reduce for prevention global warming. Especially reduction of carbon dioxide is important. Public traffic; railways has an advantage over private traffic, cars. Probability of commuter traffic selection, public or private traffic, is able to calculate by using logit model. Point of commuter behavior is used for logit model's parameter. Time and cost are point for commuter. These two parameter is used to calculate probability. Subjects of this study are commuters for Seishin Industrial park and Seishin Minami high-tech park. Result, commuter's time from home to working place, is important to choice public transportation.

keywords : traffic sharing, commuter traffic, logit model, probability model

1. はじめに

1.1 背景

世界の温室効果ガスは、ここ 100 年で大幅に増加しており、大気中の温室効果ガスである二酸化炭素（以下 CO_2 ）とメタンの濃度は、産業革命前の値をはるかに超えている。地球温暖化防止の観点から、温室効果ガスの大部分を占めている CO_2 排出削減の重要性が言われている。地球温暖化の結果として、一部研究者からは海面の上昇、異常気象、食糧危機、生態系への影響などが警告されている。¹⁾

我が国は、米国、中国、ロシア、インドに次いで世界で 5 番目に多く世界全体の約 4% の CO_2 を排出しているとされている。（図 1）。

京都議定書において、日本は第一次約束期間（2008 年～2013 年）に基準年（1990 年、HFCs, PFCs, SF6 については 1995 年）から 6% の削減を公約しているが、2004 年度の温室効果ガス排出量は 13 億 5,520 万トンであり、1990 年からは 7.4% 増

となっている。2009 年には政府により、さらに踏み込んだ 25% の排出削減の提案もされているが、いまだ具体的な対策は大きくは進んでおらず、公約を満たすための方策が懸念されている。

日本の CO_2 排出量を部門別にみると、運輸部門は全体の 22% を占めている。この結果、日本の運輸部門で世界の CO_2 排出量の約 1% を占めていることとなる。（図 2）

さらに運輸部門の内訳をみると、乗用車・貨物車・バス・タクシーなど道路交通が全体の約 87% を占めている。（図 3）

1 人を 1 km 運ぶ際に排出する CO_2 の量を鉄道・バス・航空・自家用車・営業用車で比較すると、鉄道 16 g・バス 51 g・航空 111 g・自家用車 178 g・営業用車 389 g となっており、鉄道が圧倒的に少なくなっている（図 4）。

家庭からの CO_2 排出量は、世帯当たり年間 5,600 kg- CO_2 となっている。家庭からの温室効果ガス排出量とは、家庭部門、運輸部門の自家用乗用車（家計寄与分）、廃棄物（一般廃棄物）部門で計上された排出量、および水道からの排出量の合計となる。家庭から排出される CO_2 のうち、自家用車が全体の 60% 以上を占めている。自動車は日常生活に大きな利便性をもたらす一方で、排気ガ

* 都市工学科 教授

** 新日本製鐵株式会社 都市工学科平成 22 年卒

*** 岐阜大学工学部 都市工学科平成 21 年卒

スによる大気汚染，温室効果，走行に伴う騒音など，環境に対する負の面も言われている。

1.2 研究目的

このような背景の下，交通部門における CO₂ 排出量の削減と省エネルギー化を進めるため，大都市では私的交通から公共交通への利用変換の誘導がなされている。

本研究では，対象地域を神戸市西区にある西神工業団地・西神南工業団地の神戸市交通局から提供された従業員の住所および，通勤時に利用している交通機関データを用いた．通勤時のデータを用い，マストランジット（公共交通）（以下マストラと記述）とマイカー（私的交通）それぞれの交通分担にはどのような要素が寄与するかのロジットモデルを用いて分析することを目的とする．

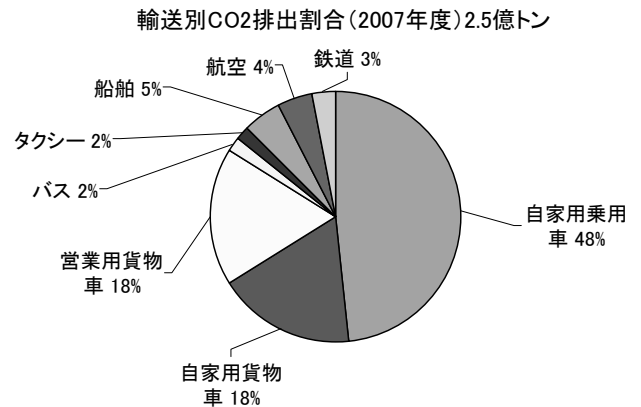


図3 輸送機関別 CO₂ 排出割合²⁾

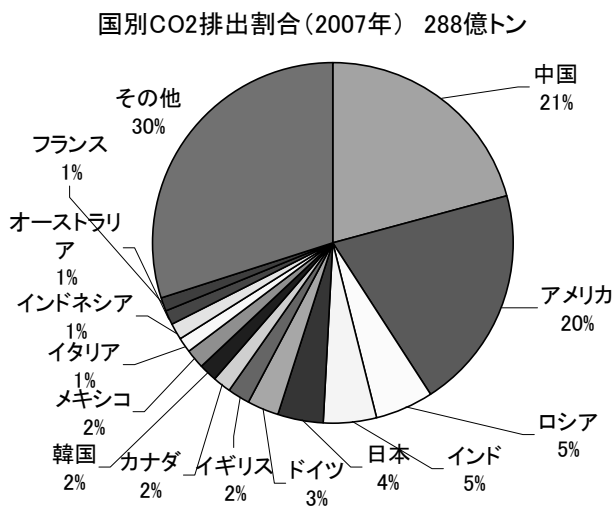


図1 国別 CO₂ 排出割合¹⁾

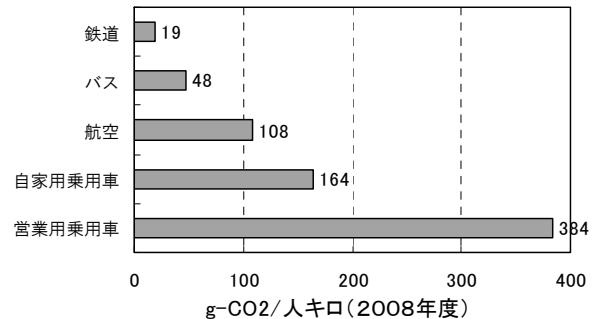


図4 人キロ当たり CO₂ 排出量²⁾

部門別CO₂排出割合(2008年) 12.1億トン

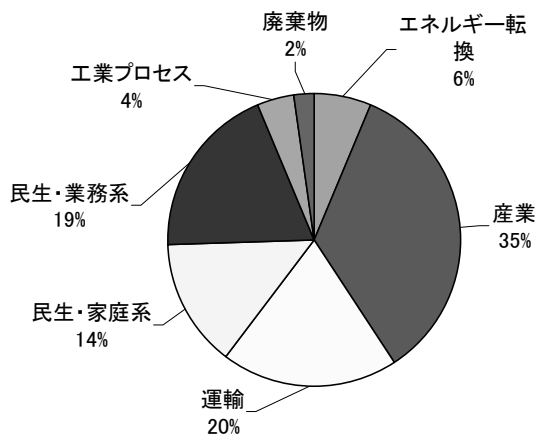


図2 産業別 CO₂ 排出割合¹⁾

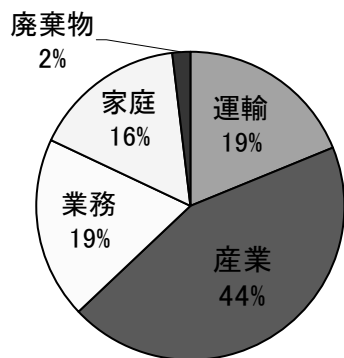
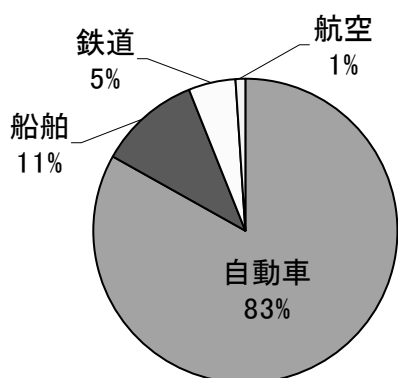
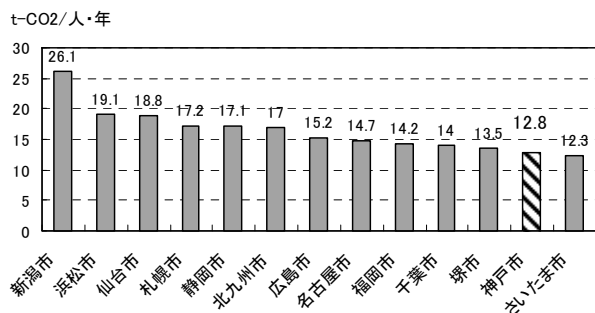
2. 神戸市の取り組み

2.1 CO₂ 排出の現状

神戸市の CO₂ 排出量の内訳は産業部門が最も多い全体の 44%を占めており，運輸部門は業務部門と並んで全体の約 19%と 2 番目に多くの CO₂ を排出している．（図 5）運輸部門の内訳をみると，自動車からの CO₂ 排出量が 83%と圧倒的に多くなっている．（図 6）

兵庫県では自動車保有台数が年々増加傾向にある．特に乗用車の保有台数が増加しており 2000 年は 1,985,175 台だったのが，2009 年では 2,204,701 台と 9 年間で 219,526 台と大幅に増加している．

人口 1 人あたりの自動車からの CO₂ 排出量は，全国主要都市で神戸市は 12 番目に多く，12.8t-CO₂/年人を排出している．（図 7）これらの状況を踏まえ神戸市では運輸部門からの CO₂ 排出量を減少させるため，私的交通から公共交通への利用転換を促すため MM (Mobility Management)^{5) 6)} の施策を打ち出している．

図5 神戸市産業別CO₂排出割合³⁾図6 神戸市輸送機関別CO₂排出割合³⁾図7 人口1人当たり自動車のCO₂排出量⁴⁾

2.2 TDM（交通需要マネジメント）

神戸市では、私的交通から公共交通への利用転換の促進による環境負荷の軽減⁷⁾と街の活性化を目指して、学識経験者、商業者、NPO、交通事業者等で構成される神戸市TDM(Traffic Demand Management)研究会が中心となり、平成15年10月より「広域的な公共交通利用転換に関する実証実験(エコモーション神戸)」を実施している。

エコモーション神戸では、土日祝日等に大人が同伴する小学生以下2名以下の神戸市バス・神戸市営地下鉄等の利用料金を無料にする『エコファ

ミリー制度』や、公共交通機関を利用して提携先の商店街・デパート・ホテル等を訪れた人に飲食・買物料金の割引、施設入場料の無料化等の様々なサービスを提供する『エコショッピング制度』等を実施している。

エコファミリー制度では以下の実績や効果をあげている。

- ・利用者が延べ213万人（地下鉄・北神急行111万人、バス102万人）に達した。

- ・休日の総乗車人数が1,800人/日増加した。

平均乗車人数 実験前:184,600人/日

→実験中:186,400人/日

- ・二酸化炭素の排出量が523トン削減された。

- ・都心周辺駅の乗客数増により、都心活性化の効果が期待される。都心周辺駅で1,200人/日増加
実験前:55,000人/日→実験中:56,200人/日

3. ロジットモデルを用いた推計

3.1 ロジットモデル⁸⁾

我々が行動するに際し選択肢の中からある特定の事項を選択する場合、例えば「通勤にマイカーを利用するかマストラ（公共交通）を利用するか」、「住宅を購入するか否か」、購入するとすれば「一戸建て住宅かマンションか」といったように、2つまたはいくつかの選択肢の中からどれを選択するかといった問題に直面することがしばしばある。ロジットモデルとは、このような複数個の選択肢の中からある特定の選択肢を選択するような行動を記述したり、分析するために用いられるモデルである。

人間の選択行動を表現するモデルとして、ロジットモデルの他にもプロビットモデル等いろいろなモデルが開発されている。ロジットモデルは他の選択行動モデルと比較して操作性が高く、交通計画など各種の土木計画の問題で利用されている。

3.2 交通選択確率

通勤者が通勤手段としてマイカーを利用するか、あるいはマストラを利用するかという選択問題を検討する。通勤に要する時間・費用、道路やマストラの混雑度、勤務先での駐車場の有無、自転車保有の有無など、通勤手段の選択に影響を及ぼす要因は色々ある。ここでは、マストラあるいはマイカーを利用した際に要する時間および費用だけに着目する。ある個人 i ($i=1, \dots, n$) がマストラを選択したときに得られる効用を U_a^i 、マイカーを選択したときの効用を U_b^i と表す。

$$U_a^i = \beta_1 x_{1a}^i + \beta_2 x_{2a}^i + \varepsilon_a^i \quad \dots \text{式(1)}$$

$$U_b^i = \beta_1 x_{1b}^i + \beta_2 x_{2b}^i + \varepsilon_b^i \quad \dots \text{式(2)}$$

ここで各変数は、

U_a^i : 個人 i のマストラ選択時の効用

U_b^i : 個人 i のマイカー選択時の効用

x_{1a}^i : 個人 i のマストラの通勤時間

x_{2a}^i : 個人 i のマストラの通勤費用

x_{1b}^i : 個人 i のマイカーの通勤時間

x_{2b}^i : 個人 i のマイカーの通勤費用

β_1 : 最尤推定法で推計されるパラメータ

β_2 : 最尤推定法で推計されるパラメータ

ε_a^i : 誤差項

ε_b^i : 誤差項

である。

通勤状況の調査結果から対象とする通勤者がマストラを利用しているか、あるいはマイカーを利用しているかは把握できる。ある調査対象の勤労者がマストラを利用したとする。この場合、この勤労者がマストラを利用することによって得られる効用は、マイカーを利用したときの効用よりも大きいと考えられる。すなわち

$$U_a^i \geq U_b^i \quad \cdots \text{式(3)}$$

が成立していると考ええる。このように、ロジットモデルは効用水準が分からなくても、個人の選択行動の結果に基づいて間接的にパラメータ β_1 , β_2 を推定することができる。

二項ロジットモデルの理論は、式(1) (2)の誤差項 ε_a^i , ε_b^i がそれぞれ独立なワイブル分布に従って分布している時、勤労者がマストラ、マイカーという選択肢を選ぶ確率は式(4) (5)により与えられる。すなわちマストラを選択する確率 p_a^i は

$$\begin{aligned} p_a^i &= \frac{\exp(\lambda U_a^i)}{\exp(\lambda U_a^i) + \exp(\lambda U_b^i)} \\ &= \frac{1}{1 + \exp\{\lambda(U_b^i - U_a^i)\}} \\ &= \frac{1}{1 + \exp\{\lambda[\beta_1(x_{1b}^i - x_{1a}^i) + \beta_2(x_{2b}^i - x_{2a}^i)]\}} \quad \cdots \text{式(4)} \end{aligned}$$

となる。同様にマイカーを選択する確率は

$$p_b^i = \frac{\exp\{\lambda[\beta_1(x_{1b}^i - x_{1a}^i) + \beta_2(x_{2b}^i - x_{2a}^i)]\}}{1 + \exp\{\lambda[\beta_1(x_{1b}^i - x_{1a}^i) + \beta_2(x_{2b}^i - x_{2a}^i)]\}} \quad \cdots \text{式(5)}$$

となる。ここで各変数は、

p_a^i : 個人 i が選択肢 a を選択する確率

p_b^i : 個人 i が選択肢 b を選択する確率

U_a^i : 選択肢 a の確定的効用

U_b^i : 選択肢 b の確定的効用

λ : 誤差項のばらつきを示すパラメータ

である。個人 i が選択肢 a に対する効用が m 個の変数 x_{ka}^i ($k=1, \dots, m$) で表現できる場合、二項ロジットモデルを m 変数に拡張すると、式(6) (7)で表される。

$$p_a^i = \frac{\exp\{\sum_k \beta_k x_{ka}^i\}}{\exp\{\sum_k \beta_k x_{ka}^i\} + \exp\{\sum_k \beta_k x_{kb}^i\}} \quad \cdots \text{式(6)}$$

$$p_a^i = \frac{\exp\{\sum_k \beta_k x_{ka}^i\}}{\exp\{\sum_k \beta_k x_{ka}^i\} + \exp\{\sum_k \beta_k x_{kb}^i\}} \quad \cdots \text{式(7)}$$

3.3 実データによる確率計算

神戸市交通局から西神中央工業団地・西神南工業団地に勤めている方々の通勤データの提供を受けた。提供されたデータの中から、西神工業団地通勤者から 84 人、西神南工業団地通勤者から 26 人をマイカーおよびマストラ通勤者が同数となるようにランダム選択した。そのデータを用いて、各通勤者の自宅から勤務先まで、マストラあるいはマイカーを利用した際に要する通勤時間および通勤費用を、表 1 の計算条件を設定して計算した。

西神工業団地および西神南工業団地への通勤データを用い、ロジットモデルを適用してマイカー通勤とマストラ通勤の選択確率を計算する。本研究ではマストラあるいはマイカーを利用した際に要する時間および費用を変数として計算を行った。

表 1 計算条件

マイカー		マストラ	
平均速度		通勤割引	
一般道	25km/h	電車	通常の60%
高速道路	60km/h	バス	通常の70%
燃費	12km/ℓ	西神～勤務先	15分
一ℓ	100円		200円
維持管理費	575円	西神南～勤務先	12分
			200円

a) 西神中央工業団地

西神中央工業団地への通勤データ (60 名) の例を表 2 に示す。

被験者 84 名に対し、マストラあるいはマイカーで通勤しているか、 σ_a , σ_b 欄に使用している交通機関には 1、使用していない交通機関には 0 で表記している。マストラを利用した場合の通勤時間を x_{1a} とし、通勤にかかる費用を x_{2a} とする。同様にマイカー通勤した場合の通勤時間を x_{1b} とし、通勤にかかる費用を x_{2b} とする。マイカー通勤費用 x_{2b} には維持管理費を加える。これらデータを用い式(6) (7)から、マストラ利用確率 P_a およびマイカー利用確率 P_b を求める。パラメータ β_1 および β_2 は繰り返し計算により収束値を求める。

表2 入力データ（西神中央工業団地）

被験者	マストラ δa	マイカー δb	マストラ $x1a$ (分)	$x2a$ (円)	マイカー $x1b$ (分)	$x2b$ (円)	$x1a-x1b$ (分)	$x2a-x2b$ (円)
1	0	1	65	536	42	768	23	-232
2	0	1	82	710	76	880	6	-170
3	1	0	70	528	53	760	17	-232
4	0	1	35	196	19	641	16	-445
5	0	1	37	259	19	641	18	-382
6	0	1	37	259	19	642	18	-383
7	0	1	25	138	19	639	6	-501
8	0	1	23	120	12	614	11	-494
9	0	1	40	259	24	656	16	-397
10	0	1	36	278	22	648	14	-370
11	0	1	21	120	12	613	9	-493
12	0	1	46	203	19	641	27	-438
13	0	1	40	189	14	623	26	-434
14	0	1	21	140	11	612	10	-472
15	0	1	25	138	16	631	9	-493
16	0	1	25	0	7	599	18	-599
17	1	0	46	203	18	640	28	-437
18	1	0	21	140	11	613	10	-473
19	1	0	35	156	25	661	10	-505
20	1	0	24	120	14	622	10	-502
21	0	1	47	296	35	698	12	-402
22	0	1	30	278	25	662	5	-384
23	0	1	42	278	33	689	9	-411
24	1	0	39	278	32	686	7	-408
25	1	0	37	306	24	659	13	-353
26	1	0	47	296	36	702	11	-406
27	0	1	34	156	30	679	4	-523
28	0	1	42	296	25	661	17	-365
29	0	1	37	180	30	677	7	-497
30	1	0	36	198	40	715	-2	-517
31	1	0	34	296	27	666	7	-372
32	0	1	40	216	40	713	1	-497
33	1	0	46	216	40	715	6	-499
34	0	1	41	216	45	733	-4	-517
35	1	0	44	216	45	730	-1	-514
36	1	0	53	234	51	752	2	-518
37	1	0	66	324	62	793	4	-469
38	1	0	86	444	79	848	7	-404
39	0	1	83	486	43	723	40	-237
40	0	1	55	308	28	673	27	-365
41	0	1	62	308	35	698	27	-390
42	0	1	75	378	27	669	48	-291
43	0	1	87	486	36	699	51	-213
44	0	1	79	438	46	734	33	-296
45	1	0	57	552	29	675	28	-123
46	0	1	84	558	58	775	26	-217
47	0	1	112	689	36	700	76	-11
48	0	1	91	540	53	761	38	-221
49	0	1	88	588	62	791	26	-203
50	0	1	101	707	42	723	59	-16
51	1	0	101	444	59	780	42	-336
52	0	1	104	444	74	832	30	-388
53	0	1	145	650	86	874	59	-224
54	0	1	107	690	37	705	70	-15
55	0	1	45	311	21	646	24	-335
56	0	1	55	398	28	673	27	-275
57	1	0	55	224	20	645	35	-421
58	0	1	107	558	81	854	26	-296
59	0	1	66	372	82	862	-16	-490
60	0	1	110	600	84	866	26	-266

図11はロジットモデルの計算結果を示し、横軸は被験者番号、縦軸は公共交通選択確率を表したものである。

b) 西神南工業団地

西神中央工業団地と同様、西神南工業団地への通勤データ（26名）を基に、マストラ利用確率 P_a およびマイカー利用確率 P_b を求めた。

図12の横軸は被験者番号、縦軸は公共交通選択確率を表したものである。

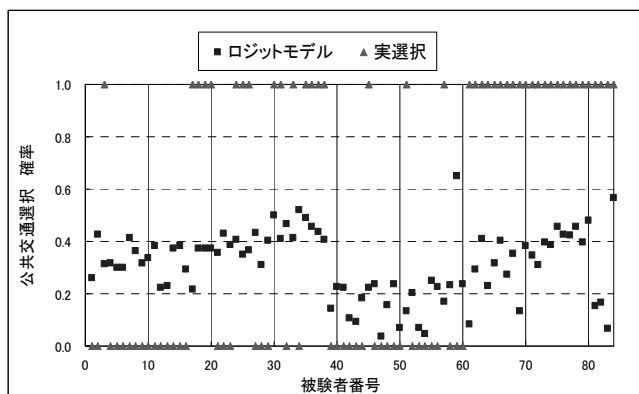


図11 公共交通選択確率（西神中央）

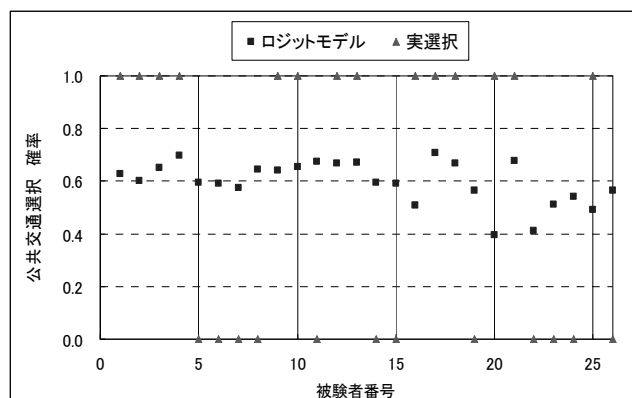


図12 公共交通選択確率（西神南）

3.4 入力パラメータ変化の影響

ロジットモデルを用い、通勤者のマストラおよびマイカーの選択確率への入力データの寄与の大きさを検討する。

選択確率を決定する要素はマストラの通勤時間、通勤費用、マイカーの通勤時間、通勤費用の4つである。この4要素をそれぞれ変化させ、元の選択確率との比較を行う。各要素は1.25倍、1.5倍に増加させるパターン、および0.75倍、0.5倍に減少させるパターンで変化させる。

図13、図14は西神中央工業団地通勤者の選択確率の変化を示している。また図15、図16は西神南工業団地通勤者の選択確率の変化を示している。

4要素を変化させ選択確率の変化を検討した結果、マイカー・マストラともに通勤費用より、通勤時間を変化させた方が、大きな変動が見られた。またマイカーの通勤時間を増加させた場合、マストラの通勤時間を減少させた場合にマストラ選択確率が実選択に近づいている。すなわち、通勤時間から見てマストラがマイカーより有利になったときに、マストラ選択確率が上がる事が確認できる。

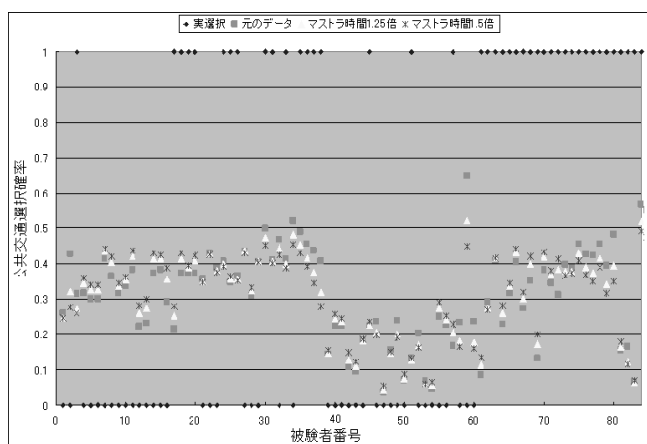


図13 マストラ時間増加（西神中央）

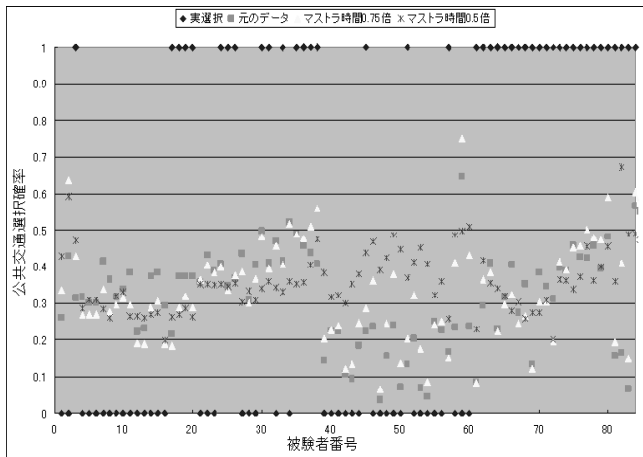


図 14 マストラ時間減少（西神中央）

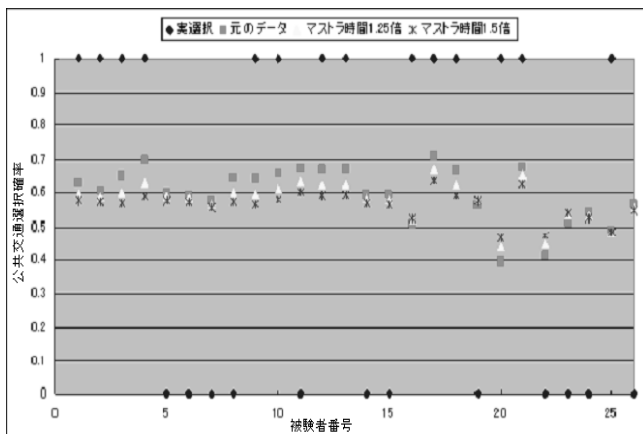


図 15 マストラ時間増加（西神南）

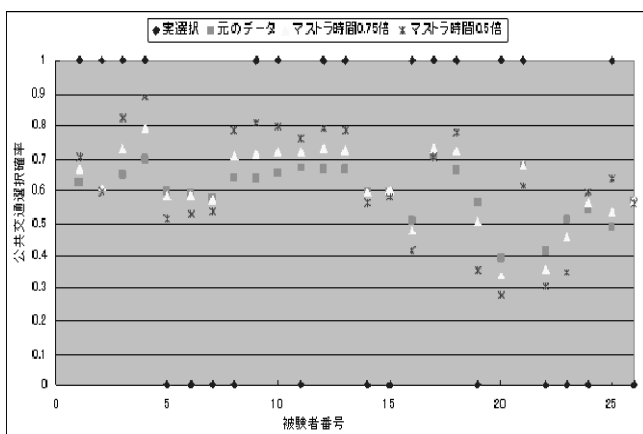


図 16 マストラ時間減少（西神南）

4. まとめ

西神中央工業団地および西神南工業団地への通勤者の公共交通あるいは私的交通利用の実態データから、ロジットモデルにより公共交通・私的交通の選択確率を検討した結果、明らかになった事項をまとめると以下の通りである。

- (1) 西神中央工業団地，西神南工業団地への通勤者の居住地から勤務先までのデータから，マストラ利用よりマイカー利用時の通勤時間が短く有利なケースが多くなっている。
- (2) 明石市，加古川市在住で，公共交通利用では時間がかかる地域の通勤者の多くは，マイカー通勤の割合が大きくなっている。
- (3) 神戸市東灘区，灘区，中央区，兵庫区のように公共交通が整備されており、通勤の際にマイカーとマストラの通勤時間に大差がない地域では，マストラ通勤の割合が大きくなっている。
- (4) マイカー・マストラ通勤の両者に対して通勤費用を変化させた場合，マストラ選択確率に大きな変化は見られない。
- (5) 通勤時間を増加あるいは減少に変化させた場合，マストラ選択確率には大きな変化が見られる。
- (6) マイカー通勤時間を増加させた場合，マストラ選択確率が実選択に近づく。
- (7) マストラの通勤時間を減少させた場合，マストラ選択確率が実選択に近づく。
- (8) マイカーよりもマストラ利用の通勤時間が有利な条件になった場合，マストラ選択確率が実選択に近づく。

【参考文献】

- 1) 全国地球温暖化防止活動推進センター
http://www.jccca.org/chart/chart03_01.html
- 2) 国土交通省ホームページ
<http://www.mlit.go.jp/>
- 3) 神戸市ホームページ
<http://www.city.kobe.lg.jp/>
- 4) 自動車検査登録情報協会
<http://www.airia.or.jp/number/index.html>
- 5) 藤井聡・谷口綾子：モビリティ・マネジメント入門，2008年
- 6) 土木学会：モビリティ・マネジメントの手引き，2005年
- 7) 交通工学研究会 EST 普及研究グループ：地球温暖化防止に向けた都市交通，2009年
- 8) 飯田恭敬・岡田憲夫：土木計画システム分析，1992年

銀の固相拡散接合における数値的検討

横尾 友洋*

朝倉 義裕**

Numerical Analysis of Solid State Diffusion Bonding of Silver

Tomohiro YOKOO

Yoshihiro ASAKURA

ABSTRACT

In the present study, the numerical analysis of solid state diffusion bonding of silver and copper were carried out. The condition of temperatures and the bonding pressures of the numerical analysis were changed. The bonding time and bonding mechanisms of the silver was compared with the copper. The bonding time was decreased when bonding condition was high temperature. Because bonding condition was high temperature, the contribution ratio of creep deformation mechanism was increased. The bonding time of silver was shorter than copper, because the bonding speed of silver by the diffusion mechanism than the copper. The results of numerical analysis were agreed with the experimental results.

Keywords: Solid State Diffusion Bonding, Numerical Calculation, Silver, Copper, P-S diagram

1. 緒論

固相拡散接合は、融点以下の温度で接合を行う技術である。変形が少なく精密接合が可能であることや、熔融接合では接合が困難な材料や異種金属材料の接合が可能であるなどの利点がある。これまでに、チタンや銅などでの研究例があり、接合機構のモデルを用いて接合予測などが行われてきたが、銀に関する研究はあまり行われていない。そこで、本研究では高橋らのモデル¹⁾を用いて銀の固相拡散接合のシミュレーションを行い、接合温度や接合圧力の違いによる接合時間や接合機構への影響について検討を行った。

2. 固相拡散接合の原理および接合機構

2.1. 固相拡散接合の原理

固相拡散接合は材料表面同士の密着が生じることで、その部分で原子間の結合が達成されて接合が進行する。表面の酸化皮膜が強固な場合、化学結合は妨げられるが、皮膜が不安定となるに十分な高真空・高温状態であれば接合は進行する²⁾。本研究では、表面の皮膜が不安定となる場合を仮定し、次に述べる3つの接合機

構が働く場合の固相接合過程のシミュレーションを行った。

2.2. 接合機構

2.2.1. 塑性変形機構

材料表面は、原子レベルで完全に平滑であることは非現実的であり、凹凸を有する表面を考える必要がある³⁾。高橋らのモデルではFig. 1のように一様な表面凹凸を有する二次元モデルを仮定している。

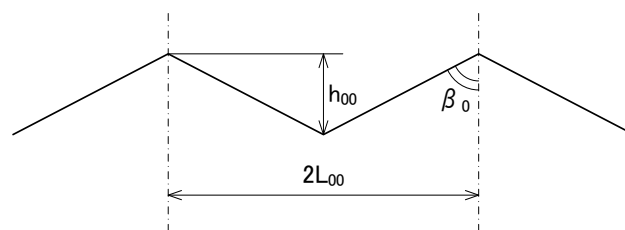


Fig. 1 二次元接合表面モデル

*専攻科 機械システム工学専攻

**機械工学科 准教授

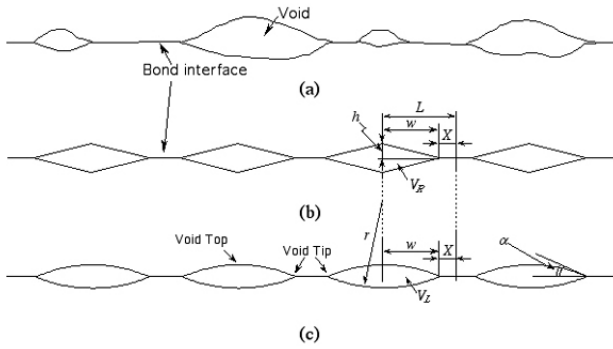


Fig. 2 接合界面モデル

ここで, h_{00} は初期凹凸高さ, $2L_{00}$ は初期空隙間距離である. 塑性変形機構は, 転位のすべりを必要とする変形機構である. 初期密着は Fig. 1 に示す接合表面の峰と峰同士が接触し, Fig. 2(b) のように潰れることによって達成される. すなわち, 初期密着は塑性変形機構によって達成される.

初期密着率 S_0 は

$$S_0 = \frac{P}{(1 + \beta_0) \sigma_Y} \quad (1)$$

P : 接合圧力[MPa]
 σ_Y : 降伏応力[MPa]
 β_0 : Fig. 1 参照

で与えられる. この塑性変形以降($t > 0$)は, クリープ変形機構, 拡散機構が共に働き接合が進行すると仮定する.

2.2.2. クリープ変形機構

クリープ変形機構は, 塑性変形機構と同じく転位のすべりを必要とする変形機構であり, 特に高温下で重要な機構である.

クリープ変形機構の速度式は, $S \leq 50\%$ で

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{creep1}} = \frac{A \cdot S \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^{n+1}}{\left(1 - S^{\frac{2}{n}}\right)^n} \left\{ \frac{2P}{nG} \left(\frac{1-S}{S}\right) \right\}^n \quad (2)$$

P : 接合圧力[MPa]
 n : 応力指数[-]
 G : 剛性率[N/m²]
 A : クリープ定数(温度に依存)[-]

$S > 50\%$ で

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{creep2}} = \frac{A \cdot (1-S) \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^{n+1}}{\left\{1 - (1-S)^{\frac{2}{n}}\right\}^n} \left(\frac{2P}{nG}\right)^n \quad (3)$$

P : 接合圧力[MPa]
 n : 応力指数[-]
 G : 剛性率[N/m²]
 A : クリープ定数(温度に依存)[-]
とモデル化されている.

2.2.3. 拡散機構

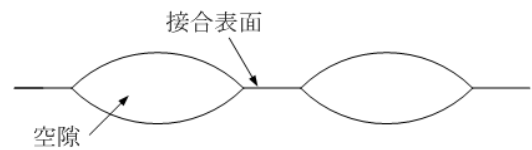


Fig. 3 接合界面モデル(拡散機構)

拡散機構は転位のすべりを必要としない機構である. 拡散機構における接合界面モデルを Fig. 3 に示す. Fig. 3 に示す接合界面モデルはレンズ状であり, Fig. 2(b) の界面モデルと異なるが, 両モデルの空隙断面積が等しくなるように曲率を設定している.

拡散機構の速度式は

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{diff}} = \frac{3 \sin \alpha \cdot \Omega \cdot \omega_j}{kT(2\alpha - \sin 2\alpha)rX^2} \times \left(\frac{P}{S} + \frac{\gamma_s}{r}\right) \left(\delta_b D_b + \frac{2L}{\pi} D_v\right) \quad (4)$$

P : 接合圧力[MPa]
 Ω : 原子体積[m³]
 ω_j : 補正係数[-]
 k : ボルツマン定数[J/K]
 T : 接合温度[K]
 α : Fig. 2(c) 参照
 X : Fig. 2(c) 参照
 γ_s : 表面エネルギー[J/m²]
 δ_b : 接合界面拡散幅[m]
 D_b : 界面自己拡散係数[-]
 D_v : 体積自己拡散係数[-]

である.

3. 固相拡散接合シミュレーション

3.1. シミュレーション条件

固相拡散接合シミュレーションは高橋らのモデルを用いて、銀・銅をそれぞれ接合温度 800~1000[K]、接合圧力 5~30[MPa]の間でシミュレーションを行った。接合温度は 100[K]ごと、接合圧力は 1[MPa]ごとにシミュレーションを行った。接合面の初期条件は、 $L_{00}=10[\mu\text{m}]$ 、表面凹凸の初期高さ $h_{00}=1.0[\mu\text{m}]$ とした。式(4)の補正係数 ω_j は純銅では常に 1.0、純銀は温度に依存し 0.1~0.25 の範囲である¹⁾。そこで、今回のシミュレーションでは、銅は $\omega_j=1.0$ 、銀は $\omega_j=0.2$ として計算を行った。

3.2. シミュレーション結果及び考察

3.2.1. P-S 領域図（等時間線）

P-S 領域図(等時間線)とは、縦軸に接合率 $S[\%]$ 、横軸に接合圧力 $P[\text{MPa}]$ をとったもので、グラフ中の曲線は接合経過時間を示している。例えば、Fig. 4 では接合圧力が 15[MPa]で 300[s]接合を行った場合は、接合率が約 60[%]になることを示している。

銀と銅をそれぞれ接合温度が 1000[K]、接合圧力が 5~30[MPa]の間でシミュレーションを行った結果を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。接合温度が 1000[K]の場合、接合圧力が 5~30[MPa]の間では、銅よりも銀のほうが早く接合が進行することがグラフから読み取れる。

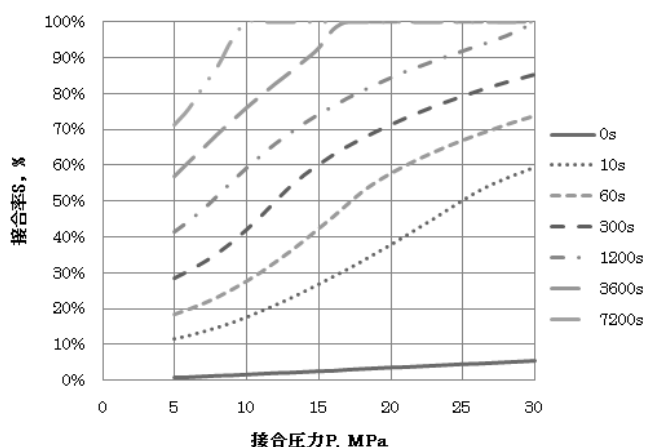


Fig. 4 1000[K]のときの銀の P-S 領域図(等時間線)

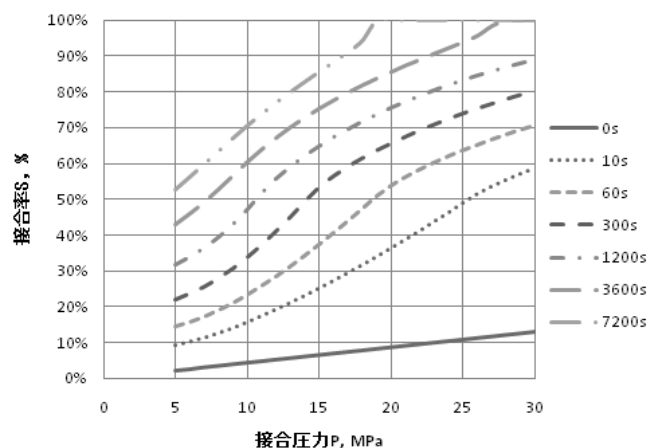


Fig. 5 1000[K]のときの銅の P-S 領域図(等時間線)

次に、接合温度が 800[K]で接合圧力が 5~30[MPa]の間でシミュレーションを行った結果を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。

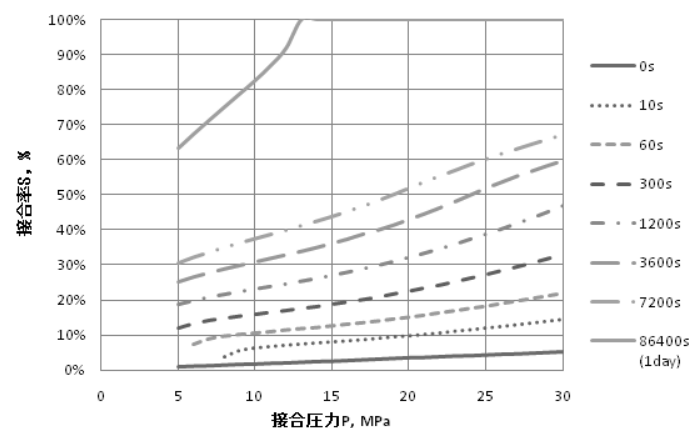


Fig. 6 800[K]のときの銀の P-S 領域図(等時間線)

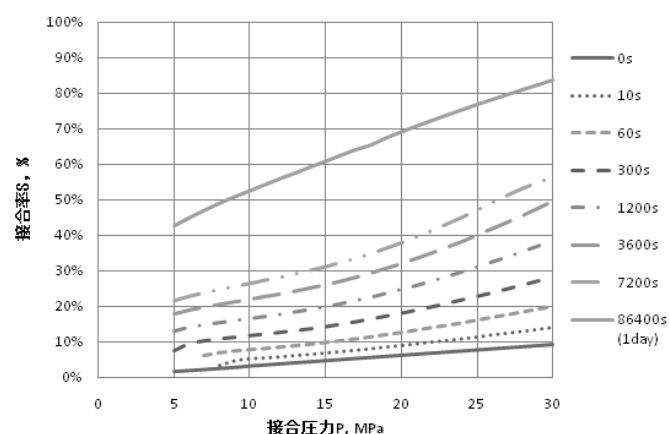


Fig. 7 800[K]のときの銅の P-S 領域図(等時間線)

グラフから 800[K]の場合も銀のほうが銅と比較して全体的に接合が早く進行することが分かった。温度が 800~1000[K]、接合圧力が 5~30[MPa]という条件では、銀のほうが早く接合が進行することが分かった。

また、接合温度が 800~1000[K]という条件下では、接合圧力を高くすることによって、銀と銅のどちらも接合の進行が早くなるということがいえる。

3.2.2. P-S 領域図 (等比率線)

P-S 領域図(等比率線)とは、縦軸に接合率 S [%], 横軸に接合圧力 P [MPa]をとったもので、グラフ中の線はクリープ変形機構と拡散機構の寄与率を示している。例えば、Fig. 8 で接合圧力が 15[MPa]で接合率が約 60%の時はクリープ変形機構が約 70[%], 拡散機構が約 30[%]の割合で接合が進行していることを示している。銀と銅をそれぞれ接合温度 1000[K], 接合圧力 5~30[MPa]の間でシミュレーションを行った結果を Fig. 8 と Fig. 9 に示す。

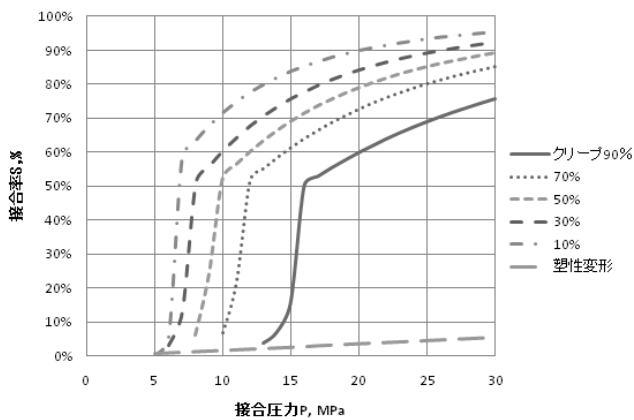


Fig. 8 1000[K]のときの銀の P-S 領域図(等比率線)

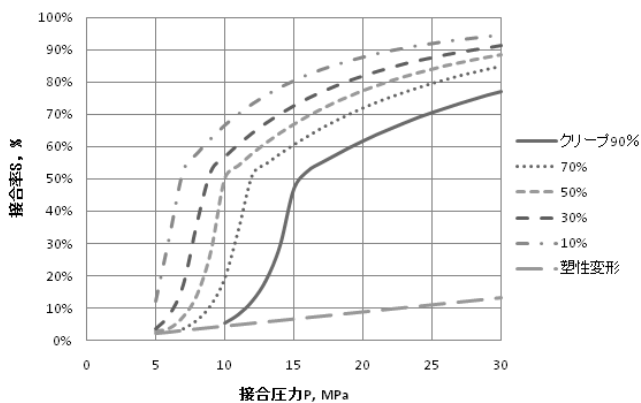


Fig. 9 1000[K]のときの銅の P-S 領域図(等比率線)

接合温度が 1000[K]の場合は、同じ接合圧力であれば銅のほうがよりクリープ変形機構の寄与率が大きくなることがグラフから読み取れる。また、銀も銅も接合圧力が高くなるとクリープ変形機構の寄与率が大きくなることが分かる。

次に、接合温度が 800[K]の場合の銀、銅それぞれの P-S 領域図を Fig. 10 と Fig. 11 に示す。

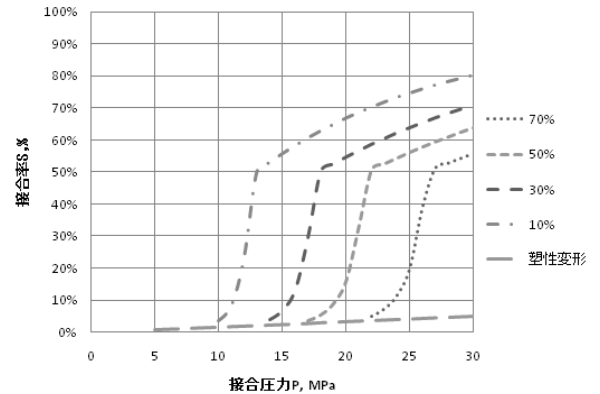


Fig. 10 800[K]のときの銀の P-S 領域図(等比率線)

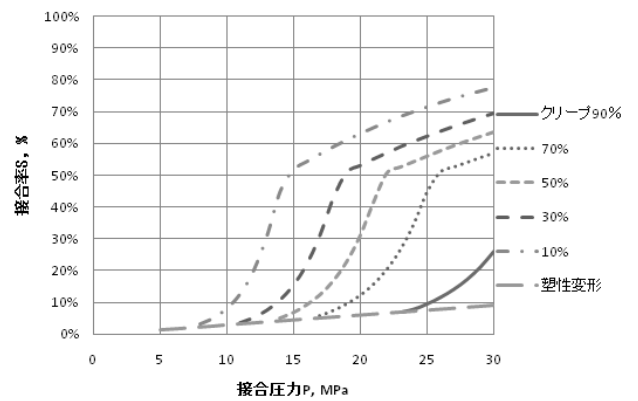


Fig. 11 800[K]のときの銅の P-S 領域図(等比率線)

接合温度が 800[K]の場合も銅のほうがクリープ変形機構の寄与率が大きく、特に銀は接合圧力が 5~30[MPa]の範囲ではクリープ変形機構の寄与率が 90[%]になることはない。しかし、Fig. 6, Fig. 7 を比較すると、銀の方が接合の進行が早い。これは、銅と比べ、銀は拡散による接合速度が速いためと考えられる。また、この接合温度でも接合圧力が高くなるとクリープ変形機構の寄与率が大きくなるという傾向がある。

接合温度が 800~1000[K]の間では、銀と比較して銅の方がクリープ変形機構の寄与率がより大きい。また銀と銅のどちらも、クリープ変形機構の寄与率は接合温度が高くなるか、接合圧力が高くなると大きくなるという傾向がみられた。

4. 固相拡散接合実験

4.1. 実験装置概要

Fig. 12 に実験装置全体の構造を示す。Fig. 13 は試料加熱部の構造を示したものである。試料をヒーターで加熱し、圧力をかけることで接合を行う。

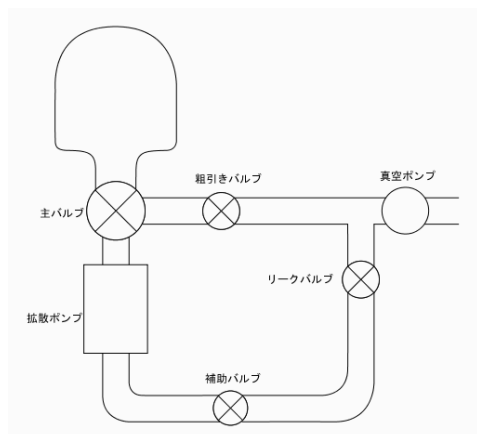


Fig. 12 実験装置の構造

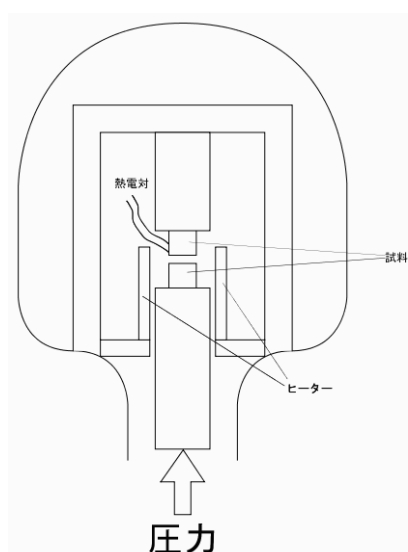


Fig. 13 実験装置の試料加熱部の構造

4.2. 実験方法

実験方法を Fig. 14 に示す。また、実験は以下の手順で行った。

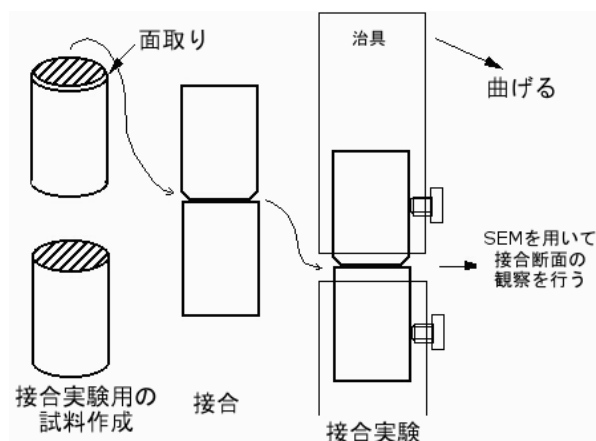


Fig. 14 実験方法

- 1) 真空ポンプ，拡散ポンプを用いて炉内を高真空 ($1.33 \times 10^{-3} \sim 1.33 \times 10^{-4} [\text{Pa}]$) にする
- 2) ヒーターのスイッチを入れ，炉内の温度を上げる
- 3) 目的の温度に達してから，数十分経過後に荷重をかける
- 4) 目標の時間が経過したら，荷重を取り除いて冷却する
- 5) 接合部で分割して，SEM(Scanning Electron Microscope)で断面画像を撮影する

4.3. 実験条件および実験結果

実験条件を Table 1 に示す。試料は，純度 99.99[%] の銀を旋盤加工し，シミュレーション時の接合表面モデルの $h_{00}=1.0 [\mu\text{m}]$ を再現するために，端面を 400 番のエメリー紙で研磨したものを実験試料とした。接合前に炉内で 30 分焼きなましを行い加工硬化の影響を緩和した。

Table 1 実験条件

	接合温度 [K]	接合圧力 [MPa]	接合時間 [s]
実験 1	1000	20	3600
実験 2	800	25	1200

Fig. 15 および Fig. 16 は実験後の試料破断面を SEM により撮影した写真である。



Fig. 15 接合後の試料断面 (実験 1)

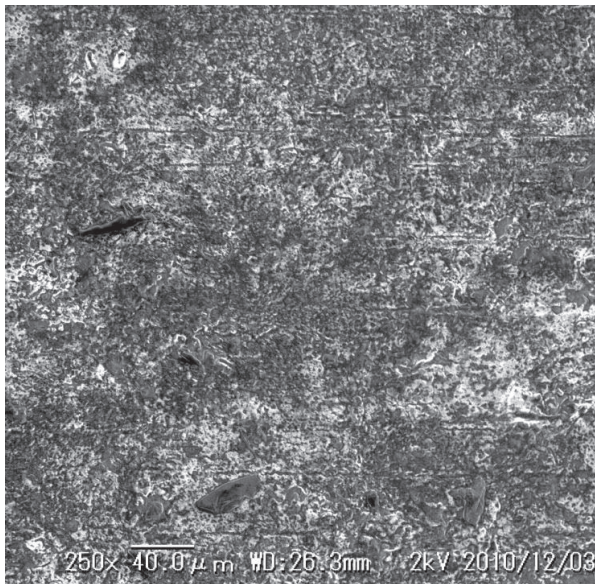


Fig. 16 接合後の試料断面（実験 2）

Fig. 15 は破断面全体にディンプルと呼ばれる凹凸が多数存在している。一方、Fig. 16 は破断面全体にディンプルは存在していない。ディンプルは接合部分が破断してできた部分であるので、実験 1 の試料はほぼ完全に接合されているのに対して、実験 2 の試料は完全には接合されていないことが分かる。そこで、実験 2 の試料の画像を 2 値化した上で、ディンプルであると考えられる白い部分の割合を画像処理によって計算を行った結果、およそ 26[%]程度であるということが分かった。

4.4. 実験結果とシミュレーション結果の比較

実験 1 の条件でシミュレーションを行うと、接合率は 100[%]となり、実験結果も接合率はおよそ 100[%]となることから、シミュレーション結果と実験結果はおよそ一致することが分かる。

また、実験 2 の条件でシミュレーションを行うと、接合率は 40[%]であり、実験結果は 26[%]であった。シミュレーション結果と実験結果には多少のずれが生じているが、およそ一致しているといえる。

このことから、接合温度が 1000[K]と 800[K]でのシミュレーションでは、ほぼ妥当な結果を得られていると考えられる。

5. 結論

本研究では銀および銅の固相拡散接合のシミュレーションを行い、比較を行った。その結果、接合温度が 1000[K]では銅と比較して、銀の方が早く接合が完了することが分かった。また 1000[K]では、銀のほうクリープ変形機構の寄与率が大きく、一般的にクリープ変形機構と拡散機構を比べるとクリープ変形機構の

方が接合の進行が早いことから、銀のほうが多く早く接合が完了することは正しいと考えられる。

温度が 800[K]の場合は、銅の方がクリープ変形機構の寄与率の大きい、銀の方が拡散機構による接合の進行が早いため、銀のほうが多く早く接合が完了することが分かった。

固相拡散接合実験を行った結果、接合温度 1000[K]、接合圧力 20[MPa]、接合時間 3600[s]という条件では、シミュレーション結果と実験結果はおよそ一致した。また、接合温度 800[K]、接合圧力 25[MPa]、接合時間 1200[s]という条件ではシミュレーション結果と実験結果に多少のずれが生じているものの、妥当な結果を得られたことを確認した。

参考文献

- (1) 高橋康夫, 青野真也, 上谷力, 井上勝敬, 西口公之, 接合中の空隙間隔分布推定手法と密着過程予測モデルの試作—固相拡散接合予測支援システムに関する研究(第1報)—, 溶接学会論文集, 第14巻 第4号, pp. 666-673, 1996
- (2) 高橋康夫, 常國博史, 佐名川佳治, 井上勝敬, 西口公之, 確率統計論的解析を適用した接合過程ばらつき推測アルゴリズム—固相拡散接合予測支援システムに関する研究(第3報)—, 溶接学会論文集, 第14巻 第4号, pp. 682-688, 1996
- (3) 朝倉義裕, 前田将克, 高橋康夫, 池田聖, 高橋邦夫, 大谷忠幸, 接合機構領域図に基づく固相圧接過程の検討, 第11回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, Vol. 15, pp. 417-420, 2005
- (4) 西口公之, 高橋康夫, 基本的な接合機構に基づく固相接合過程の定量的検討(第1報), 溶接学会論文集, 第3巻 第2号, pp. 303-309, 1985
- (5) M.F.Ashby, A First Report on Deformation-Mechanism Maps, Acta Metall., Vol.20, Issue7, pp.887-897, 1972
- (6) 深谷保博, 東保男, 肥後寿泰, 浜岡正義, 末田穰, 小林敏郎, 小川真, 篠崎賢二, 超精密加工された銅板の拡散接合—銅の拡散接合に関する研究(第1報)—, 溶接学会論文集, 第15巻 第3号, pp. 467-475, 1997
- (7) 深谷保博, 生田明彦, 岩西耕平, 高橋康夫, 山根八州男, 東保男, 小林敏郎, 超精密加工銅板に対する接合予測計算による接合率と接合強度との相関性—銅の拡散接合に関する研究(第2報)—, 溶接学会論文集, 第20巻 第2号, pp. 207-212, 2002

高専生の学習動機について

上垣 宗明*

The Research on the Students' Motivation

Muneaki UEGAKI*

ABSTRACT

Nowadays, many researchers have examined student motivation to learn English from the various points of view. But at the Colleges of Technology (Kosen), there are few researches on student motivation. On this paper, I have researched motivation of Kosen students relating to their English abilities. A questionnaire was administered about the motivation to learn English. I analyzed the results with statistical method. Using the questionnaire survey, student motivation is measured according to one of three categories, Integrative / Personal Motivation, Instrumental Motivation, and Intrinsic Motivation. Based on each category, I analyzed the relation between their English ability and their motivation.

The findings would suggest: (1) Integrative / Personal Motivation had even bigger influence to student English ability than other categories, Instrumental Motivation and Intrinsic Motivation, (2) students who got the higher score of English exam were highly motivated.

Keywords : motivation, English ability, the College of Technology

1. はじめに

近年、日本でも、言語学習と学習動機の関係は注目されており、その調査や研究が盛んになっている。しかし、従来からの調査や研究は、主に中学生、高校生、大学生を対象に行われている。最近では、早期英語教育が小学校で導入されているため、それらを対象とした調査はますます盛んになってきている。しかし、小西（1994）は「・・・第二言語習得と一口に言っても、さまざまな学習環境が考えられるということを念頭に置き、それぞれの学習環境特有の条件を考慮して動機づけを考えていかなければならないのである。」⁽¹⁾と述べている。また、H. D. Brown（1987）も、“Teachers, therefore, may need to discern the source of a student's motivation in order to meet particular, possibly specialized, needs.”⁽²⁾と、述べており、教員が適切な教育を行うためにも、その学習環境特有の学習動機についてしっかりと理解しておくことは必要である。

高等専門学校（以下：高専）という5年間の一貫

教育を実践している本校では、高校や大学等とは異なる環境で学生たちは様々な学習活動を行っている。英語学習に関しても高専独自の要因が影響しているのではないと思われる。当然、高専独自の学習動機についての調査や研究が必要である。本稿では、高専2年生を対象に英語の学習動機とその成績との関係について調査する。

2. 動機づけの分類について

第2言語学習における動機づけの研究は、1960年代後半から、Robert Gardner と Wallace Lambert によって、カナダで始められた。彼らは、Instrumental Motivation（道具的動機づけ）と Integrative Motivation（統合的動機づけ）の言語学習に与える効果についての研究を行った⁽³⁾。彼らは動機づけを、道具的動機づけ（実用目的達成のための言語使用願望）と、統合的動機づけ（目標言語が用いられている社会の一員とみなされるようになりたいという融合・同化願望）に分類した。しかし、日本の実情を考慮すると、日本国内では、目標言語が使われている社会があまり多く存在しないために、その社会の一員のようにになりたいという、統

* 一般科 准教授

合的動機づけはあてはまらないように思われる。次の『応用言語学辞典』の記述の方が日本国内の実情を考慮すると参考になる。

動機づけとは、たとえば外国語習得という大きな目標の達成、あるいは、さらに細かな個々の目標の達成に結びつくような心理的な特性であり、内的動機づけ (intrinsic motivation) と外的動機づけ (extrinsic motivation) とがある。前者は、達成感、自尊心、問題を解決した誇り、授業が充実しているという気持ち、思った通りに言語活動ができることなどを指し、後者は課題自体とは別のもの、つまり課題をこなした結果得られる報酬・地位・テストの点数・資格などを指す。⁽⁴⁾

以上のように、動機づけの分類方法も多様である。H. D. Brown の “Most situations involve a mixture of each type of motivation.”⁽²⁾ という既述から、ほとんどの学習状況で、学習動機が複雑に混ざ合っていることがわかる。

Mark Kelly (2005) は、日本の大学1年生へのアンケート結果において、動機づけを3つの要因に分類し、英語専攻の学生とそれ以外の学生とに分けて、それぞれの要因の比較を行った。その結果、どの調査項目においても英語専攻の学生の方が、動機づけが高いことを明らかにしている。分類は、Instrumental Motivation (道具的動機づけ)、Integrative Motivation / Personal Motivation (統合的・個人的動機づけ)、Intrinsic Motivation (主観的動機づけ) である⁽⁵⁾。

また、R. A. Brown (2004) も、日本の大学1年生を対象とした英語学習の理由を問うアンケートの結果を4つの要因に分類している。Personal Development、Job Related、Intrinsic Interest、Pop Culture Related⁽⁶⁾ の4つの要因である。しかし、“The fourth factor was only marginally reliable.” と述べているように、Pop Culture Related に関する要因は、あまり信頼性がないといえる。

以上の日本の大学生を対象にした2つの調査から、英語学習の動機づけや理由を分類する際には、3つの要因に分けて分類することが適当だと思われる。

本研究の統計処理は「エクセル統計 2008 (SSRI : 社会情報サービス株式会社)」を使用した。

3. アンケートについて

2010年3月に、英語の学習動機を調査する32項目からなるアンケートを、121名の高専1年生を対象に実施した。実施日は1年の英語の最後の授業日

であった。成績とは全く関係がなく、自分の正直な気持ちを答えるように教示した。

アンケート実施日

クラスA 2010年3月1日 09:00~09:15

クラスB 2010年3月1日 09:50~10:05

クラスC 2010年3月1日 10:45~11:00

4点法での評定基準とし、1 全然そう思わない、2 あまりそう思わない、3 だいたいそう思う、4 全くそう思う、の4段階の回答を求めた。このアンケートの内的一貫性を測定するために、信頼度係数 (クロンバック α 係数) を用いた。ゾルタイ (2006) は、「うまく作られた質問紙であれば、たとえ10項目程度しかない場合でも、内的一貫性による信頼度係数は0.8程度あります。」⁽⁷⁾ と述べている。クロンバック α 係数を求めた結果、0.77と0.8より少し低い数値を示した。そのため、相関係数がマイナスの値を示した3項目 (24, 高専では英語は必要ないと思う、28, 今後も日本語だけで十分だと思う、29, 外国の人と話すときは、英語ではなく日本語で会話したい) の値を逆数 (5-評定値) にし、再度クロンバック α 係数を求めた。その結果、0.83となり、このアンケートは内的一貫性が高いことを確認した。

この32項目について、主因子法による因子分析 (バリマックス法) を行った。先行研究 (Mark Kelly と R. A. Brown) や α 係数等を考慮し、3因子解を求める因子分析が適当であると判断した。各因子に対する寄与率が0.4以上のものを取り上げ、分析対象とした。

第1因子は10項目が、第2因子は11項目が、第3因子は5項目が、0.4以上の寄与率であった。以下に、それぞれの因子への寄与率が0.4以上の項目寄与率が高かった順に記述する。

第1因子は、17, 将来、留学したいから英語を勉強している、10, 外国の人と友達になりたいから英語を勉強している、2, 外国の人と会話をしたいから英語を勉強している、21, 将来、外国へ移住したいから英語を勉強している、18, 英語が容易にいろんな友達を作るのを助けてくれる、29, 外国の人と話すときは、英語ではなく日本語で会話したい (逆数)、7, 英語のWEBページを閲覧したいから英語を勉強している、11, 英語が好きだから勉強している、3, 自分から進んで英語を勉強している、30, 英語の読み物あるいは映画などに直接触れたい、であった。この10項目の α 係数は、0.84であり、項目数が少ないにもかかわらず、非常に高い値を示していた。

第2因子は、27, 英語は外国の生活についての情報を得ることや、それらをよりよく理解するためにとても役立つ、16, 少なくとも1つの外国語を知っていることは、社会の評価やより高い社会のステータスを得るのに望ましい、14, 最近、英語はほとん

どの仕事の場面でとても役に立っている、22, しっかりと教育を受けた人は書かれたり話されたりした英語を読めたり理解できると思う、26, 英語は、本当の意味での“国際感覚のある人”や“世界の市民”になるためには必要である、24, 高専では英語は必要ないと思う（逆数）、6, 英語は世界中で通用する言葉と思うので英語を勉強している、13, エンジニアとして海外で活躍するために英語を勉強している、28, 今後も日本語だけで十分だと思う、23, 教養の一つとして英語の力は必要である（逆数）、11, 英語が好きだから勉強している、であった。この11項目の α 係数は、0.79と第1因子と比較すると低い値であったが、ゾルタイが述べているように、11項目でこの値なら十分信頼できるといえる。

第3因子は、4, 親に言われるから英語を勉強している、1, 英語の試験でよい点を取るために勉強する、5, 単位を取るために英語を勉強している、12, 友達よりも良い点数を取りたいから英語を勉強している、18, 英語が容易にいろんな友達を作るのを助けてくれる、であった。この5項目の α 係数は0.68と項目数が少ないために低い値を示していた。項目数を考慮すると十分とは言えないが、信頼できる値である。

第1から第3因子のそれぞれの項目の寄与率を表1に示す。

表1 各因子への寄与率

項目	第1因子	項目	第2因子	項目	第3因子
17	0.751	27	0.600	4	0.580
10	0.718	16	0.554	1	0.565
2	0.698	14	0.529	5	0.565
21	0.623	22	0.501	12	0.541
18	0.590	26	0.487	8	0.526
29	0.537	24	0.487		
7	0.527	6	0.462		
11	0.478	13	0.445		
3	0.427	28	0.439		
30	0.404	23	0.424		
		11	0.416		

各因子の項目群を検討すると因子の特徴がうかがえる。第1因子は、“自分対英語が話されている社会の中の個人”という枠でとらえることができ、内的動機づけに関係する項目が多くみられる。また、比較的短期的な目標となる動機を尋ねている項目が多いことも特徴的である。Mark Kellyの結果にあ

てはめて考えると、Integrative Motivation / Personal Motivationに相当する。R. A. Brownの結果では、Personal Developmentに相当すると考えられる。第1因子をまとめると、短期的な個人を対象とした内的統合的動機づけといえる。

第2因子は、自分とその言語が話されている社会とのつながりに関する項目がみられる。第1因子と比較すると、比較的長期的な目標を尋ねていることが特徴的である。Mark KellyとR. A. Brownの両者の結果のIntrinsic Motivation、Intrinsic Interestに相当すると考えられる。第2因子をまとめると、長期的な社会を意識した内的統合的動機づけといえる。第1因子と第2因子は、共通点と相違点とがみられる。両因子とも、統合的動機づけであるが、第1因子は個人を対象とした近い将来に関する項目が多く含まれている。第2因子は、遠い将来の目標であり、社会から自分がどのようにみられたいか、ということに関する項目が多く含まれている。

第3因子は、典型的な道具的動機づけに関する項目で、短期的な外的動機づけといえる。Mark Kellyの結果では、Instrumental Motivationに、R. A. Brownの結果では、Job Relatedに相当すると考えられる。第3因子をまとめると、短期的な外的道具的動機づけといえる。

4. アンケート結果と各試験との分析

アンケートの全項目を総合計した値、第1因子、第2因子、第3因子のそれぞれの項目の合計の値の高い群（上位群）と低い群（下位群）とで比較する。それぞれの群を“文型”^(注1)（サンプル数：121, 平均：66.2, 標準偏差（SD）：17.64）、“単語”^(注2)（サンプル数：121, 平均：72.5, SD：15.73）、“1年前期中間試験”（サンプル数：121, 平均：68.18, SD：12.73）、“1年学年末評定”（サンプル数：121, 平均：76.9, SD：9.28）、“2年前期定期試験”（サンプル数：120, 平均：58.17, SD：20.16）、“2年前期末評定”（サンプル数：121, 平均：73.5, SD：18.82）の6つの成績において、有意差があるのかを、対応のない2群の差の検定（t検定）で分析する。

“文型”については、暗記力だけではなく英語の文構造の理解力を問う問題である。“文型”とは異なり、“単語”は暗記力と努力で点数が左右されるものである。“1年前期中間試験”（2009年6月21日 9:00～9:50実施）は、高専入学後の初めての試験で、学生全員が高い動機をもって受験した試験である。

“1年学年末”は、試験成績だけではなく、学業成績も加味した1年の総合点である。“2年前期定期試験”（2010年9月28日 9:00～9:50実施）は、直近の試験成績である。“2年前期末”は、2年前期の学業成績を加味した総合点である。

初めに、アンケートの全項目（サンプル：121，平均：84.1，SD：10.41）の上位群（サンプル数：36，平均：95.7，SD：4.83）と下位群（サンプル数：38，平均：2.9，SD：6.86）の各試験での差を検定した結果を表2に示す。

表2 総合点のt検定の結果

		平均値	SD	統計量	p 値	判定
文型	上位群	67.50	19.21	0.41	0.34	
	下位群	65.76	16.98			
単語	上位群	74.75	13.67	1.24	0.11	
	下位群	70.29	16.88			
1 年 前期中間	上位群	70.58	12.37	1.59	0.06	
	下位群	65.89	12.92			
1 年 学年末	上位群	78.81	9.40	1.58	0.06	
	下位群	75.39	9.15			
2 年 前期定期	上位群	64.39	18.97	2.47	0.01	**
	下位群	52.82	21.17			
2 年 前期末	上位群	76.47	14.07	1.63	0.05	
	下位群	71.32	13.18			

**：1%有意 *：5%有意

全項目での上位群と下位群では2年前期定期試験の点数で1%水準の有意差が見られた。平均点でも11.6点の差があった。その他の項目で有意差は見られなかった。

次に、第1因子（サンプル：121，平均：22.18，SD：5.39）について、上位群（サンプル数：37，平均：28.4，SD：2.92）と下位群（サンプル数：38，平均：16.2，SD：2.38）の差の検定を行った結果を表3に示す。

表3 第1因子のt検定の結果

		平均値	SD	統計量	p 値	判定
文型	上位群	72.73	18.32	1.79	0.04	*
	下位群	65.29	17.76			
単語	上位群	75.79	14.32	1.16	0.12	
	下位群	71.74	15.98			
1 年 前期中間	上位群	73.32	11.73	3.04	0.00	**
	下位群	64.53	13.45			
1 年 学年末	上位群	80.76	8.55	2.66	0.00	**
	下位群	75.32	9.28			
2 年 前期定期	上位群	66.16	18.09	3.11	0.00	**
	下位群	51.92	21.64			
2 年 前期末	上位群	77.92	13.14	2.17	0.02	*
	下位群	71.26	13.62			

**：1%有意 *：5%有意

第1因子については、単語以外の成績で有意差が

見られた。

次に、第2因子（サンプル：121，平均：32.31，SD：4.73）について、上位群（サンプル数：37，平均：37.5，SD：2.02）と下位群（サンプル数：40，平均：32.7，SD：3.71）の差の検定を行った結果を表4に示す。

表4 第2因子のt検定の結果

		平均値	SD	統計量	p 値	判定
文型	上位群	66.49	17.49	0.14	0.44	
	下位群	65.93	16.58			
単語	上位群	72.86	15.03	0.34	0.37	
	下位群	71.65	16.09			
1 年 前期中間	上位群	70.19	12.36	1.60	0.06	
	下位群	65.70	12.21			
1 年 学年末	上位群	79.30	9.11	1.85	0.03	*
	下位群	75.55	8.69			
2 年 前期定期	上位群	63.46	19.38	2.12	0.02	*
	下位群	53.63	21.17			
2 年 前期末	上位群	76.84	14.16	1.69	0.05	*
	下位群	71.53	13.45			

**：1%有意 *：5%有意

第2因子においても、3つの成績で下位群と上位群の点数に5%水準の有意差が見られた。

最後に、第3因子（サンプル：121，平均：12.14，SD：2.595）について、上位群（サンプル数：33，平均：15.2，SD：1.19）と下位群（サンプル数：31，平均：8.7，SD：1.23）の差の検定を行った結果を表5に示す。

表5 第3因子のt検定の結果

		平均値	SD	統計量	p 値	判定
文型	上位群	67.18	17.25	0.62	0.27	
	下位群	64.45	18.25			
単語	上位群	73.97	11.74	1.15	0.13	
	下位群	69.61	17.99			
1 年 前期中間	上位群	66.94	14.19	0.52	0.30	
	下位群	68.65	12.04			
1 年 学年末	上位群	77.12	9.08	0.11	0.46	
	下位群	76.87	9.03			
2 年 前期定期	上位群	67.6	21.92	0.16	0.43	
	下位群	56.7	20.91			
2 年 前期末	上位群	74.48	13.15	0.75	0.23	
	下位群	71.77	15.58			

**：1%有意 *：5%有意

第3因子においては、どの成績でも有意差は見られなかった。

以上の結果から、英語の成績に一番大きく影響している因子は、第1因子であることがわかる。第2因子、第3因子の順で、学習動機が成績に与える影響が弱くなる。特に、第3因子は全ての試験において上位群と下位群との比較では、平均点に差はあるが、有意差はみられなかった。この結果は、Rod Ellis (1985) の見解を支持するものとなった。

Where the L2 functions as a 'foreign language' (i.e. is not important outside the class for the learners), an integrative motivation helps; but where the L2 functions as a 'second language' (i.e. is used as means of wider communication outside the classroom), an instrumental motivation is more effective. ⁽⁸⁾

第二外国語が教室外であまり話されていない環境では an integrative motivation が有効であるが、教室外でもその言語が広く使われている場合は an instrumental motivation がより効果的であると述べている。日本の実情を考えると、前者にあてはまり、本校の英語学習において、an integrative motivation の高いか低いかが、英語の成績に作用することが本調査で明らかになった。

八島智子 (2004) は、日本での様々な調査を総合して、英語の学習動機について、次のように述べている。

日本の学習者は英語の学習に対して、1)「受験・学校での成績・テスト・宿題」といった短期的で具体的な目標 2)「外国の人とのコミュニケーション・留学・国際的な仕事、国際人としての自己像」というやや漠然とした長期的な目標の両者を併せ持っているとして分析している。・・・今の日本の教育では、英語を日常的に話さない環境であることも影響し、短期的な目標を目指して日々の努力を積み重ねることが、国際的な目標を持つことに必ずしもつながっていないのである。⁽⁹⁾

本調査では、高専という特異な教育機関での調査結果であり、八島の述べていることとは必ずしも一致しない。しかし、比較的短期的な目標といえる第1因子が強く英語の成績に影響しており、長期的な目標といえる第2因子が第1因子に比べると影響していないといえる。長期的、または、短期的目標ということに関しては、八島の見解と同じ結果といえる。また、高専ということで、他の教育機関とは異なり、大学入試を受ける必要がないので、1) のすぐ目の

前にある目標はあまり影響していなかったのだろう。また、アンケートの実施日が1年生終了時であり、試験や宿題が目の前に迫っていなかったために、第3因子が成績にあまり影響していないということも推測できる。

次に、アンケートの総合点(サンプル:121, 平均:84.1, SD:10.41)の上位群(サンプル数:38, 平均:95.37, SD:4.94)と下位群(サンプル数:39, 平均:72.74, SD:6.89)で、1年生の時に受けた4回の試験成績の平均点(サンプル:121, 平均:69.4, SD:11.98)において有意差がみられるのかを分析した。その結果を表6に示す。

表6 動機づけの違いによる試験成績の違い

	平均	SD	統計量	p 値	判定
上位群	71.57	11.65	1.57	0.06	
下位群	67.30	12.12			

** : 1%有意 * : 5%有意

表6が示す通り、アンケートの数値、つまり学習動機の違いによっては試験の点数に有意差は見られなかった。

次に、試験成績の上位群(サンプル数:38, 平均:83.16, SD:5.55)と下位群(サンプル数:38, 平均:55.79, SD:4.88)における動機づけの違いについて検定し、その結果を表7に示す。

表7 試験成績による動機づけの違い

	平均	SD	統計量	p 値	判定
上位群	87.92	9.76	2.43	0.009	**
下位群	82.13	11.10			

** : 1%有意 * : 5%有意

表7が示すように、成績の違いによって、動機の数値がかなり異なり、1%水準の有意差がみられた。

表6と表7の結果から、成績が良いから学習動機が高いことが明らかになった。しかし、表6の数値も、有意差ではないにしても、有意傾向だといえるので、今後のさらなる調査が望まれる結果である。

SUGITA & TAKEUCHI (2010) は、中学生を対象に調査を行い、その結果を次のように述べている。

This means that the students in the higher proficiency group were more sensitive to motivational influences. Based on these results, we can say that differences in English proficiency levels have an effect on students' perception of motivational influences. ⁽¹⁰⁾

彼らの見解と非常に近い結果となった。中学生と高専生とは異なっているが、本調査でも成績の優秀な学生は動機づけが成績に強く影響していることが明らかになった。

5. まとめ

学生の動機づけと英語の成績の関係を考察すると、一般的に言われている短期的な内的統合的動機づけ（第1因子）の方が、長期的な内的統合的動機づけ（第2因子）より英語の成績に強く関係していた。また、外的な道具的動機づけ（第3因子）の違いでは成績に有意差がないことが明らかになった。この結果が、高専以外の教育機関で妥当であるかは今後のさらなる研究が待たれるところである。

学習動機が高いから成績が良いのか、成績が良いから学習動機が高いのかは、非常に複雑な問題である。本調査ではアンケート結果と成績との関係から、成績が良いから学習動機が高い、という一様の結論に達した。しかし、アンケートの実施時期等を考慮すると、今後もこの結論は変わる可能性が十分ある。

動機づけと一口に言っても、「外的動機づけ」、「内的動機づけ」、「統合的動機づけ」、「道具的動機づけ」は互いに対立するものではなく、補完しあっているといえる。⁽¹¹⁾との記述があるように、動機づけは様々な要因が混ざり合っている非常に複雑なものである。今回の調査だけでは、正確な動機を把握することはできていないといえる。高専という5年間の一貫教育の過程で、今後の長期的な調査や研究が学生の学習動機と成績との関係をより正確に理解するうえでは必要である。

今後、学生の学習動機が複雑で多様なものになってくる。より効果的な教育を行うためにも、しっかりと学習動機を理解する調査や研究は、ますます、必要になってくるだろう。

《注》

（注1）文型については、昨年度の4回の中間・定期テストで、文型を問う問題を37問出題した。1問3点で、111点満点として計算した。

（注2）単語については、2年生で各Lesson終了後に、小テストとして30点満点の単語テスト（日本語から英語15問、英語から日本語15問の30問の試験を3回行い、その合計点で計算した。

参考文献

- （1）小西正恵 著：「第二言語習得における学習者要因」，小池生夫 監修，SLA研究会編，『第二言語習得研究に基づく最新の英語教育』，大修館書店，pp.127-146，1994.
- （2）H. D. Brown : “Principle of Language

Learning and Teaching”，Prentice-Hall, Inc, 1987.

- （3）Gardner, R. C. & MacIntyre, P. D. : “AN INSTRUMENTAL MOTIVATION IN LANGUAGE STUDY –Who Says It Isn’t Effective?–”，H. Douglas Brown, Suzan T. Gonzo, READING ON SECOND LANGUAGE ACQUISITION , Prentice Hall Regents, pp.206-225, 1991.
- （4）小池生夫 編集主幹：『応用言語学辞典』，研究社，2003.
- （5）Mark Kelly : “Motivation, the Japanese Freshman University Student and Foreign Language Acquisition”，JALT Hokkaido Journal, pp.32-47, 2005.
- （6）R. A. Brown : “Motivation for Learning English among Japanese University Students” , 文教大学情報学部『情報研究』第31号, pp.1-12, 2004.
- （7）Rod Ellis : “Understanding Second Language Acquisition”，Oxford University Press, 1985.
- （8）ゾルタイ・ドルニエイ 著，八島智子・竹内理 訳：『外国語教育学のための質問紙調査入門』，松柏社，2006.
- （9）八島智子：『外国語コミュニケーションの情意と動機』，関西大学出版部，2004.
- （10）SUGITA, Maya & TAKEUCHI, Osamu : “Motivational Influences Surrounding Secondary School EFL Students” , Language Education & Technology 第47号, pp.181-203, 2010.
- （11）JACET 教育問題研究会 編：『新英語科教育の基礎と実践 授業力のさらなる向上を目指して』，三修社，2005.

ラム波直交スキャンによる FRP 積層板の衝撃損傷検査

渡邊 優太*

和田 明浩**

Impact Damage Inspection of FRP Laminates with Lamb Wave Cross-Scanning

Yuta WATANABE Akihiro WADA

ABSTRACT

Lamb wave Cross-scanning is demonstrated for quick inspection of FRP laminates with impact damage. One of nondestructive evaluation methods to find localized defect is ultrasonic testing. However, conventional method such as C-scan is time-consuming for wide area inspection, because the inspected area by one operation is relatively small. In this study, two orthogonal line-scanning is conducted to specify the location of impact damage. Change in power spectral density is used as damage index instead of wave velocity or attenuation. It is found that evaluation based on the centroid of spectral density is the most promising method for quick inspection of impact damage.

Key words : FRP laminates, NDT, Lamb wave

1. 緒言

FRP 積層板は繊維配向角が異なる単層を複数重ね合わせた構造を持ち、繊維配向角を選択することで材料設計が可能な材料である。FRP 積層板に衝撃負荷が加わると、層間はく離、母材き裂、強化繊維破断などが局所的に発生し、残存強度が著しく低下する。このため、衝撃損傷部位の効率的な検査手法の確立が望まれている。

衝撃損傷検査の手法の 1 つに超音波を用いた非破壊検査法がある。従来は板厚方向に超音波を伝播させその反射波から欠陥を検出する垂直探傷法や、超音波探触子を 2 つ用いて板面内方向に伝播させ、超音波の減衰から欠陥を検出する斜角入射法が多用されてきたが、いずれの場合も測定一回あたりの検査領域が小さく、試料全体を検査するには平面走査が必要となるため、検査に時間を要するという欠点がある⁽¹⁾。そこで本研究では時間短縮を目的として、従来の斜角入射法を応用したラム波直交スキャンによる検査方法を検討した。

2. ラム波による損傷検出原理

ラム波はガイド波の一種であり、板面内方向に比較的長距離伝播できることが知られている。板面内を伝播するラム波の特性は材質・板厚によって変化し、損傷部ではその特性が大きく変化するため損傷部位の特定に利用できる⁽²⁾。

本研究ではラム波の入射方法として斜角入射法を用いる。Fig.1 のように超音波探触子を 2 個用い、一方の探触子から超音波を斜角入射して材料

中に伝播させ、入射角と対称となるように設置された受信側探触子で漏洩波を受信する。この際、検査領域は送受信探触子に挟まれた領域となるが、従来はこの距離を比較的小さく設定し、垂直探傷法と同様に材料表面を平面走査することで試料全体の検査を行っていた。本研究では、送受信探触子を検査領域をまたぐように設置してラム波をロングレンジで伝播させ、一次元走査により損傷検査を試みる。

等方性材料の場合、一次元走査の走査方向は任意に設定可能である。しかしながら FRP 積層板は異方性材料のため、材料主軸以外の方向での長距離伝播による一次元走査は困難である。このことから本研究では直交する材料主軸方向にラム波ロングレンジスキャンを試み、効率のよい損傷特定方法について検討する。

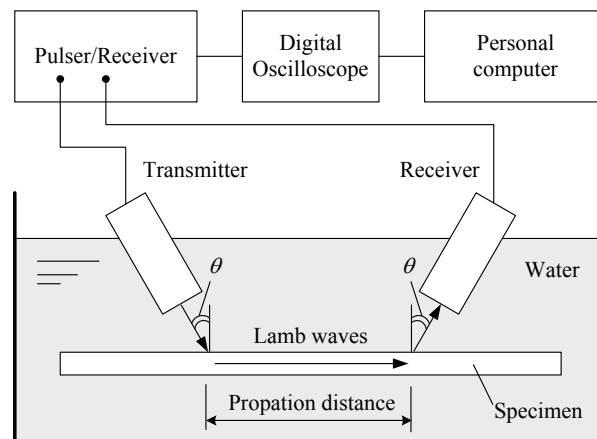


Fig.1 Experimental setup for Lamb wave inspection.

* 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

損傷領域を画像化する場合、従来は測定領域を二次元格子状に分け、各点ごとの特性を測定することで二次元配列を構成し、これに基づきグレースケール画像を構成していた。これに対して直交スキャンでは、Fig.2 に示すように一回の走査につき測定領域の格子の各行および各列の積算的な特性を測定する。さらに、それらを格子状に演算して得られた各成分をグレースケール化したものを検査画像とする方法である⁽³⁾。

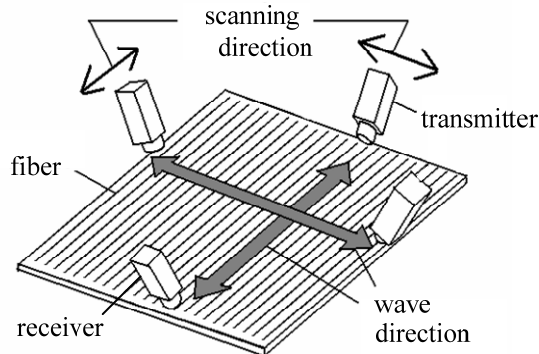


Fig.2 Concept of cross scanning inspection.

3. 測定条件の選定

3. 1 供試材

供試材はCFRP積層板とし、トレカ織物プリプレグ（東レ F6343B-05P）を用いてオートクレーブ成形により作製した。積層枚数は8枚で板厚約2mm、積層板の大きさは250×300mmとした。以後、供試材の長手方向を0°方向、短手方向を90°方向とする。

作製した供試材にFig.3に示すストライカ（質量1kg）を用いて高さ0.7mの地点から落錘試験を行い、測定領域中央部に衝撃損傷を付与した。衝撃損傷は衝撃負荷面の裏面からはFig.4のように十字の割れとして観察できたが、衝撃負荷面からはほとんど確認できなかった。



Fig.3 Striker (steel).



Fig.4 Impact damages in CFRP laminate.

3. 2 斜角入射法を用いた最適角測定

斜角入射法を用いた超音波検査を行うにあたり、超音波が板面内に沿って伝播するように入射角を設定する必要がある。板の面内方向に屈折する入

射角は、Fig.5 に示すスネルの法則によって決まり、 $\theta_2=90^\circ$ となるときの θ_1 が最適角となる。本研究では被検査材の最適入射角を実測により決定した。入射波は周波数 1 MHz、振幅 400 V の矩形波とし、伝播距離は 60 mm に設定した。受信波形の一例を Fig.6 に示す。入射角を $\theta_1=6^\circ$ から 2° 刻みで 22° まで変化させ、各角度での受信波の最大振幅を計測し、振幅値が最大になるときの入射角を最適入射角とした。なお、伝播の方向によって特性が変化することを考慮し、 0° 方向と 90° 方向の 2 種類の伝播方向について測定を行った。測定結果を Fig.7 に示す。これより、 0° 方向、 90° 方向ともに最適角 14° という結果を得た。

次に板面内を伝播している波と確定するために各方向の音速を測定した。本実験では、超音波の伝播距離を 60 mm から 100 mm まで 10 mm 間隔で変化させながら Fig.6 に示すゼロクロスポイントを追跡し、(伝播距離) - (伝播時間) 関係の傾きから音速を計算した。これらの音速からスネルの法則を用いて最適角を逆算した結果を Table 1 に示す。音速により得られた計算値と測定値を比較すると多少の開きはあるものの、Fig.7 のピークがなだらかなことから有意な差異とはいえない。以上の結果より本研究では斜角入射法の入射角を 14° と定めた。

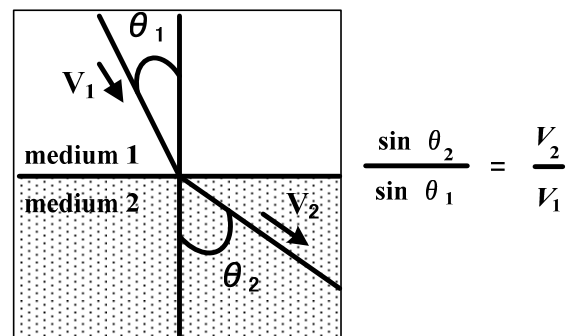


Fig.5 Refraction at an interface.

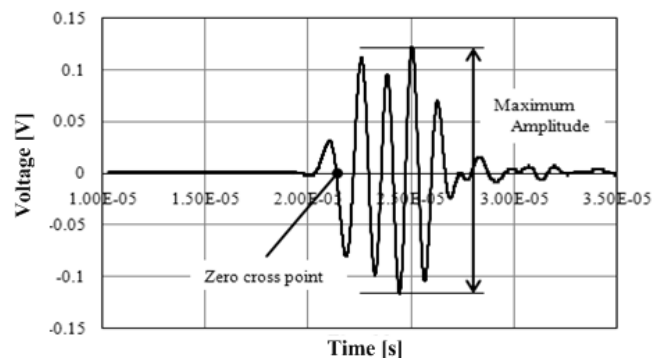


Fig.6 Example of a detected waveform.

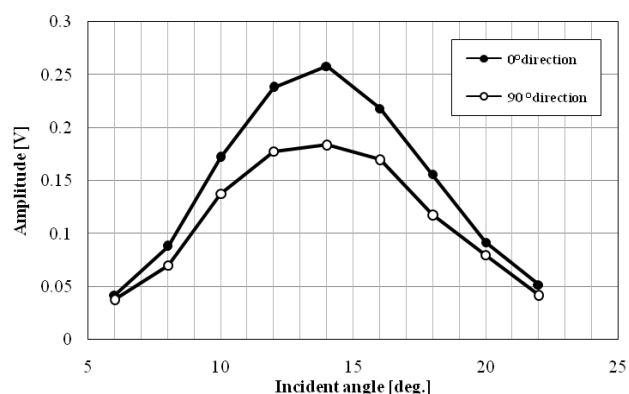


Fig.7 Variation of ultrasonic intensity with incident angle.

Table 1 Optimal angles of ultrasonic incidence.

Ultrasonic velocity [m/s]		Optimal angle[deg.]	
0°	90°	0°	90°
6860	5990	12.6	14.5

3. 3 有効測定範囲の選定

材料検査を行うにあたり，材料端面付近で測定を行うと端面からの反射波の影響により，材料そのものの特性が得られない可能性がある．そこで，端面が影響を与える距離を調べ，確実な測定が行える範囲を選定した．

Fig.8に端面の影響測定の概略図を示す．探触子の中心が材料端面と重なる点を0とし，端面からの距離 x を2mm間隔で増加させ $x=80\text{mm}$ になるまで測定を行った．ラム波の伝播距離は60mm, 80mm, 100mmの3種類について測定を行った．入射波は周波数1MHz，振幅400Vの矩形波とした．各測定点における受信波形の最大振幅の測定結果をFig.9に示す．Fig.9より，今回使用した探触子の径が16mmであることから，探触子全体が材料面内に収まるように設置することで，材料端面の影響を軽

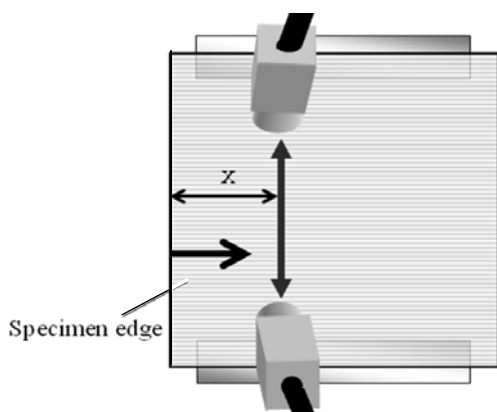


Fig.8 Distance from the specimen edge.

減することができるといえる．また伝播距離に関わらず，材料端面から20mm以上の距離を設けることで端面による影響を無視できることが確認できる．以上の結果に基づき，本研究では以後の測定を材料端面から20mm以上の距離を設けて行った．

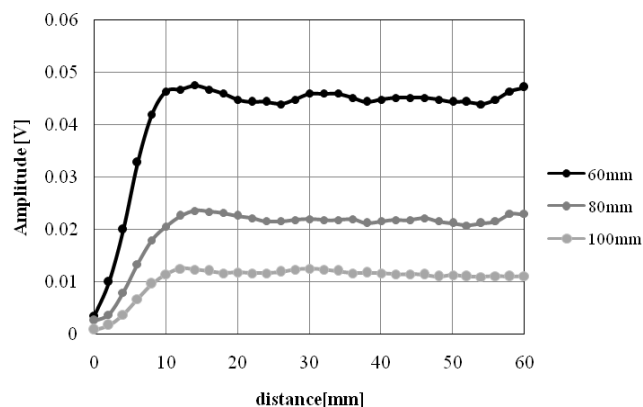


Fig.9 Effect of specimen edge on ultrasonic measurement.

4. ラム波ロングレンジスキャンによる検査

4. 1 測定方法および評価手法

健全状態および衝撃損傷を付与した供試材に対してラム波ロングレンジスキャンによる測定を行い，後述するパラメータに基づいて評価し検査結果の比較を試みた．ラム波の伝播距離を60mm, 80mm, 100mmの3種類とし，材料長手方向に伝播させ直交方向に走査する0°方向スキャン，材料短手方向に伝播させ直交方向に走査する90°方向スキャンの2種類の測定を各伝播距離に対して行った．なお，走査間隔は2mmとし，入射波は周波数1MHz，振幅400Vの矩形波とした．

超音波検査では従来，損傷評価パラメータとして音速や減衰率が用いられていたが，いずれも材料中の繊維配向の乱れなど損傷以外の影響を受けることから，検査精度に問題があった．そこで本研究ではこれらに代わるパラメータとして，損傷の有無に伴い変化する受信波のパワースペクトルを評価対象とした．本研究では M.T.Kiernanらの示したパラメータ⁽⁴⁾を参考にし，以下に示す3つの評価パラメータでパワースペクトルの特徴を代表させた．

$$SP1 = \int_0^{f_{\max}} S(f) df \quad (1)$$

$$SP2 = \frac{1}{SP1} \int_0^{f_{\max}} S(f) f df \quad (2)$$

$$SP3 = \frac{1}{SP1} \int_0^{f_{\max}} S(f) (f - SP2)^2 df \quad (3)$$

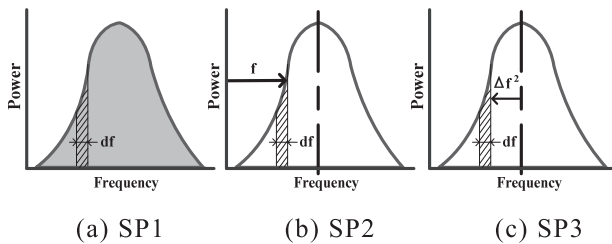


Fig.10 Schematic of evaluation parameter.

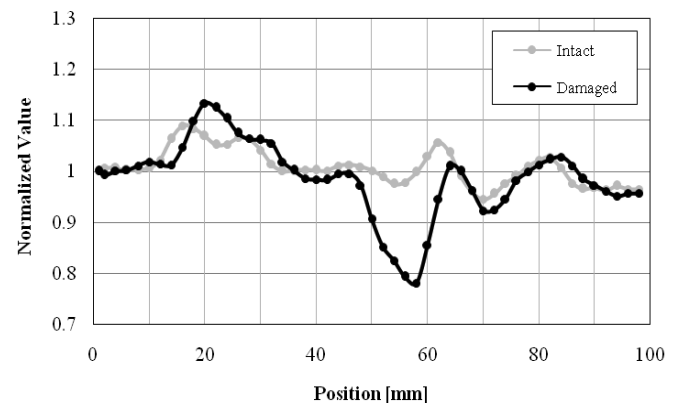
式(1)-(3)の概略図をFig.10(a)-(c)にそれぞれ示す. 式(1)はスペクトル線図の面積, 式(2)はスペクトル線図の図心位置, 式(3)はスペクトル線図の分散度を示す. 本研究ではこの3項目を損傷前後で比較することで各パラメータの有効性を検討した.

4. 2 測定結果および考察

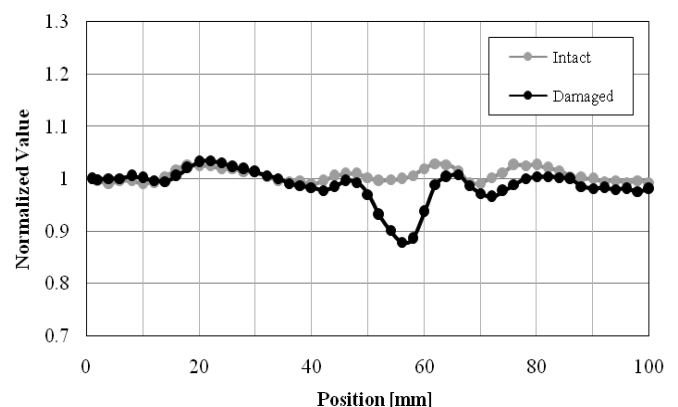
以下では損傷前後の差が明確に現れた伝播距離100mmについての測定結果を示す. 0° 方向スキャンの結果をFig.11に, 90° 方向スキャンの結果をFig.12に示す. Fig.11(a)およびFig.12(a)は式(1)を評価パラメータとし, 0mm地点のデータを基準として各測定点におけるパラメータの変化割合を損傷前後で比較したグラフである. 以下同様に(b)と式(2), (c)と式(3)がそれぞれ対応している. 得られた結果からどの評価パラメータを用いても損傷領域付近での変化が確認でき, 損傷前後の状態を比較することで損傷領域の特定に有効だといえる. しかし面積(SP1)や分散度(SP3)による評価では, 損傷前の結果が不安定で損傷領域以外の箇所においても変化が生じているため, 損傷後のデータのみを用いて損傷部位を特定することは困難である. 一方, 図心位置(SP2)による評価では非損傷状態において安定した結果を得られているため, 損傷後のみのデータで損傷位置を特定するには図心位置(SP2)による評価が最も適切だといえる.

スペクトル線図の面積(SP1)は受信波のエネルギーに相当し, 試料への超音波の入射効率に依存するため, 損傷前においても大きな変動がみられる. このことから, 面積による評価によって損傷領域を特定することは困難である. 一方, スペクトル線図の図心位置(SP2)は受信波の中心周波数の変化を表しており, その低下は信号に含まれる高周波成分の減衰を意味する. したがって, Fig.11(b), Fig.12(b), は損傷領域でラム波の高周波成分が選択的に減衰したものと解釈できる. これを確認するために損傷領域での損傷前後のパワースペクトルの変化を比較したものをFig.13,14に示す. ス

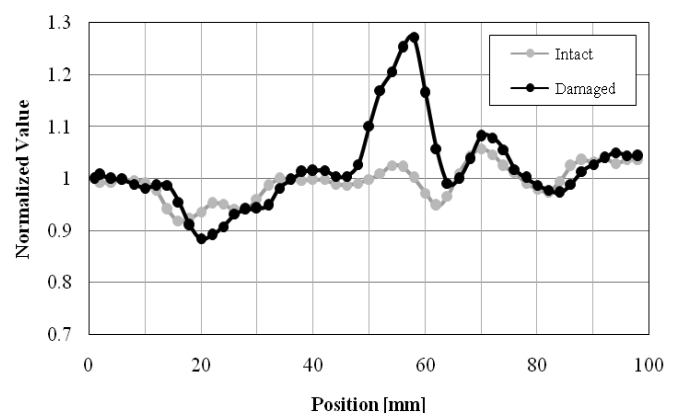
ペクトル線図より損傷前後で1MHz弱での高周波成分が減衰したことが確認できる. また, スペクトル線図の分散度(SP3)については損傷による高周波成分の減衰によって, 損傷前と比較してスペクトルが平滑化しており, 分散度が増加することが確認できる. しかしながら, 面積と同様に損傷領域以外の箇所においても変化が生じているため, 検査精度に問題がある.



(a) SP1 (Area)

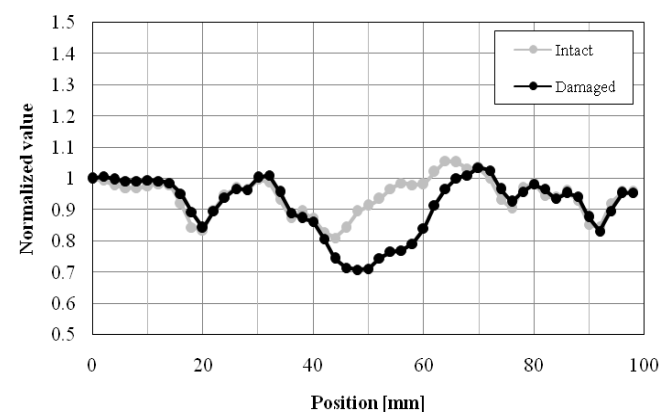


(b) SP2 (Centroid)

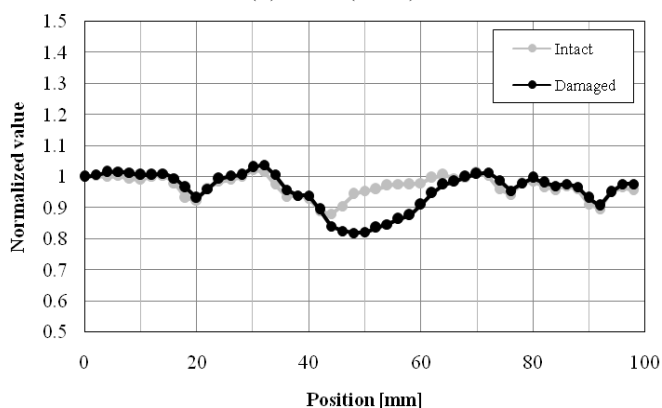


(c) SP3 (Second moment)

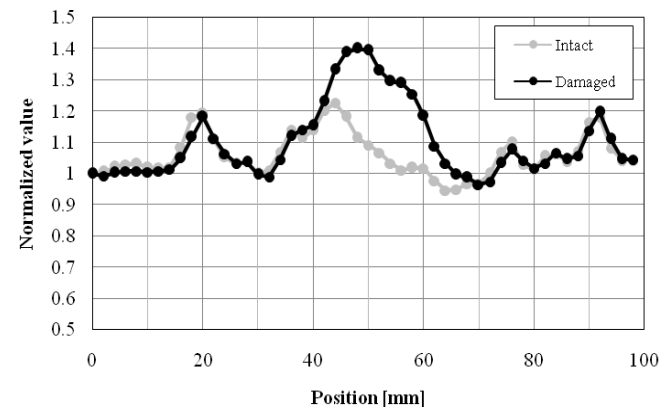
Fig.11 Variation in the spectrum parameters before and after damage formation. (0° direction scanning)



(a) SP1 (Area)



(b) SP2 (Centroid)



(c) SP3 (Second moment)

Fig.12 Variation in the spectrum parameters before and after damage formation. (90° direction scanning)

次に0°方向スキャンと90°方向スキャンの結果を比較すると、90°方向スキャンは0°方向スキャンよりも非損傷状態での乱れが大きいことが確認できる。しかしながら、90°方向においても面積(SP1)や分散度(SP3)による評価は損傷領域以外の乱れが大きく、0°方向スキャン同様に損傷領域の特定には図心位置(SP2)による評価が最も適切だといえる。

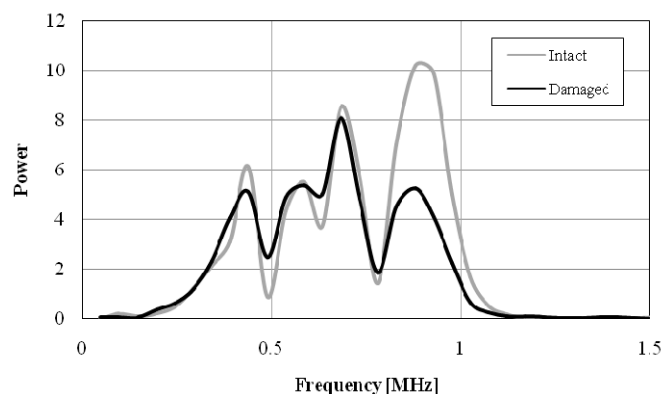


Fig.13 Comparison of power spectrum between intact and damaged laminates. (0° direction scanning)

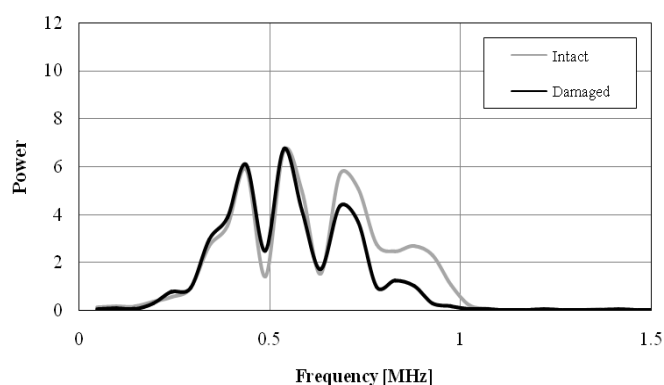


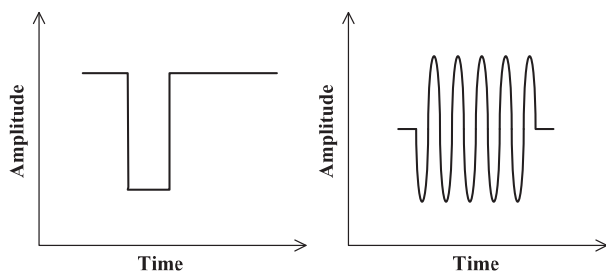
Fig.14 Comparison of power spectrum between intact and damaged laminates. (90° direction scanning)

4. 3 入射波による周波数成分の影響

ラム波ロングレンジスキャンによる測定から、損傷位置の特定には1MHz付近の高周波成分が影響することが確認できた。そのため高周波成分をより多く含んだ信号を入射することで検査精度の向上が見込まれる。そこで、矩形波 (Fig.15(a)) にかえて、必要な周波数を選択的に発信することができるバースト波 (Fig.15(b)) を用いて測定を行い、入射波による比較を試みた。

損傷前後の供試材に対して、矩形波とバースト波の2種類の入射波を用いてラム波ロングレンジスキャン (伝播距離100mm, 走査間隔2mm) による測定を行った。前述の結果から0°方向スキャン、SP2による評価を採用した。バースト波と矩形波の損傷後のみの結果をFig.16に示す。測定結果から特に目立った差異はなく、矩形波・バースト波ともに損傷領域で似たような変化が確認できた。各波における損傷領域と健全領域のパワースペクトルの変化を比較したものをFig.17, 18に示す。Fig.17はバースト波, Fig.18は矩形波のスペクトルの変化を表している。また図中の破線は損傷前後における図心位置の変化を示している。バースト

波のスペクトルが1MHz付近に集中的に存在しているのに対して、矩形波は低周波領域側に分散していることが確認できる。バースト波と矩形波の損傷前後の高周波成分の減衰率に注目すると、バースト波のほうが大きいことが確認できる。このことから図心位置の変化量はバースト波にすることで大きくなる。しかしながら、矩形波はバースト波に対してスペクトルの図心位置が低周波側にあることから相対的な図心位置の変化量はほとんど差異が現れなかった。以上のことから、SP2による評価を行う場合はバースト波による検査精度向上は見込めないことが分かった。



(a) Square pulse (b) Burst wave
Fig.15 Schematic of incident waveform.

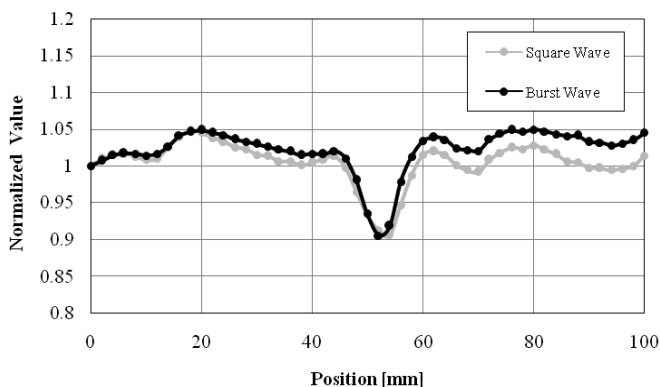


Fig.16 Variation in the dispersion of power spectrum.
(0°direction, SP2)

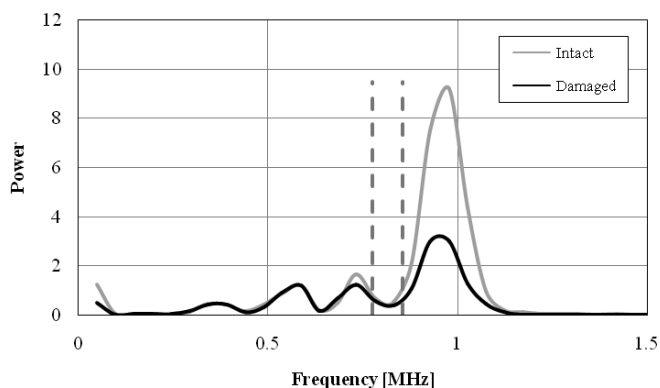


Fig.17 Comparison of power spectrum between intact and damaged laminates. (Burst wave)

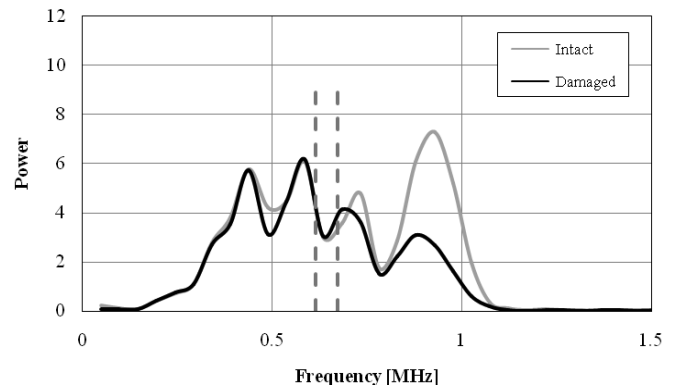


Fig.18 Comparison of power spectrum between intact and damaged laminates. (Square wave)

5. 結言

本研究ではFRPの超音波検査の時間短縮を目的として、直交する2方向のラム波ロングレンジスキャンを試み、損傷領域の特定に適したパラメータの選定を行った。以下に得られた結論を示す。

- (1) 試料端面の影響はラム波伝播距離にかかわらず一定であり、探触子との距離を20mm以上設けることでその影響を無視できる。
- (2) 本研究で使用したCFRP積層板の場合、衝撃損傷によって1MHz弱の周波数成分が著しく減衰することを確認した。
- (3) スペクトル線図の図心位置 (SP2) の変化による評価を行うことで、損傷以外の影響を軽減でき欠陥位置の特定に有効であることを確認した。
- (4) 入射波にバースト波を用いることで、損傷位置の特定に有効な1MHz付近の高周波成分を集中的に入射できるが、検査精度の向上には寄与しない。

以上の結果より、直交する材料主軸方向にラム波ロングレンジスキャンを行い、得られた結果からグレースケール画像を構成することで、損傷位置の特定が可能だといえる。

参考文献

- (1) Wei Yang, Tribikram Kundu, Guide Waves in Multilayered Plates for Internal Defect Detection, *Journal of Engineering Mechanics*, (1998), 311-318.
- (2) N.Toyama, J.noda, T.Okabe, Quantitative damage detection in cross-ply laminates using lamb wave method, *Composites Science and Technology* ,63 (2003), 1473-1479.
- (3) 木村友也,ラム波直交スキャンによる FRP 積層板の非破壊損傷評価,専攻科特別研究論文,(2008).
- (4) M.T.Kiernan, J.C.Duke, Acousto-Ultrasonics as a Monitor of Material Anisotropy, *Materials Evaluation*, 46 (1988), 1105-1113.

加古川流域の地表被覆状況の経年変化調査

稲葉愛*, 中尾幸一**

The Investigation of the Secular Change of Land Cover on the Kakogawa River Basin

Ai INABA* , Kouichi NAKAO**

1. はじめに

現在, 人工衛星搭載のセンサにより観測された画像データを用いるリモートセンシングは広く活用されている。その活用分野は, 広域的な陸域・海洋情報の収集, 地球規模の環境変動のモニタリングまできわめて多岐にわたっている。都市, 地域スケールでは土地開発の進展や, 緑地, 植生の変化のモニタリングなどに利用されている。また砂漠化など地球スケールの自然環境を把握するために不可欠な手段ともなっている。人工衛星画像データには次の2つの利点がある。1つは観測範囲が広範囲であること, もうひとつは, 1970年代後半からの観測データの蓄積がある(少なくとも年に1度以上の観測データが保存されている)ことである。これらのリモートセンシングにより得られた過去数年間の人工衛星画像データを比較することにより, 人工衛星で観測された地域の地表面の状況の経年的変化を調査することが可能である。本研究では, この利点を使って, 研究対象を図1に示す加古川流域とし, その環境変化のモニタリングデータを作成するものとした。過去に遡って, 隔年に, この地域の地表面の状況を示すデータを作成し, 経年的な地表被覆状態の変化を検討する。特に, 市街地, 農耕地, 植生域, 裸地の変化状況に着目する。衛星画像データは, 1992年, 1998年, 2007年のデータを用いて15年間の変化を表すデータを作成する。使用するのは1992年, 1998年はJERS-1-VINR (解像度18m), 2007年はTerra-ASTER(解像度15m)である。センサの違いによる解像度の違いがあり, その精度に差があると考えられるが, やむをえない事と考えて分析する。

2. 調査方法

データの処理法は, 1992年, 1998年, 2007年の人工衛星画像データから, フリーソフトMultiSpecを利用し, フォルスカラー画像を作成する。植生域に着目することから, 画像データから植生指標(NDVI)を求めて, これも含めて, 分類項目別にクラスタリ

*都市工学科2009年度卒業生

**都市工学科 教授

ングによる分類を行い, 地表被覆分類図を作成する。図2は1992年のフォルスカラー画像である。作成に使用したバンドは, NDVIによるもの, 近赤外線, 可視光である。これをもとに地表被覆分類を行う。その後, 加古川流域を図3に示す13の地域に分け, 地表被覆分類図をそれぞれの区域に切り出し, それぞれ分析を行う。図4は地表被覆分類図の区域部分を切り出した例で, 1992年の分類図からのa10地区を切り出したものである。また図5は分類結果を円グラフで表した例で, a10地区のものである。次にその分析結果をもとに, 1992年, 1998年, 2007年の各地域の経年変化の様子の違いを比較する。2007年に関しては, 観測している区域が加古川流域の一部を含んでいないためa1~a5, a11の地域の分析は行っていない。

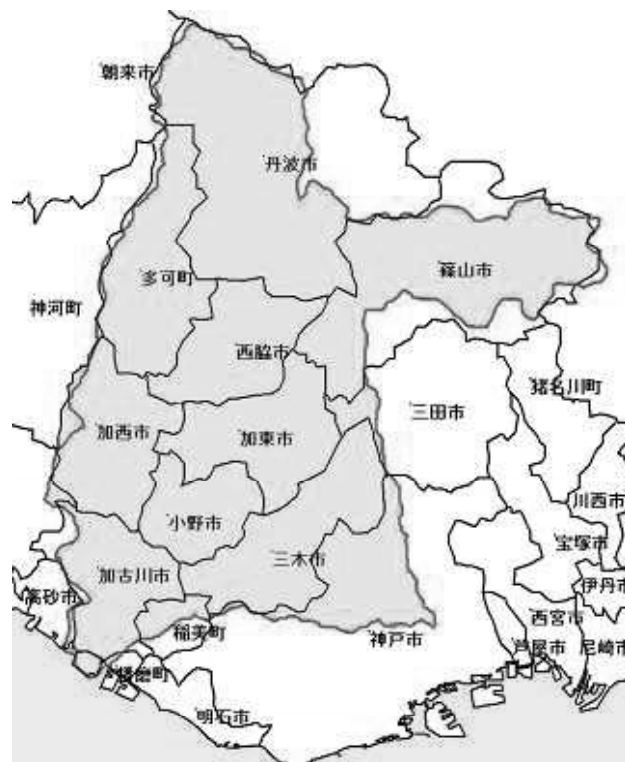


図1 加古川流域と行政区

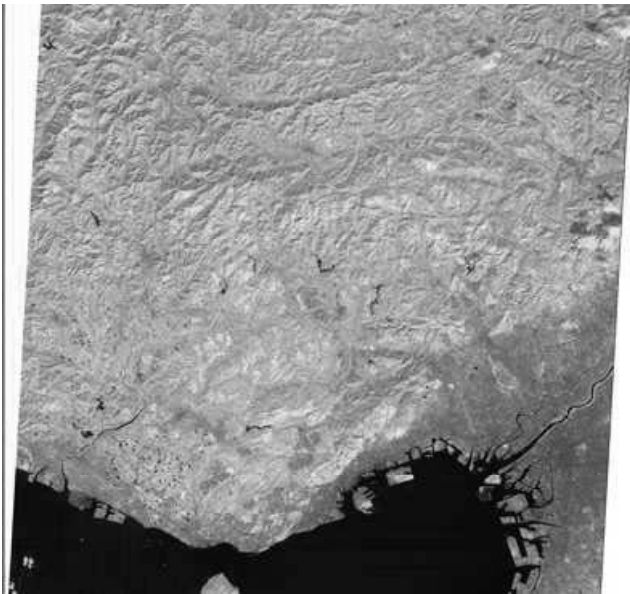


図2 フォールスカラー画像(1992年)

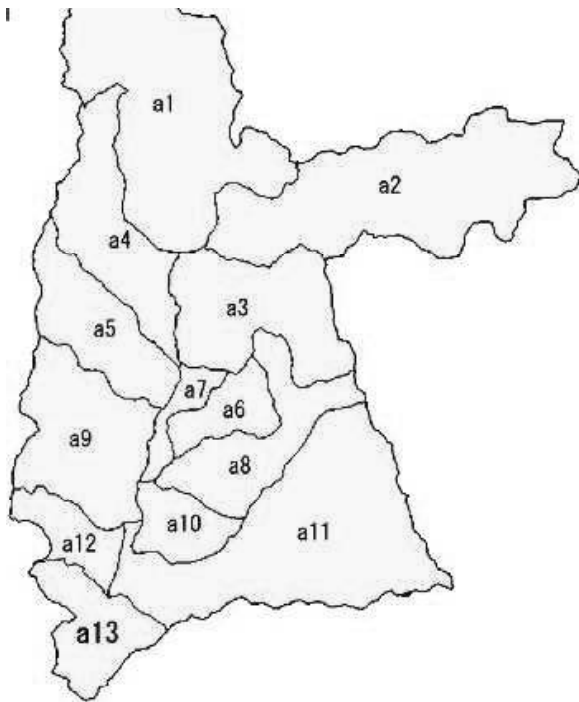


図3 加古川流域の分割地域



図4 a10地域の分類図(1992年)

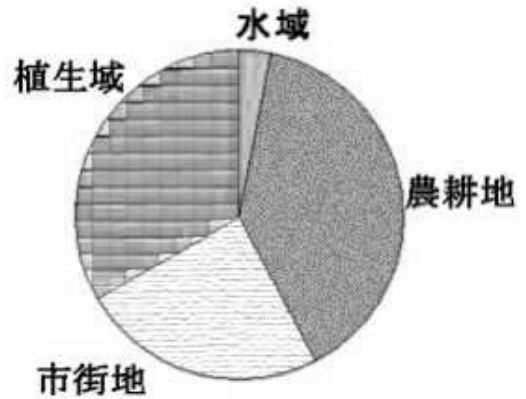


図5 a10地域の分類結果

3. 地域による経年変化の比較

人工衛星画像解析の結果から a1～a13の地域のそれぞれの経年変化を表すグラフを作成し図6～図18に示した。分類項目は、市街地・農耕地・植生域・水域・裸地として分類したが、大部分を占める市街地・農耕地・植生域を用いてグラフを作成した。図6，図7，図8 では1998年までほとんど変化がみられないことがわかる。図9，図10では、植生域に変化がみられ、その被覆面積が図9 では減少し、図10では増加している。図11，図12，図13では、農耕地が減少し、植生域が増加している。図14では、農耕地が減少し、市街地が増加している。図15では、農耕地が減少し、植生域、市街地が増加している。図16，図17，では、市街地が減少し、植生域が増加している。図18では、変化があまりみられない。

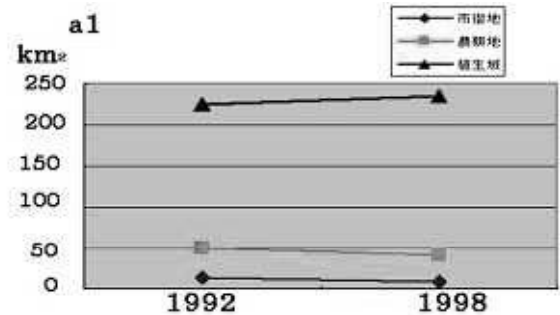


図6 a1地域の経年変化

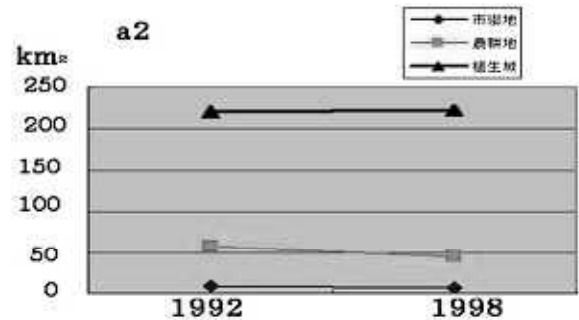


図7 a2地域の経年変化

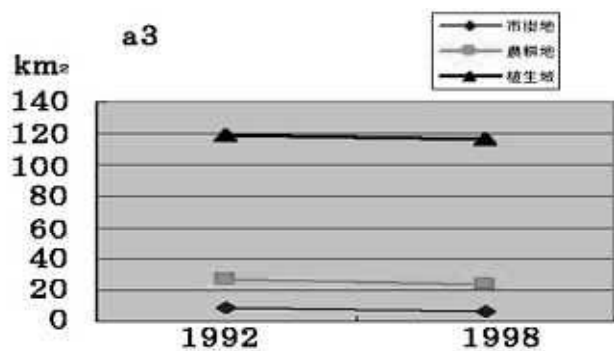


図8 a3地域の経年変化

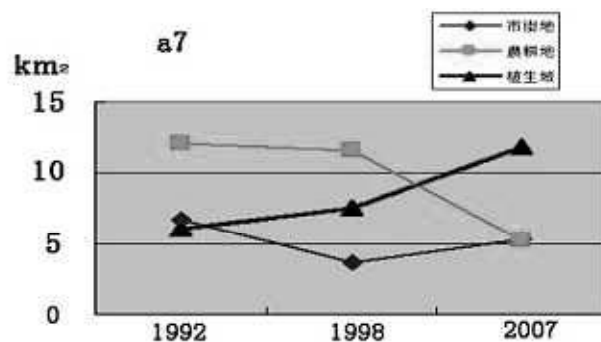


図12 a7地域の経年変化

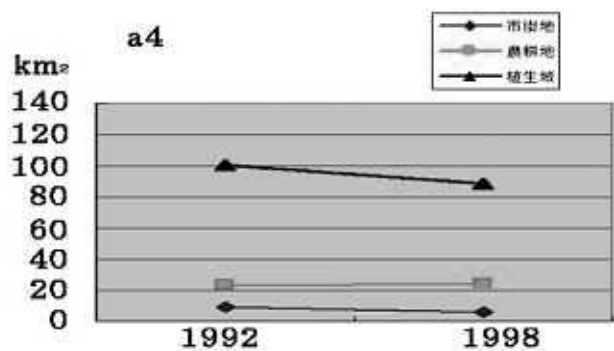


図9 a4地域の経年変化

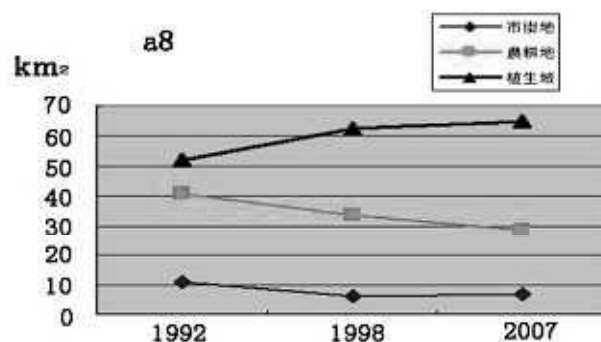


図13 a8地域の経年変化

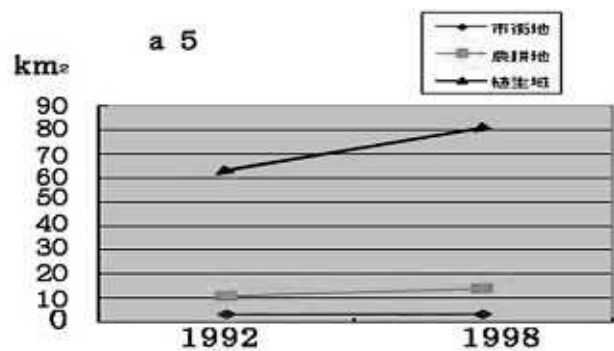


図10 a5地域の経年変化

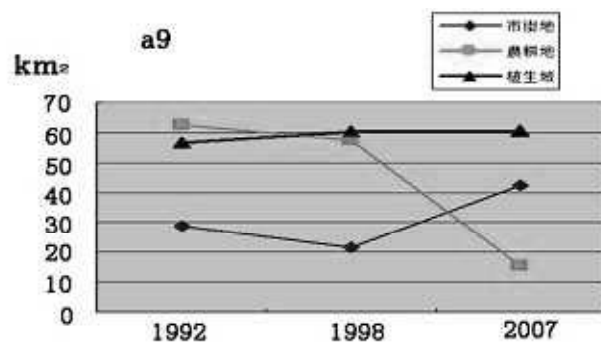


図14 a9地域の経年変化

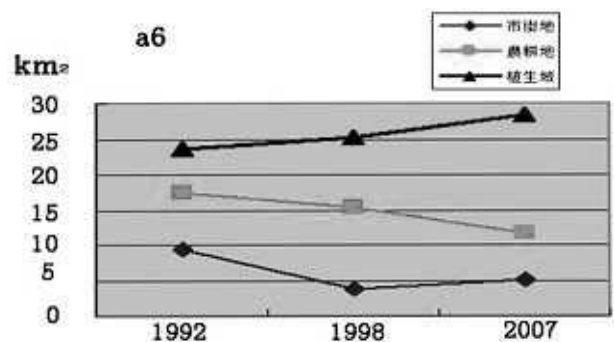


図11 a6地域の経年変化

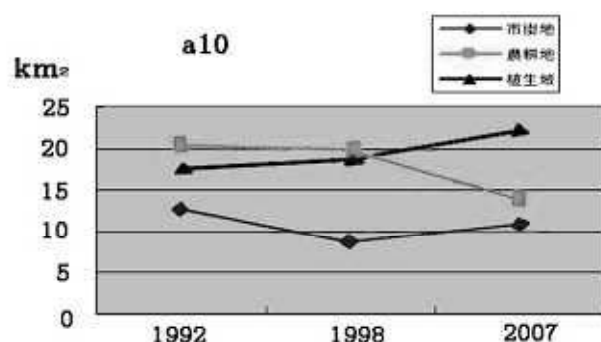


図15 a10地域の経年変化

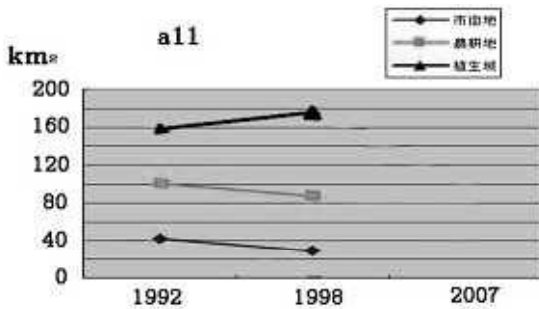


図16 a11地域の経年変化

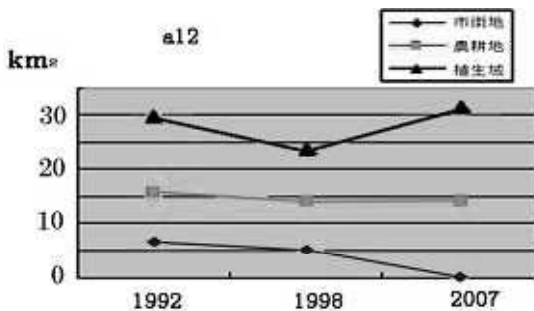


図17 a12地域の経年変化

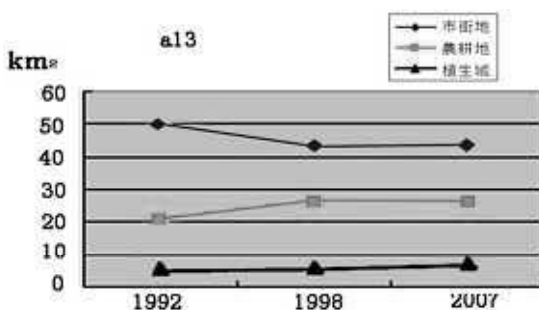


図18 a13地域の経年変化

4. 加古川流域の経年変化の分析

図6～図18から加古川流域の1992年～2007年間の変化を分析する。図19は、地表被覆状態の変化を流域全体でみるため、各区域の分類項目ごとの変化を棒グラフで表したものである。これらをみて、上流域、中流域、下流域でそれぞれちがった変化の傾向があることがわかる。上流域のa1～a5は、植生域が大部分であり1998年までのデータであるが、a5で植生域が増加している以外は、変化があまりみられない。中流域のa6～a8では農耕地が減り植生域が増加の傾向がみられる。これは農耕地と植生域の区分が十分にできていなかったためではないかと推察される。再度検証の必要がある。a9～a10では農耕地が減少して市街地が増加している。これは農耕地を宅地に造成し市街化が進んでいることを示すものと推察される。a11～a13ではあまり変化がみられない。市街地の面積割合

が大きな地域は、a7, a9, a10, a13である。a7は社町, a9は加西市, a10小野市, a13は加古川市の所在するところである。

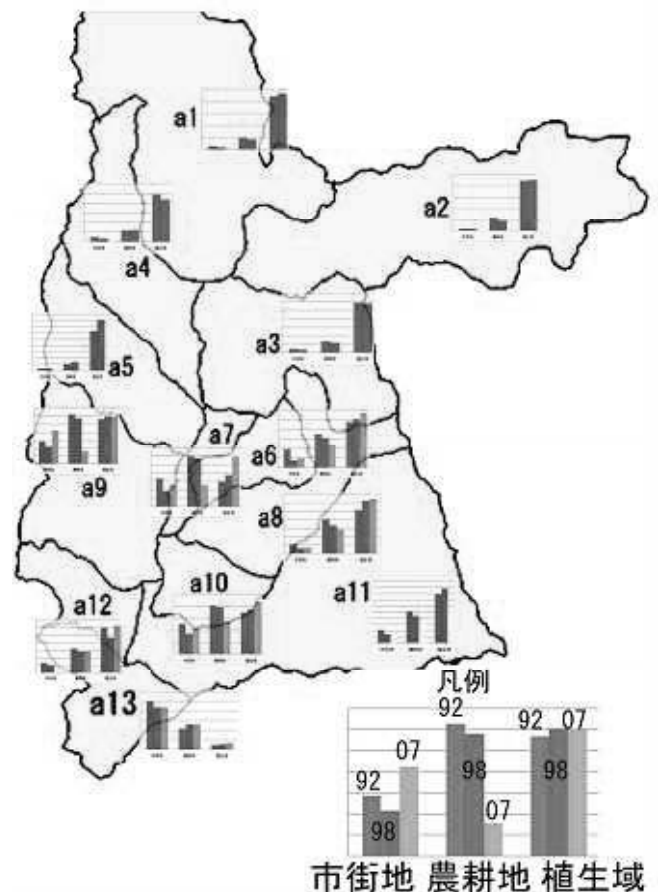


図19 加古川流域の地表被覆状態の変化

5. まとめ

本研究では、市街地、農耕地、植生域の3つの分類項目を比較した。分類項目は、裸地、ゴルフ場等もあるがその割合が比較的小さいので分析に含めなかった。また、農耕地は季節によってその状態が異なるので裸地との区別が難しかった。精度は、各地域の年ごとの面積合計の差が最大20%程度であることから80%程度の整合性が期待できる。この成果は、加古川流域での土地開発の進展や、植生の変化の監視に役立つものであると考えている。

参考文献

- (1) 中尾幸一：「MultiSpecによる人工衛星画像処理」, 神戸高専研究紀要, 第44号, pp97～pp102, 2006
- (2) 小西 諒：「衛星写真による加古川流域地表被覆の経年変化調査」, 神戸高専2004年度都市工学科卒業研究

神戸高専学園都市移転から 20 年

中尾幸一* 赤対秀明**

Change of KCCT in 20 Years after the Removal to Gakuentoshi

Kouichi NAKAO* Hideaki SHAKUTSUI**

1. はじめに

本校は、平成2年4月1日に現在の学園都市に移転した。それまでは、垂水区の舞子台に学舎を構えていたが、明石海峡大橋の建設と連動して、学園都市への移転が急ピッチで進められた。平成21年度にちょうど移転20年をむかえた。人間でいえば、“はたち”である。

本稿では、“成人した”神戸高専の学舎の変遷を記録に残すため、特に施設面からの資料を集めた。本校の一つの節目として、保存されれば幸いである。

2. 移転の経緯

舞子学舎は、昭和34年竣工の中央実験棟をはじめとして老朽化がすすみ、また、全国一の学生数を擁しているにもかかわらず42700m²と狭く、昭和50年頃から、移転による再整備の構想が持ち上がっていた。

移転候補地として現在地の神戸研究学園都市があり、「将来計画策定委員会」が設置されて審議の後、昭和56年8月に「神戸高専の将来計画に関する報告書」がまとめられた。神戸市から、昭和56年より調査費の予算措置があり、昭和61年度予算で移転着工経費が認められ、開校時期は昭和65年4月（当時）とされた。校内でも準備がすすみ、平成2年4月、学園都市に移転開校した。校地面積85,500m²、建築面積15,200m²、校舎延床面積28,700m²で、設備も整備された。

3. 移転後10年間の変遷

3.1 外周道路にカーブミラー設置

3.2 中央広場マイク設備設置

3.3 女子トイレ増設

3.4 平成6年度トレーニングルーム新設

体育館武道場下の一階スペースに各種のトレーニングマシン、バーベル等の器具を備えた、筋力トレーニングを安全かつ効率的に行うことができる部屋が作られた(写真1)。

* 都市工学科 教授

** 機械工学科 教授



写真1 トレーニングルーム

3.5 校門名盤の拡大化



写真2 正門の新旧の名盤

3.6 阪神淡路大震災・校舎被災

平成7年1月の阪神淡路大震災では、神戸高専にも多くの被害があった。室内は、写真3のような状態で早朝でなければ多くの人が負傷していたと思われる。建物にも多くのクラックが生じていた。



写真3 被害を受けた研究室

3.7 仮設住宅建設

平成7年7月、震災被災者のため仮設住宅が本校グラウンドに建設された。写真4はその情景であり、図1のような状況であった。平成12年1月に撤去された。



写真4 グラウンドの仮設住宅

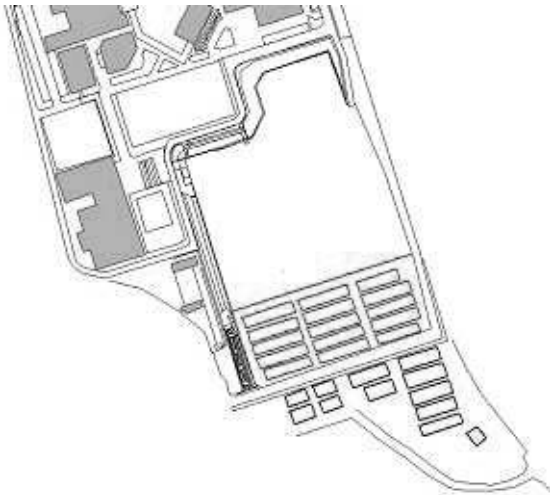


図1 グラウンドの仮設住宅

4. 移転後10年から20年の変遷

4.1 専攻科棟建設

平成10年4月に専攻科が設置され、平成11年2月専攻科棟の建設に着工、10月に竣工した(写真5)。



写真5 専攻科棟

4.2 専攻科長室設置

平成14年に本部棟1階の車庫であったところを専攻科長室とした。

4.3 講義棟に防護ネット設置

4.4 生物学実験室増設

4.5 ロボコン製作室・ソーラーカー製作室の新設

機械工学科棟1階ピロティにロボコン製作室(写真6左側)とソーラーカー製作室(写真6右側)が設置された。



写真6 ロボコン製作室とソーラーカー製作室

4.6 地域協働研究センター室設置

平成16年に本部棟1階にあった専攻科長室が専攻科棟に移転し、そこを地域協働研究センター室とした。以後、地域協働研究センターの活動拠点として活用されている。平成22年度には広報室も同所に設置された。

4.7 体育館前に渡り廊下とひさし取り付け

トレーニングルームが設置されたため、体育館に入るためには屋根のない区間を通らなければならなくなっていた。これを改善するため、写真7の渡り廊下が設置された。この渡り廊下の設置で、雨天時に濡れずに体育館に入ることができるようになった。



写真7 体育館前の渡り廊下とひさし

4.8 掲示板設置(2基)

本部棟北側に新たに2カ所設置された(写真8)。

4.9 日本庭園外部入口設置

移転当初から日本庭園があったが、出入が難しい状態であった。これを活用できるよう出入口を設置した(写真9)。

4.10 学生相談室の設置

本部棟1Fの保健室の向かいに専用室が設置された。



写真 8 新たに設置された掲示板



写真 12 電気工学科仮設実験室



写真 9 日本庭園外部入口設置



写真 10 高電圧実験棟増築部分



写真 11 グラウンド更衣室

4.11 M-C棟間4F踊り場にソファ設置

専門科棟の階段近くにソファを設置した。様々な用途で活用されている。

4.12 高電圧実験棟増築

高電圧実験の安全確保のために要求していた実験室の増築が実現した(写真 10)。

4.13 グラウンド更衣室の設置

グラウンドに更衣室がなく、不便であったが、42 回生の卒業記念として設置された(写真 11)。

4.14 電気工学科仮設実験室建設

西駐車場の一角に電気工学科仮設実験室が設置された(写真 12)。

5. 六甲工業高校記念碑

神戸高専の母体となった六甲工業高校の記念碑は、舞子の校地内に設置されていたが、移転以来、行方不明となっていた。平成 9 年にこれが見つかり、正門南の植栽内に再建された(写真 13)。



写真 13 六甲工業高校記念碑

6. 卒業時に贈られた記念品

H 3,3 第 24 回生 掛け時計 (所在不明)

H 4,3 第 25 回生 (不明)

H 5,3 第 26 回生 (不明)

H 6,3 第 27 回生 植樹「かりん」(写真 14)

H 7,3 第 28 回生 植樹「うめ」(写真 15)

H 8,3 第 29 回生 植樹「シャラ」(写真 16)

H 9,3 第 30 回生 掛け時計 (図書館)

- H10,3 第31回生 花台(本部棟ロビー)
- H11,3 第32回生 掛け時計(食堂)
- H12,3 第33回生 掛け時計(体育館玄関)
- H13,3 第34回生 植樹「きんもくせい」(写真17)
- H14,3 第35回生 植樹「タイワンフウ」(写真18))
- H15,3 第36回生 植樹「サルスベリ」(所在不明)
- H16,3 第37回生 テント(写真19)
- H17,3 第38回生 阪神淡路大震災10周年メモリアル
銘板「忘れない」(写真20)
- H18,3 第39回生 テント(写真19)
- H19,3 第40回生 テント
- H20,3 第41回生 テント
- H21,3 第42回生 グラウンド更衣室(写真11)
- H22,3 第43回生 テント



写真14 第27回生植樹

写真15 第28回生植樹



写真16 第29回生植樹



写真17 第34回生植樹



写真18 第35回生植樹

写真19 第37回39回生寄
贈テント



写真20 第38回生銘板

7. おわりに

舞台から学園都市への移転20年を記念して、施設面の変遷をまとめた。また、図2に、それらの位置を整理した。

既に21年が過ぎようとしており、多くの方の情報を繋ぎ合わせたが、記憶の風化は始まっており、収録できていないものも多くあると思うが、ご容赦願いたい。収録したものには、それぞれ思いがあり、特に卒業時に贈られた記念品は、この間に卒業した約4500名の思いが込められている。これらの記念品は、伝統を受け継ぎ、本校が発展することを凛として見守っている。



図2 神戸高専内収録施設の配置地図

参考文献

- (1) 30周年記念誌, 神戸市立工業高等専門学校, 1993
- (2) 40周年記念誌, 神戸市立工業高等専門学校, 2003

神戸高専『研究紀要』 投稿規定（投稿の手引き）

1. まえがき

本誌は、神戸市立工業高等専門学校の研究紀要として毎年発行する。

2. 編集委員会

『研究紀要』の編集、発行は、研究紀要編集委員会（以下、編集委員会と称する）がその任にあたる。編集委員会は、情報委員会により組織される。

3. 投稿資格

原稿の内容は学術に関する未公開の論文、または、資料とする。投稿者は、神戸市立工業高等専門学校の教職員、前教職員、非常勤講師および在学生とする。共著論文または共著資料は、少なくとも前記1名を共著者として含まなければならない。

4. 投稿方法

投稿者は、後述の「投稿上の注意」を熟読の上、本規定に適う形式で原稿を作成し、投稿すること。

最初、ワードプロセッサなどで作成したA4サイズの紙原稿1部を提出すること。紙原稿の裏面上部に、「論文タイトル」、「第一著者名」および「ページ番号／全ページ数」を記入すること。投稿原稿を封筒に入れ、その表に主たる連絡者名および論文名を記し、編集委員に提出すること。受理した原稿は全て編集委員会によって査読する。査読後、編集委員会によって採録または修正条件付採録と判定された原稿の著者は、PDF形式で最終原稿を提出すること。

最終原稿の作成、提出にあたっては編集委員会の指示に従うこと。特に、ランニングヘッド、ページ番号および受理年月日は、編集時に一括処理するので原稿に記入しないこと。

著者には、抜き刷り（別刷）30部を無償配布する。これを超える部数の抜き刷りは自己負担とする。

5. 原稿の査読（校閲）

研究成果を発表する論文としての、また教育・研究に有用な資料としての体裁を整えるために、学内学識経験者による査読を行う。査読者は、編集委員会が選出、指名する。

査読結果に基づいて、編集委員会より、変更、削除など、原稿の修正再提出を求めることがある。著者による修正がなされない場合は、編集委員会の判断によって掲載を見送ることがある。また、編集委員会は、資料相当と判断した原稿の資料への、論文相当と判断した原稿の論文への変更を要求することもある。査読終了後の訂正は認められない。

査読者はいかなる理由であっても公表されない。

6. 投稿上の注意

以下に示す投稿上の規定、注意は、指示や特記事項がない限り、論文、資料の両者に適用される統一規定となるので、投稿者は、原稿作成の前に必ず熟読すること。

<6-1> フォーマット

ワードプロセッサなどを利用して投稿原稿を作成する際に、原稿の余白等は次のように設定する。また、フォーマットの種類は、論文の分野、内容に応じて、投稿者が表1の中から適当なものを選択すること。文字の大きさや文字数は、選択したフォーマットによって異なるので注意すること。

- (a) 原稿は、A4サイズで作成し、本投稿規定最終頁に示す形式を厳守すること。
- (b) 余白：上25mm，下24mm，左右各16mm，段間8mm
- (c) 文字の大きさ、片段の行数、文字数などは、下記の表1に従うこと。

表1 投稿原稿のフォーマット（論文，資料共通）

フォーマット	段組，文字・行数/1頁	文字の大きさ	制限枚数
1. 和文（横書）	2 段組，24 文字×50 行	10 ポイント	原則として，6 ページ以内でまとめること．超過の場合は10 ページ以内とし，それを超えることは認められない．
2. 英文	2 段組，48 文字×50 行	10 ポイント	
3. 和文（縦書）	2 段組，33 文字×32 行	10 ポイント	
4. 和文，英文（横書特例）	(和)1 段組，50 文字×46 行 (英)1 段組，100 文字×46 行	10 ポイント	

<6-2> 表題ページ

(a) フォント・フォントサイズ

表題ページのフォント，フォントサイズについては，表2を参照すること．なお，表2では，フォントを明朝体，Times などに指定しているが，それに酷似した他のフォントを使用しても構わない．また，英語以外の外国語（独語，仏語など）を使用する場合は，表2の英文に準じるものとする．ただし，この場合，英語表題は必要となるので留意すること．

表2 表題ページに使用するフォント・フォントサイズ

フォーマット	表 題	著 者 名	英語表題	英語著者名	英文要旨	本 文
1. 和文（横書）	ゴシック体 18 ポイント	明朝体 12 ポイント	Times 14 ポイント	Times 12 ポイント	10 ポイント ・見出しの「 ABSTRACT 」はゴシック ・要旨本体は Times	明朝体 10 ポイント
2. 英 文	ゴシック体 18 ポイント	Times 12 ポイント				Times 10 ポイント
3. 和文（縦書）	ゴシック体 18 ポイント	明朝体 14 ポイント	Times 10 ポイント	Times 10 ポイント		明朝体 10 ポイント
4. 和文，英文（横書特別）	上記の1（和文・横書），2（英文）に準ずる					

(b) 表題・著者名

[1] 和文（横書）

- ・ 表題は，原稿の2行目中央に記入し，2行にわたる場合は，原稿の2行目～4行目に適当な配置で記入すること．
- ・ 著者名は，表題の後に1行あけて記入し，共著者名も同じ行に略さずに記入すること．
- ・ 英語表題は，著者名の後に1行あけて記入し，2行以上にわたる場合は，適当な配置で記入すること．表題に使われる各単語の頭文字は，大文字とすること．ただし，冠詞・接続詞・前置詞は除く．
- ・ 英語表記の著者名は，英語表題の後に1行あけて記入すること．名(First Name)は頭文字のみ大文字とし，姓(Family Name)は全て大文字とすること．
- ・ 表題・著者名は，段組を行わずに中央揃えとすること．

[2] 英文（他の外国語の文）

- ・ 表題は，原稿の2行目中央に記入し，2行にわたる場合は，原稿の2行目～4行目に適当な配置で記入すること．各単語の頭文字は大文字とすること．ただし，冠詞・接続詞・前置詞を除く．
- ・ 著者名は，表題の後に1行あけて記入すること．名(First Name)は頭文字のみ大文字とし，姓(Family Name)は全て大文字とすること．
- ・ 表題を英語以外の外国語で表記する場合，その表題の後に1行あけて，英語表記を記入すること．そして，さらに1行あけて，著者名を記入すること．
- ・ 表題・著者名は，段組を行わずに中央揃えとすること．

[3] 和文（縦書）

- ・ 表題は、原稿の3行目から記入すること。このとき、表題の上部には、4字程度の余白をとること。
- ・ 著者名は、8行目に略さずに記入すること。著者名の下部には、4字程度の余白をとること。
- ・ 英語表題と英語著者名は、表題ページには記入せず、論末にアスタリスク記号を表示し、その下に“英語表題”：英語著者名の形式で記入すること。

(c) 著者の所属機関

著者の所属機関は、ページ左下に実線を引き、その下に記入すること。なお、連名の場合は、名前の後ろにアスタリスク記号を上付きで「*」、「**」のように付け、ページ左下に対応する所属機関を記入すること。

（注）著者の所属機関の表記法は、以下を参照すること。

- 著者が本校に属する場合：学科、職名の順で記載。例）電気工学科准教授，機械工学科名誉教授
- 本校以外の機関に属する場合：所属機関名を記載。例）××大学，△△株式会社，□□研究所
- 本校に在籍する学生の場合：所属、学科・専攻を記載。例）本科都市工学科，専攻科応用化学専攻
- 本校の卒業生の場合：所属・卒業年度を記載。例）△△株式会社（平成8年度卒）

(d) 英文要旨

論文として投稿する場合は、シングルスペースで150語程度の英文要旨を必要とする。ただし、和文（縦書）の論文、および、資料に関しては英文要旨は必要でない。また、英語以外の外国語（独語、仏語など）で本文を書く場合でも、論文であるならば英語による英文要旨は必要である。

- ・ 英文要旨は、前述(b)の英語著者名の後に1行あけ、中央に「**ABSTRACT**」と表示すること。このとき、フォントはゴシック体で全て大文字とすること。
- ・ 「**ABSTRACT**」から1行あけて、英文要旨の本文を記述すること。要旨を記述する際、左右に2文字程度の空白をとること。

(e) キーワード

- ・ 英文要旨から1行あけて「*Keywords:*」と斜文字（イタリック）の文字スタイルで記述すること。
- ・ 同じ行に続けて5つ以内の英文キーワードを記述すること。文字スタイルは標準体（Normal）を用いること。
- ・ 各キーワードは、名詞形で記述し、それぞれをカンマ（,）により区切ること。また、特に意味がある場合を除き、全て小文字で示すこと。尚、文字の大きさは10ポイントとする。
- ・ 英文キーワードが2行にわたる場合は、適切に配置し見やすいものにすること。本文が英語以外の外国語の場合、本文と同じ外国語を用いても構わない。
- ・ 和文（縦書）、資料に関しては、キーワードは必要としない。

(f) 本文

上述のキーワードから1行あけて2段組となる本文を書き出すこと。特例を除き、本文は2段組とする。

※ 英語表現、英文要旨、キーワード、および、英文論文など、外国語で記述する文章、単語は、それを読んだ国内外の読者が「正確明快到理解できる」ということに注意して執筆すること。

<6-3> 本文

本文は、章（チャプタ）、節（セクション）に分け、それぞれに番号と適当な見出しを付け、読者が理解しやすいようにすること。このとき、章や節の見出しのフォントはゴシック体にすること。

(a) 章（チャプタ）について

本文中の各章の始めには、例えば、「**1. はじめに**」、「**2. 実験操作**」、等々の章番号と適当な見出しを付け、改行してから文章を書くこと。また、各章の区切りは1行あけること。

(b) 節（セクション）について

一つの章をさらに細かい節（セクション）に分ける場合は、例えば、「**2. 1 分析条件**」や「**3. 2 温度変**

化の追跡」，等々の節番号と適当な見出しを付けること．文章は原則として改行せずに見出しから2文字あけて書き始めること．構成上，改行したほうが見やすくなる場合は改行しても構わない（例えば，見出しが長くなり，文章が若干しか欠けない場合など）．セクションの区切りは，行をあげないこと．

※ 節をさらに細かく分ける場合も，適当な見出しは必要となる．このとき，細節番号の決め方やフォントなどは著者の見識にゆだねることとする．例えば，「2. 2. 1」，「2. 1. 2」や「(a)」，「(b)」，「(c)」など．

<6-4> 数式

数式には，「(1)」，「(2)」のように通し番号を付けること．また，長い数式等が存在し，一つの式が2行以上にわたる場合は，次行の冒頭に，「=」，「+」，「-」，「×」，「÷」などの記号がくるようにすること．

<6-5> 図（写真を含む），表

PDF原稿を印刷したとき，図表が鮮明に描かれるように作成すること．説明文（caption）は図表の中央にくるようにセンタリングし，文字サイズは，本文と同じか少し小さめであることが望ましい．

(a) 図（写真を含む）について

本文中の各図には，「図1」，「図2」，「Figure 1」，「Figure 2」のように通し番号を付け，1文字あけて図の説明文を書くこと．通し番号と説明文は，横書原稿の場合は図の下部に，縦書原稿の場合は図の右側に書くこと．図の大きさは，左右（または上下）どちらかの1段の中に納まることが望ましいが，図の性質上，2段にわたる必要がある場合は，2段使用しても構わない．

(b) 表について

本文中の各表には，「表1」，「表2」，「Table 1」，「Table 2」のように通し番号を付け，1文字あけて表の説明文を書くこと．通し番号と説明文は，横書原稿の場合は表の上部に，縦書原稿の場合は表の右側に書くこと．表の大きさは，左右（または上下）どちらかの1段の中に納まることが望ましいが，表の性質上，2段にわたる必要がある場合は，2段使用しても構わない．

<6-6> 謝辞

論文や資料に謝辞を必要とする場合は，最終節の文末の後に1行あけて，段の中央にゴシック体で「**謝辞**」，または「**Acknowledgement(s)**」という見出しを付け，次の行から本文中と同じフォントで記述すること．謝辞には節番号は付けないこと．助成金，装置の借用，資料の提供を受けた場合は，謝辞に記述すること．

<6-7> 参考文献（引用文献）

(a) 参考文献の書き方

本文中で引用した参考文献は，最終節の文末の後（謝辞がある場合は，その後）に1行あけて，段の中央にゴシック体で「**参考文献**」，または「**REFERENCES**」という見出しを付け，次の行から本文中と同じフォントで記述すること．参考文献には節番号は付けないこと．なお，和文，英文以外の論文は，使用した言語で「参考文献」を意味する単語を見出しとして記載すること．

引用した参考文献には，本文中で現れる順番に通し番号を付け，左詰めで書くこと．参考文献の記述様式は，原則として，著者名，題目（表題），論文誌名（雑誌名または出版社），巻，号，ページ，発表年月（出版年月）の順に記述すること．

（参考文献の記述例）以下の例は全て架空のものである．

- (1) 神戸太郎，高専次郎，その他：「高専教育に関する研究」，神戸高専研究紀要，第55号，pp.30-35，2000.
- (2) 神戸太郎著：「高等専門学校の変遷」，コロナ社，第2章，1975.
- (3) 調査専門委員会編集：「最近の科学の進歩について」，電気学会，1989.
- (4) 神戸三郎，その他：「有機化合物の発光特性」，応物学会全国大会講演論文集[3]，pp.3-75，2000.
- (5) 神戸花子：「SIデバイスの応用」，物理学会SIデバイス研究会講演論文集，Vol.7，pp.23-28，1998.
- (6) 高専史郎，高専五郎：「長良川河口堰の現状」，土木学会論文誌A，Vol.116-7，pp.245-253，1997.
- (7) Hanako Kosen, Taro Kobe, et al. : " A Novel Scheme for DSG System " , IEE-Transactions on Nuclear Science, Vol.30, pp.555-561, 1999.
- (8) Taro Kobe : " Design Considerations for New Circuit Topology " , Proceedings of IEEE-International Symposium on Power Electronics Circuit (SPEC98), Vol.1, pp.23-28, 1998.

英文の場合、「Conference」や「Symposium」、「International」等を「Conf.」、「Symp.」、「Int.」と略しても構わない。また、「Proceedings」や「Transactions」等も「Proc.」、「Trans.」と略しても構わない。

上記の文献(8)を略式で記述すると以下のようになる。

(8) Taro Kobe: "Design Considerations for New Circuit Topology", IEEE Proc. Int. Symp. on Power Electronics Circuit (SPEC98), Vol.1, pp.23-28, 1998.

(b) 本文中での引用

本文中に引用する場合は、その文章や項目の終わりに、「⁽¹⁾」、「^{(1),(3)}」、「⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾」のように、文末に挙げた参考文献の文献番号を上付で記入すること。また、参考文献中の文章等をそのまま引用する場合は引用符、「」や“ ”で括るか、横書の場合は左端に、縦書の場合は上端に、本文より2～3文字(4～6文字)多めに余白を取り、引用箇所が明確に識別できるようにすること。本文と引用箇所の間に1行空白を入れても構わない。

一般に公開されていない委員会報告等は参考文献としてあげないようにすること。また、掲載は決定しているが未発行の論文等は、巻、ページの代わりに「印刷中」もしくは「in press」と書くこと。

尚、ページのレイアウトに関する詳細は、本規定の末尾に添付した『神戸高専の紀要に関するフォーマット』を参照すること。

7. 著作権

神戸高専研究要に掲載された論文、資料の著作権(著作財産権, Copyright)は神戸市立工業高等専門学校に帰属する。

尚、本投稿規定は、平成22年12月に改正され、平成22年度から施行される。

(平成18年3月改訂)

(平成21年3月改訂)

(平成22年12月改訂)

(※1行あける)

(※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)

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。

(※1行あける)

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

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まる場合は、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。

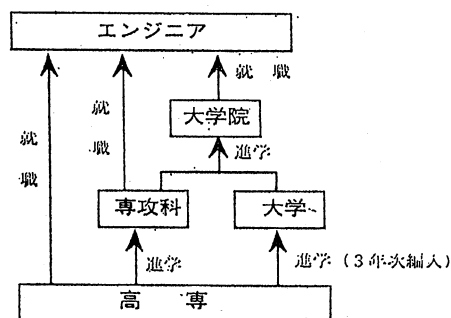


図1 高専卒業からエンジニアまでの経路

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(漢字)	2段組, 24文字×50行	10ポイント	原則として、6ページ
2. 英文	2段組, 48文字×50行	10ポイント	以内でまとめること。
3. 和文(漢字)	2段組, 33文字×32行	10ポイント	
4. 和文、英文 (横書き特別)	1段組, 48文字×46行 1段組, 96文字×46行	10ポイント	超越の場合は10ページ以内、 それ以上は認めない。

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

神戸高専研究紀要第 49 号 編集委員

吉本 隆光	(総合情報センター長)	笠井 正三郎	(副センター長)	児玉 宏児	(副センター長)
宮下 芳太郎	(副センター長)	鈴木 隆起	(機械工学科)	松田 忠重	(電気工学科)
尾山 匡浩	(電子工学科)	渡辺 昭敬	(応用化学科)	宇野 宏司	(都市工学科)
折附 良啓	(一般科)	一瀬 昌嗣	(一般科)	入江 正明	(学生係)
福田 孝義	(総合情報センター)	乾 あさ子	(図書館)	萩庭 恵美	(図書館)

研 究 紀 要 第 49 号 (非売品)

発 行 日 平成 23 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 22 年度 第 338 号 (広報印刷物規格 A-6 類)

