

# 研 究 紀 要

第 48 号

平成 22 年 3 月

RESEARCH REPORTS

OF

KOBE CITY COLLEGE OF TECHNOLOGY

NO. 48

MARCH, 2010

神戸市立工業高等専門学校

# 目 次

## 論 文

|   |                                  |        |
|---|----------------------------------|--------|
| 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                                  | 山本 高久, 石丸 和博, 渡辺耕太郎, 芳川昇次郎       | 1      |
| 中空粒子分散材料の異方性損傷発達過程のモデル化                                     | 川見 唯, 和田 明浩                      | 7      |
| 周囲流を伴う水素噴流拡散火炎の安定限界と火炎構造                                    | 影山 朋久, 谷川 涼一, 吉本 隆光              | 13     |
| 超硬合金の切削におけるWC粒子径およびCo含有量の影響                                 | 谷口 友秋, 宮本 猛, 齊藤 茂, 西田 匡志         | 19     |
| 高面圧すべり接触における水溶性加工油添加剤と極圧添加剤のトライボロジー特性(1)<br>—実用品の性能に関する検討—  | 山口 永人, 大山 雄介, 八木 大輔, 奥津 晶彦, 中辻 武 | 25     |
| 高面圧すべり接触における水溶性加工油添加剤と極圧添加剤のトライボロジー特性(2)<br>—開発油剤の性能に関する研究— | 山口 永人, 八木 大輔, 大山 雄介, 奥津 晶彦, 中辻 武 | 29     |
| プロパーな近似DVDFBによる柔軟宇宙構造物の周波数依存型評価関数に対する最適制御                   | 小林 洋二, 鹿田 哲生, 姜 貴暢, 山中 貴裕        | 33     |
| T字形エルボによるキャビテーション壊食対策に関する研究                                 | 苗木 伸也, 柴田 高宏, 林 公祐, 鈴木 隆起, 赤対 秀明 | 39     |
| 非構造格子に基づく流体粒子数値予測手法に関する研究                                   | 長 正和, 林 公祐, 赤対 秀明                | 45     |
| 簡易表面筋電位測定システムに関する研究   | 宮川 大毅, 朝倉 義裕                     | 51     |
| 熟練者やワープロ文字の特徴を取り入れた個人の手書き文字フォント                             | 才木 常正, 宮武 克幸, 林 昭博               | 57     |
| エアロバイク型仮想空間移動シミュレータの作製とその操作性の評価                             | 上北 一博, 橋本 好幸                     | 63     |
| レーンキーピングアシストシステムの開発   | 益田 祐次, 笠井正三郎                     | 69     |
| ウェーブレット変換を用いた音声認証の実現可能性についての検討                              | 田中 英之, 笠井正三郎                     | 75     |
| 4次元超曲面に基づくFDG-PETからの異常陰影抽出と解析                               | 戸崎 哲也, 千田 道雄, 山根登茂彦              | 83     |
| 有機金属塗布光分解法による硫化物蛍光体の作製とフォトルミネッセンス                           | 西 敬生                             | 89     |
| MOD法によるCuAlS <sub>2</sub> の作製                               | 西 敬生                             | 93     |
| Gaussian98におけるNMRスペクトル予測のスケール因子の決定                          | 渡辺 昭敬, 安田 圭祐                     | 97     |
| 国内ミヤコグサ系統間のアルミニウムイオン応答解析                                    | 下村憲司朗, 堅田 夏輝, 松野 光樹, 藤岡 睦未       | 101    |
| ALS罹病者の病(やまい)の語りにみる療養の場に関する研究                               | 亀屋恵三子                            | 105    |
| GISによる出石周辺の洪水記録の作成  | 中尾 幸一                            | 115    |
| 水位変化を考慮した海浜断面形状と粒径分布特性に関する実験的研究                             | 酒井 大樹, 辻本 剛三                     | 121    |
| 超高速鉄道における車内定常加速度  | 橋本 渉一                            | 127    |
| 高専におけるクラブ指導の実践と課題—バスケットボール部の活動を通して—                         | 春名 桂                             | 133    |
| 可能性と蓋然性—ヴォルフとカントの差異   | 手代木 陽                            | 139    |
| 高専1年生からの母平均の区間推定  | 大多喜重明, 長井 清香                     | 147    |
| 学習指導要領の改訂(数学)について   | 八木 善彦                            | 151    |
| 高専数学の学習と数式処理  | 八木 善彦                            | 155    |
| 契丹陶磁の「周縁性」に関する検討—唾壺と陶枕を例に—                                  | 町田 吉隆                            | 161    |
| 新古今和歌集古筆切拾穂   | 舟見 一哉                            | 1(172) |

## 資 料

|                         |              |     |
|-------------------------|--------------|-----|
| 機械工学科新入生に対する自学自習の調査について | 石崎 繁利, 和田 明浩 | 173 |
| 学生のモチベーションと英語の学力について    | 上垣 宗明        | 177 |

# CONTENTS

## PAPERS

|  |        |
|--|--------|
| Numerical Simulation of Concentration Overvoltage in Polymer Electrolyte Fuel Cell<br>with Low Hydrogen Concentration Fuel<br>Takahisa YAMAMOTO, Kazuhiro ISHIMARU, Koutaro WATANABE, Shojiro YOSHIKAWA  | 1      |
| Modeling of Anisotropic Damage Development in Hollow Particle Reinforced Composites<br>Yui KAWAMI, Akihiro WADA  | 7      |
| Flame structure and Stability Limit of Hydrogen Diffusion Flame with Co-flow<br>Tomohisa KAGEYAMA, Ryouichi TANIGAWA, Takamitsu YOSHIMOTO  | 13     |
| Influence of WC Grain Size and Co Content in Cutting Cemented Carbides<br>Tomoaki TANIGUCHI, Takeshi MIYAMOTO, Sigeru SAITO, Tadashi NISHIDA   | 19     |
| Tribological Properties of Water-soluble Processing Oil Additives and Extreme Pressure<br>Additives under High Pressure in Sliding Contact(1)<br>-Tribological discussion on the performance of useful Articles-<br>Eito YAMAGUCHI, Yusuke OYAMA, Daisuke YAGI, Akihiko OKUTSU, Takeshi NAKATSUJI          | 25     |
| Tribological Properties of Water-soluble Processing Oil Additives and Extreme Pressure<br>Additives under High Pressure in Sliding Contact(2)<br>-Tribological discussion on the performance of developing oil additives-<br>Eito YAMAGUCHI, Daisuke YAGI, Yusuke OYAMA, Akihiko OKUTSU, Takeshi NAKATSUJI | 29     |
| Optimal Control for Flexible Space Structures by a Proper Approximation of DVDFB with a<br>Frequency Dependent Cost Function<br>Yohji KOBAYASHI, Tetsuo SHIKATA, Kuichang KANG, Takahiro YAMANAKA  | 33     |
| Study on countermeasure against cavitation erosion using T-shape elbow<br>Shinya NAEKI, Takahiro SHIBATA, Kosuke HAYASHI,<br>Takayuki SUZUKI, Hideaki SYAKUTSUI  | 39     |
| Study on Interface Tracking Method based on Unstructured Grid<br>Masakazu CHO, Kosuke HAYASHI, Hideaki SHAKUTSUI   | 45     |
| Study of Surface Myo-Electric Potential Measurement System<br>Daiki MIYAGAWA, Yoshihiro ASAKURA  | 51     |
| Improvement of Personal Handwritten Character Fonts by Getting in Calligrapher's<br>Character Features or Word-processing Ones<br>Tsunemasa SAIKI, Katsuyuki MIYATAKE, Akihiro HAYASHI   | 57     |
| A Study on Operation Performance of Aero-Bike Simulator in a Virtual Space<br>Kazuhiro UEKITA, Yoshiyuki HASHIMOTO   | 63     |
| The Development of Lane Keeping Assistance System<br>Yuji MASUDA, Shozaburo KASAI  | 69     |
| Study on Realization of Voice Authentication Using Wavelet Transform<br>Hideyuki TANAKA, Shozaburo KASAI   | 75     |
| Extraction and Analysis of Abnormal Nodules on FDG-PET Images Using Curvature of Four<br>Dimensional Hyper Surface<br>Tetsuya TOZAKI, Michio SENDA, Tomohiko YAMANE  | 83     |
| Photoluminescence studies and preparation of sulfide fluorescent thin films by<br>metal organic decomposition technique<br>Takao NISHI   | 89     |
| Preparation of CuAlS <sub>2</sub> by MOD technique<br>Takao NISHI  | 93     |
| Determination of the Scaling Factors for NMR Spectroscopy in Calculation with Gaussian98<br>Akihiro WATANABE, Keisuke YASUDA   | 97     |
| Aluminum Ion Response Comparison between Domestic <i>Lotus japonicus</i> Lines<br>Kenshiro SHIMOMURA, Natsuki KATADA, Kouki MATSUNO, Mutumi FUJIOKA  | 101    |
| Study on Convalescent Based on Writing of ALS Patients<br>Emiko KAMEYA   | 105    |
| Creation of the Flood Record Around Izushi by GIS<br>Kouichi NAKAO   | 115    |
| An experimental study on cross-shore profile and sand grain size distribution<br>under conditions of water level changes<br>Daiki SAKAI, Gozo TSUJIMOTO  | 121    |
| Stable Acceleration of Rollingstock Inside in Ultra High-speed Railway<br>Shoichi HASHIMOTO  | 127    |
| Practice and Challenges of Coaching the Basketball Club at Technical College<br>-Through the Activities of Basketball Club-<br>Katsura HARUNA  | 133    |
| Möglichkeit und Wahrscheinlichkeit-Der Unterschied zwischen Wolff und Kant<br>Yo TESHIROGI   | 139    |
| Teaching Methods of Interval Estimation of Population Mean Value to First-year Students in KCCT<br>Shigeaki OHTAKI, Kiyoko NAGAI   | 147    |
| New National Curriculum Standards for Secondary School<br>Yoshihiko YAGI   | 151    |
| Learning with Computer Algebra Systems in the Technical College Mathematics<br>Yoshihiko YAGI  | 155    |
| Examining on the Border Character of the Kitai Pottery in China : With the Spit Pots and<br>the Pillows in the Liao Dynasty as examples<br>Yoshitaka MACHIDA   | 161    |
| Collection of fragment of Shinkokinwakasyu<br>Kazuya FUNAMI  | 1(172) |

## RESEARCHES AND FINDINGS

|   |     |
|---|-----|
| Investigation of Self-Study for First Grade Students in Department of Mechanical Engineering<br>Shigetoshi Ishizaki, Akihiro WADA | 173 |
| The Research on the Students' Motivation and Their English Ability<br>Muneaki UEGAKI  | 177 |

# 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

山本高久<sup>\*</sup>, 石丸和博<sup>\*\*</sup>, 渡辺耕太郎<sup>†</sup>, 芳川昇次郎<sup>†</sup>

## Numerical Simulation of Concentration Overvoltage in Polymer Electrolyte Fuel Cell with Low Hydrogen Concentration Fuel

Takahisa YAMAMOTO<sup>\*</sup>, Kazuhiro ISHIMARU<sup>\*\*</sup>, Koutaro WATANABE<sup>†</sup>, Shojiro YOSHIKAWA<sup>†</sup>

### 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 assumed that hydrogen and oxygen were transported inside PEFC ideally, and took into account activation, concentration and resistance overvoltages. 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, performance down of PEFC is small under hydrogen concentration 40% condition, but it become significant in the range of the concentration 30% below.

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

### 1 はじめに

地球環境問題やエネルギー資源の有効利用への世界的な動きにより、燃料電池は新エネルギーとして脚光を浴びている。中でも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 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いる。そのため自動車用や家庭用コージェネレーションシステムなど、幅広い分野への適用が期待されている。他方、燃料となる水素の多くは炭化水素系燃料の燃料改質操作により生産されている。この際に窒素や一酸化炭素、二酸化炭素などの不純ガスの発生が伴い、一般には水素の精製を行う必要がある。水素精製の方法としては圧力スイング吸着法 (Pressure Swing Adsorption) や膜分離処理による方法があるが、このような精製プロセスは水素製造コストの増大を意味する。そこで著者らは炭化水素燃料の改質により得られた低水素濃度のガスを直接 PEFC に使用できないか実験的に検討してきた。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<sup>(1, 2)</sup>。このような低水

素濃度燃料の使用においては PEFC の運転条件をどのように設定するのか、また、どのような設定の時にどの程度の出力が得られるのかを予め予測する手段を確立することが、PEFC の効率的運用を行う上で必要不可欠となる。

PEFC の性能解析に関する研究は、これまでも多くの研究者によって行われている。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<sup>(3)</sup>。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<sup>(4, 5)</sup>。しかしこれら既往の研究では低水素燃料使用時の PEFC の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。

そこで本研究では燃料電池内の電気化学反応を解析する PEFC 出力モデルを作成し、その妥当性の検証および従来の PEFC において低水素濃度燃料を使用した際の PEFC 出力特性の数値解析を行った。

### 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<sup>2</sup> が、カソード側触媒には

<sup>\*</sup> 機械工学科 准教授

<sup>\*\*</sup> 岐阜工業高等専門学校機械工学科 教授

<sup>†</sup> 専攻科 機械システム工学専攻

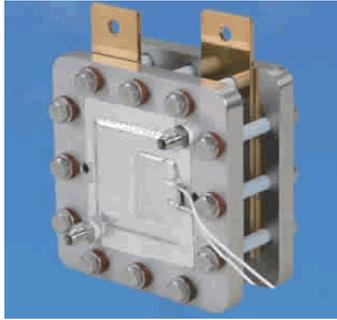


図1 PEFC(単セル)の写真

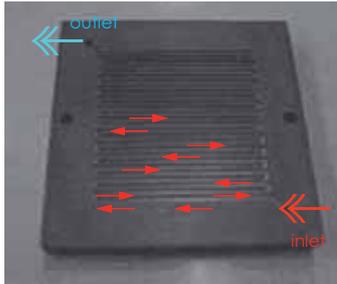


図2 サープンタイン流路

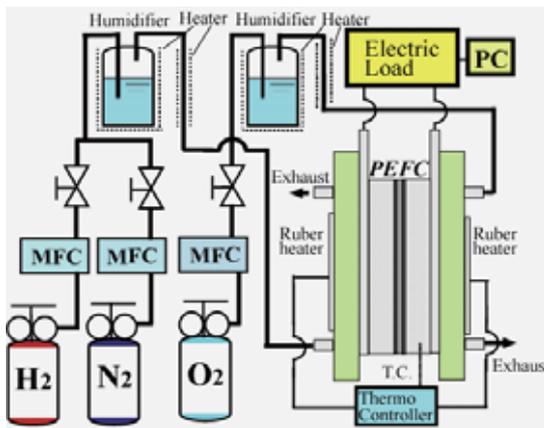


図3 実験装置概略図

0.52mg-Pt/cm<sup>2</sup>の白金触媒が用いられている。電極面積は50mm×50mm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1mm、山幅1mm、流路間隔1mmとなっている(図2)。なお、セルの締付け力は40kgf/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℃,70℃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150sccm(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上に取り付け、セルを80℃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。

燃料電池の電気的な特性を調べるためには、出力されるセル電圧 $V$ と出力される電流密度 $i$ との関係である負荷特性(ターフェルプロット図)が必要となる。一般に電池は負荷電流を増やすと電池両端電圧が低下する。電池としてはこの低下が損失となり、低下分が少ないほど優れた電池であると言える。そこで、セルのアノードおよびカソードの電極をPCで制御された電子負荷装置に接続し、一定電流が取り出されるように負荷を制御して計測を行った。取り出す電流値は0~10A(電流密度0~0.4A/cm<sup>2</sup>)とし、0.5A間隔で30秒間保持し安定して出力されるセル電圧を計測した。なお、セル電圧が0Vとなった時点で計測は終了となる。

### 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いる。通常、固体高分子膜は電極となる白金触媒に両側を挟まれた状態で圧着一体化されている。このように一体化したものは膜電極接合体(Membrane Electrode Assembly)と呼ばれている。拡散層は集電帯として電流を取り出す役割を有している。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した。本研究では井上らによるPEFCモデル<sup>(6)</sup>をベースに解析モデルの構築を行った。モデルの詳細は以下の通りである。

#### 3.1 PEFC 出力モデルの仮定

本モデルでは以下に示す仮定の下で電気化学反応のモデル化を行った。

- ガス流路と拡散層の境界におけるガス濃度は供給ガス濃度に等しい
- 加湿水分および反応により精製された水は全て蒸気の状態が存在しているものとし、水分の凝縮による燃料、酸化剤の拡散阻害、電極の濡れによる反応面積の減少は無視する

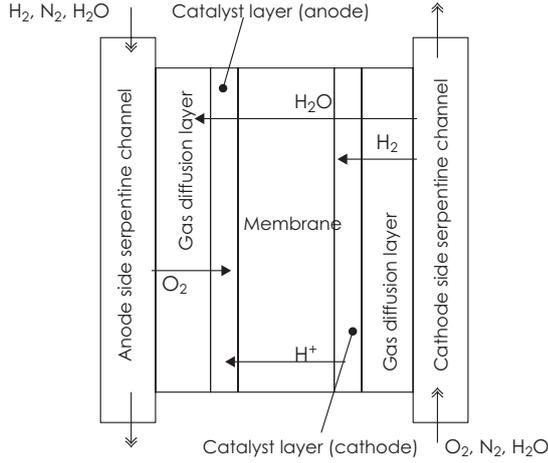


図4 PEMFC出力モデルの概略図

- 反応熱は全てPEFC外部へ放出されるものとし、燃料電池構成部品は全て温度一定とする
- 供給ガス温度とセル温度は等しいものとし、供給ガス中の水蒸気分圧は飽和蒸気圧と等しいとする
- カソード側では反応により水が生成し、また電気浸透効果によりアノード側から水が移動するため湿潤状態になる。逆にアノード側では乾燥状態になりやすい。そのため膜の湿潤状態に依存するイオン伝導度は、アノード側の水の活量によって決まるものとする
- アノード側の活性化過電圧は他の過電圧に比べて非常に小さいため無視する

### 3.2 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。

### 3.3 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<sup>(6)</sup>。

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

ここで  $E$  は起電力、 $\eta_{act}$  は活性化過電圧、 $\eta_{conc}$  は濃度過電圧、 $\eta_{ohm}^m$  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。

### 3.3.1 起電力

起電力  $E$  は Nernst の式より算出される。

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

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。

### 3.4 活性化過電圧

カソード側の活性化過電圧  $\eta_{act}^c$  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  $\alpha_2^c$  移動係数であり、Parthasarathy らが求めた実験式により算出した<sup>(7)</sup>。

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

$C_\alpha$  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<sup>(8)</sup>。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<sup>(9)</sup>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 PEMFC 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。

### 3.5 濃度過電圧

アノードおよびカソードの濃度過電圧  $\eta_{conc}$  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,  $\alpha^a, \alpha_1^c$  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ように表される．

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

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

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．

### 3.6 抵抗過電圧

抵抗過電圧  $\eta_{ohm}^m$  は電解質膜の厚さ  $l^m$ , 電解質膜のイオン伝導度  $\sigma_e^m$  から

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

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  $\sigma_e^m$  は比例定数  $k_\sigma$  を用いて次式にて算出できる．

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

なお,  $\lambda$  は含水量であり, 水の活量  $\xi^a$  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  $\xi^a$  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               | $\alpha_a$     | 0.10  |
| transfer coefficient of cathode             | $\alpha_{1,c}$ | 0.09  |
| fitting parameter of activation overvoltage | $C_\alpha$     | 0.98  |
| fitting parameter of ion conductivity       | $k_\sigma$     | 0.60  |
| fitting parameter of current density        | $k_{i,0}$      | 1.00  |

## 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 3, 10, 30, 100 mol% にした場合について解析した結果を図 5 に, 水素濃度 100 mol%, 酸素濃度を 5, 10, 21 mol% とした解析結果を図 6 に示す．また, 酸素濃度 21 mol%, 水素濃度 100 mol%, PEFC 温度を 298, 313, 333 K とした解析結果を図 7 に示す．図 5-7 に示したように, 解析結果は水素濃度, 酸素濃度が高い場合については実験で得られた結果とほぼ同様のものが得られている．水素濃度, 酸素濃度が低い場合においては解析結果と実験結果に若干の差が生じているものの, 出力特性の傾向は得られている．温度を変えた場合も, 解析結果と実験結果は同様な傾向を示している．これらのことから, 作成したモデルは PEFC の出力特性を再現できること, また, 水素濃度の低下による濃度過電圧を再現できることが確認できた．

以上の結果より本研究で作成した出力モデルで水素濃度が電池出力に及ぼす影響を検討することが可能であると考え, 以降の解析を実施した．

### 4.2 低水素濃度時の PEFC 出力特性

PEFC 出力モデルを用いて水素濃度が PEFC 出力特性に及ぼす影響を数値解析により検討した．酸素濃度を 10, 21, 100 mol% とした時の各水素濃度条件における PEFC 出力を図 8-10 に示す．

解析結果より電流密度は水素濃度の低下と共に低下していくことが確認できる．酸素濃度による違いを見ると, 酸素濃度が高いほど電流密度の値も高いことが確認できる．そして, 酸素濃度が 100 mol% と高い場合は水素濃度の影響が大きいが, 酸素濃度が 21 mol%, 10 mol% と低くなるにつれて水素濃度の影響が小さくなることが確認できる．この理由としては, 酸素濃度が高い場合は水素量に対して酸素量が十分にあるが, 酸素濃度が低い場合は水素量に対して酸素量が十分でないため, 酸素濃度に見合う水素濃度までは水素濃度が低下しても影響が小さいと推測される．

通常, カソードには空気 ( $O_2$  21 mol%) を用いる．酸素

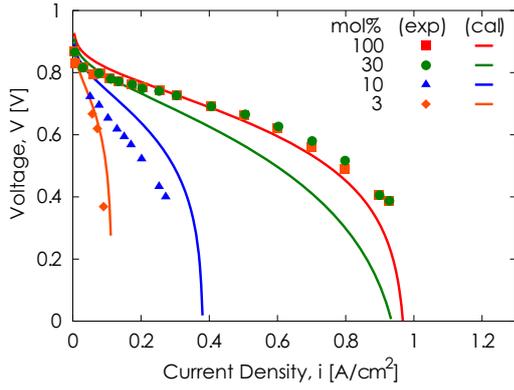


図5 電流密度-電圧曲線の酸素濃度依存性 (実験データ<sup>(1)</sup>と解析結果の比較)

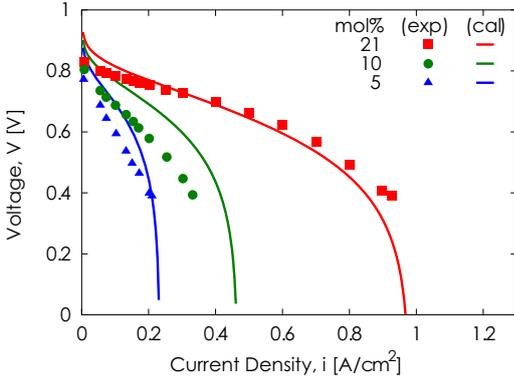


図6 電流密度-電圧曲線の酸素濃度依存性 (実験データ<sup>(1)</sup>と解析結果の比較)

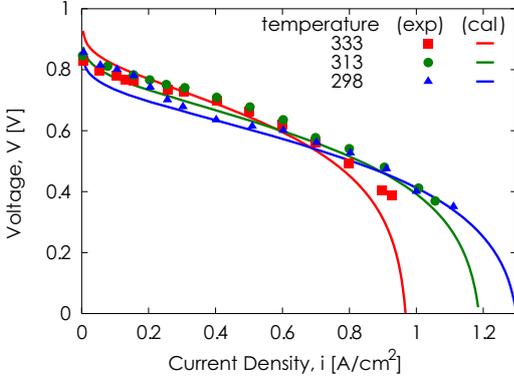


図7 電流密度-電圧曲線の温度依存性 (実験データ<sup>(1)</sup>と解析結果の比較)

濃度 21 mol% の場合について水素濃度をどの程度下げることが可能であるか考えるため、図 11 に酸素濃度 21 mol% 時の電流密度の変化の割合を示す。横軸は水素濃度、縦軸は水素濃度 100 mol% 時の電流密度に対する割合である。電流密度は酸素濃度 50 mol% で約 8%、酸素濃度 30 mol% で約 20%、酸素濃度 10 mol% で約 60% 低下することが確認できる。このことから許容できる電流密度の低下率にもよるが、仮に低下率を 20% 程度とすると PEFC に用いる燃料ガスの水素濃度を約 30 ~ 50 mol% ま

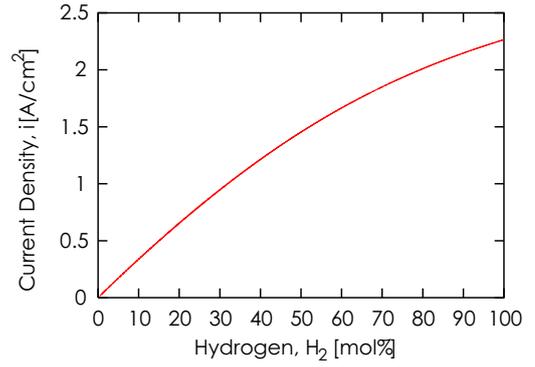


図8 水素濃度-電流密度曲線 (酸素濃度 100mol %)

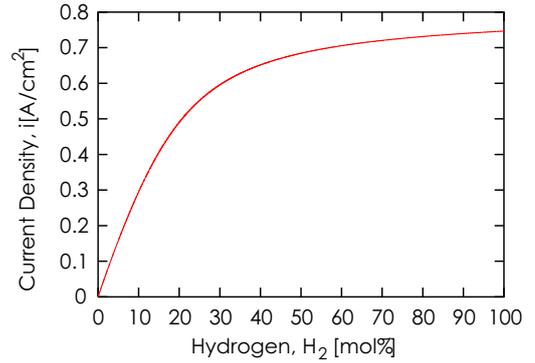


図9 水素濃度-電流密度曲線 (酸素濃度 21mol %)

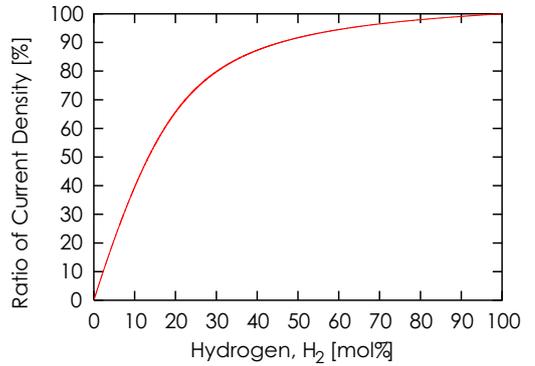


図10 水素濃度-電流密度曲線 (酸素濃度 10mol %)

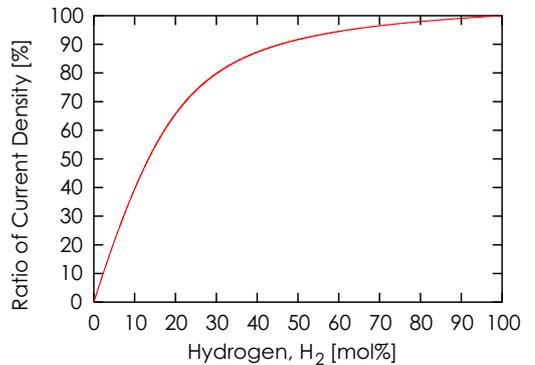


図11 酸素濃度 21mol %における電流密度の低下割合

で低くすることが可能になると考えられる。

## 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出力特性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。

- 本研究で作成したPEFCモデルはPEFC出力特性を再現できること、また、水素濃度による濃度過電圧を再現できることを実験結果との比較により検証、明らかにした。
- カソード側の酸素濃度が高い条件において水素濃度を操作すると、電流密度に大きく影響を及ぼす事が明らかになった。これは酸素濃度が高い場合は水素量に対して酸素量が十分にあるが、酸素濃度が低い場合は水素量に対して酸素量が十分でないため、酸素濃度に見合う水素濃度までは水素濃度が低下しても影響が小さいことに由来するものと考えられる。
- 酸素濃度 21 mol% 時の電流密度の変化割合を算出したところ、電流密度は酸素濃度 50 mol% で約 8%、30 mol% で約 20%、10 mol% で約 60% 低下することが明らかになった。許容できる電流密度の低下率をどの程度に設定するかにもよるが、仮に低下率を 20% 程度とするとPEFCに用いる燃料ガスの水素濃度を約 30 ~ 50 mol% まで低く設定できると考えられる。

以上の研究成果を基に、燃料電池内の詳細な各化学種濃度分布および電流密度分布が明らかになれば、低水素濃度燃料使用時のPEFC内の各化学種濃度分布を高効率で運用可能なサーペンタイン流路形状や燃料電池の仕様を求める事が可能となる。そのために本解析モデルと燃料電池内の3次元熱・物質輸送解析モデルとの連成解析モデルの作成が今後の課題と考えられる。

## 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) 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.
- (4) Wang Y., et al.: "Ultra Large-Scale Simulation of Polymer Electrolyte Fuel Cells", J. Power Sources, Vol.153, pp.130-135, 2006.
- (5) Wang F.B., et al.: "Numerical Prediction of Concentration and Current Distributions in PEFC", J. Power Sources, Vol.145, pp.546-554, 2005
- (6) 井上元ら: 固体高分子型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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.

# 中空粒子分散材料の異方性損傷発達過程のモデル化

川見 唯\*      和田 明浩\*\*

## Modeling of Anisotropic Damage Development in Hollow Particle Reinforced Composites

Yui KAWAMI\*      Akihiro WADA\*\*

### ABSTRACT

Anisotropic damage development of hollow particle reinforced composites has been formulated based on equivalent inclusion concept. Macroscopic response of the composite including intact or cracked hollow particles is evaluated by three-dimensional finite element method to investigate the load carrying capacity of the particle, and the way to replace an intact or cracked hollow particle with an equivalent homogeneous particle is examined. Moreover, based on energy balance concept, damage development of hollow particle reinforced composites due to particle fracture is simulated to characterize anisotropic damage development. It is found that damage induced anisotropy is little affected by the hollow ratio whereas it has significant effect on stress-strain response of the composite.

**Keywords:** hollow particle, random particulate composite, FEM, damage mechanics

### 1. 緒言

粒子分散材料は強化材とする粒子を母材内に分散させた複合材料である。複合化の目的には、材料の強化及び剛性の向上や耐熱性などの力学的特性に関する高性能化と、ゴムマトリックス内に強磁性粒子を分散させたゴム磁石のように力学以外の機能化（導電性・磁性・圧電性など）が挙げられる。

粒子分散複合材料には共通の損傷機構として界面はく離・粒子割れ・母材き裂があり、これらの損傷の発生により材料の機械的特性は大きく損なわれる。一方、粒子近傍での局所的な損傷はエネルギー散逸による強靱化機構として働く可能性も指摘されているが、そのメカニズムの解明には正確な損傷のモデル化が不可欠である。従来は解析が容易であるという理由から損傷した粒子をヴォイドに置換する手法が多用されてきた。しかし、この手法では粒子損傷を過大評価することになり、損傷の異方性も再現できない。そこで、損傷した粒子を等価な均質粒子に置換して解析する手法<sup>(1)(2)</sup>が提案されているが、対象は中実粒子に限定されていた。本研究では、等価粒子置換の手法を中空粒子の割れ損傷に拡張し、粒子割れの増加に伴う異方性損傷発達過程のモデル化を試みた。

### 2. 3次元 FEM 解析

#### 2.1 解析手法

等価粒子解析に先立ち、中空粒子を含む複合材料の3次元 FEM 解析を行い、粒子割れによる複合材料の巨視的剛性の変化傾向について調査した。以下に解析手法を示す。

粒子配置は実際にはランダムであるが、ここでは粒子が Fig.1 のように単純立方格子 (SC) の配置をしていると仮定して解析を行う。この場合、対称性により Fig.1 の代表体積  $V$  の解析を行えば、全体の解析が可能である。負荷は引張応力  $\sigma = 1$  とし、粒子体積分率  $V_f$  及び粒子空洞率  $H_r$  を変化させ解析を行った。ここで、粒子体積分率  $V_f$  は Fig.2 の代表体積の一辺の長さ  $a$  と粒子外径  $r$  の比率で表し、また粒子空洞率  $H_r$  は中空粒子の粒子外径  $r$  とその内径  $r_p$  との比  $r_p/r$  とする。拘束条件は周期性を考慮し、Fig.2 の点  $O$  に接する3面では法線方向の変位を0とし、他の3面には法線方向の変位が面内で同一になるように節点に拘束を与える。

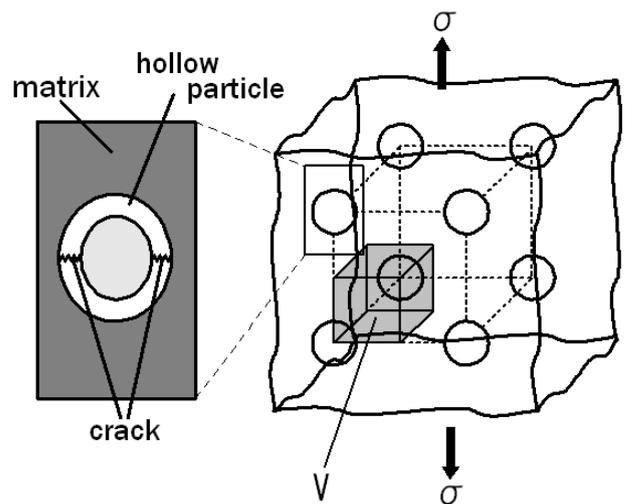


Fig. 1 Modeling of random particulate composites as SC particle arrangement.

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 機械工学科 准教授

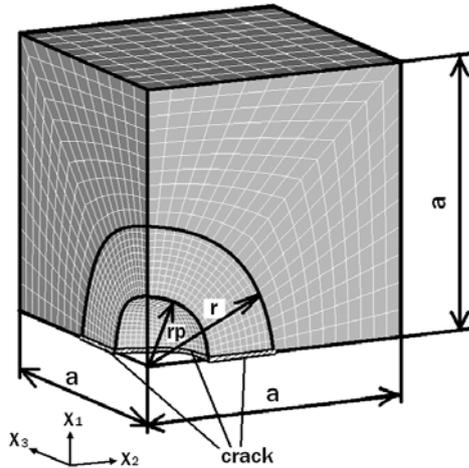


Fig. 2 FEM mesh used in the analysis of SC.

粒子割れの解析では Fig.1 に示すように全ての粒子で負荷応力に対して垂直に割れが起こっていると仮定し解析を行なった。この場合, Fig.2 の crack と書かれている負荷応力に対して垂直な粒子面だけ拘束条件をなくすことで粒子の割れを表現する。母材には不飽和ポリエステル ( $E=3.0[\text{GPa}]$ ,  $\gamma=0.37$ ), 粒子にはガラスビーズ ( $E=70[\text{GPa}]$ ,  $\gamma=0.22$ ) を用いると仮定した。また, 解析には有限要素法ソフト ANSYS 7.0 を用い, 要素には 20 節点ソリッド要素を用いた。

2.2 解析結果

(1) 中空粒子解析

損傷がない中空粒子分散材料について, 粒子体積分率  $V_f$  及び粒子空洞率  $H_r$  を変化させたときの巨視的なヤング率と比弾性率 (ヤング率  $E$  / 比重量  $\gamma$ ) を解析した結果, 以下のことが分かった。

複合材ヤング率は粒子が最も多く含まれ, 最も中実粒子に近いときに最大となり,  $H_r$  が増加して粒子が中空化するとその値は低下する。一方で, 比弾性率は Fig.3 に示すように  $V_f$  が一定の場合,  $H_r$  が増加して粒

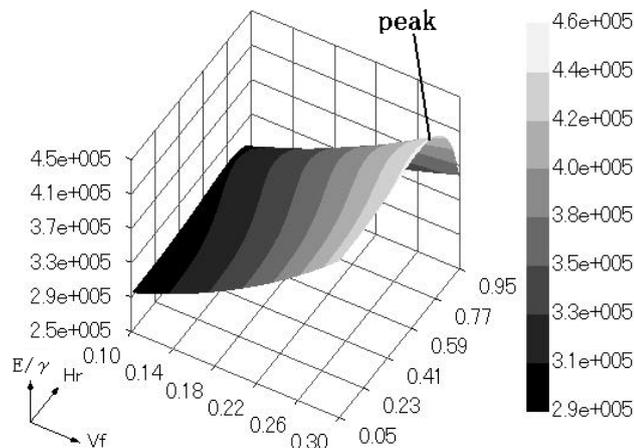


Fig. 3 Variation of specific Young's modulus with  $V_f$  and  $H_r$ .

子が中空化することでその値が増加するが,  $H_r$  が 1 付近に達すると逆に減少し, 比弾性率を最大にする  $H_r$  が存在する。この  $H_r$  の最適値は Table 1 に示すように,  $V_f$  の増加に伴い減少することが分かった。また解析の範囲内では  $V_f=0.3$ ,  $H_r=0.68$  のとき最大値となった。

Table 1 Optimum value of  $H_r$  in each  $V_f$ .

| $V_f$ (Volume fraction of particles) | $H_r$ (Hollow ratio) |
|--------------------------------------|----------------------|
| 0.1                                  | 0.82                 |
| 0.2                                  | 0.73                 |
| 0.3                                  | 0.68                 |

(2) 割れた中空粒子解析

粒子の割れによる影響を調べるために, 前節と同様に Fig.2 のような FEM モデルを用いて解析を行い, 粒子が割れたときの複合材料の巨視的なヤング率を求めた。Fig.4 に  $V_f=0.1, 0.2, 0.3$ ,  $H_r=0.05, 0.5, 0.95$  のときの結果を示す。なお, Fig.4 の縦軸の値は不飽和ポリエステル単体のヤング率で正規化した値とする。

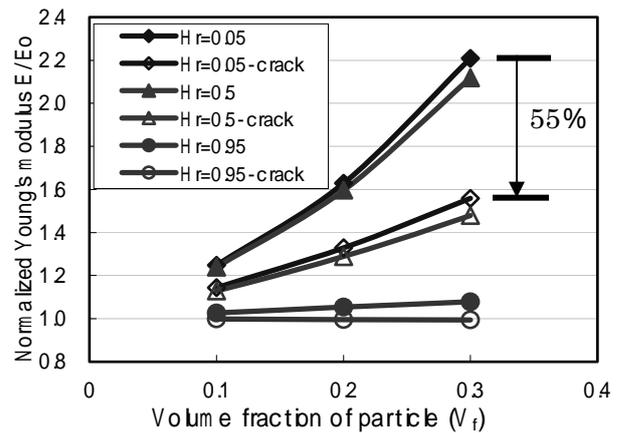


Fig. 4 Variation in Young's modulus of composites due to particle fracture.

Fig.4 において,  $V_f=0.3$ ,  $H_r=0.05$  について見ると, 粒子を入れることで樹脂単体よりもヤング率は約 2.2 倍向上している。しかし, 割れが発生することでヤング率は, 粒子を入れることで向上した分の約 55% 低下している。この低下率は  $H_r=0.5$  のときも同程度であり,  $V_f=0.2, 0.1$  についても同様の傾向が見られる。一方で  $H_r=0.95$  の場合, 粒子が割れると樹脂単体のヤング率よりも低下している。このことから  $H_r$  が大きい中空粒子を用いた場合, 粒子が健全なときは複合材剛性の向上が見込めるが, 粒子が割れた場合には母材よりも剛性が低下する危険性があることが分かった。

以上では, 粒子割れに伴う複合材料全体の剛性変化に着目したが, 複合材料剛性の変化は粒子体積分率に依存するため, 汎用モデルの構築には適さない。そこで以下では粒子のみに着目し, 等価粒子置換の手法を用いて損傷のモデル化を試みる。

### 3. 等価粒子置換

#### 3.1 損傷力学の概念

本研究では Fig.5 に示すように、健全または割れた中空粒子を均質な等価粒子に置き換えて解析を行ない、両者の巨視的な挙動が一致するときの等価粒子の剛性を探索する。ただし、この際の等価粒子の剛性マトリックスは全部で 21 個の独立な変数で構成されているため、全ての剛性要素を個別に決定することは困難である。永田ら<sup>(3)</sup>は、中実粒子が部分はく離したモデルに損傷力学の概念を用いて、互いに独立な 2 つの損傷変数  $D_1$  (負荷方向)、 $D_2$  (負荷垂直方向) で粒子の剛性変化を代表させ、各はく離角度に対する  $D_1$ 、 $D_2$  の最適値を探索している。本研究ではこの手法を中空粒子に適用し、等価粒子の剛性 (有効剛性) を算出する。

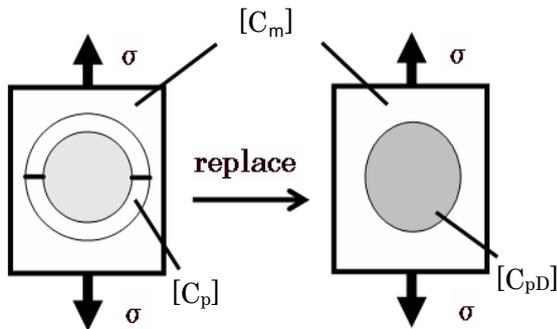
以下、Chow&Wang のモデル<sup>(4)</sup>に基づき損傷力学の概念について簡単に説明する。損傷力学とは材料内に存在する損傷を材料の内部構造変化として捉え、はく離などの損傷を応力やひずみとは別の連続無次元変数 (損傷変数) で代表させて解析を行なう手法である。例えば Fig.6 のように応力が負荷され、応力に対して垂直な面の面積が  $S$  である材料があるとする。さらに材料内部のある面に損傷が発生し、全面積  $S$  に対する損傷面積  $S - S'$  の割合が損傷変数の値であると仮定すると、有効面積  $S'$  に働いている応力  $\sigma'$  は次式のように表される。

$$\sigma' = \frac{1}{1-D} \sigma \quad (1)$$

ここで、損傷変数は全面積  $S$  に対する損傷面積の割合であるから非損傷時には 0、完全に損傷した場合には 1 の値をとる。つまり損傷変数は 0 から 1 の間で変化する値をとる。また、式(1)で示されているのは 1 次元の有効応力であるが、実際の 3 次元解析では次式のようにマトリックスで表される。

$$[\sigma'] = [M(D)][\sigma] \quad (2)$$

ここで  $[M(D)]$  は Damage effect matrix と呼ばれる  $6 \times 6$  のマトリックスである。



(a) Cracked particle (b) Equivalent particle

Fig. 5 Replacement of a cracked particle with an equivalent particle.

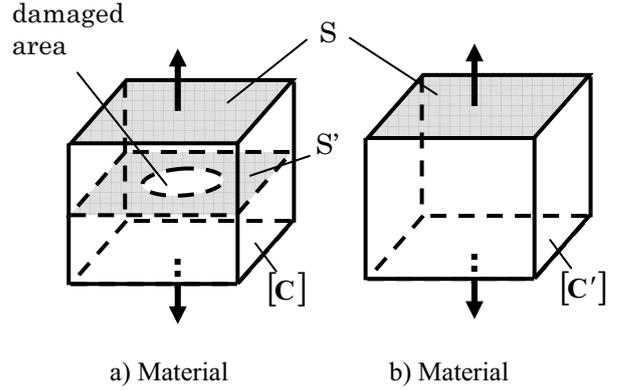


Fig.6 Concept of damage mechanics.

ここで、非損傷時の剛性を  $[C]$  とすると、非損傷時のひずみエネルギーは

$$W_{I(\sigma,0)} = \frac{1}{2} [\sigma]^T [\varepsilon] = \frac{1}{2} [\sigma]^T [C]^{-1} [\sigma] \quad (3)$$

となり、損傷後もエネルギー関数の形式が不変であると仮定すると、損傷時のひずみエネルギーは式(2)より

$$W_{I(\sigma,D)} = \frac{1}{2} [\sigma]^T [M(D)]^T [C]^{-1} [M(D)] [\sigma] \quad (4)$$

となる。さらに同じ荷重条件を与えた場合に同様の巨視的挙動を示す等価材料があったとする。この材料の剛性を  $[C']$  とするとひずみエネルギーは次式のようにになる。

$$W_{I(\sigma,0)} = \frac{1}{2} [\sigma]^T [C']^{-1} [\sigma] \quad (5)$$

損傷時の材料のひずみエネルギーと等価材料のひずみエネルギーは等しいので、等価材料の剛性は最終的に次式のように表される。

$$[C'] = [M(D)]^T [C]^{-1} [M(D)]^{-1} \quad (6)$$

このように損傷変数を導入することによって、非損傷時の材料の剛性と Damage effect matrix を用いて損傷時の剛性を予測することができる。ただし、損傷変数の値は材料の損傷状態を代表する値であれば良いので、必ずしも面積割合である必要はない。

#### 3.2 中空粒子の損傷力学モデル

前節の損傷力学の手法を Fig.5 に示すモデルに適用すると損傷時の粒子有効剛性  $[C_{pD}]$  は次式となる。

$$[C_{pD}] = [M(D)]^T [C_p]^{-1} [M(D)]^{-1} \quad (7)$$

ここで  $[C_p]$  は非損傷時の粒子剛性である。本研究では損傷力学モデルとして、Chow&Wang が示した

Damage effect matrix [M(D)]を用いる．負荷方向の損傷変数を  $D_1$ ，垂直方向の損傷変数を  $D_2, D_3$  とすると，Damage effect matrix [M(D)] は次式のように表される．

$$[M(D)] = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-D_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-D_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1-D_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(1-D_2)(1-D_3)}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(1-D_3)(1-D_1)}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(1-D_1)(1-D_2)}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

ここで，負荷方向に垂直な面内では損傷が等方性であると考え， $D_2=D_3$  とおく．これにより二つの損傷変数を定めることで損傷時の粒子剛性 $[C_{pD}]$ が定まる．本研究では  $D_1, D_2$  の組み合わせとして2500通りの中から最適値を探索した．

3.2 最適値探索結果

Fig.7 に粒子体積分率  $V_f=0.3$  の場合について，最適損傷変数の粒子空洞率  $H_r$  に対する変化傾向を示す．図より非損傷粒子の場合， $D_1, D_2$  の変化傾向は同等で，粒子の中空化による剛性低下が等方的であることが分かる．一方，割れた粒子の場合，健全粒子と比較して  $D_1$  が急増しており，負荷方向の荷重負担能力が低くなっている．また，負荷垂直方向は損傷がない場合とほぼ同様の変化傾向を示している．このことから中空粒子が割れると負荷方向に対する剛性低下が支配的であり，粒子空洞率  $H_r$  が0.8以下の場合， $D_1=0.65$  付近に設定すれば粒子の割れが模擬できることが分かった．またこの変化傾向は  $V_f=0.1, 0.2$  においても同様であった．

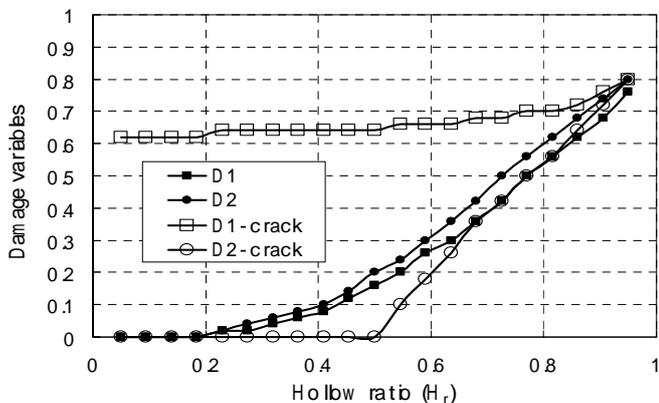


Fig. 7 Dependence of damage variables on  $H_r$  before and after damage formation. ( $V_f=0.3$ )

4. 複合則

前章では，損傷した粒子を等価粒子に置換することで，1つの粒子に対する有効剛性を明らかにした．これを種々の複合則に組み込むことで複合材料の巨視的な剛性を算出することができる．本研究では複合則として Voigt&Reuss 中間モデル<sup>(5)</sup>を用いる．Fig.8 に示すように複合材料の巨視的応力とひずみ(6×1のベクトル)を  $\sigma, \epsilon$  とし，母材と強化材の剛性マトリックス(6×6の行列)を  $C_m, C_p$ ，強化材の体積分率を  $V_f$  とすると Voigt&Reuss の中間モデルでの応力-ひずみ関係式は次式で表される．

$$\sigma = C \epsilon = \left\{ V_f I + (1-V_f) C_m C_p^{-1} - k(1-V_f) C_m (C_p^{-1} - C_m^{-1}) \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで  $I$  は単位行列， $k$  は任意定数であり  $0 < k < 1$  の値をとる．本研究では  $k=0.5$  とした．

上記の複合則は母材と健全な強化材の2相から構成される複合材料を対象とした複合則である．しかし，本研究で対象とする複合材料は母材，健全粒子，損傷粒子の3相から構成されている．そこで Fig.9 に示すように，まず母材と健全粒子の2相から成る複合材料を構成し，母材と健全粒子の剛性  $C_m$  と  $C_p$  から2相複合材料の有効剛性を次式より算出する．

$$C_m' = \left\{ V_f I + (1-V_f) C_m C_p^{-1} - k(1-V_f) C_m (C_p^{-1} - C_m^{-1}) \right\} \times \left\{ C_p^{-1} - k(1-V_f) (C_p^{-1} - C_m^{-1}) \right\} \dots\dots\dots (10)$$

次に，この2相複合材料を新たな母材と考え，その剛性  $C_m'$  と損傷粒子の剛性  $C_{pD}$  から，対象とする複合材料の剛性  $C_c$  を次式より算出する．

$$C_c = \left\{ V_{pD} I + (1-V_{pD}) C_m' C_{pD}^{-1} - k(1-V_{pD}) C_m' (C_{pD}^{-1} - C_m'^{-1}) \right\} \times \left\{ C_{pD}^{-1} - k(1-V_{pD}) (C_{pD}^{-1} - C_m'^{-1}) \right\}^{-1} \dots\dots\dots (11)$$

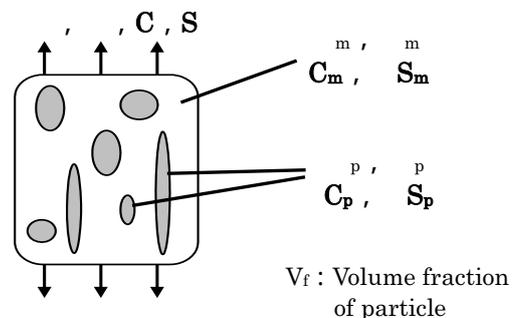


Fig. 8 Macroscopic and microscopic stress-strain in a composite.

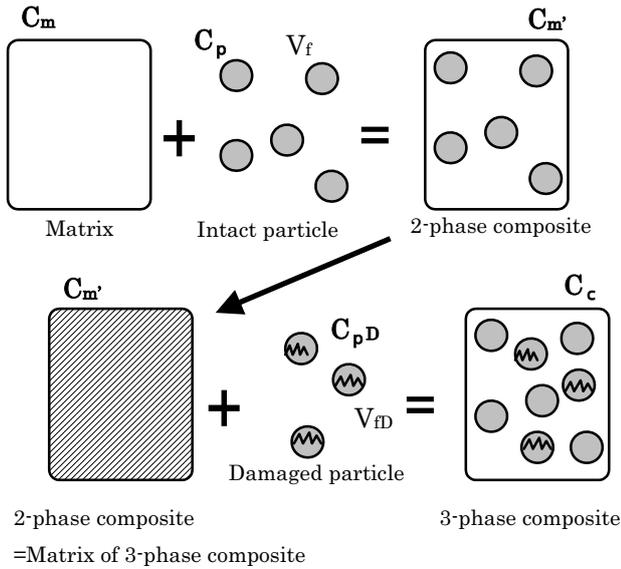


Fig. 9 Low of mixture for 3-phase composite.

### 5. 損傷発達則

複合材料の損傷発達過程の予測には、前章までに示した粒子の有効剛性と複合則に加えて、どのような基準で粒子が損傷するのかを損傷発達則によって記述する必要がある。そこで本研究では Wong&Ait-Kadi が示したエネルギー基準の損傷発達則<sup>(6)</sup>を用いる。エネルギーバランスの観点から、粒子割れによるエネルギー解放率が粒子破壊靱性と等しくなる時に粒子割れが生じるとすると、単軸負荷の場合次式となる。

$$-2 \frac{G_c}{V_0} \left( \frac{dA}{dc} \right) = \varepsilon_{11}^2 \left( \frac{dE}{dc} \right) \quad (12)$$

ここで、 $G_c$ は粒子破壊靱性、 $c$ は健全粒子の体積分率、 $V_0$ は参照体積、 $A$ は粒子の破断面積、 $E$ は複合材の負荷方向ヤング率である。 $E$ は前節の複合則より算出する。次に、健全粒子体積分率の変化と中空粒子の破断面積の変化の間には、幾何学的な見解から次式が成り立つ。

$$\frac{dA}{dc} = -\frac{3}{2r} V_0 \left\{ 1 - \left( \frac{r_p}{r} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

ここで、 $r_p/r$ は粒子空洞率  $H_r$  である。式(12),(13)より、中空粒子の割れに対する損傷発達則として最終的に次式を得る。

$$\varepsilon_{11}^2 = \frac{3G_c(1-H_r^2)}{r(dE/dc)} \quad (14)$$

本研究では粒子空洞率  $H_r$  の変化と粒子径分布のばらつきを考慮し、これらが複合材料の損傷過程に与える影響を調査した。以下に解析手順を示す。

- 1) 粒子径分布を正規分布により仮定する。
- 2) 粒子空洞率  $H_r$  に応じて健全および割れた中空粒子の有効剛性を損傷変数  $D_1, D_2$  を用いて算出する。
- 3) 割れた粒子の体積分率増分幅  $dc$  を設定し、累積確率密度が 1 回目は  $(1-dc)$ 、2 回目は  $(1-dc)^2$  に相当する粒子外径  $r$  を決定する。
- 4) 複合則により割れた粒子が  $dc$  だけ増えたときの有効剛性を算出し、初期剛性との差より  $dE/dc$  を求める。
- 5) 式(14)より損傷発達に必要なひずみを算出し、4) で求めた有効剛性より対応する応力を求める。
- 6) 割れが  $dc$  だけ増加した状態を初期状態とみなし、3)~5)の手順を繰り返す。

### 6. 解析結果

#### 6.1 粒子径分布の影響

初めに、粒子空洞率  $H_r=0.68$  で一定、平均粒子径を  $50[\mu\text{m}]$  とし、粒子径の標準偏差を 4 段階に変化させ粒子径分布が損傷発達過程に及ぼす影響を調査した。割れた粒子の体積分率増分幅は  $dc=0.001$ 、粒子体積分率は  $V_f=0.3$ 、粒子の破壊靱性は  $G_c=3.5[\text{J}/\text{m}^2]$  とした。Fig.10 に応力-ひずみ曲線の予測結果を示す。また Fig.11 は縦ひずみ-横ひずみ曲線の除荷直線からポアソン比を算出し、その変化傾向を示したものである。

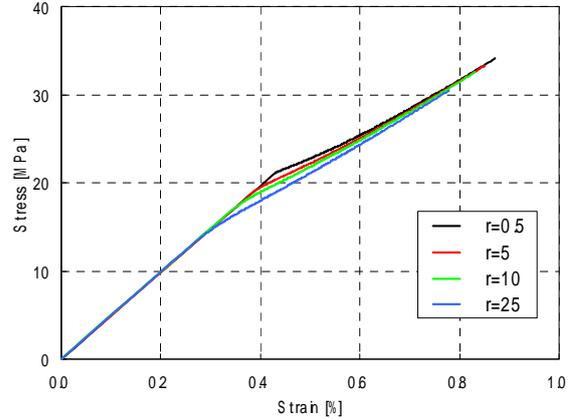


Fig. 10 Stress-strain curves of composites. ( $V_f=0.3, H_r=0.68, G_c=3.5[\text{J}/\text{m}^2]$ )

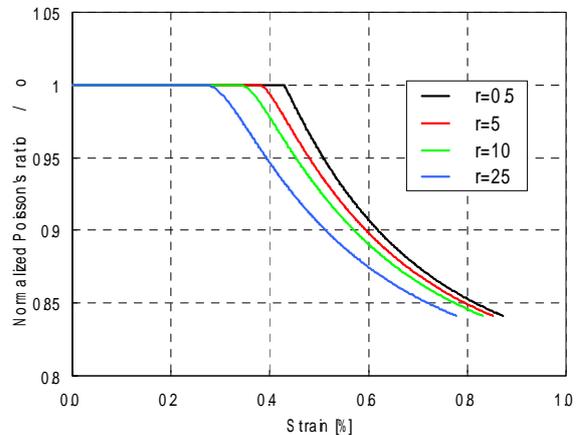


Fig. 11 Variation of Poisson's ratio of composites. ( $V_f=0.3, G_c=3.5[\text{J}/\text{m}^2], H_r=0.68$ )

Fig.10 の応力-ひずみ関係, Fig.11 のポアソン比変化の両方において, 粒子径のばらつきが大きいほど損傷開始が早くなっているのが分かる. この結果は, 粒子径のばらつきが大きくなると, 粒子の割れが起りやすい大きな粒子の存在確率が上がることを反映している. またポアソン比変化のグラフから, 損傷発達により, ポアソン比が減少し損傷異方性が現れているが, 損傷の最終段階(全ての粒子が割れた状態)では, ほぼ同じ値に収束することも分かる.

6.2 粒子空洞率の影響

Fig.12 に粒子径分布を平均粒子径  $50[\mu\text{m}]$ , 粒子径の標準偏差  $\sigma_r=10[\mu\text{m}]$ とし, 粒子空洞率  $H_r$  を4段階に変化させたときの応力-ひずみ曲線の予測結果を示す. 粒子体積分率は  $V_f=0.3$ , 粒子の破壊靱性は  $G_c=3.5[\text{J}/\text{m}^2]$ である. また, Fig.13 に対応するポアソン比変化を示す. Fig.12 より, 粒子の中空洞の増加に伴う粒子強度の低下を反映して, 粒子空洞率  $H_r$  が大きいほど損傷開始が早まっているのが分かる. また Fig.13 より,  $H_r=0.68$  以下では損傷開始点は異なるが, 粒子空洞率によるポアソン

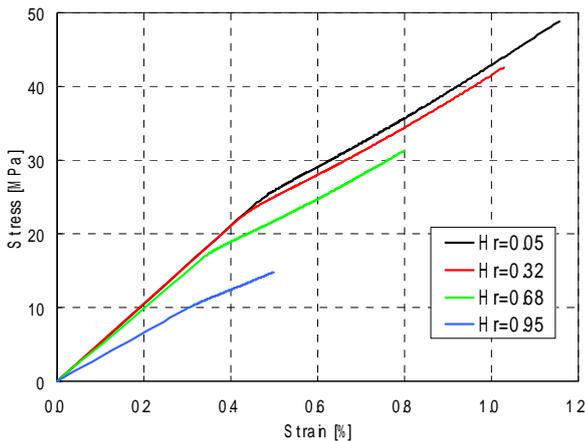


Fig. 12 Stress-strain curves of composites. ( $V_f=0.3, G_c=3.5[\text{J}/\text{m}^2], r_{\text{ave}}=50[\mu\text{m}], \sigma_r=10[\mu\text{m}]$ )

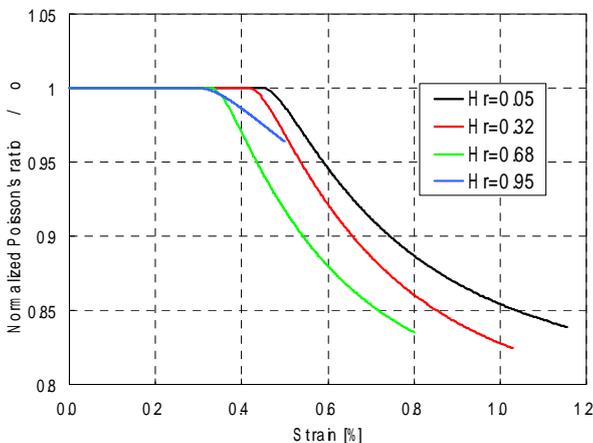


Fig. 13 Variation of Poisson's ratio of composites. ( $V_f=0.3, G_c=3.5[\text{J}/\text{m}^2], r_{\text{ave}}=50[\mu\text{m}], \sigma_r=10[\mu\text{m}]$ )

比変化の傾向に差はない. しかし  $H_r=0.95$  の場合, 他の粒子空洞率の結果と比較してポアソン比変化が小さいことが分かる. これは Fig.7 で示すように,  $H_r=0.95$  では健全粒子でも  $D_1, D_2$  共に割れた粒子と同じ程度の荷重負担能力しかないために, 損傷粒子数の増加に対して粒子割れの影響がほとんど出なかったと考えられる.

6.3 ヴォイド置換との比較

参考として従来の解析手法であるヴォイド置換による応力-ひずみ曲線の予測結果を Fig.14 示す. ヴォイド置換では損傷開始点から応力が低下しており, Fig.12,13 の等価粒子置換による結果と比較すると, 粒子の損傷を過大評価していることが分かる. また, ヴォイド置換は粒子剛性を等方的に低下させているため, ポアソン比の変化を表すことができない. このように, ヴォイド置換では正確な損傷発達過程をモデル化することが困難であると言える.

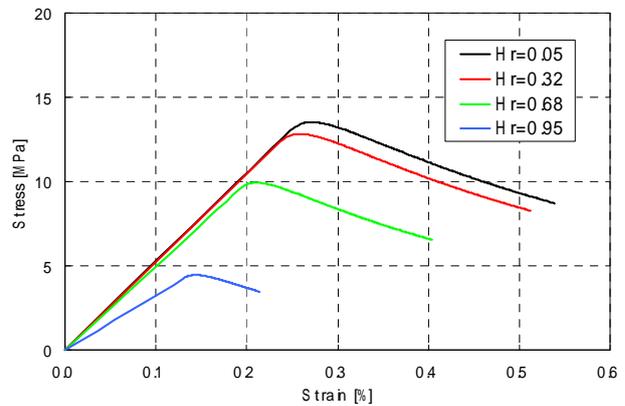


Fig. 14 Stress-strain curves of composites. (Void replacement method)

7. 結言

健全および割れた中空粒子を均質な等価粒子に置換し, 損傷力学的手法を用いてその有効剛性を求める手法を提案した. また, 等価粒子の有効剛性に与える粒子空洞率の影響を調べ, 粒子割れは主に負荷方向の剛性を低下させ負荷垂直方向の剛性は割れによりほとんど変化せず, この傾向は粒子空洞率に依存しないことを示した. さらに, 複合則とエネルギー基準の損傷発達則を用いて中空粒子分散材料の損傷過程を解析し, 粒子径分布や粒子空洞率の変化による異方性損傷発達過程の相違を示した.

参考文献

- (1) 和田明浩, 元木信弥, 機論 A, 69-681(2003-5), 846-853.
- (2) 東郷敬一郎, 曹永太, 機論 A, 65-631(1999-3), 514-522.
- (3) 永田雄介, 和田明浩, 神戸高専研究紀要, 43(2005-3), 37-42.
- (4) C.L.Chow & J.Wang, Int. J. Fract., 33 (1987), 3-16.
- (5) 東郷敬一郎, 材料強度解析学, 内田老鶴圃, 2004, 193-199.
- (6) F. C. Wong & Ait-Kadi, J. Appl. Polymer Science, 55(1995), 263-278.

# 周囲流を伴う水素噴流拡散火炎の安定限界と火炎構造

影山 朋久\* 谷川涼一\* 吉本 隆光\*\*

## Flame structure and Stability Limit of Hydrogen Diffusion Flame with Co-flow

Tomohisa KAGEYAMA\* Ryouichi TANIGAWA\* Takamitsu YOSHIMOTO\*\*

### ABSTRACT

The characteristics and properties of the hydrogen diffusion flame have been investigated as a clean energy in the future. The objective of the present study is to get further understanding lifting/blow-off in the hydrogen diffusion flame and present clearer understandings of the processes for flame holding. The species of the fuels are pure hydrogen and dilute hydrogen which is formed with putting nitrogen gas into the fuel. The parameters of the experiment are selected as fuel velocity, air velocity, equivalent ratio, nozzle inner diameter, concentration of the fuel and so on. The experiments were conducted to investigate the stability limits and flame behaviors with increasing the spout velocity or the co-flow velocity. The inside temperature of the flame is measured for researching the structure of the flame. The flame base and the flame configuration are observed in detail. It is found that the stability limit depends on the co-flow velocity.

*Keywords*; hydrogen flame, co-flow, lifting, blow-off, stability limit

### 1. はじめに

エネルギーの有効利用と燃料消費量低減の燃焼技術に関して、安定な燃焼形態の保持は重要である。しかし、その火炎基部の構造、消炎現象などの不明な点も多い。そこで、安定な拡散火炎の挙動を観察し、火炎の安定限界（浮き上がり・吹き飛び）や火炎形状<sup>(1)</sup>などを調べる必要がある。本研究では、燃料として純水素および窒素を混合して希釈した水素燃料を用いる。また、ノズルには2重管を使用する。内側のノズル（内管ノズル）に燃料を噴出させ、外側のノズル（外管ノズル）から空気を周囲流とし噴出させ、周囲流を伴う噴流拡散火炎<sup>(2)(3)</sup>を形成する。これとは反対に燃料と空気を入れ換えて燃焼させ、内側に形成される火炎を逆拡散火炎<sup>(4)(5)</sup>という。なお2重管の両先端ノズルの噴出口は同一水平平面である。

ノズル寸法や周囲速度をパラメータとして、浮き上がり・吹き飛び現象に至る過程を、詳細に観察及び測定する。また火炎基部と火炎形状、火炎安定限界などを調べ、周囲流や各噴出速度が火炎の安定限界<sup>(6)(7)</sup>にどのように影響するのかを調べる。

### 2. 実験方法・装置

燃料（水素）と希釈ガス（窒素）を流量計で流量を調整し所定の割合で混合させる。周囲流を伴う拡散火炎では内管から、逆拡散火炎では外管から燃料を噴出させ噴

流拡散火炎を形成する。燃焼用空気は圧縮空気を減圧させ流量計で流量を調整してノズルから噴出させる。

2重管の外管の内径はすべて同一口径のものを用いる（ $d_a=17.9\text{ mm}$ ）。火炎の挙動を観察する方法として、直接写真、シュリーレン法、シャドウグラフ法を用いた。温度測定には熱電対を用いた。

Fig.1にシュリーレン装置を示す。シャドウグラフ法はFig.1においてKnife edgeで屈折光を切断せずに撮影したものである。Fig.2に実験装置フロー図を示す。

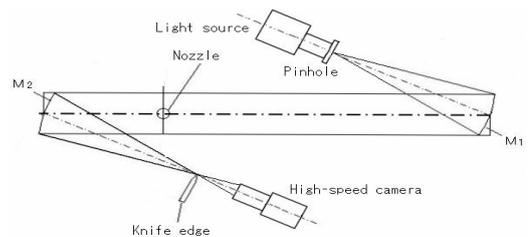


Fig.1 Experimental apparatuses of Schlieren photography

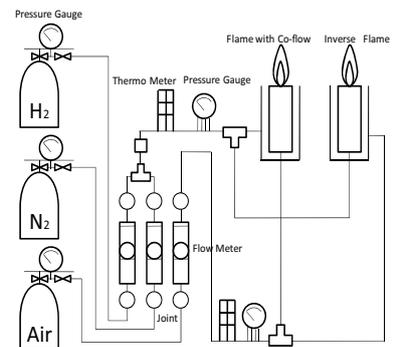


Fig.2 Flow Diagram

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 機械工学科 教授

### 3. 実験結果

#### 3.1 周囲流を伴う拡散火炎

##### 3.1.1 周囲流による火炎の変遷

周囲流を伴う拡散火炎で燃料に  $H_2:N_2=100:0$  の純水素を用いる。Fig.3 に示す。Fig.3 (a)に燃料噴出速度  $V_h=96$  m/s, Fig.3(b)に  $V_h=120$  m/s, Fig.3(c)に  $V_h=240$  m/s と一定にして, 周囲流の空気速度を増加させた場合の火炎の変遷を直接写真で撮影したものを示す。また, Fig.4 に  $H_2:N_2=70:30$  の希釈された水素を用いて, 燃料噴出速度  $V_h=96$  m/s 一定, Fig.5 に  $H_2:N_2=50:50$  の希釈された燃料の噴出速度  $V_h=72$  m/s 一定の場合での火炎の変遷を示す。内管ノズルの口径は外径  $D=1.2$  mm, 内径  $d=0.94$  mm のものを使用した。

$H_2:N_2=100:0$  の純水素を用いた場合, 周囲流がない大気中での自由噴流拡散火炎状態では赤色炎であるが, 周囲流(空気)速度を増加させるにつれて, 火炎基部が青色炎となる。また燃え切りが早くなり, 火炎形状は細長く薄火炎となる。燃料噴出速度が 96 m/s (Fig.3(a))では周囲流速度を上げるとくびれが確認できた。また燃料噴出速度が 120 m/s (Fig.3(b))においては, 拡散火炎でくびれが鮮明になり, 短炎となり, 全体的に圧縮されたような形状になる。また 240 m/s (Fig.3(c))では周囲流を流すと浮き上がりが発生した。また, 周囲流速度を上げることにより, 燃焼が促進され, 火炎は短くなっていく。

$H_2:N_2=70:30$ ,  $H_2:N_2=50:50$  の希釈された水素を用いた場合は, 周囲流がない大気中での自由噴流拡散火炎状態では, かすかに赤色炎であるが, 周囲流を伴うと青色炎となる。

また, 希釈された燃料は自由噴流拡散火炎においても吹飛びやすい

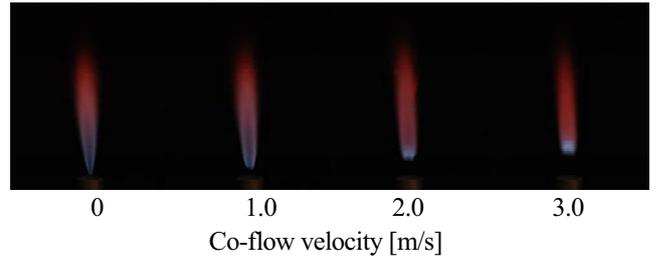


Fig.3(c) Behavior of normal diffusion flame  
( $H_2:N_2=100:0$ ,  $V_h=240$  m/s)

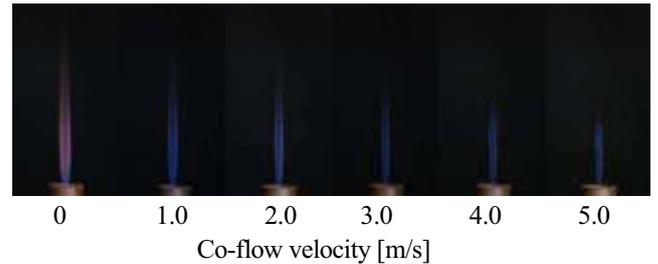


Fig.4 Behavior of normal diffusion flame  
( $H_2:N_2=70:30$ ,  $V_h=96$  m/s)

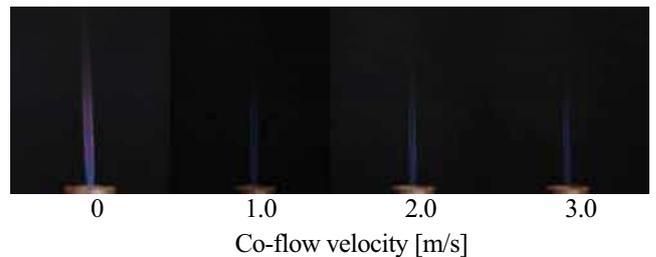


Fig.5 Behavior of normal diffusion flame  
( $H_2:N_2=50:50$ ,  $V_h=72$  m/s)

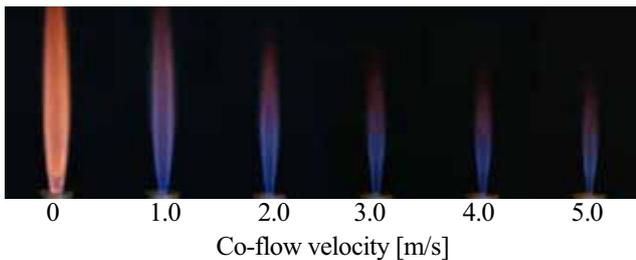


Fig.3(a) Behavior of normal diffusion flame  
( $H_2:N_2=100:0$ ,  $V_h=96$  m/s)

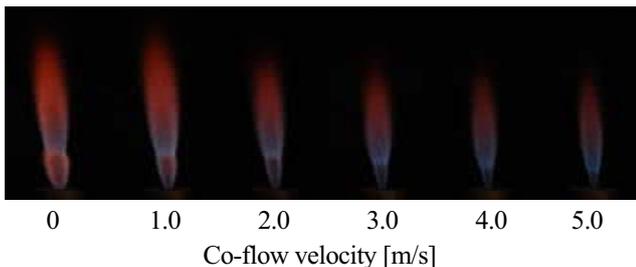


Fig.3(b) Behavior of normal diffusion flame  
( $H_2:N_2=100:0$ ,  $V_h=120$  m/s)

##### 3.1.2 火炎の挙動

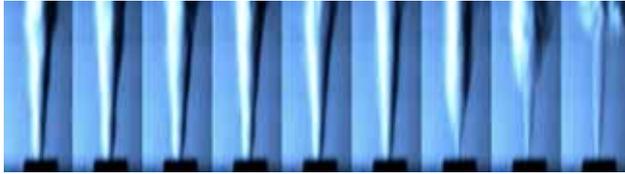
Fig.6(a),(b),(c)に  $H_2:N_2=100:0$  の純水素, Fig.7(a),(b),(c)に  $H_2:N_2=70:30$ , Fig.8(a),(b)に  $H_2:N_2=50:50$ , Fig.9 に  $H_2:N_2=30:70$  の希釈された水素を燃料に用い, 前項 3.1.1 と同一条件で, シュリーレン法で撮影した火炎の挙動を示す。

$H_2:N_2=100:0$  の燃料を用いた場合の火炎挙動では層流状態, 遷移領域からの吹き飛び (Fig.6(a),(b)) では浮き上がり現象は発生せず, それぞれ基部まで乱流に遷移後, 浮き上がる。しかし, 自由噴流拡散火炎の状態では乱流状態からの吹き飛び (Fig.6(c)) では浮き上がりが発生し, その後吹き飛ぶ。

希釈された水素を燃料に用いた場合, 周囲流を伴わせると, 火炎基部が層流状態であるとき (Fig.7(a),(b), Fig.8(a),(b), Fig.9),  $H_2:N_2=100:0$  の燃料を用いた場合と異なり, 火炎基部まで乱流状態に遷移するまえに吹き飛んでしまう。さらに, 火炎基部が乱流状態 (Fig.7(c)) であっても, 浮き上がり現象は発生せず吹き飛び現象に至る。また,  $H_2:N_2=50:50$ ,  $H_2:N_2=30:70$  の場合は, 自由噴流拡散火炎の状態において火炎の基部から乱流状態になることはなく,  $H_2:N_2=30:70$  の燃料を用いた場合 (Fig.9) では, 火炎下流部すら乱流状態に遷移せずに吹き飛ぶ。



Low ← Co-flow velocity → High  
Fig.6(a) Behavior of flame (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=100:0, V<sub>h</sub>=96m/s)



Low ← Co-flow velocity → High  
Fig. 6(b) Behavior of flame (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=100:0, V<sub>h</sub>=120m/s)



Low ← Co-flow velocity → High  
Fig. 6(c) Behavior of flame (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=100:0, V<sub>h</sub>=240m/s)



Low ← Co-flow velocity → High  
Fig. 7(a) Behavior of flame (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=70:30, V<sub>h</sub>=48m/s)



Low ← Co-flow velocity → High  
Fig. 7(b) Behavior of flame (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=70:30, V<sub>h</sub>=132m/s)



Low ← Co-flow velocity → High  
Fig. 7(c) Behavior of flame (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=70:30, V<sub>h</sub>=192m/s)



Low ← Co-flow velocity → High  
Fig. 8(a) Behavior of flame (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=50:50, V<sub>h</sub>=96m/s)



Low ← Co-flow velocity → High  
Fig. 8(b) Behavior of flame (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=50:50, V<sub>h</sub>=168m/s)



Low ← Co-flow velocity → High  
Fig.9 Behavior of flame (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=30:70, V<sub>h</sub>=48m/s)

### 3.1.3 火炎内温度分布

以下の図は内管ノズル口径が  $D=8.0\text{ mm}$ ,  $d=5.0\text{ mm}$  のものを用いた場合の希釈水素火炎の各断面での半径方向温度分布である。Fig.10(a)は  $H_2:N_2=50:50$  の燃料を用いて、燃料噴出速度  $V_h=1.7\text{ m/s}$  として、Fig.10(b)は周囲流速  $V_a=0.8\text{ m/s}$  で一定とした場合の温度分布を示している。Fig.11(a),(b)は  $H_2:N_2=30:70$  を用いて、燃料噴流速度を  $V_h=1.7\text{ m/s}$ 、Fig.11(b)は周囲流速を  $V_a=0.8\text{ m/s}$  で一定とする。Fig.12(a)は  $H_2:N_2=30:70$  を用いて、燃料噴流速度を  $V_h=8.5\text{ m/s}$ 、Fig.12(b)は周囲流速  $V_a=3.3\text{ m/s}$  での温度分布を示している。

希釈割合が高いほど全体的に温度が低下している。また、周囲流を流すことでも全体的に温度が低下し、最高温度点（火炎面）が火炎中心に近付き、火炎が細くなっている。

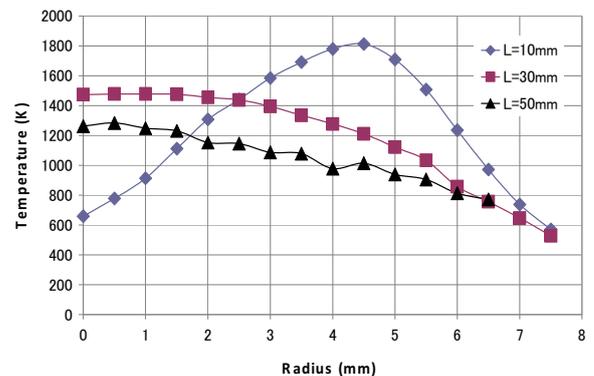


Fig. 10(a) Profiles of Flame Temperature (H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=50:50)

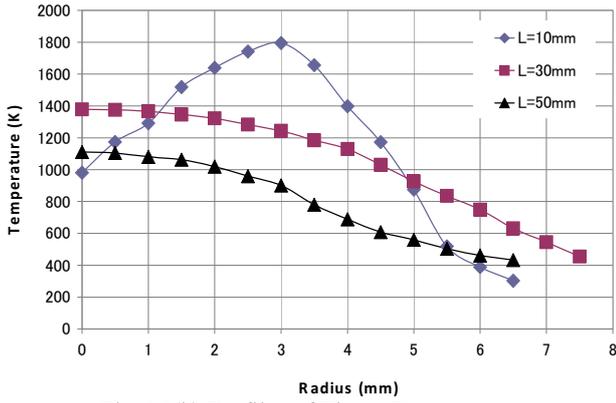


Fig. 10(b) Profiles of Flame Temperature  
( $H_2:N_2=50:50$  with air co-flow)

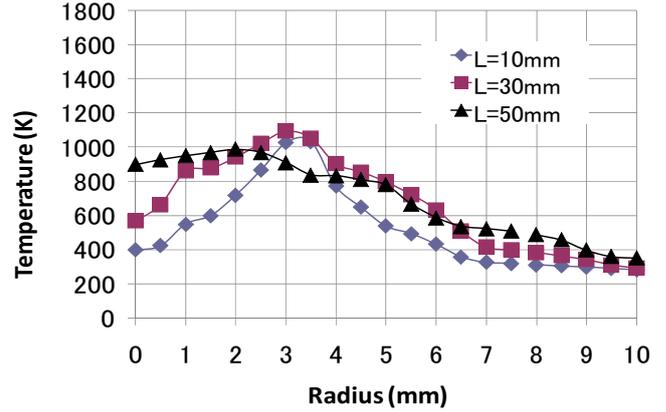


Fig. 12(b) Profiles of Flame Temperature  
( $H_2:N_2=30:70$  with air co-flow)

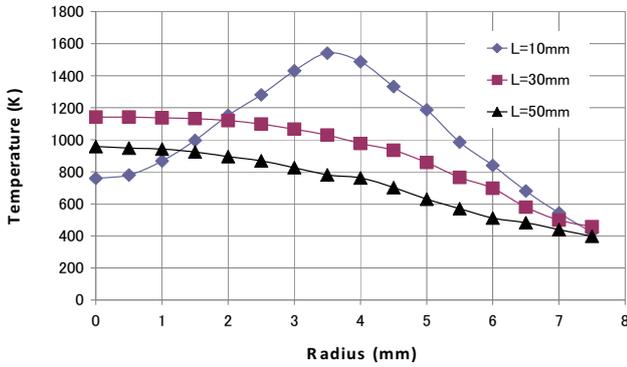


Fig. 11(a) Profiles of Flame Temperature ( $H_2:N_2=30:70$ )

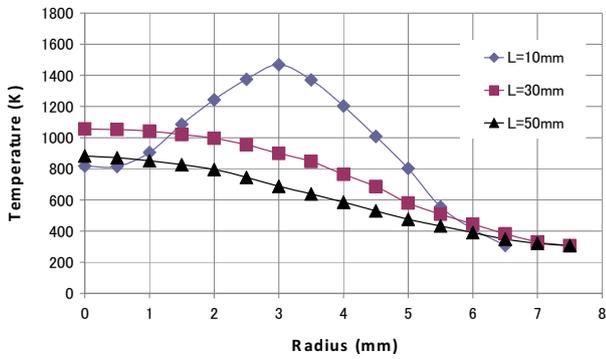


Fig. 11(b) Profiles of Flame Temperature  
( $H_2:N_2=30:70$  with air co-flow)

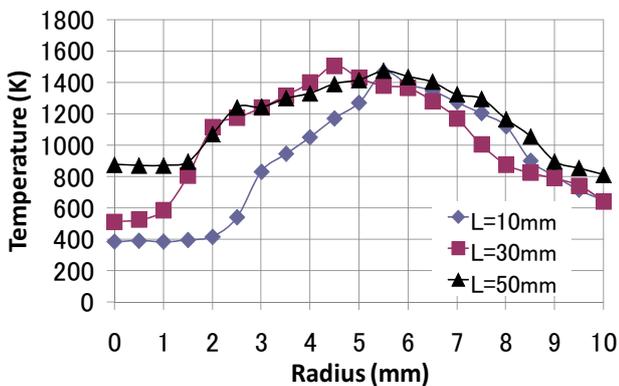


Fig. 12(a) Profiles of Flame Temperature ( $H_2:N_2=30:70$ )

**3.1.4 周囲流を伴う安定限界** Fig.13 に内管ノズル口径が  $D=1.2$  mm,  $d=0.94$  mm のものを用いた場合の、吹き飛び現象に至る燃料噴出速度と周囲流速を示す。 $H_2:N_2=100:0$  では火炎基部が層流燃焼状態(0-200 m/s)と乱流燃焼状態(230-360 m/s)では吹き飛び周囲流速がはっきりとした違いが見られた。また乱流状態であるときは周囲流を伴うことにより、浮上りが発生し、吹き飛びに至る周囲流速はほぼ一定となった。

また、 $H_2:N_2=70:30$ ,  $H_2:N_2=50:50$ ,  $H_2:N_2=30:70$  の希釈された水素を燃料に用いた場合でも同様に火炎基部が層流状態である場合と乱流状態である場合で周囲流による吹き飛び速度に変化がみられた。さらに、燃料の水素濃度が低くなるにつれて全体的に吹き飛び周囲流速は小さくなる。

さらに各水素濃度における火炎基部が乱流状態に移した後の、速度の増加量と吹き飛びに至る周囲流速の関係は、水素濃度が高いほど吹き飛びにくい。純水素( $H_2:N_2=100:0$ )を用いた場合の浮上り現象発生する。

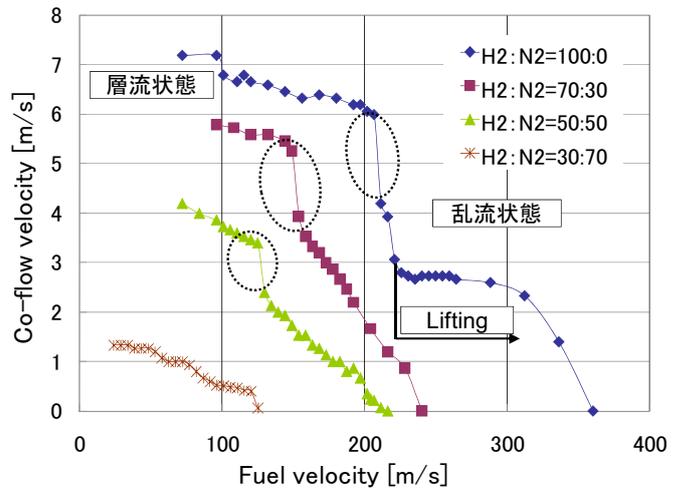


Fig.13 Blow-off velocity  
(Diffusion flame with Co-flow)

### 3.2 逆拡散火炎

**3.2.1 逆拡散火炎の変遷と挙動** Fig.14(a),(b),(c),(d),(e)(f)は逆拡散火炎で燃料に各一定の割合で希釈した水素を用いて、周囲流（燃料）速度  $V_h=0.33$  m/s 一定とし、内管ノズルから空気速度を増加させた場合の火炎の変遷を上段に直接写真，下段にシャドウグラフ法で撮影したものを示す。空気速度は写真の左から 0m/s から 17.63 m/s まで 1.18 m/s 間隔で撮影した。

直接写真では、水素濃度が低下するにつれて火炎色は薄くなっていく。空気速度を増加させると、火炎長さが増加していき、浮き上がりに至る。さらに空気速度を増加させると、外側の火炎の影響を受け、吹飛びには至らない。しかし、目視では水素濃度が低い  $H_2:N_2=50:50$  を用いた場合には、空気速度を増加させると火炎色がさらに薄くなり、消炎に至るように見える。逆拡散火炎は先端が尖った閉じた火炎が空気速度とともに伸びている。また、空気速度が小さい場合には、希釈された水素を周囲流に用いたほうが火炎長さは長くなっている。

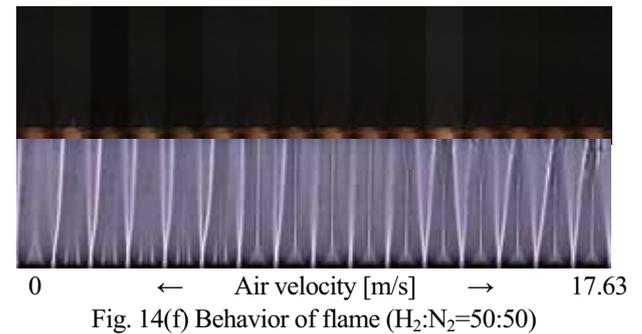
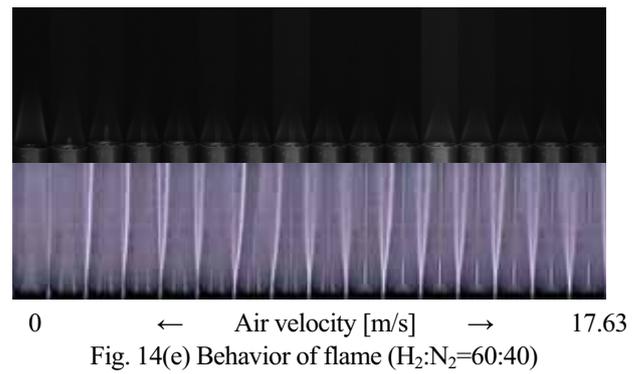
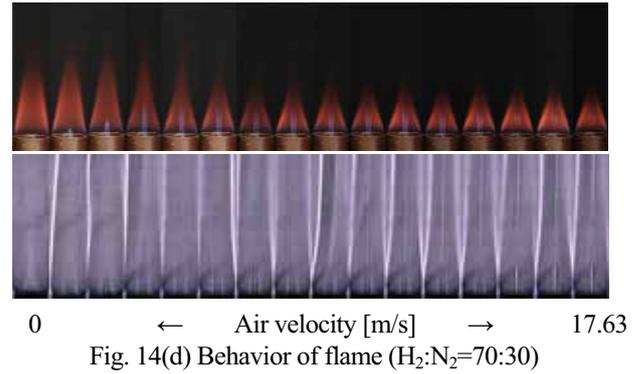
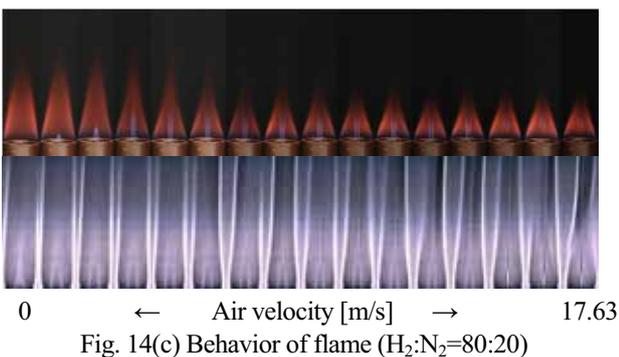
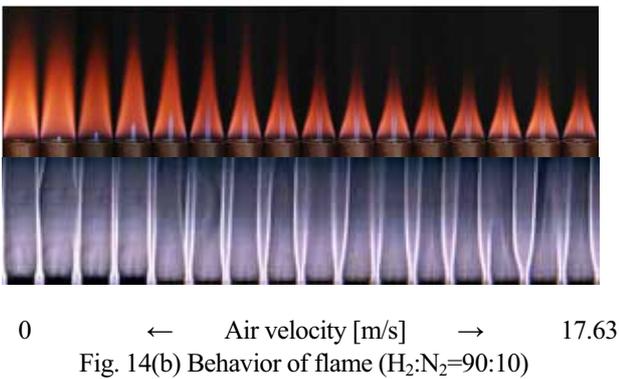
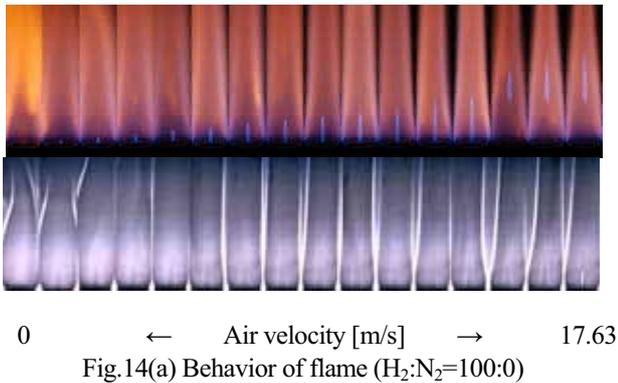
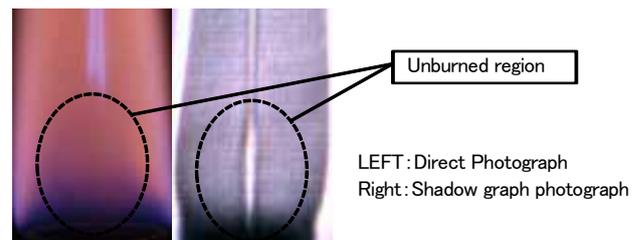


Fig.15は  $H_2:N_2=100:0$  の燃料を用いた場合の未燃部分の拡大写真を示す。内管ノズルは外径  $D=3.9$  mm, 内径  $d=1.94$  mm のものを使用した。火炎の基部の未燃部分がシャドウグラフ法の写真では白くなっている。また、水素濃度が変化しても、浮上がりに至る空気速度は異なるが、浮上がりに至る火炎挙動では変化は見られない。



( $H_2:N_2=100:0$ ,  $V_h=0.33$  m/s,  $V_a=17.63$  m/s)  
Fig.15 unburned region

また, Fig.16 に示すように空気速度が小さい場合には, 窒素の混入割合を上げて, 希釈された水素を周囲流に用いたほうが火炎長さは長くなっている。

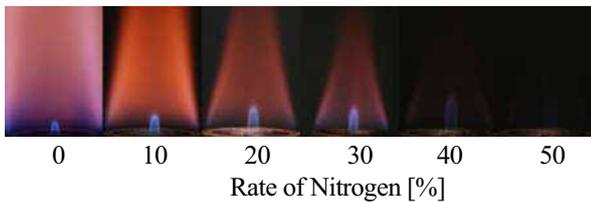


Fig.16 Flame length ( $V_h=0.33\text{m/s}$ ,  $V_a=4.72\text{m/s}$ )

**3.2.2 逆拡散火炎の安定限界** Fig.17 は逆拡散火炎において, 燃料に各一定の割合で希釈した水素を用い, 周囲流(燃料)速度を  $V_h=0.33\text{m/s}$  と一定とし, 内管ノズルから空気速度を増加させた場合の火炎の浮き上がり速度を示している. ノズルの口径は  $D=3.9\text{mm}$ , 内径  $d=1.94\text{mm}$  を使用した。

燃料中の水素濃度が増加するにつれて浮き上がりにくくなり, 水素濃度が高いほど安定性が良いと言える。しかし, 水素濃度が 100%になると 90%と比べて浮き上がりやすくなるが, これは水素濃度が低くなると, 外側の火炎が小さくなり, その影響を受けたためだと考えられる。

また, 逆拡散火炎の吹き飛びに至る空気速度は従来の拡散火炎での燃料噴出速度の 1/100 程度になっている。

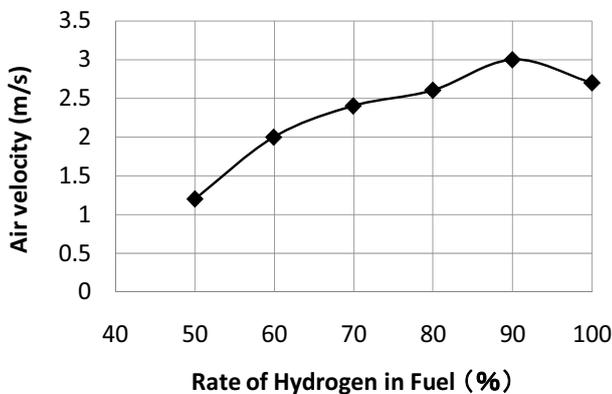


Fig.17 Blow-off velocity for Inverse flame

## 4. まとめ

### 4.1 周囲流を伴う拡散火炎

(1)周囲流を伴う水素拡散火炎は, 空気流量を増加させると火炎は小さく細くなり燃え切りが早くなっている。また火炎色は自由噴流拡散火炎では赤色炎だが, 周囲流速が増加すると次第に青色炎になる。

(2)火炎基部で乱流状態になると周囲流速の影響が大きくなり, 周囲流速が小さくても吹き飛びが起こる。また, 希釈された水素火炎は吹き飛びやすく, 水素濃度が低いと火炎基部まで乱流状態に遷移せずに吹き飛ぶ。

(3)希釈された水素を用いた場合, 周囲流を伴う火炎は浮

き上がり現象を発生せずに吹き飛びに至る。また,  $\text{H}_2:\text{N}_2=30:70$  の希釈水素を用いた場合では, 火炎上流部も乱流に遷移せずに吹き飛ぶ傾向が見られる。

(4)希釈水素では水素濃度が低いほど温度が低下し, 周囲流を伴うことで, 最高温度点が中心軸に近付き, 火炎が細くなる傾向が見られた。

### 4.2 逆拡散火炎

(1)周囲流の水素濃度が低下すると火炎色が薄くなり, 空気速度が小さいとき水素濃度が高い燃料を用いた場合に比べて火炎長さが長くなる。

(2)周囲流の水素濃度が高いと浮き上がりにくくなる。

### 参考文献

- (1)B.K.Jung, S.Torii, T.Yano and Y.Yatusiro. Fourth JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Vol.2, pp65-69, 2000.
- (2)吉本隆光, 安本祐治, 北村英樹ほか2名, 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, pp170-171, 2006.
- (3)安本祐治, 吉本隆光, 北村英樹, 塩島史哉, 永田雄一, 日本高専学会誌 Vol.12 NO2, 第1回論文集, pp23-26, 2007.
- (4)T.Yoshimoto,D.Ito,H.Kitamura,H.Shiosima,Y.Yasumoto and T.Takagi, 31st International Symposium on Combustion, WIPP 377, 2006.
- (5)伊藤大介, 吉本隆光, ほか3名, 日本機械学会関西支部第80期総会一般講演論文集, pp12-53・54, 2005
- (6)川見唯, 吉本隆光, 日本機械学会関西学生会学生員卒業研究講演論文集, pp19-2, 2008.
- (7)久保直志, 吉本隆光, ほか3名, 第42回燃焼シンポジウム講演論文集, pp167-168, 2004.

# 超硬合金の切削における WC 粒子径および Co 含有量の影響

谷口 友秋\* 宮本 猛\*\* 斉藤 茂\*\*\* 西田 匡志\*\*\*\*

## Influence of WC Grain Size and Co Content in Cutting Cemented Carbides

Tomoaki TANIGUCHI\* Takeshi MIYAMOTO\*\* Sigeru SAITO\*\*\* Tadashi NISHIDA\*\*\*\*

### ABSTRACT

Cemented carbides have high hardness and strength even in high temperature, and are used for not only cutting tools but also forming rolls, dies and so on. They are well known as difficult-to-cut materials because the tool wear is so severe in cutting with a diamond tool. As the results, the productivity becomes low and the production cost becomes high. In previous studies, the relationship between tool life and cutting conditions was investigated in detail by cutting with PCD (Poly-Crystal Diamond) tool. But it wasn't made clear, because the common cemented carbides had a variety of WC grain sizes and Co contents. In this study, the influence of WC grain size and Co content is investigated in detail by observing the tool after turning eight types of cemented carbides. They have the WC grain size of 2 or 7  $\mu\text{m}$ , which have the Co contents of 10, 15, 20 and 25%.

*Key words:* Cemented carbides, WC grain size, Co content, PCD tool, cBN tool, turning

### 1. 緒言

鉄 (Fe) やコバルト (Co) などの金属を結合剤として、炭化物粉末を焼結結合した合金を超硬合金と呼ぶ。超硬合金は高強度特性を有することから、切削用工具、鉄鋼の圧延用ロール、また近年では金型用材料としても注目を集めている。それらは主に粉末冶金法により最終形状に焼結して製造されるが、近年では超硬合金素材の多様化や製品形状の複雑化に伴い、研削加工による仕上げ加工や切削加工による中仕上げ加工が行われている。しかしながら、超硬合金は難削材であり、切削時には激しい工具摩耗が生じる。工具摩耗要因には超硬合金中の硬質粒子タングステンカーバイド (WC) による機械的な摩耗機構<sup>(1)</sup>が挙げられるが、WC 含有量の少ない超硬合金の切削でも工具摩耗が大きくなることが報告<sup>(2)</sup>されている。許ら<sup>(1)</sup>は、超硬合金の切削において機械的な摩耗機構と異なる摩耗要因が存在することを示唆しており、工具摩耗部の凝着物の脱落による摩耗機構の影響が推測される。

本研究では硬質粒子 WC による機械的な摩耗機構と凝着物の脱落による摩耗機構、それぞれが工具摩耗にどのように関係しているかを調べることを目的として WC 粒子径を統一し、Co 含有量の異なる超硬合金の旋削を行った。WC 粒子径を 2  $\mu\text{m}$  と 7  $\mu\text{m}$  の 2 種類、Co 含有量を 10, 15, 20 および 25% の 4 種類、計 8 種類の超硬合金を被削材として使用し、工具摩耗生成機構について詳細に調べた。

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 機械工学科 准教授

\*\*\* 機械工学科 教授

\*\*\*\* 本科 機械工学科

### 2. 実験装置および方法

Fig. 1 に示す NC 旋盤を用いて、WC 粒子径と Co 含有量の異なる 8 種類の超硬合金を端面旋削した。切削条件を Table 1 に示す。切削距離 30 m 間隔で工具逃げ面を観察し、切削距離 210 m まで実験を行った。ただし、PCD 工具を用いた乾式切削は逃げ面摩耗幅が 0.3 mm に達するまで旋削を続けた。観察には光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用した。

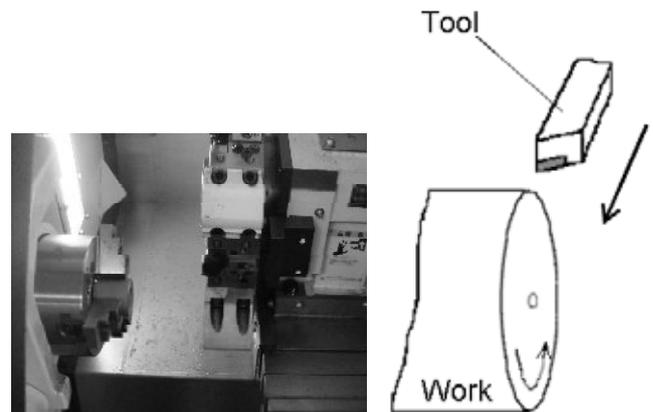


Fig. 1 NC lathe and operation area

Table 1 Cutting conditions

| Tool                 | PCD      | cBN |
|----------------------|----------|-----|
| Cutting speed(m/min) | 15       | 10  |
| Feed rate(mm/rev)    | 0.1      |     |
| Depth of cut (mm)    | 0.1      |     |
| Cutting method       | Dry, Wet | Dry |

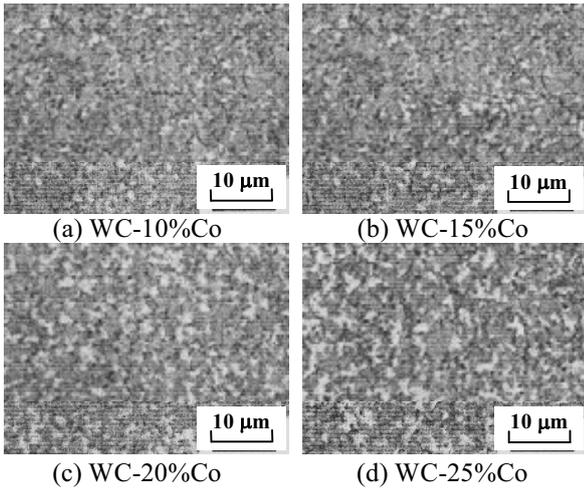


Fig. 2 Structures of cemented carbides (WC grain size : 2 μm)

Table 2 Mechanical properties of cemented carbides (WC grain size : 2 μm)

| Cemented carbides | Specific gravity (g/m <sup>3</sup> ) | Hardness (HRA) | Compressive strength (GPa) |
|-------------------|--------------------------------------|----------------|----------------------------|
| WC-10%Co          | 14.55                                | 89.4           | 3.57                       |
| WC-15%Co          | 14.05                                | 87.3           | 3.54                       |
| WC-20%Co          | 13.60                                | 85.4           | 3.49                       |
| WC-25%Co          | 13.15                                | 83.6           | 3.24                       |

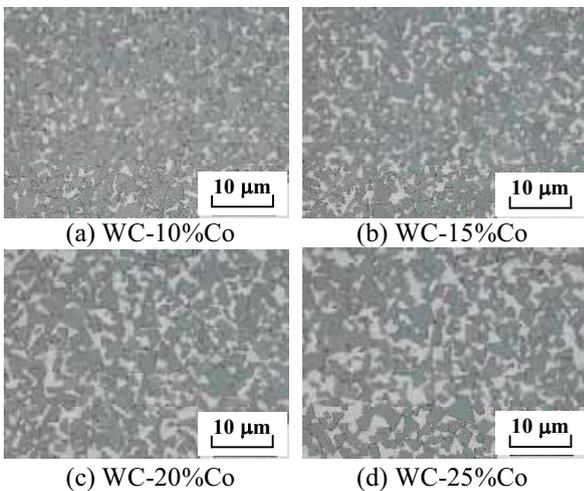


Fig. 3 Structures of cemented carbides (WC grain size : 7 μm)

Table 3 Mechanical properties of cemented carbides (WC grain size : 7 μm)

| Cemented carbides | Specific gravity (g/m <sup>3</sup> ) | Hardness (HRA) | Compressive strength (GPa) |
|-------------------|--------------------------------------|----------------|----------------------------|
| WC-10%Co          | 14.47                                | 86.3           | 3.02                       |
| WC-15%Co          | 13.98                                | 84.7           | 3.02                       |
| WC-20%Co          | 13.53                                | 82.5           | 2.83                       |
| WC-25%Co          | 13.10                                | 81.5           | 2.73                       |

**2.1 超硬合金** 被削材には WC 粒子径と Co 含有量が異なる 8 種類の超硬合金を使用した。超硬合金の WC 粒子径は平均して 2 μm と 7 μm に統一しており、それぞれ Co 含有量が 10, 15, 20, 25% である。以下、それぞれを WC-10%Co, WC-15%Co, WC-20%Co, WC-25%Co と表記する。被削材には全て内径 25 mm, 外径 50 mm の中空円筒材を使用した。

WC 粒子径 2 μm, 7 μm 超硬合金の光学顕微鏡による組織写真および機械的特性をそれぞれ Fig. 2, Fig. 3 と Table 2 と Table 3 に示す。

**2.2 工具** 工具には各工具材種がロウ付けされたスローアウェイチップを端面切削用ホルダ (Fig. 4) に取り付けしたものを用いた。それらの機械的特性について Table 4 に示す。焼結ダイヤモンド (PCD : Poly Crystalline Diamond) 工具は一般に広く使用されているものを、立方晶窒化ホウ素 (cBN : Cubic Boron Nitride) 工具には粒子径と結合相が異なる 4 種類を使用した。以下、cBN 工具はそれぞれ cBN1, cBN2, cBN3, cBN4 と表記する。なお、cBN2, cBN3, cBN4 工具には刃先にチャンファの加工が施されているものを用いた。

Table 4 Mechanical properties of tool materials

| Tool | Grain contents (Vol%) | Grain size (μm) | Bonding material | Hardness (Hv) | Transverse rupture strength (GPa) |
|------|-----------------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------------------------|
| PCD  | 91                    | 12.5            | Co               | 10000         | 1.7                               |
| cBN1 | 80-90                 | 3               | Co               | 3900-4200     | 0.95-1.10                         |
| cBN2 |                       |                 |                  |               |                                   |
| cBN3 | 50-60                 | 3               | TiN              | 3200-3400     | 0.95-1.10                         |
| cBN4 |                       | 2               |                  |               | 1.00-1.10                         |

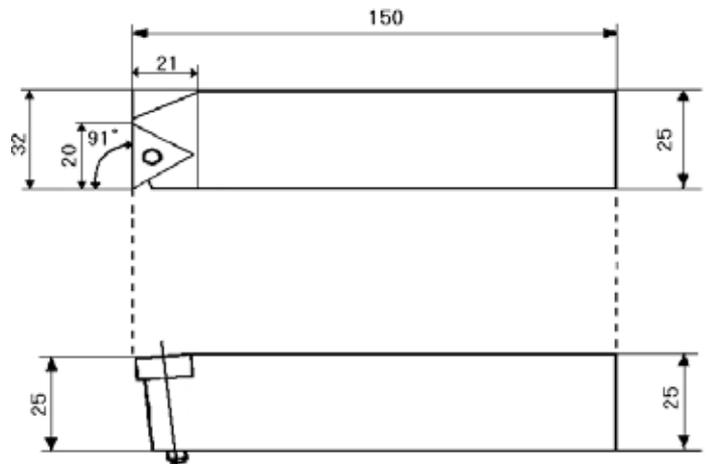


Fig. 4 Geometry of tool holder

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 PCD 工具・乾式切削

**3.1.1 工具逃げ面摩耗幅** WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$ , WC-25%Co 超硬合金を乾式切削したときの PCD 工具の逃げ面画像を Fig. 5 に例示する. 工具摩耗幅は切削距離 30 m 間隔で増加し, 摩耗形態としては切削方向に筋状となっていた.

PCD 工具を用いて, 4 種類の WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$  超硬合金を乾式切削し, 得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 6 に示す. 工具摩耗幅が 0.3 mm に達した時点工具寿命とした場合, WC-25%Co > WC-20%Co > WC-15%Co > WC-10%Co の順に工具寿命に到達した. WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削では Co 含有量の変化に伴って工具摩耗幅に差が見られたのに対して, WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削においては Co 含有量が変わっても工具摩耗幅にほぼ差は見られなかった. したがって WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削では Co に起因した凝着物の脱落による摩耗機構よりも WC 粒子に起因した機械的な摩耗機構の方が顕著に影響したと考えられる.

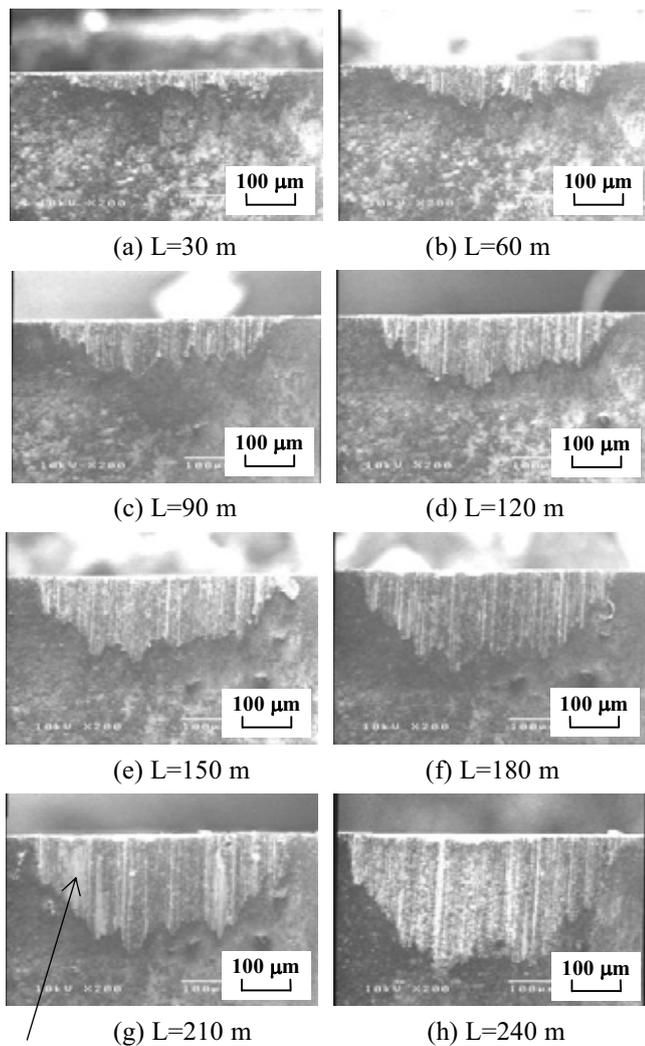


Fig. 5 SEM photographs of tool wear (WC grain size : 2  $\mu\text{m}$ , WC-25%Co, Dry)

Fig. 5(g)からも分かるように, 工具摩耗部には凝着物が見られる. 凝着物はどの条件下でも存在しており, その量は大きく変化している. すなわち, 摩耗は凝着物が着脱を繰り返すことにより増大したと考えられる.

PCD 工具を用いて, 4 種類の WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金を乾式切削し, 得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 7 に示す. この場合, 被削材が WC-15%Co > WC-25%Co > WC-20%Co > WC-10%Co の順に工具寿命に到達した. WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削では Co 含有量の変化に伴って工具摩耗幅に差が見られたのに対して, WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削においては Co 含有量が変わっても工具摩耗幅にほぼ差は見られなかった. したがって WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削では Co に起因した凝着物の脱落による摩耗機構よりも WC 粒子に起因した機械的な摩耗機構の方が顕著に影響したと考えられる.

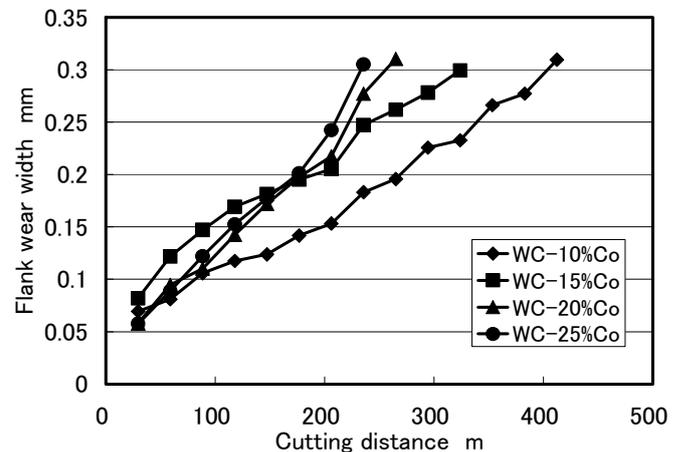


Fig. 6 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 2  $\mu\text{m}$ , PCD tool, Dry)

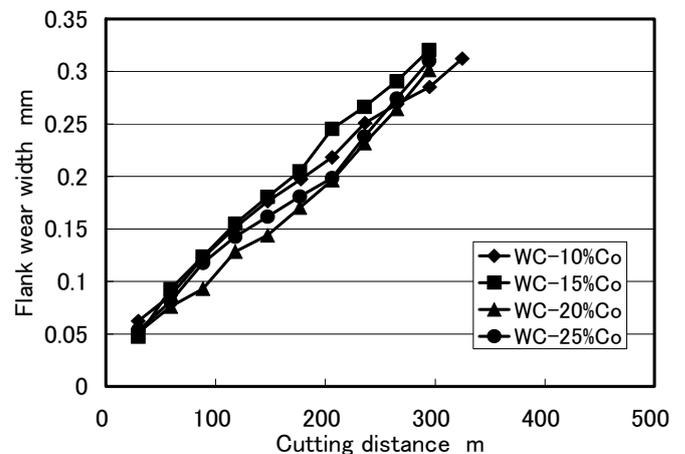


Fig. 7 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 7  $\mu\text{m}$ , PCD tool, Dry)

**3.1.2 工具逃げ面の凝着物** 切削後の工具摩耗部に凝着物が見られたことから、汎用の画像処理ソフトを用いて工具摩耗部の SEM 画像を二値化し、凝着面積および摩耗面積を測定した。得られた凝着面積を摩耗面積で除した凝着割合を求め、切削距離 30 m 間隔での凝着割合の変動について調べた。WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削における切削距離に対する凝着割合の変動量を Fig. 8 に示す。Fig. 8 から一回の実験で削られる切削距離 30 m の間に凝着割合が大きく変動し、凝着物の着脱が生じていたことが分かる。Fig. 9 では切削距離 30 m 間の凝着割合の最大変動量を示しているが、工具摩耗の大きかった WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$ , WC-20%Co と WC-25%Co 超硬合金では凝着割合の最大変動量が大きくなっていった。したがって、これらの被削材の切削では Co に起因した凝着物の脱落による摩耗機構が顕著に影響したことによって工具寿命が短くなったと考えられる。

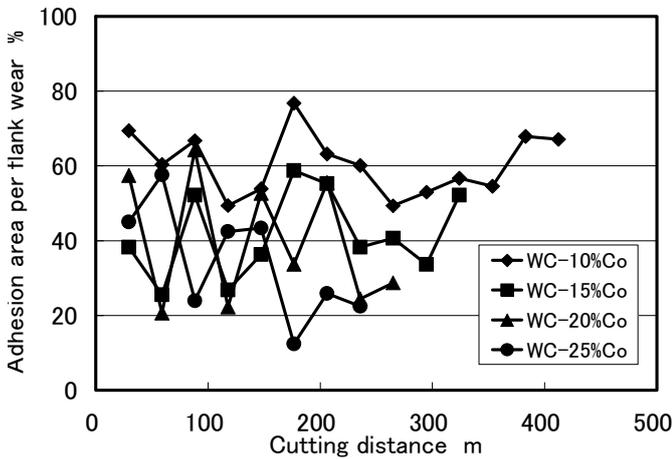


Fig. 8 Adhesion area per flank wear (WC grain size : 2  $\mu\text{m}$ , PCD tool, Dry)

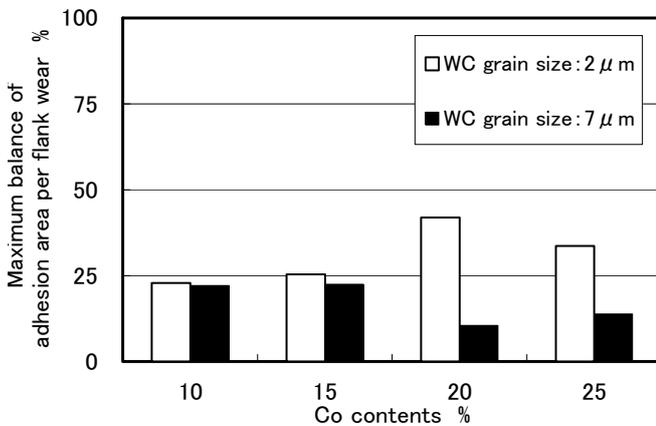


Fig. 9 Maximum balance of adhesion area per flank wear (PCD tool, Dry)

**3.1.3 仕上げ面粗さ** 切削距離 210 m における 8 種類の超硬合金の仕上げ面粗さを Fig. 10 に示す。仕上げ面には超硬合金の Co で覆われた層(被覆)の凝着が見られ、その凹凸が仕上げ面粗さに影響したと考えられる。

WC 粒子の割れによる影響を調べるため、切削後の超硬合金の仕上げ面観察を行った。しかし Fig. 11 (a) のように仕上げ表面には切削時に被覆した Co が存在し、WC 粒子を観察することが困難であった。そこで、Co を腐食する性質を持つメチルアルコールと硝酸の混合液を用いて、WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$ , WC-15%Co の仕上げ表面において Co の腐食を行った。腐食前後の仕上げ表面および腐食後に発見した WC 粒子の割れの写真を Fig. 11 (c) に示す。WC 粒子の割れは切削時に工具と接触することで WC 粒子が破碎されたと考えられ、ひっかき摩耗を引き起こす要因<sup>(3)</sup>の一つと言える。

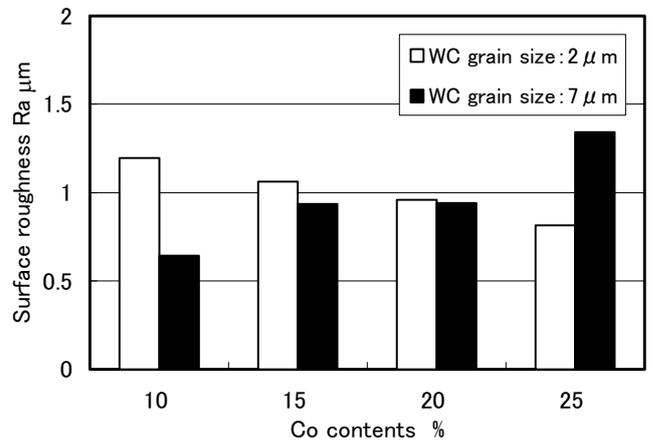


Fig. 10 Surface roughness (PCD tool, Dry, L=210 m)

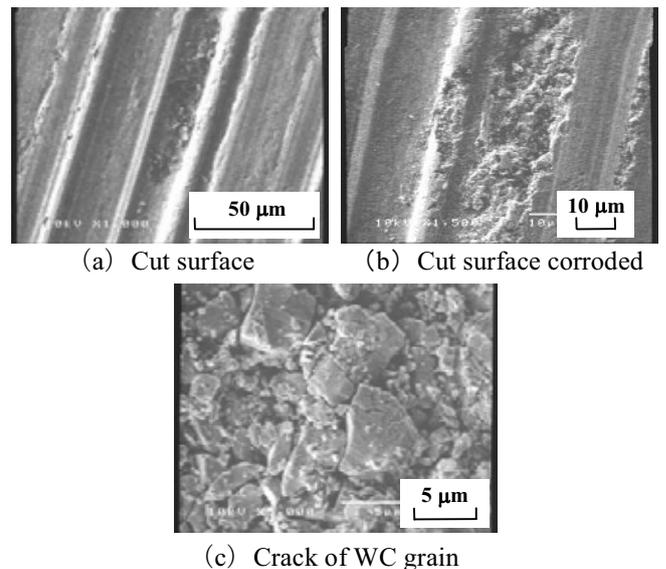


Fig. 11 Observation of cut surface and WC grain after cutting (WC grain size : 7  $\mu\text{m}$ , WC-15%CoPCD tool, Dry)

### 3.2 cBN 工具・乾式切削

**3.2.1 工具逃げ面摩耗幅と仕上げ面粗さ** cBN 工具を用いて、8 種類の超硬合金を乾式切削し、得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 11 と Fig. 12 に示す。2 種類の WC 粒子径どちらにおいても、切削距離 210 m での工具摩耗幅は WC-10%Co > WC-15%Co > WC-20%Co > WC-25%Co の順に大きかった。WC 含有量が多い超硬合金を切削するほど工具摩耗幅が大きくなったことから、WC 粒子による機械的な摩耗機構が顕著に影響したと考えられる。他の cBN 工具での結果は紙面の都合により割愛するが、それらの工具でも cBN1 工具と同様の傾向が見られた。

cBN1 工具を用いて、切削距離 210 m もしくは工具摩耗幅 0.3 mm に達した時点での 8 種類の超硬合金の仕上げ面粗さを Fig. 14 に示す。仕上げ面粗さは WC 粒子径に関係なく WC-10%Co > WC-15%Co > WC-20%Co > WC-25%Co の順に大きかった。工具摩耗幅も同様の順で大きかったことから、cBN1 工具では工具の摩耗状態が仕上げ面粗さに影響したことが分かった。

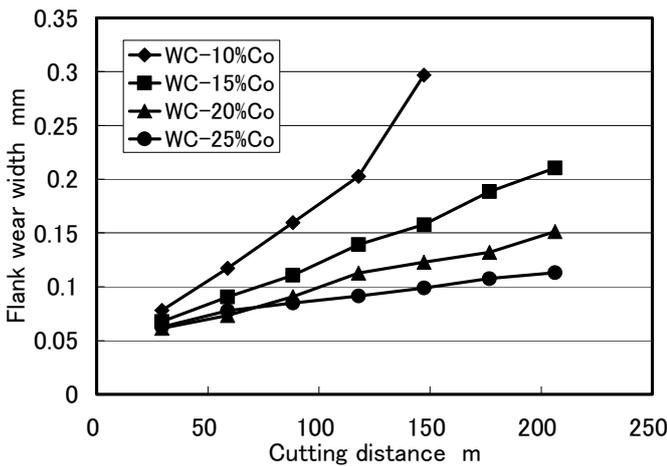


Fig. 12 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 2 μm, cBN tool, Dry)

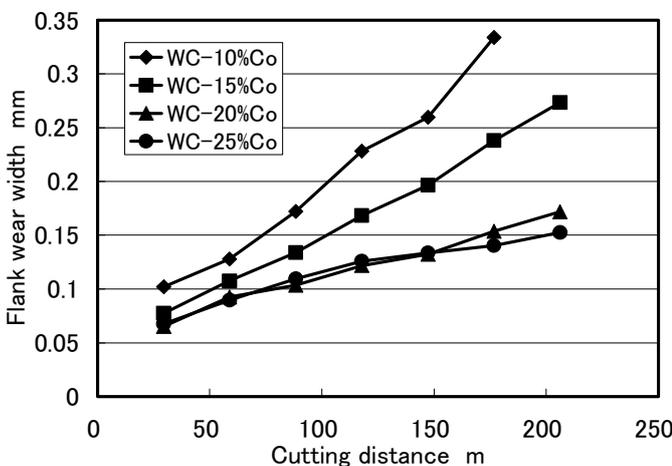


Fig. 13 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 7 μm, cBN tool, Dry)

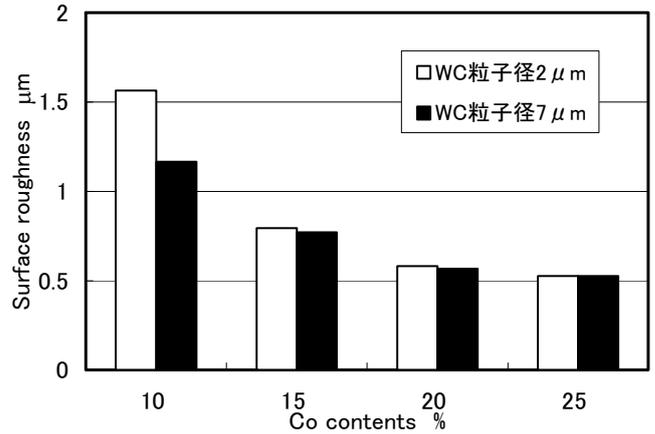


Fig. 14 Surface roughness (cBN tool, Dry, L=210 m or tool wear)

**3.2.2 cBN 工具と PCD 工具の比較** PCD 工具と 4 種類の cBN 工具を用いて、WC 粒子径 2 μm, WC-25%Co 超硬合金を切削し、得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 14 に示す。工具の初期摩耗は cBN3 > cBN4 > cBN2 > cBN1 > PCD の順に大きく、切削距離 30 m から切削距離 210 m までの工具摩耗幅の増加率は PCD 工具が最も大きかった。また、cBN 工具の中では cBN1 工具の摩耗幅が最も小さかったことから、刃先にチャンファの加工を施すと逆に工具寿命が短くなることが分かった。

PCD 工具を用いた WC 粒子径 2 μm 超硬合金の切削では、Co 含有量の違いによる初期摩耗に差は見られず、Co 含有量が増加するほど工具摩耗幅の増加率が大きくなった (Fig. 6)。一方、cBN 工具では Co 含有量が増加するほど工具摩耗幅が小さくなった (Fig. 12)。その結果、Co 含有量の多い超硬合金の切削では PCD 工具よりも cBN 工具の方が工具寿命が長くなる場合があり、切削条件によっては cBN 工具を用いた切削が有効<sup>(4)</sup>であることを示している。

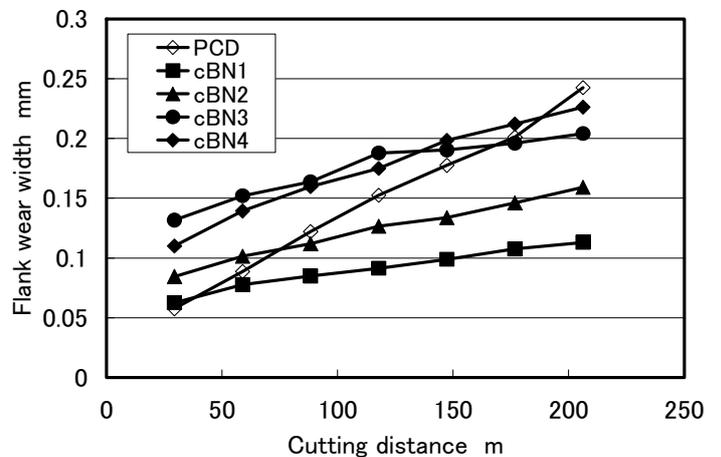


Fig. 15 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 2 μm, WC-25%Co, Dry)

**3.3 PCD 工具・湿式切削** PCD 工具を用いて、8 種類の超硬合金を湿式切削し、得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 15 に示す. WC 粒子径 2 μm と 7 μm 超硬合金の切削における工具摩耗幅を比較すると、大きさはほぼ同じであり、Co 含有量の影響についても同じ傾向となった。また、WC 粒子径 7 μm 超硬合金においては、乾式切削 (Fig. 7) と比較すると Co 含有量が増加するほど工具摩耗幅が大きくなる傾向にあることから、湿式切削では機械的な摩耗機構が軽減され、凝着による摩耗機構が顕著に影響したと考えられる。

一方、乾式切削と比較して WC 粒子径 7 μm, WC-10%Co 超硬合金の切削を除いて工具摩耗幅は増加した。許ら<sup>(5), (6)</sup>が行った冷風切削の実験においても同じく工具摩耗幅が増加したことから、湿式切削による冷却効果により工具摩耗幅が増大したと推測される。

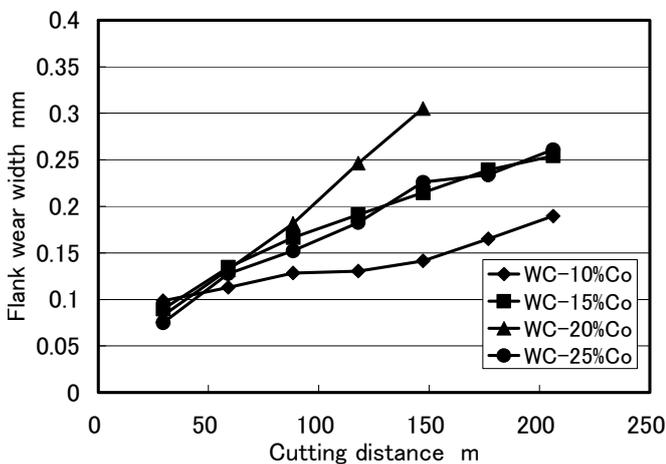


Fig. 16 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 2 μm, PCD tool, Wet)

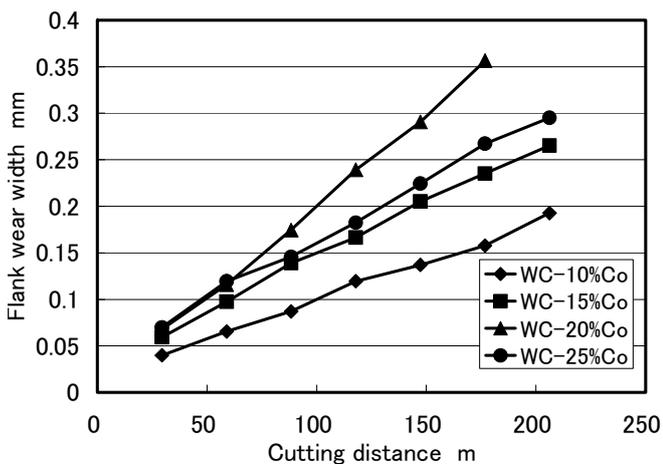


Fig. 17 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 7 μm, PCD tool, Wet)

#### 4. 結言

WC 粒子径を 2 μm と 7 μm に統一し、それぞれ WC-10%Co, WC-15%Co, WC-20%Co, WC-25%Co の計 8 種類の超硬合金を PCD 工具および 4 種類の cBN 工具を用いて端面切削した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) PCD 工具を用いた WC 粒子径 2 μm の超硬合金の乾式切削では、Co 含有量が多い順に工具摩耗幅が増加した。工具摩耗幅が大きかった WC-20%Co, WC-25%Co 超硬合金の切削では摩耗部の凝着物の凝着割合の変動が大きく、凝着物の脱落による摩耗機構が顕著に影響したと考えられる。
- (2) PCD 工具を用いた WC 粒子径 7 μm の超硬合金の乾式切削では、Co 含有量が変わっても工具摩耗幅に差は見られなかった。WC-15%Co 超硬合金の仕上げ面では WC 粒子の割れが生じていたことから、機械的な摩耗機構が主たる摩耗要因であったと考えられる。
- (3) PCD 工具を用いた湿式切削では、WC 粒子径それぞれについて差は見られず、工具摩耗幅は乾式切削より大きくなる傾向があった。
- (4) 切削条件によって PCD 工具よりも cBN 工具を用いた方が工具寿命が長くなる場合があった。

#### 謝辞

本研究で使用した超硬合金は、(株)シルバーロイのご協力により作成して頂きましたことを付記し、謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) 許盛中, 宮本猛, 花崎伸作, 藤原順介: 超硬合金の切削に関する研究—旋削における PCD 工具の摩耗機構と切削抵抗—, 精密工学会誌論文集, vol69, No.12, pp. 1724-1728, 2003.
- (2) 天野祥毅, 藤原順介: 耐摩耗・耐衝撃工具用超硬合金の切削加工に関する研究, 大阪大学, 平成 16 年度修士論文.
- (3) 許盛中, 宮本猛, 花崎伸作, 藤原順介, : 耐摩耗・耐衝撃工具用超硬合金の SEM 内微小切削, 精密工学会誌論文集, Vo71, No7, pp. 926-930, 2005.
- (4) 加工データファイル, (財) 機械振興協会技術研究所, 95-0325, 1997.
- (5) 許盛中, 宮本猛, 花崎伸作, 藤原順介, 天野祥毅: 耐摩耗工具用超硬合金における切削油の効果, 精密工学会誌論文集, Vo73, No8, pp. 896-900, 2007.
- (6) Miyamoto, T. et al. : Influence of WC and Co on Machinability in Mist and Dry Cutting of Cemented Carbides, ICPMT, pp. 17-20, 2006.

# 高面圧すべり接触における水溶性加工油添加剤と

## 極圧添加剤のトライボロジー特性(1)

### -実用品の性能に関する検討-

山口 永人\*・大山雄介\*・八木大輔\*・奥津晶彦\*\*・中辻 武\*\*\*

Tribological Properties of Water-soluble Processing Oil Additives and Extreme Pressure Additives under High Pressure in Sliding Contact(1)

Tribological discussion on the performance of useful articles

Eito YAMAGUCHI\*, Yusuke OYAMA\*, Daisuke YAGI\*, Akihiko OKUTSU\*\*,  
Takeshi NAKATSUJI\*\*\*

#### ABSTRACT

Boundary lubrication can easily be broken to yield severe adhesion when subjected to high pressure sliding contact. In such a case, it is easy to fail into the state yielding severe wear and scuffing under thermal influence. In our study, the processing oils blending additives of Amine's for oil having oiliness to dissolve in water were used to protect these failures.

*Keywords*: water lubrication, additives, protect, severe wear and scuffing

#### 1. はじめに

機械要素の接触面において流体潤滑では滑っている2面間に摩擦はないが、急速な加減速や荷重増加などの運転条件に変化等が生じる場合、容易に潤滑油膜が破断され乾燥摩擦に近い厳しい潤滑状態になり、完全流体状態を維持するのは困難である。そして高面圧状態では境界潤滑や金属接触が支配的な状態となる。接触面が境界潤滑に至った時には、摩擦や焼きつきが生じやすい。圧延や深絞り等、加工条件が厳しい場合には、そのような状態に陥りやすい。一般にこのような加工油剤としては、鉱油（以下、不水とする）の加工油剤に極圧添加剤を混入したものが用いられる。しかしながら、不水の加工油剤は、廃油処理時に二酸化炭素を発生する。また、これ

は、石油から精製されるものであり、化石燃料等の資源を守る意味からも、できるだけ不水の加工油剤は使用しない方がよいと思われる。そこで、本報では環境に良いと思われる水溶性加工油剤がこのような厳しい加工条件でも適用可能かどうかについての検討を行った。加工油剤としては、水にリシノレイン酸、メルカプタン系脂肪酸およびジズルフィド系極圧添加剤を混入したものをを用いた。リシノレイン酸は、接触面への物理吸着を期待してOH基が、脂肪酸は化学吸着を期待してCOOH基が、ジズルフィド系極圧添加剤は接触面との化学反応を期待してSが、それぞれ含まれている。また、水溶性加工油剤は冷却効果も望める。

実験は加工油剤の一般的指標を得るため、高速四球形摩擦試験機を用い、すべり速度一定、荷重を高荷重に設定し、上述の趣旨に沿うよう原液、5倍、10倍希釈による特性の変化について検討<sup>(1)</sup>した。

\* 神戸高専専攻科 機械システム工学専攻

\*\* (株)大和化成工業

\*\*\* 神戸高専機械工学科 教授

## 2. 実験装置および実験方法

本研究には、図1に示されるシェル式高速四球形摩擦試験機が用いられる。これは主に、試験部分、立軸駆動装置、負荷装置、計測装置、操作盤から構成されている。また図1の試験部分の試料油容器を拡大したのが図2である。荷重は油圧によって負荷され、オイルカップを固



図1 シェル式高速四球形摩擦試験機

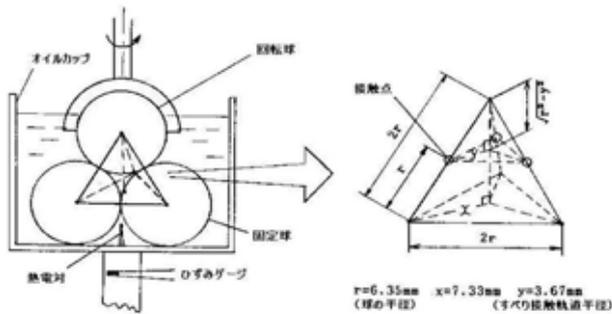


図2 試験装置主要部

定しているトーションバーに貼り付けられたひずみゲージによって摩擦係数を測定する。球は直径1/2インチSUJ2JIS1級の高炭素クロム軸受鋼球、表面粗さ(算術平均高さ)は0.01[ $\mu\text{m}$ ]、表面のピッカース硬度は7840HVである。以下に今回の実験に用いる試料油の成分の表を示す。

表1 試料油(ダイヤン系統)の成分

|                      | 300 E | 500 E | SL200 |
|----------------------|-------|-------|-------|
| 水                    | 74.3% | 67%   | 78%   |
| リシノレイン酸(OH基)         | 19%   | 20%   | -     |
| メルカプタン系脂肪酸(COOH基)    | -     | -     | 15%   |
| メルカプタン系防腐剤           | 1%    | 1%    | 1%    |
| 脂肪酸アミン系防腐剤           | 0.5%  | 1%    | 1%    |
| アミン                  | 5%    | 7%    | 5%    |
| 消泡剤                  | -     | -     | 極微量   |
| ジズルフィド系極圧添加剤         | -     | 4%    | -     |
| 増粘剤(ポリエチレンオキサ<br>イト) | 0.2%  | -     | -     |
| 界面活性剤                | -     | -     | -     |

実験はすべり速度  $V = 0.46[\text{m/s}]$ 、単位球あたりの垂直荷重  $P$  は  $681[\text{N}]$ で行った。そのときの荷重比 ( $= \text{max} / \text{HV}$ ;  $\text{max}$ =最大ヘルツ応力[MPa],  $\text{HV}$ =球のピッカース硬度[MPa])は約0.7で、かなりの高荷重領域である。試験時間はJIS法を採用し60秒とした。

## 3. 実験結果および考察

図3~8に代表例として、それぞれの加工油における摩擦係数の5倍,10倍希釈の結果を示す。図9には原液,5倍,10倍希釈の摩耗径の測定結果を示す。

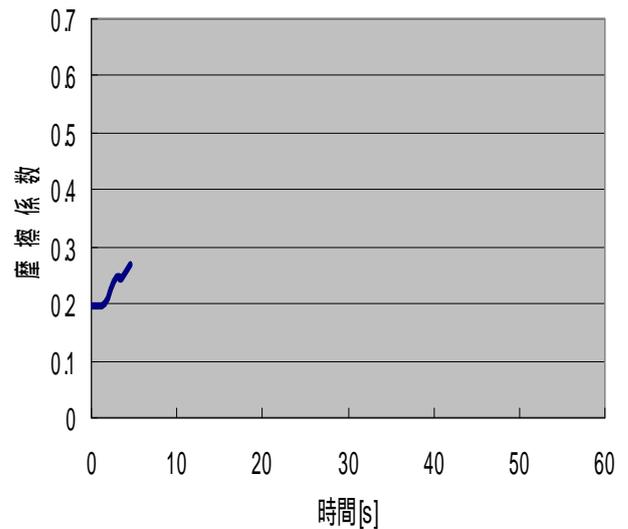


図3 ダイヤン300 E (5倍希釈)

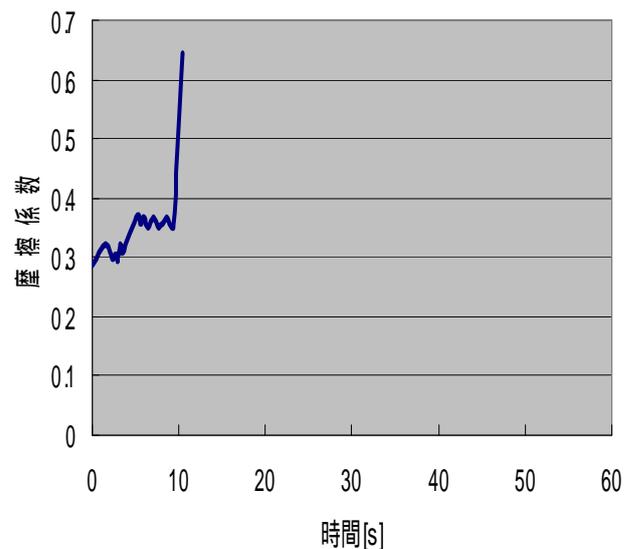


図4 ダイヤン300 E (10倍希釈)

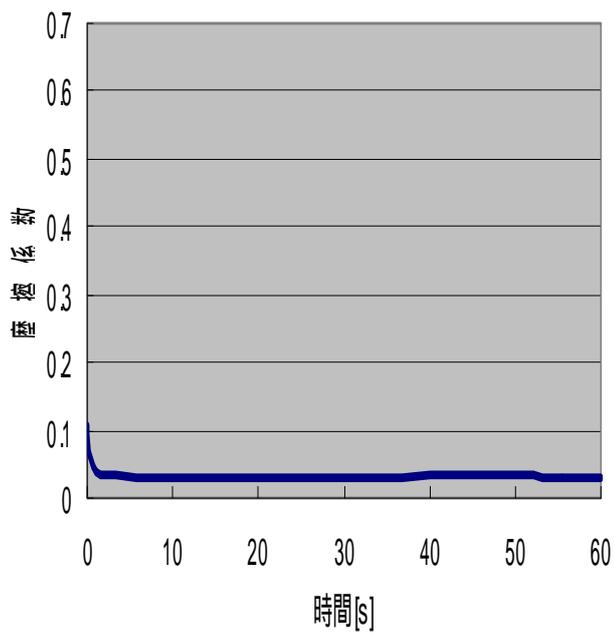


図5 ダイアソ 501 E (5倍希釈)

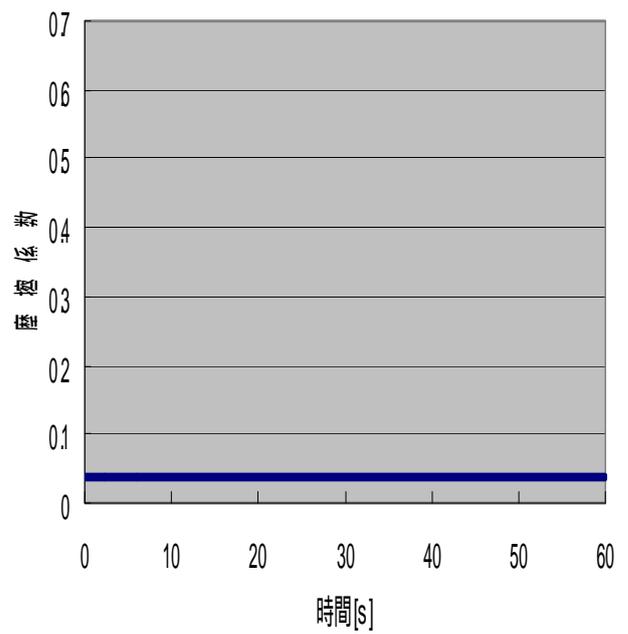


図7 SL200(5倍希釈)

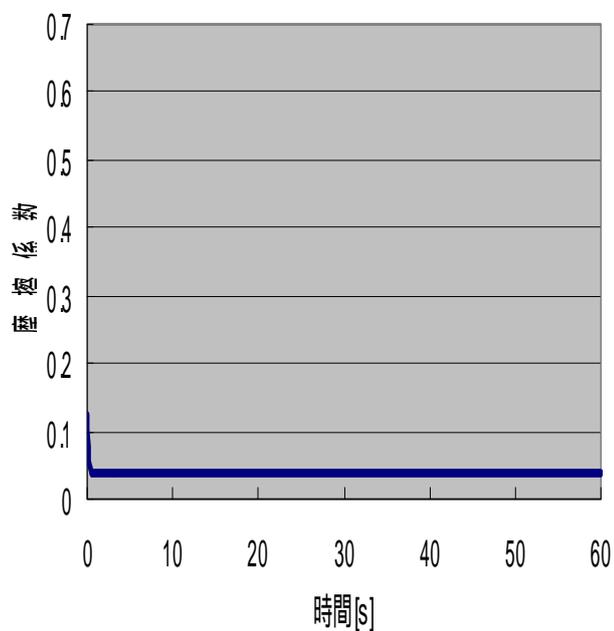


図6 ダイアソ 501 E (10倍希釈)

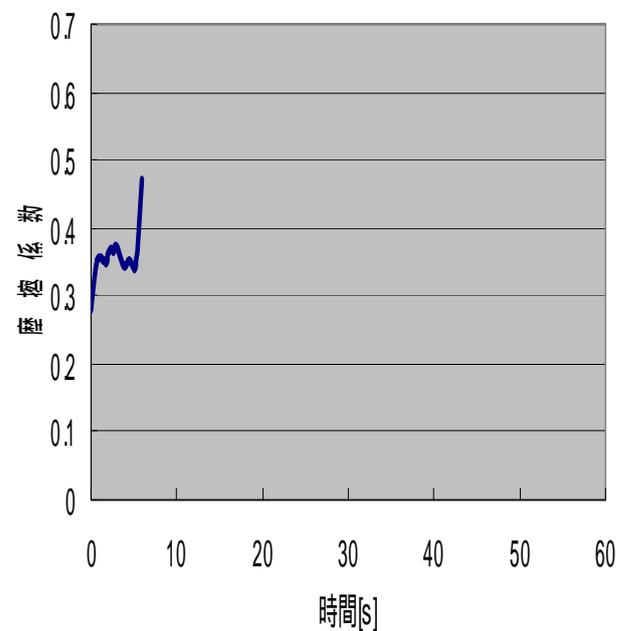


図8 SL200(10倍希釈)

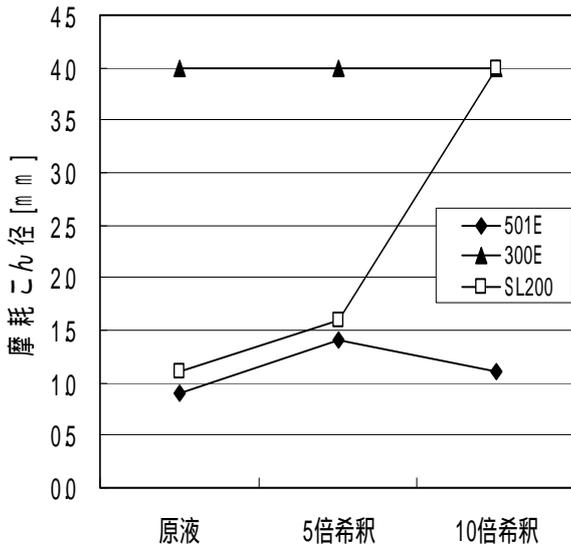


図9 摩耗こん径の比較( 0.7)

図3と図4より300Eは、作用直後より0.2や0.3の高い摩擦係数値を示し、2面間が凝着(摩擦係数が0.1を越えると金属接触に入る)していることが分かる。これは、5倍希釈と10倍希釈の結果であるが、希釈無しの場合も同様であった。図5と図6より500Eは、作用直後に0.1の摩擦係数値を示すが、すぐに0.08以下の境界潤滑の値を示すようになり、十分潤滑された状態に至っている。これは、希釈無しの場合も同様であった。図7と図8より、SL-200は、5倍希釈では作用直後より境界潤滑の摩擦係数値を示し、非常に良好な潤滑状態を示したが、10倍希釈では凝着を生じた。この場合、希釈無しは5倍希釈と同様の結果を示した。

したがって、摩擦係数値から見ると、OH基が主体である300Eは、その油性剤としての効果が低いと言える。それに比較してCOOH基が主体であるSL200は、油性剤の物理吸着以外に化学吸着が期待でき、より効果を発揮したと考えられる。価格の点では、COOH基を添加したSL-200の方が高価であり、より安価なOH基入り油剤にジスルフィド(硫黄)系極圧添加剤を混入すれば、これまた、高価になるが、これらの結果より、SL200を5倍希釈で用いるか、硫黄系添加剤を混入した500Eを10倍希釈で用いれば、より安価になり実用的だと思われる。

次に、凝着が摩耗こん径と比例するとみなして、摩耗こん径の観点から、これらの油性剤や極圧添加剤の効果について考察する。このような高荷重領域では、荷重によって球自体も塑性変形する。したがって、避けられない摩耗こん径dは、

$$d = \{4P / (\sigma_y)\}^{1/2}, \quad P = \text{垂直荷重}$$

$$\sigma_y = \text{球の降伏応力} = (1/3)HV$$

より、約0.67mmとなる。この値と図9を比較すると、約1mm~1.5mm程度の摩耗こん径であれば、摩擦(0.1程度の摩擦係数)によるジャンクションの成長を考慮しても、それほど凝着していないと言える。

300Eは希釈なし、希釈ありのいずれの場合も凝着を起こし摩耗こん径が大きくなった。300Eは表1に示すように、リシノレイン酸が主体の潤滑油であり、これによりOH基による油性剤の効果が低いと考えられる。501Eは希釈なし、希釈ありのいずれの場合も最もよい性能を示した。これは摩擦係数の結果より、S系の極圧添加剤が作用したからだと思われる。2面間の状態が最も安定していた。SL-200は表1に示すように、メルカプタン系添加剤が主体の加工油であり、5倍希釈までは、501Eと同様優れた特性を示した。これによりCOOH基による油性剤の効果はOH基よりも優れていると思われる。しかしながら、10倍希釈になると焼付きが生じた。したがって5倍希釈までは、COOH基による油性剤の効果があったと思われる。これは、COOH基による化学吸着性の効果と思われる。したがって501Eの10倍希釈とSL200の5倍希釈までが効果があったといえる。

#### 4. おわりに

油性添加剤や極圧添加剤が混入された、市販の深絞り用水溶性加工油剤について、その性能の比較を行った。その結果、OH基を主体とする300Eについては、このような高荷重下の加工に適していないことが分かった。COOH基を主体とするSL200は5倍希釈まで適用できることがわかった。OH基を主体とするが、そこに硫黄系極圧添加剤を混入すれば、10倍希釈しても十分に実用に供せられることがわかった。

このように、水溶性加工油剤の厳しい加工のもとにおける適用の可能性について検討したが、不水に代わって、適用できる可能性を見出した。

#### 参考文献

(1) Takeshi NAKATSUJI, Yusuke OYAMA, Daisuke YAGI and Akihiko OKUTSU: "Tribological Properties of Water-soluble Processing Oil Additives and Extreme Pressure Additives under High Pressure in Sliding Contact", Proceeding of CJGHMTMD-2008, pp222-227

# 高面圧すべり接触における水溶性加工油添加剤と 極圧添加剤のトライボロジー特性(2) 開発油剤の性能に関する研究

山口 永人\*・八木大輔\*・大山雄介\*・奥津晶彦\*\*・中辻 武\*\*\*

Tribological Properties of Water-soluble Processing Oil Additives and Extreme  
Pressure Additives  
under High Pressure in Sliding Contact(2)  
—Tribological discussion on the performance of developing oil additives—

Eito YAMAGUCHI\*, Daisuke YAGI\*, Yusuke OYAMA\*, Akihiko OKUTSU\*\*,  
Takeshi NAKATSUJI\*\*\*

## ABSTRACT

Under high pressure sliding contact, it is difficult to keep fluid-lubrication and, the contact surfaces can easily become boundary-lubrication. In such a case, it is easy to fall into the state yielding extreme wear and scuffing from thermal influence. In our researches, the processing oils blending additives fatty acid of Amine were used to be able to dissolve the additives having hydroxyl in water. Then, we tried to find the suitable processing oil for deep drawing.

*Keywords*: tribology, water lubrication, additives, high pressure, effect of dilution

## 1.はじめに

歯車や軸受等の機械要素や機械加工面などの接触面において、急速な加減速や荷重増加などの運転条件の変化等が生じる場合、容易に潤滑膜は破断され、乾燥摩擦に近い厳しい潤滑状態となる。特に高面圧状態では完全流体潤滑状態を維持するのは困難であり、境界潤滑や金属接触が支配的な状態となる。加工面においても同様で、圧延や板金プレス加工、深絞り等における加工条件が厳しい場合には、熱的影響により、極度な摩耗や焼付が生じやすい状態に陥りやすい。そのため加工油剤としては、金属接触を防止する何らかの添加剤が必要であり、特に深絞りでは発熱が大きいので、その除去も必要である。一般にこのような加工油剤としては、鉱油（以下、不水とする）に極圧添加剤を混入したものが用いられる。し

かしながら、不水の加工油剤は、廃油処理時に二酸化炭素を発生する。また、これは、石油から精製されるものであり、化石燃料等の資源を守る意味からも、できるだけ不水の加工油剤は使用しない方がよいと思われる。そこで、本報では環境に良いと思われる水溶性加工油剤がこのような厳しい加工条件でも使用可能かどうかについての検討を行った。第1報は市販の加工油剤の効果を報告したが、本報ではその結果をさらに深めた開発加工油剤の結果について報告する。

## 2.実験装置および実験方法

本研究では、図1に示されるシェル式高速四球型摩擦試験機を使用した。また、試験機の主要部である、試料油容器を拡大したものを図2に示す。試験球は回転球、固定球ともに直径1/2インチSUJ2 JIS1級の高炭素クロム軸受用鋼球を用いる。試験球の表面粗さ(算術平均高さ)は0.01[ $\mu\text{m}$ ]、ピッカース硬度は7840[HV]である。装

\* 神戸高専専攻科 機械システム工学専攻

\*\* (株)大和化成工業

\*\*\* 神戸高専機械工学科 教授

置図などは一報に示すとおりである。試験機の主要部であるオイルカップには3個の固定球と固定球の上に1個の回転球が設置されている。また、オイルカップ内は潤滑油で満たされており、荷重は下から油圧によって負荷される。

オイルカップを固定しているトーションバーに貼り付けられたひずみゲージによって、摩擦係数の算出に必要なひずみ量を測定する。



図1 シェル式高速四球形摩擦試験機

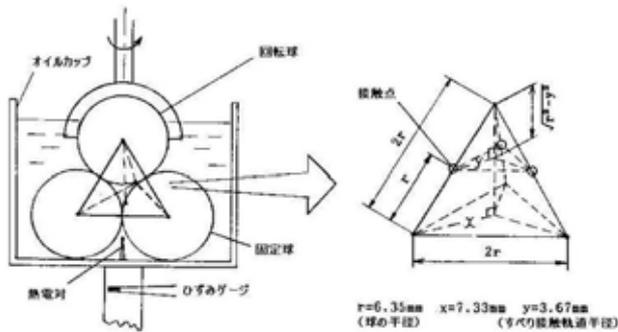


図2 試験装置主要部

摩擦係数の算出には、必要なひずみ量をペンレコーダーに記録させ、摩擦係数  $\mu$  は次式によって求めた。

$$\mu = \frac{T}{0.011P} \quad (1)$$

$\mu$  : 摩擦係数      T : 摩擦モーメント [N・m]  
P : 単位球あたりの垂直荷重 [N]

表1 試料油の成分

|            | 市販油剤<br>300E | 開発油剤<br>300S |
|------------|--------------|--------------|
| 水          | 74.3%        | 59%          |
| OH基        | 19%          | 15%          |
| 防腐剤メルカプタン系 | 1%           | 1%           |
| 防腐剤脂肪酸アミン系 | 0.5%         | 1%           |
| アミン        | 5%           | 5%           |
| 増粘剤        | 0.2%         | 1%           |
| 界面活性剤ノニオン系 | -            | 18%          |

表1に示す開発油剤 300S は、面との吸着性の向上を期待して、界面活性剤を新たに添加した。また、ダイヤモンド 300S-Sには耐焼付き性を期待して、ジスルフィド（硫黄）系極圧添加剤が5%、ダイヤモンド 300S・ZnPには耐摩耗性を期待してZnP系極圧添加剤が5%含まれている。

実験はすべり速度  $V_s=0.46[m/s]$  とし、単位球あたりの垂直荷重 P は 681[N] で行った。荷重比  $\alpha$  は以下に示す式より、求めることができる。

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{HV} \quad (2)$$

ただし、

$\sigma_{max}$  : 最大ヘルツ応力 [MPa]  
HV : 球のビッカース硬度 [MPa]

今回高荷重領域である、 $\alpha=0.70$  で実験を行った。また、試験時間は60秒とした。

### 3. 実験に関わる原理

(1) 実験における目標摩擦係数と境界潤滑

図3に相対運動している接触2面間の潤滑状態を示す。

この潤滑状態は摩擦係数により次のように区分される。本研究では、境界潤滑の代表値である摩擦係数 $\mu$ が0.08以下になることを目標としている。

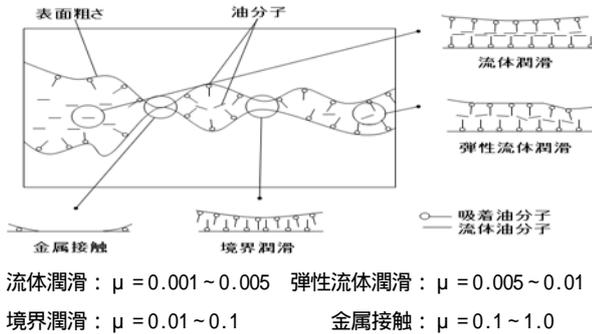


図3 潤滑状態の種類

(2)境界潤滑における油性と油膜強度

油性とは、境界潤滑状態において金属表面に油分子が物理吸着または化学吸着膜などを構成して摩擦を減少させる性質をいう。油性が高いとは、金属表面にこのような吸着膜を形成して摩擦を減少させる能力が高いことをいう。摩擦を減少させる要因となる物理吸着、化学吸着、化学反応を模式図を用いて順に説明する。

a)物理吸着と化学吸着

油性を高めるために、油に油性剤を添加するが、油性剤には物理吸着を生じる OH 基と化学吸着を生じる COOH 基がある。物理吸着とは潤滑剤と金属表面が電気的に結合することである。一般に可逆的であり、熱によって脱離するので低摩擦発生条件の場合に限られる。物理吸着の模式図を図4に示す。

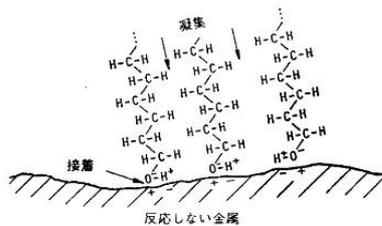


図4 物理吸着の模式図

化学吸着とは、潤滑剤の分子が化学結合し、金属石けんの膜を形成する。これは一般的に可逆的であり、化学吸着膜による潤滑は中程度の荷重、温度、すべり速度で可能であり、過酷な運転条件では膜は破断する。化学吸着の模式図を図5に示す。

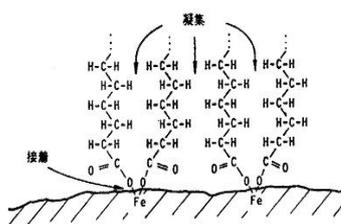


図5 化学吸着の模式図

b)化学反応

さらに油性を高めるために、極圧添加剤を添加する。多くの極圧添加剤は、硫黄S、リンP、塩素CLを含んでおり、熱によって金属と反応して硫化物、リン酸化物、塩化物といった融点の高い化合物を形成する。これは物理吸着膜や化学吸着膜よりも安定であり、高荷重、高温、高すべり速度条件に適している。硫黄系極圧添加剤は硫化ラードがよく用いられ、耐焼付き性に優れている。リン系極圧添加剤は、アミノフォスフェートがよく用いられ、耐摩耗性に優れている。また、2種類を混ぜたものもよく用いられる。それは自動車用である。さらに良好な潤滑作用が得られるものとしてCL-P系がある。これは塩素化パラフィンが瞬時に下地と反応して、塩化鉄皮膜を形成してそこにリンが溶解して、すぐに下地の鉄と反応するという性質を有する。しかし、廃油処理のときにダイオキシン発生の問題があり、実用的ではない。化学反応の模式図を図6に示す。

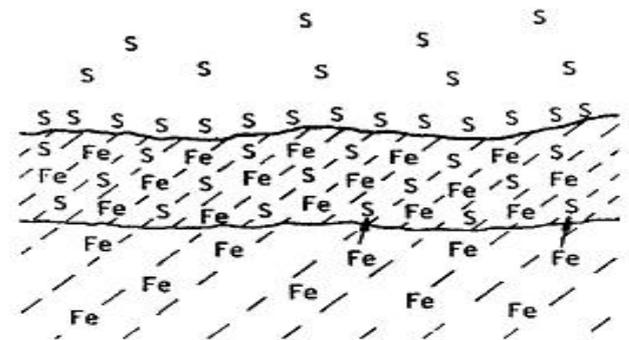


図6 化学反応の模式図

4.実験結果および考察

図7~9にそれぞれの潤滑油における摩擦係数の実験結果を原液、5倍希釈、10倍希釈と希釈ごとに示す。また、図10にそれぞれの希釈における摩耗こん径の測定結果を示す。

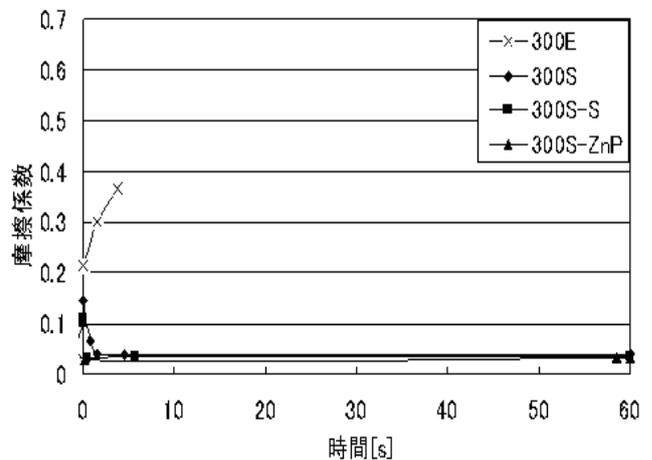


図7 原液における摩擦係数の比較

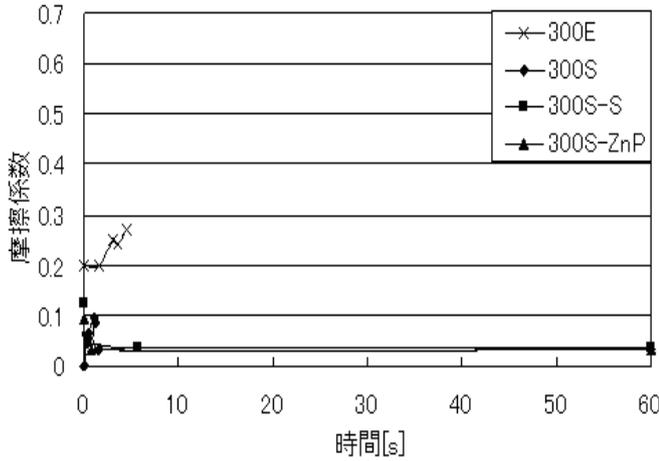


図8 5倍希釈における摩擦係数の比較

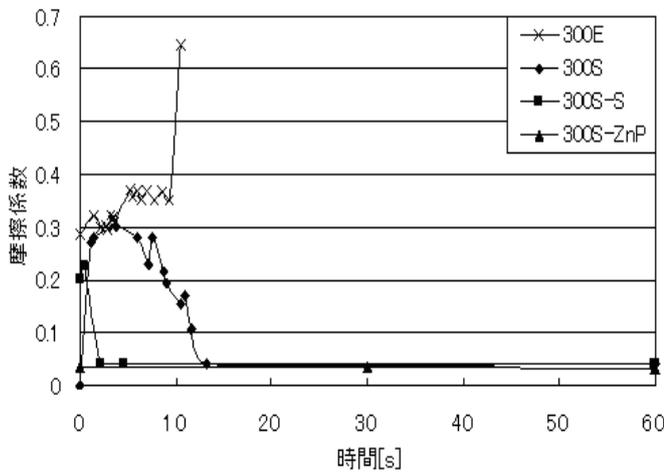


図9 10倍希釈における摩擦係数の比較

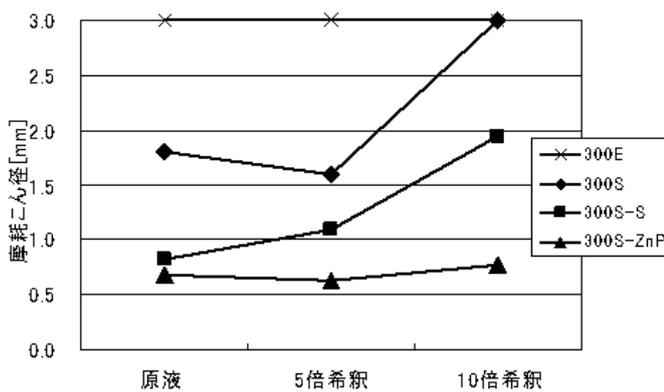


図10 摩耗こん径による比較

300Eは、原液、希釈を行った場合いずれも凝着を起こした。これは表1に示すように300Eはソルフィン酸主体の潤滑油であり、OH基による油性剤の効果はほとんどないと考えられる。300Sは原液、5倍希釈の場合において良好な摩擦係数の結果が得られた。これは、ノニオン系界面

活性剤により、水と潤滑油の親和性が増すことによって、接触面に添加剤が十分吸着したためだと考えられる。また、図10に示す摩耗こん径の比較からも原液と5倍希釈においては、低い値を示し界面活性剤の効果と思われる良好な結果となった。10倍希釈では、界面活性剤の効果はほぼなくなり、凝着を起こした。300S-Sは原液、5倍希釈において良い性能を示した。10倍希釈においても、ほかの希釈に比べて良好とはいえないが、ジスルフィド系極圧添加剤が添加されていない300Sが凝着したのに対し、凝着は起こさなかった。これはジスルフィド系極圧添加剤によって、2面間に硫化鉄被膜が形成され、金属接触状態が緩和されたためである。第1報に示した、塑性変形による避けられない摩耗こん径  $d = 0.67\text{mm}$  と比較しても、300S-ZnPはその程度の摩耗こん径を示していることから、300S-ZnPは全ての希釈において良好な結果を示し、今回使用した潤滑油の中で最も良い性能が得られた。これは300S-ZnPにはZnP系極圧添加剤が含まれているため、2面間にリン酸鉄被膜が形成され、金属接触が緩和されたためである。また、ZnP系極圧添加剤はジスルフィド系極圧添加剤よりも耐摩耗性に優れているため、5倍や10倍希釈の場合も摩擦係数、摩耗こん径ともに低い値になったと考えられる。また、この摩耗こん径の値は、第1報の500Eの値よりも小さく、300S-ZnPの開発油剤は、優れた摩擦摩耗特性を示していると言える。

### 5. おわりに

市販されている潤滑油と、その潤滑油に界面活性剤や極圧添加剤を添加している現在開発中の潤滑油の性能比較実験を行った。OH基の油性剤のみでは、高荷重に耐えることができず、界面活性剤、さらに極圧添加剤を添加することにより、性能が飛躍的に上昇することがわかった。とくに、界面活性剤が添加され、ZnP極圧添加剤が添加された、5倍や10倍希釈の300S-ZnPは、コストの面から考慮しても、十分な性能があることがわかった。以上の結果より、本開発の水溶性加工油剤は厳しい加工下において、不水に代わって十分適用できる可能性があることを見出した。

謝辞：以上の研究は、科研費(21560156)の助成を受けたものである。

### 参考文献

Daisuke YAGI, Yusuke OYAMA, Takeshi NAKTSUJI and Akihiko OKUTSU: "Tribological Properties of Water-soluble Processing Oil Additives and Extreme Pressure Additives under High Pressure in Sliding Contact (2)", Proceedings of CJIGHMTMD-2008, pp239-244

# プロパーな近似 DVDFB による柔軟宇宙構造物の 周波数依存型評価関数に対する最適制御

小林 洋二\*, 鹿田 哲生\*\*, 姜 貴暢\*\*\*, 山中 貴裕\*\*\*\*

## Optimal Control for Flexible Space Structures by a Proper Approximation of DVDFB with a Frequency Dependent Cost Function

Yohji KOBAYASHI\*, Tetsuo SHIKATA\*\*,  
Kuichang KANG\*\*\*, and Takahiro YAMANAKA\*\*\*\*

### ABSTRACT

This paper considers robust synthesis of optimal control for flexible space structures with collocated sensors and actuators. The idea of direct velocity and displacement feedback (DVDFB) is adopted. A filter of the relative degree 1 is introduced at the input channel to approximate DVDFB by a proper controller for implementation. The proper approximation of DVDFB is employed for robustness of optimal control against high frequency residual modes which are usually neglected in low dimensional models for control system design. It is shown that the overall closed-loop system becomes optimal for a frequency dependent quadratic cost function by appropriately choosing the filter parameters and the DVDFB gains. In the cost function, the weight on the control input increases with no bound in the high frequency range to suppress the control spillover to the residual modes.

*Keywords:* flexible space structures, displacement output feedback, optimal control, robust control

### 1. はじめに

宇宙太陽発電衛星<sup>(1),(2)</sup>のような大型宇宙構造物においては、打上げコスト削減のために構造物本体の軽量化が図られる。その結果、宇宙構造物は柔軟構造物となり、無数の振動モードをもつことになる。このような柔軟宇宙構造物の位置と姿勢を制御する手法として、これまでにセンサとアクチュエータを同位置・同方向に配置(コロケーション)する前提のもとで、速度と変位の静的出力フィードバックを施す Direct Velocity and Displacement Feedback (DVDFB) 制御<sup>(3)</sup>が提案されている。この DVDFB は、宇宙構造物の特性パラメータの不確かさに対して、閉ループシステムをロバスト安定化できるだけでなく、フィードバックゲインを適当に定めることにより、閉ループシステムをある二次形式評価関数に対して最適レギュレータにて

きるなど優れた性質をもっている<sup>(3)</sup>。しかしながら、DVDFB を実装するためには、変位センサと速度センサの両方が必要となり、これはコストと信頼性の面から好ましくない。一方、柔軟宇宙構造物の制御システムを設計する際には、高周波域にある高次の振動モードを無視した低次元化モデル<sup>(4)</sup>が用いられる。したがって、実際の構造物には、低次元化の際に無視された振動モードが残存することになる。この無視された振動モードが励起された場合、閉ループシステムは意図した応答特性を実現できず、コントローラのパラメータの選び方によっては、不安定になる可能性がある。

これらの問題に対して、本論文ではセンサ/アクチュエータ・コロケーションのもとで、変位出力のフィードバックのみを用いたプロパーなコントローラによって DVDFB を近似する手法を提案する。そして、提案法によって構成される閉ループシステムが、ある二次形式評価関数を最小にする最適レギュレータになるようにコントローラのパラメータを選ぶことができ、そのとき閉ループシステムは、操作入力に対する周波数依存型の

\* 機械工学科 教授

\*\* 専攻科 機械システム工学専攻(平成 18 年 3 月 修了)

\*\*\* 専攻科 機械システム工学専攻(平成 19 年 3 月 修了)

\*\*\*\* 専攻科 機械システム工学専攻(平成 20 年 3 月 修了)

評価関数を最小にする最適レギュレータになることを示す。この周波数依存型の最適制御によって、無視された高周波域の振動モードに対するゲインを一定値以下に抑制し、閉ループシステムをロバスト安定化することができる。

本論文では、まず、柔軟宇宙構造物の運動を二階の微分方程式で記述する。そして、DVDFBと高域遮断特性をもつ一次遅れフィルタを組み合わせたコントローラを考え、このコントローラが変位出力のみを用いたプロパーなコントローラで実装できることを示す。つぎに、宇宙構造物と一次遅れフィルタによって構成される拡大系を考え、この拡大系にDVDFBとフィルタの出力フィードバックを施したシステムが、プロパーなコントローラに変位出力をフィードバックして構成される閉ループシステムと等価であることを示す。そして、閉ループシステムがある二次形式評価関数を最小にする最適レギュレータになるために、コントローラのパラメータが満たすべき条件を導き、そのとき得られた閉ループシステムが操作入力についての周波数依存型評価関数を最小化する最適レギュレータになることを示す。最後に、提案法を用いれば、構造物の低次元化モデルにもとづいて設計されたコントローラを、無視された振動モードをもつ柔軟宇宙構造物に適用した場合でも、閉ループシステムをロバスト安定化できることを数値例によって示す。

## 2. 柔軟宇宙構造物の記述

本論文では、運動方程式がつぎの二階微分方程式で表される柔軟宇宙構造物を考える。

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

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

$$\text{rank} \begin{bmatrix} D & K \end{bmatrix} = \text{rank} K \quad (2)$$

式(1)において行列  $L \in \mathbb{R}^{n \times r}$  は、宇宙構造物への入力の伝わり方を示し、アクチュエータの配置によって決まる。この行列  $L$  は列フルランクであるとする。ここでは、センサとアクチュエータを同位置、同方向に配置するセンサ/アクチュエータ・コロケーションが実現されているものとする。その場合、変位出力  $y(t) \in \mathbb{R}^r$  は次式で表される。

$$y(t) = L^T q(t) \quad (3)$$

この係数行列  $L^T$  は操作入力  $u(t)$  の係数行列  $L$  と転置の関係になる。

ここで、つぎの仮定をおく。

$$\text{rank} \begin{bmatrix} D & L \end{bmatrix} = n \quad (4)$$

これは剛体モードに関する式(2)のもとで

$$\text{rank} \begin{bmatrix} K & L \end{bmatrix} = n \quad (5)$$

が成り立つことを表し、式(4)、(5)は、式(1)、(3)の宇宙構造物の剛体モードが可制御かつ可観測であることを意味している。

## 3. プロパーな近似 DVDFB 制御

式(1)、(3)の宇宙構造物にDVDFB<sup>(3)</sup>を適用した場合、その操作入力  $u(t)$  は次式で与えられる。

$$u(t) = -(\hat{\alpha}\hat{R}y(t) + \hat{\beta}\hat{R}\dot{y}(t)) \quad (6)$$

ただし、 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  は正のスカラー、 $\hat{R} \in \mathbb{R}^{r \times r}$  は任意の正定行列である。これは、変位出力と速度出力の静的出力フィードバックであり、この制御則によって閉ループシステムはロバスト安定化され、かつ  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  を適当に選ぶことによって閉ループシステムは最適レギュレータになる<sup>(3)</sup>。しかしながら、DVDFBを実装する場合、変位センサと速度センサの両方が必要になり、このことはコストと信頼性の面から望ましくない。また、速度センサの代わりに、変位センサから得られる変位出力を微分器に通すことによって速度信号を得ようとした場合には、高周波域において非常に高いゲインを実現することが必要になり、これは現実的には困難である。そこで、本論文では、変位出力のみを用いたプロパーなコントローラによってDVDFBを近似的に実現し、高周波域におけるコントローラのゲインを一定の値にとどめることによって、上記の問題の解決を図る。

まず、式(1)の制御対象への操作入力  $u(s)$  を次式の高域遮断フィルタの出力で与える。

$$u(s) = \frac{1}{s+a} v(s) \quad (7)$$

ただし、 $a$  はフィルタの折点周波数を表し、 $v(s)$  はフィルタの入力を表す。このフィルタの一つの実現は、

$$\dot{z}(t) = -az(t) + v(t) \quad (8)$$

$$u(t) = z(t) \quad (9)$$

で表される。ここで、 $z(t) \in \mathbb{R}^r$  はフィルタの出力を表す。フィルタへの入力  $v(t) \in \mathbb{R}^r$  は次式で与える。

$$v(t) = -\gamma(\alpha Ry(t) + \beta R\dot{y}(t) + z(t)) \quad (10)$$

上の式において、 $\alpha, \beta, \gamma$  はそれぞれ正のスカラー、 $R \in \mathbb{R}^{r \times r}$  は任意の正定行列である。式(8)、(9)のフィルタと式(10)のフィードバックで構成されるコントローラの伝達関数は、

$$u(s) = -\frac{\gamma(\beta s + \alpha)}{s + (a + \gamma)} Ry(s) \quad (11)$$

と計算される。式(11)は、ここで提案するコントローラが、制御対象の変位出力  $y(s)$  のみを入力とするプロパーな一次の伝達関数で表されるコントローラとして実装できることを意味している。また、式(11)において  $\gamma$  を十分に大きくしたとき、

$\omega/\gamma \approx 0$  とみなせる周波数域では、 $u(s) \approx (\beta s + \alpha) Ry(s)$  となる。この右辺は DVDFB によるコントローラの伝達特性を表し、式 (11) は DVDFB を近似したコントローラになっていることがわかる。以下では、式 (11) で表されるコントローラをプロパーな近似 DVDFB とよぶ。

#### 4. プロパーな近似 DVDFB による最適制御

式 (1), (3) の宇宙構造物と式 (8), (9) のフィルタからなる拡大系の状態方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bv(t) \\ x(t) &= \begin{bmatrix} q^T(t) & \dot{q}^T(t) & z^T(t) \end{bmatrix}^T \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & I_n & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D & M^{-1}L \\ 0 & 0 & -aI_r \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 $I_n$ ,  $I_r$  はそれぞれ  $n$ ,  $r$  次の単位行列を表す。

式 (1), (3) の宇宙構造物の変位出力を式 (11) のコントローラに入力することによって得られる閉ループシステムは、この拡大系に式 (10) のフィードバックを施したシステムと等価である。得られた閉ループシステムが最適レギュレータになるためにコントローラパラメータが満たすべき条件は、つぎの定理で与えられる。

[定理] 式 (12) の拡大系に式 (10) のフィードバックを施して得られる閉ループシステムは安定であり、つぎの二次形式評価関数を最小にする最適レギュレータになる。

$$J = \int_0^\infty \left( x^T(t)\tilde{Q}x(t) + v^T(t)\tilde{R}v(t) \right) dt \quad (13)$$

$$\tilde{Q} = T^T \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{12}^T & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{13}^T & Q_{23}^T & Q_{33} \end{bmatrix} T \quad (14)$$

$$Q_{11} = 2\alpha K + \alpha^2 LRL^T, \quad Q_{12} = 0$$

$$Q_{13} = (\alpha a I_n + \beta KM^{-1})L$$

$$Q_{22} = 2(\beta D - \alpha M) + \beta^2 LRL^T$$

$$Q_{23} = \{(\beta a - \alpha)I_n + \beta DM^{-1}\}L$$

$$Q_{33} = \gamma\{(2a + \gamma)R^{-1} - 2\beta L^T M^{-1}L\}$$

$$T = \begin{bmatrix} \gamma I_n & 0 & 0 \\ 0 & \gamma I_n & 0 \\ 0 & 0 & I_r \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R} = R^{-1}$$

ただし、コントローラパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  は  $\tilde{Q}$  が正定になるように決められ、かつ、

$$\gamma R^{-1} - \beta L^T M^{-1}L > 0 \quad (15)$$

を満たすものとする。

(証明) 制御対象がもつ不安定極は、固有値 0 の剛体モードのみであり、これらの剛体モードは、式 (4), (5) より可制御である

から、制御対象は可安定である。一方、制御対象に直列に接続されている式 (7) のフィルタは有限の零点をもたないため、制御対象とフィルタの間で不安定な極と零点の相殺は起こらない。よって、制御対象とフィルタからなる式 (12) の拡大系  $(A, B)$  は可安定である。 $(A, B)$  が可安定であれば、正定行列  $\tilde{Q}$  について、つぎの Riccati 方程式

$$\tilde{P}A + A^T\tilde{P} - \tilde{P}B\tilde{R}^{-1}B^T\tilde{P} = -\tilde{Q} \quad (16)$$

は、正定一意解  $\tilde{P}$  をもつ。

ところで、行列  $\tilde{P}$  を

$$\tilde{P} = T^T \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12}^T & P_{22} & P_{23} \\ P_{13}^T & P_{23}^T & P_{33} \end{bmatrix} T \quad (17)$$

$$P_{11} = \alpha D + \beta K + \alpha\beta LRL^T$$

$$P_{12} = \alpha M, \quad P_{13} = \alpha L$$

$$P_{22} = \beta M, \quad P_{23} = \beta L, \quad P_{33} = \gamma R^{-1}$$

で与えると、この  $\tilde{P}$  は式 (16) の Riccati 方程式を満たし、定理の式 (15) が満たされれば正定になる。よって、この  $\tilde{P}$  は、Riccati 方程式の正定一意解である。

この  $\tilde{P}$  を用いて、最適制御則を計算すると、

$$\begin{aligned} v(t) &= -\tilde{R}^{-1}B^T\tilde{P}x(t) \\ &= -\gamma(\alpha Ry(t) + \beta Ry(t) + z(t)) \end{aligned} \quad (18)$$

となる。これは、式 (10) のフィードバックと一致する。したがって、式 (12) の拡大系に式 (10) のフィードバックを施して構成される閉ループシステムは、最適レギュレータを構成し、安定であることがわかる。

(証明終わり)

ここで、高域遮断フィルタにおける入出力の関係と Parseval の等式を用いて式 (13) の評価関数を周波数領域で表すと、

$$\begin{aligned} \tilde{J} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( x^*(j\omega)\tilde{Q}x(j\omega) \right. \\ &\quad \left. + u^*(j\omega)\tilde{R}u(j\omega) \right) d\omega \end{aligned} \quad (19)$$

となる。ただし、\* は共役転置を表し、

$$\tilde{R}(j\omega) = [W(j\omega)^{-1}]^* \tilde{R}W(j\omega)^{-1} \quad (20)$$

$$W(j\omega) = \frac{1}{j\omega + a} I_r \quad (21)$$

である。式 (19) の右辺第二項は、高周波域で重みが大きくなる周波数依存型重み  $\tilde{R}(j\omega)$  によって  $u(j\omega)$  を評価することを意味している。したがって、式 (10) の制御則は、制御対象へ加える操作入力  $u(t)$  の高周波成分のゲインを一定値以下に抑える周波数依存型最適レギュレータ<sup>(5)</sup>を構成している。このことから、低次元化の際に無視された高周波域の振動モードが宇宙構造物に存在しても、操作入力  $u(t)$  の高周波成分のゲインは一定値以下に抑制されるため、高周波域の振動モードの励起を抑制

することができ、その結果として式(10)の制御則は、閉ループシステムをロバスト安定化できる。

式(7)の高域遮断フィルタにおいて任意の  $a$  が与えられたとき、定理の条件を満たす  $\alpha, \beta, \gamma$  が必ず存在することは容易に示すことができる。これらのパラメータの選び方の一例として、まず、任意の  $\alpha > 0$  を選ぶ。この  $\alpha$  に比べて十分大きな  $\beta$  を選ぶことにより、式(14)の右辺の  $T^T$  と  $T$  ではさまれた行列の左上隅  $2 \times 2$  ブロックを正定にすることができる。さらに、これらの  $\alpha, \beta$  に対して、 $\gamma$  を大きく選ぶことによって、式(14)の右辺の  $T^T$  と  $T$  ではさまれた行列を正定にでき、かつ式(15)を満たすことができる。なお、式(7)の高域遮断フィルタにおいて、 $a = 0$  として積分器を用いた場合には、式(14)の  $Q_{33}$  の正定性によって式(15)の条件は不要になる。

5. 数値例

ここでは、本論文で提案したプロパーな近似 DVDFB を用いた柔軟宇宙構造物の閉ループシステムの応答特性についてシミュレーションを行い、その有効性を示す。例として、Fig. 1 のように横方向に並んだ矩形の剛体 11 ~ 15 と 21 ~ 25 を、バネとダンパで近似される柔軟なリンクによって横方向と斜め方向に柔結合して構成される宇宙構造物を考える。 $ij$  ( $i = 1, 2, j = 1, \dots, 5$ ) 番目の剛体は、 $x_{ij}, y_{ij}$  方向の並進運動と質量中心  $O_{ij}$  回りに  $\theta_{ij}$  方向の回転運動を行うものとする。各剛体の質量を  $m_{ij}$  で、慣性モーメントを  $J_{ij}$  で表し、剛体を結合するリンクのバネとダンパの定数を  $k_{ijk}, d_{ijk}$  ( $i = 1, 2, j = 1, \dots, 5, k = 1, 2, 3$ ) で表す。ただし、剛体 15 と剛体 21 を結合するリンクのバネとダンパの定数は  $k_{ck}, d_{ck}$  ( $k = 1, 2, 3$ ) で表す。なお、センサとアクチュエータは、剛体 13 の質量中心に設置され、センサは剛体 13 の  $x_{13}, y_{13}$  方向の変位と  $\theta_{13}$  方向の角変位を計測するものとし、アクチュエータは、操作入力として  $x_{13}, y_{13}$  方向の力と質量中心  $O_{13}$  回りのトルクを加えるものとする。また、すべての剛体について  $x_{ij} = 0, y_{ij} = 0, \theta_{ij} = 0$  で静止しているとき、剛体間の柔軟なリンクのバネとダンパによる力およびトルクは 0 であるとする。

制御系設計に用いる低次元化モデルは、剛体 11 ~ 15 をまとめて剛体 1、剛体 22 ~ 25 をまとめて剛体 2 と考えて、Fig. 2 のように表されるものとする。

Fig. 2 の低次元化モデルにおいて、 $i$  ( $i = 1, 2$ ) 番目の剛体は、 $x_i$  方向と  $y_i$  方向の並進運動と質量中心  $O_i$  回りに  $\theta_i$  方向の回転運動を行う。各剛体の質量を  $m_i$ 、慣性モーメントを  $J_i$  で表し、結合点  $ij$  ( $i = 1, 2, j = 1, 2$ ) は、 $i$  番目の剛体における  $j$  番目の結合点を表し、 $l_{ij}$  は、剛体の質量中心から結合点  $ij$  までの距離を表す。 $\psi_{ij}$  は、質量中心と結合点  $ij$  を結ぶ線分と剛体の辺がなす角度を表し、 $\phi_{ij}$  は、結合点  $ij$  において剛体の辺と斜めに取り付けられたリンクが剛体の辺となす角度を表す。なお、センサとアクチュエータは、Fig. 1 の宇宙構造物と整合性をもたせるために、剛体 1 の質量中心に設置され、センサは剛体 1 の  $x_1, y_1$  方向の変位と  $\theta_1$  方向の角変位を計測するものとし、アクチュエータは、操作入力として  $x_1, y_1$  方向の力と

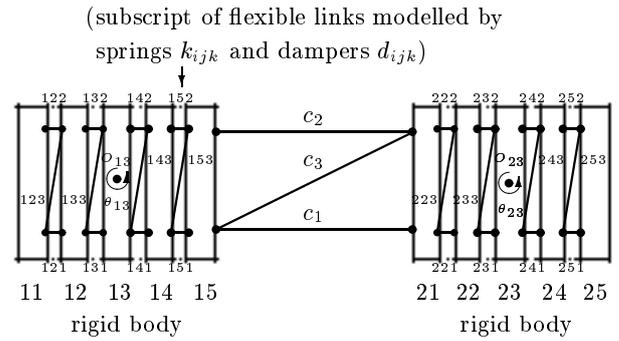


Fig. 1 A flexible space structure

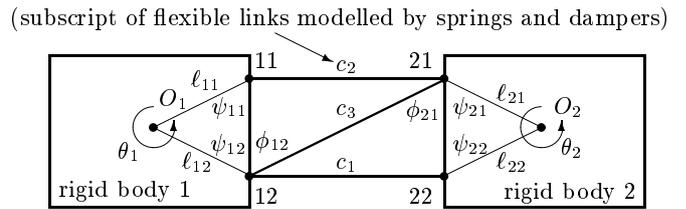


Fig. 2 A low dimensional model of the flexible space structure in Fig. 1

質量中心  $O_1$  回りのトルクを加えるものとする。まず、この低次元化モデルを用いてプロパーな近似 DVDFB のパラメータを決定し、そのコントローラを用いて Fig. 2 の低次元化モデルを制御した場合を考える。各剛体の運動は、変位ベクトル  $q(t)$  を

$$q(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) & y_1(t) & \theta_1(t) & x_2(t) & y_2(t) & \theta_2(t) \end{bmatrix}^T$$

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

$$M = \text{diag} \begin{bmatrix} m_1 & m_1 & J_1 & m_2 & m_2 & J_2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} N_1 \\ -N_2 \end{bmatrix} D_c \begin{bmatrix} N_1^T & -N_2^T \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} N_1 \\ -N_2 \end{bmatrix} K_c \begin{bmatrix} N_1^T & -N_2^T \end{bmatrix}$$

$$N_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sin \phi_{12} \\ 0 & 0 & \cos \phi_{12} \\ l_{12} \cos \psi_{12} & -l_{11} \cos \psi_{11} & l_{12} \sin(\psi_{12} + \phi_{12}) \end{bmatrix}$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sin \phi_{21} \\ 0 & 0 & \cos \phi_{21} \\ l_{22} \cos \psi_{22} & -l_{21} \cos \psi_{21} & -l_{21} \sin(\psi_{21} + \phi_{21}) \end{bmatrix}$$

$$D_c = \text{diag} \{ d_{c1}, d_{c2}, d_{c3} \}$$

$$K_c = \text{diag} \{ k_{c1}, k_{c2}, k_{c3} \}$$

$$L = \text{diag} \begin{bmatrix} I_3 & 0_3 \end{bmatrix}$$

ここで、 $N_1, N_2$  は、二つの剛体の結合の仕方を表し、 $K_c, D_c$  は、剛体を柔結合しているリンクのバネとダンパの特性を表す

行列である．また， $I_3, 0_3$  はそれぞれ，三次の単位行列とゼロ行列を表す．

宇宙構造物の剛体の質量と慣性モーメント，結合に用いる柔軟なリンクのバネ定数とダンパの定数をつぎのように与える．

$$m_i = 1.0, J_i = 0.5, i = 1, 2$$

$$k_{cj} = 1.0, d_{cj} = 0.16, j = 1, 2, 3$$

また， $\ell_{ij}, \psi_{ij}, \phi_{ij}$  は，それぞれつぎのように与える．

$$\ell_{ij} = 1.0, \psi_{ij} = \pi/3 [\text{rad}], \phi_{ij} = \pi/3 [\text{rad}], i, j = 1, 2$$

このとき， $u$  から  $y$  への周波数伝達関数の特異値をプロットすると Fig. 3 となる．この図より構造物の振動モードの最大値は約 3 [rad/sec] となるので，高域遮断フィルタの折点周波数  $a$  は，すべての振動モードがフィルタの帯域に入るように  $a = 10.0$  [rad/sec] と選ぶ．さらに，コントローラのパラメータ  $\alpha, \beta, \gamma, R$  は，第 4 章の定理を満たすようにつぎの値とした．

$$\alpha = 4.0, \beta = 3.1 \times 10^2, \gamma = 1.3 \times 10^3, R = I_3 \quad (22)$$

Fig. 2 の構造物において，初期変位として剛体 1 の  $x_1, y_1$  方向に変位  $x_1(0) = 0.1, y_1(0) = -0.1$  を与えたとき，閉ループシステムにおける剛体 1 と剛体 2 の  $x, y$  方向の変位と  $\theta$  方向の角変位の初期値応答はそれぞれ Fig. 4 の Case 1 のようになる．この図より閉ループシステムは，提案法によって安定化されていることがわかる．比較のため，式 (22) の  $\alpha, \beta$  を用いた DVDFB によって制御した場合の閉ループシステムの応答を Case 2 に示す．Case 1 と Case 2 の応答を比較することにより，提案法が DVDFB と同等の応答特性を実現していることがわかる．

つぎに，Fig. 2 の低次元化モデルを用いて設計されたプロパーな近似 DVDFB を，Fig. 1 の構造物に適用した場合について考える．Fig. 1 の構造物において，各剛体の質量と慣性モーメント，結合に用いる柔軟なリンクのバネ定数とダンパの定数を以下のように与える．

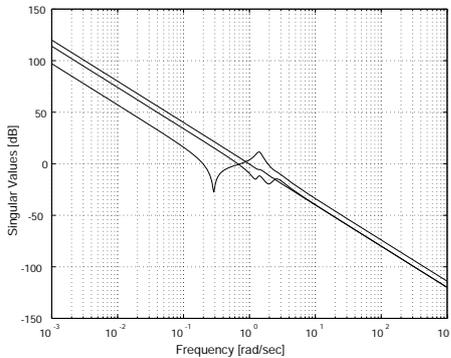


Fig. 3 Singular values of the frequency response of the low dimensional model in Fig. 2

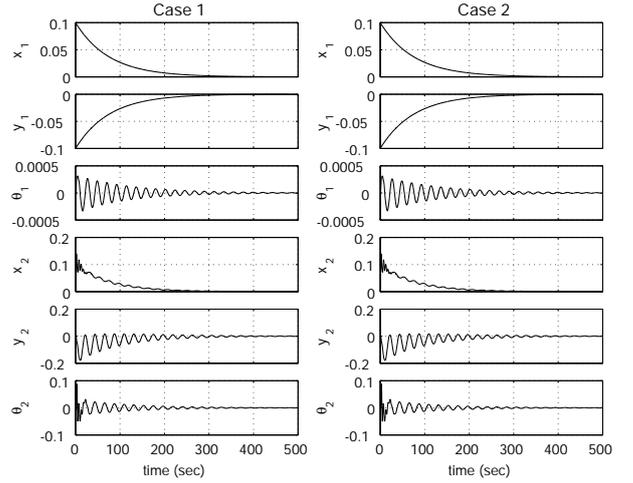


Fig. 4 Initial-state responses of  $x_i, y_i,$  and  $\theta_i$  ( $i = 1, 2$ ) of the low dimensional model in Fig.2, controlled by the proposed method (Case 1), and by DVDFB (Case 2)

$$m_{1j} = 0.1, J_{1j} = 0.01, j = 1, 2, 4, 5$$

$$m_{13} = 0.6, J_{13} = 0.06$$

$$m_{2j} = 0.2, J_{2j} = 0.02, j = 1, \dots, 5$$

$$k_{ijk} = 8.0 \times 10^3, d_{ijk} = 2.5,$$

$$i = 1, 2, j = 1, \dots, 5, k = 1, 2, 3$$

また，質量中心  $ij$  と結合点  $ijl$  を結ぶ線分の長さ  $\ell_{ijl}$  (ただし， $l = 1, \dots, 4$  は，各剛体の左上の結合点から左回りに付番するものとする．このとき結合点 111, 112, 253, 254 は存在しない)，その線分と剛体の辺がなす角  $\psi_{ijl}$ ，結合点  $ijl$  において剛体の辺と斜めに取り付けられたリンクがなす角  $\phi_{ijl}$  をつぎのように与える．

$$\ell_{ijl} = 0.5, \psi_{ijl} = 0.04\pi [\text{rad}], \phi_{ijl} = 0.47\pi [\text{rad}]$$

$$i = 1, 2, j = 1, \dots, 5, l = 1, \dots, 4$$

このとき，Fig. 1 の構造物の特異値は，Fig. 5 となり， $10^2 \sim$

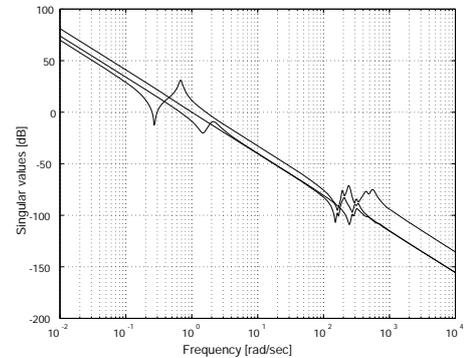
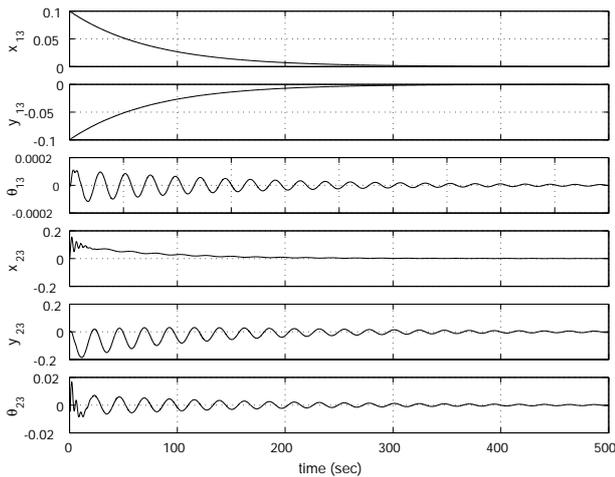


Fig. 5 Singular values of the frequency response of the flexible structure in Fig. 1

## 参考文献

- (1) Mankins J. C., The Space Solar Power Option, *Aerospace America*, Vol.35 (1997) pp.30 - 36
- (2) 泉田：宇宙太陽発電システム, 日本機械学会会員のための宇宙工学概論(日本機械学会宇宙工学部門編集), pp.183-187 (2004)
- (3) 糺谷, 池田, 木田：Collocated Feedback による宇宙構造物の最適制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.25-8, pp.54-60 (1989)
- (4) 土屋, 柏瀬：大規模宇宙構造物(LSS)の制御, 計測と制御, Vol.26-10, pp.855-862 (1987)
- (5) 池田：最適レギュレータ理論 - 再考, システム/制御/情報, Vol.34-6, pp.340-346 (1990)



**Fig. 6** Initial-state responses of  $x_{i3}$ ,  $y_{i3}$ , and  $\theta_{i3}$  ( $i = 1, 2$ ) of the structure in Fig. 1, controlled by the proposed method with the same control parameters in eq. (22)

$10^3$ [rad/sec] の角周波数領域に低次元化モデルに含まれない振動モードが存在していることがわかる。この構造物に対して、低次元化モデルを用いて設計した式(22)のコントローラパラメータを適用して初期値応答のシミュレーションを行う。初期変位は、低次元化モデルに対するシミュレーションと整合性をもたせるために、剛体  $1j$ ( $j = 1, \dots, 5$ ) において、 $x_{1j}(0) = 0.1$ ,  $y_{1j}(0) = -0.1$  と与える。このときの剛体 13 と剛体 23 の変位と角変位の初期値応答を Fig. 6 に示す。この図より低次元化モデルを用いて設計したコントローラを、低次元化の際に無視された振動モードを含む実際の柔軟宇宙構造物に適用した場合においても、閉ループシステムがロバスト安定化されていることがわかる。

## 6. おわりに

本論文では、柔軟宇宙構造物の位置と姿勢を制御するシステムにおいて、センサ/アクチュエータ・コロケーションの前提のもとで、変位出力のみを用いたプロパーな近似 DVDFB によって制御する方法を提案した。まず、宇宙構造物の入力端に分母が一次、分子が零次のフィルタを直列に接続し、仮想的に変位出力と速度出力、およびフィルタの出力をフィードバックする形で閉ループシステムを構成した。そして、この制御則が構造物の変位出力のみを入力とするプロパーなコントローラとして実装でき、そのコントローラが DVDFB の近似になっていることを示した。つぎに、閉ループシステムが、最適レギュレータとなるためにコントローラのパラメータが満たすべき条件を導出し、そのとき得られる閉ループシステムは、操作入力に対して高周波域成分のゲインを一定値以下に抑える周波数依存型最適レギュレータになることを示した。最後に、提案法によって DVDFB と同等の応答性能を閉ループシステムにもたせることができ、さらに、低次元化モデルにおいて無視された高次の振動モードが宇宙構造物に存在した場合でも、閉ループシステムをロバスト安定化することを数値例によって示した。

# T 字形エルボによるキャビテーション壊食対策に関する研究

苗木伸也<sup>\*</sup>，柴田高宏<sup>\*\*</sup>，林公祐<sup>\*\*\*</sup>，鈴木隆起<sup>\*\*\*\*</sup>，赤対秀明<sup>\*\*\*\*\*</sup>

Study on countermeasure against cavitation erosion using T-shape elbow

Shinya NAEKI<sup>\*</sup>，Takahiro SHIBATA<sup>\*\*</sup>，Kosuke HAYASHI<sup>\*\*\*</sup>，Takayuki SUZUKI<sup>\*\*\*\*</sup>，Hideaki SYAKUTUI<sup>\*\*\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

Recently, it is actively using the water in fluid device because of considering the environment problems and device safety. However, the cavitation often occurs and it can cause the pipe erosion. Up to now, we reported that the development of pipe erosion could be reduced by using T-shape elbow. In this study, we investigate the most useful shape of T-shape elbow by experiments and numerical simulations. In the experiments, the cavitating flow is observed by using a high-speed video camera. As a result, it was found that the diameter of the pipe is 19 mm, length of trap section is 30 mm and outlet direction is upward for the most useful shape of T-shape elbow in this experimental condition, and the effect of countermeasure against cavitation erosion is enabled by measuring the staying time of the circulation flow which have formed in a trap section.

*Keywords:* cavitation, erosion, circulating flow, Tee

## 1. 緒論

従来、流体機器の作動流体は水に比べて腐食しにくい利点から、油が用いられてきた。しかし、油を使用する場合、引火の恐れがあり、また油の廃棄に関して環境汚染につながるといった問題点が生じる。そこで、流体機器の作動流体に水を用いることが検討され、いくつかの事例が提案されている<sup>(1), (2)</sup>。しかし、油を使用した場合における諸問題は解決できるものの、水の飽和蒸気圧が油よりも高いため<sup>(3), (4)</sup>、局所的な圧力の低下によりキャビテーションが発生しやすくなる。キャビティは崩壊時に高温・高圧を伴うため管壁の壊食の原因となる<sup>(5)</sup>。

本一連の研究では、Fig.1 に示す管内エルボ部におけるキャビテーションによる壊食を対象としてその対策が検討されてきた。本研究の発端は、ある企業の装置において、キャビテーション壊食によりエルボ部に穴が開いたときに、交換用のエルボがなく、応急処置的にT字管の1ヶ所に栓をしたもの（以後、T字形エルボと呼ぶことにする）を代用したところ、その後、穴が開かなかつたという事実にある。

これを受けて、本研究室ではその流れ状況を模擬するために、透明アクリル樹脂製のT字形エルボを製作し、その流れの解明を行ってきた<sup>(1), (6)</sup>。しかし、未だに実験室レベルではT字形エルボがキャビテーション壊食に有効であるという事実を確認していなかった。

この事実を確認するために、実機による試験を行う場合、金属では壊食までの時間がかかりすぎる。そこで、本研究では、比較的材質の弱いもので、通常のエルボとT字形エルボを製作し、比較的短い時間で、両者の耐壊食性を確認することにした。これが本研究の目的の1つである。

以前に、透明アクリル樹脂で製作したT字形エルボを用いた実験より、Fig. 2 に示すようにT字部の栓をした箇所（以下、トラップ部と呼び、その長さをFig. 2 に示すようにトラップ部長さLとする）に循環流が生じることが確認されている<sup>(1)</sup>。また、この循環流によりキャビティを含む流れがトラップされ、キャビティは壁面に到達するまでに大幅に減速することも確認されている<sup>(6)</sup>。これが、壊食が低減される理由の一つとして考えられている。しかしながら、この循環流は、継続的に形成されるのではなく、上流の流れの影響を受け、断続的に形成される<sup>(7)</sup>。

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 機械工学科

\*\*\* 神戸大学 工学部

\*\*\*\* 機械工学科 助教

\*\*\*\*\* 機械工学科 教授

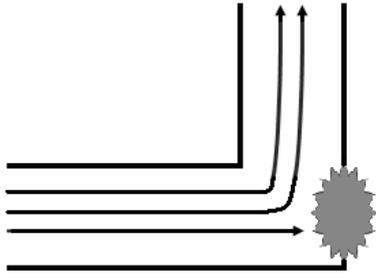


Fig. 1 Erosion at an elbow

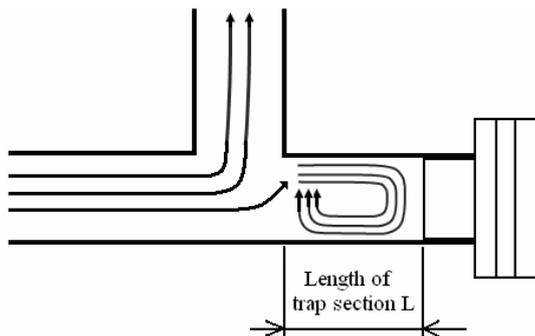


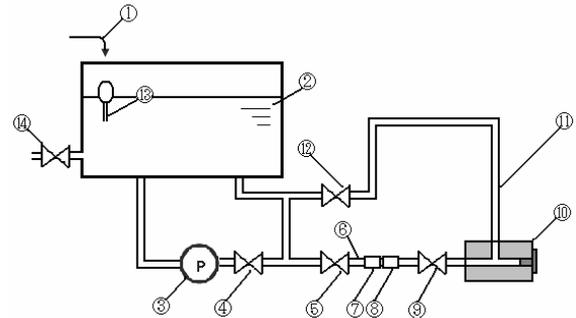
Fig. 2 T-shape elbow

断続的に形成される循環流による壊食低減を効果的に得るためには、循環流が形成・維持される時間が重要となる。循環流の形成に影響を与える因子として次に示すものが考えられる。まず、形状におけるパラメータとして、トラップ部長さ、管径、T字形エルボを設置する方向、T字形エルボの角部にアールをつけた場合、続いて流体工学におけるパラメータとして、流速、粘度、密度である。

これらの因子の中で本研究では、トラップ部長さおよびT字形エルボを設置する方向について実験を行い、循環流の形成・維持にどのように影響を及ぼすかを調べる。なお、残りの因子についても、今後調べていく必要がある。

## 2. 耐壊食性の確認実験

2.1 実験装置および実験方法 本研究で用いた実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。実験装置は主に、水槽、高圧ポンプ、1次側配管、流量制御弁、試験部、および2次側配管からなる。水槽内の水は高圧ポンプ(ロータリー式、流量 14.6 L/min, 3.7 kW)により強制流動させられ、流量制御弁を通過する際の圧力低下によりキャビテーションが発生する。その後、キャビティを含む流れは試験部を通り、2次側配管を経て水槽へと戻る。試験部には、金属よりかなり耐壊食性の弱いと考えられる塩化ビニルおよび軟質塩化ビニルを用いた。



① : Water supply    ② : Tank    ③ : Pump    ④ : Relief valve  
 ⑤ : Primary valve    ⑥ : Primary pipe    ⑦ : Pressure gauge (primary)  
 ⑧ : Flow meter    ⑨ : Flow control valve    ⑩ : Test section    ⑪ : Secondary pipe  
 ⑫ : Secondary valve    ⑬ : Thermometer    ⑭ : Drain

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 塩化ビニル製試験部を用いた確認試験

Fig. 4 に塩化ビニルで製作した試験部を示す。Fig. 4 (a) は通常のエルボ、Fig. 4 (b) はT字形エルボである。まず、Fig. 4 (a) で実験を行ったが、合計 60 時間経過しても壊食は生じなかった。また、内壁を観察したが、表面に壊食らしき傾向も確認できなかった。このことから、塩化ビニル製の試験部では短時間で結果を得ることは困難と判断した。なお、Fig. 4 (b) はさらに壊食が期待できないので実験は行わなかった。

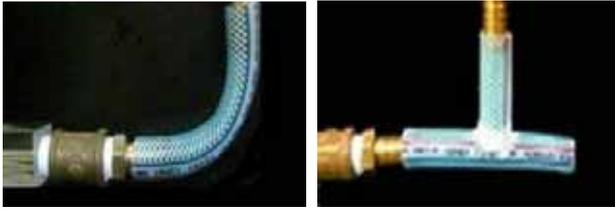


(a) elbow    (b) T-shape elbow

Fig. 4 Shape of test section (vinyl chloride)

### 2.2.2 軟質塩化ビニル製試験部を用いた確認試験

塩化ビニル製の試験部では、短時間で結果を得ることは困難であったため、ここではさらに弱い軟質塩化ビニル製耐圧ホースの試験部を用意して実験を行った。Fig. 5 に示すような1本のホースを曲げてL字に近い形状にして通常のエルボの試験部とした場合と、ホースを接合してT字形エルボの試験部とした場合について実験を行った。この実験では、通常のエルボの試験部では、10分弱で壊食が生じた。一方、T字形エルボの試験部では、4時間(240分)以上経過しても壊食が生じなかった(実験の都合上4時間で打切った)。



(a) elbow (b) T-shape elbow  
Fig. 5 Shape of test section (polyvinyl chloride)

2.2.3 耐壊食性の確認実験のまとめ 以上のように、金属よりも壊食を起こしやすい材料を用いて、通常のエルボとT字形エルボの耐壊食性を調べたところ、軟質塩化ビニルを用いて製作した形状において、通常のエルボでは10分程度で穴が空くが、T字形エルボでは最低4時間は穴が空かないことを確認し、T字形エルボが耐壊食性に優れていることを実験室レベルで実証した。

### 3. トラップ部長さの影響

本章では、循環流に及ぼすトラップ部長さの影響について、まず実験的に検討を行い、その事象について数値計算を用いて解明を試みた。主となる流動系は第2章で説明したものと共通で用い、試験部のみを変更した。

3.1 実験装置および実験方法 流動状況の確認には高速度ビデオカメラ(PHOTRON製ASTCAM-NYEC, レンズCanon製V6×16\_1.9MACRO, フレーム速度500 frames/s)を使用した。撮影では、直接光を当てると反射しハレーションを起こし撮影できないため、透過光を用いた<sup>(8)</sup>。実験では、どのT字形エルボが壊食低減を得るために最適であるかを調べるために、一定時間内で循環流の形成・維持されている総時間を調べ、これを全測定時間で除した値(循環流の存在時間割合:  $C_t$ と呼ぶ)を求める。全測定時間は5秒間とし、高速度ビデオカメラにより撮影した動画をスロー再生し、循環流が形成・維持している総時間を求めた。管径  $D = 19 \text{ mm}$  の試験部を使用し、トラップ部長さの影響を調べた。トラップ部長さは Fig. 6 に示すように

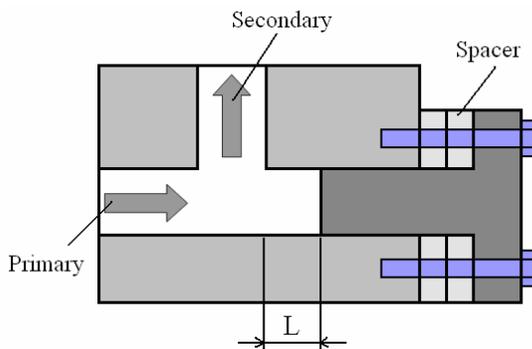


Fig. 6 Test section

スペーサーを用いて変更した。トラップ部長さは  $L = 10.5, 12, 15, 22.5, 27, 28.5, 30, 32, 35, 50, 100 \text{ mm}$  の11条件について測定した。また、実験条件は以下の通りである: レイノルズ数 19800, 平均液流速  $0.94 \text{ m/s}$ , 水温  $23.1$ , 一次側圧力  $9.70 \text{ MPa}$ 。

3.2 実験結果 Fig. 8 に  $L = 30 \text{ mm}$  の流動状況の写真を示す。透過光のため黒く写っている所がキャビティである。写真ではわからないが、図の矢印のように循環流が生じた。

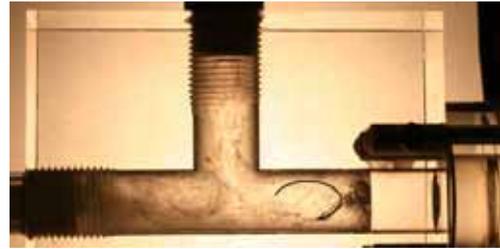


Fig. 8 Photo of flow in T-shape elbow ( $L = 30 \text{ mm}$ ,  $D = 19 \text{ mm}$ )

Fig. 9 にトラップ部長さ  $L$  と循環流の存在時間割合  $C_t$  の関係を示す。 $L = 10.5 \text{ mm}$  (内径とトラップ部長さの比:  $L/D = 0.55$ ) では、循環流は形成されておらず、 $L = 12 \text{ mm}$  では循環流の形成が確認できた。このことから、循環流は  $L \geq 10.5 \text{ mm}$  で形成されると考えられる。また、 $10.5 < L < 30 \text{ mm}$  ( $0.55 < L/D < 1.58$ ) では、 $L$  が増加するに伴って  $C_t$  も増加しているが  $L = 30 \text{ mm}$  の場合を最大値として、それ以上の  $L$  では  $L$  の増加に伴い  $C_t$  は減少した。

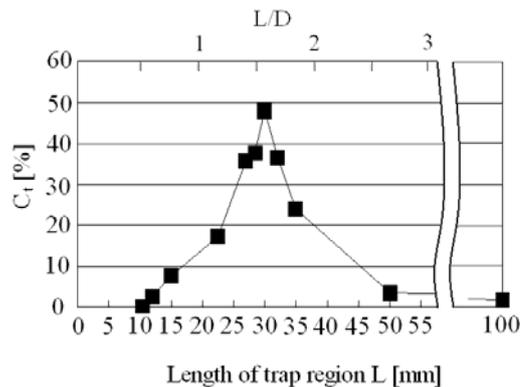


Fig. 9 Circulation rate ( $D = 19 \text{ mm}$ )

3.3 数値計算と考察 このトラップ部長さによる循環流の形成されやすさの違いを理解するために、数値解析ソフトウェア PHOENICS (Release 3.6)を用いて<sup>(7)</sup>、T字形エルボ付近の流速および流線を調べた。ただし、実験で観察されたキャビティが非常に小さいことから、気相が液相流れに与える影響は小さいと考え、水単相の時間平均流を計算した。計算を行ったトラップ部長

さは  $L = 15, 22.5, 30, 35$  mm であり, 各  $L$  について流動状況を比較した。

数値計算結果により得た T 字形エルボにおける流線を Fig. 10 に示す。この流線を確認すると, どの  $L$  においても, T 字形エルボにおける流れは上流から下流へ直接流れる流れと上流からトラップ部へ流れる流れが存在していることが確認できた。この中で上流からトラップ部へ流れる流れについて  $L$  ごとに比較するために, 上流から下流へ直接流れる流れの内, 最もトラップ部に近い流線を太く表示してある。この太くした流線を比較すると,  $L$  が増加するにつれて, 流線の曲がり具合が緩やかになっている。トラップ部へ流れ込む流れは太くした流線に沿って流れるため, 曲がり方が急である  $L$  が小さな場合ではトラップ部への流入位置が低くなる。逆に  $L$  が増加するにつれて流入位置は上側推移し, その結果循環流を大きく駆動させることとなる。このことが循環流の形成・維持を促進したと考えられる。しかしながら,  $L = 30, 35$  mm の流線には大きな違いが見られなかった。このことから  $L = 30, 35$  mm では循環流の形成されやすさは変わらないと考えられる。ところが, トラップ部長さが大きくなるにつれて循環流の局所的な流速は低下する。その結果, 上流からの流れの影響を受けやすくなるため循環流の維持が困難になったと考えられる。

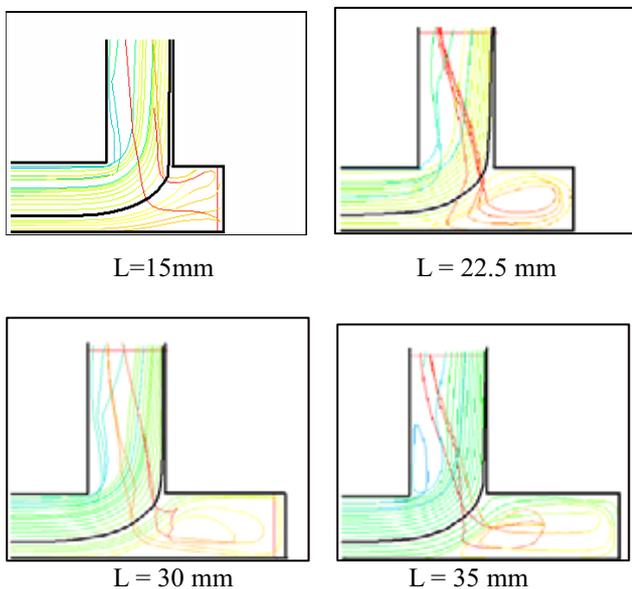


Fig. 10 Streamline in T-shape elbow (different trap length)

以上の説明をよりわかりやすくするために, Fig. 11 に  $L = 15, 22.5, 30, 35$  mm について, トラップ部への流入位置における水平方向の速度分布を示す。なお, 流速は円管中心を通る鉛直線上の値を用いており, トラップ部流入方向を正, 流出方向が負である。

この結果について, まず  $L = 15$  mm と  $22.5$  mm のトラップ部へ流入および流出する流れについて, その流速分布を比較すると, 流入, 流出の双方とも, 流れの中心位置は  $L = 22.5$  mm の方がトラップ部入口の中心部分から遠い位置にあると言える。この計算結果における流速は同一面積を持つ, 各メッシュ当りの流速であるから, 流速分布は流量の分布形状に等しいといえる。トラップ部入口について, その中心から遠い距離に多くの流量が流入・流出することは中心回りのモーメントが大きくなり, 循環流の形成・維持を促進すると考えられる。この  $L$  の増加とともに循環流が形成されやすくなる傾向は  $L < 30$  mm までは顕著に表れている。しかし,  $L = 30, 35$  mm を比較すると, その分布形状は酷似している箇所が多々あり,  $L < 30$  mm までと同様に  $L$  の増加により循環流が形成されやすくなるとは言えない。

これらのことが Fig. 9 に示す結果が得られた要因と考えられる。

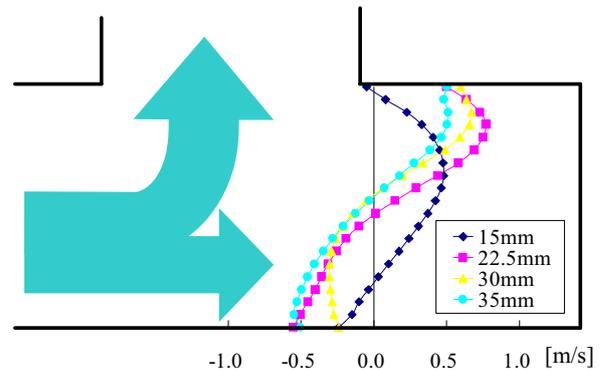


Fig. 11 Velocity at inlet of T-shape elbow

#### 4. 方向の影響

4.1 実験装置および実験方法 T 字形エルボについて, 流入方向によって様々な設置方向が考えられる。Fig. 12 (a)に示すように垂直面内に設置する場合, Fig. 13 における 8 種類の形状が考えられる。

一方で, Fig. 12 (b)の水平面内に設置する場合は Fig. 13 A, B に示す 2 種類が考えられ, 水平面内においては A, B に示す各 4 つの形状は視点を変えただけで同じ流動である。

本節ではこのような方向の違いが循環流にどのように影響を及ぼすかを調べる。

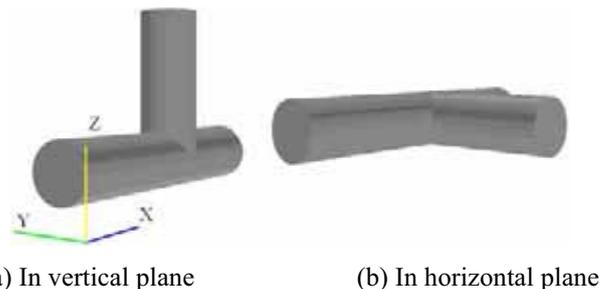


Fig. 12 Direction of test section

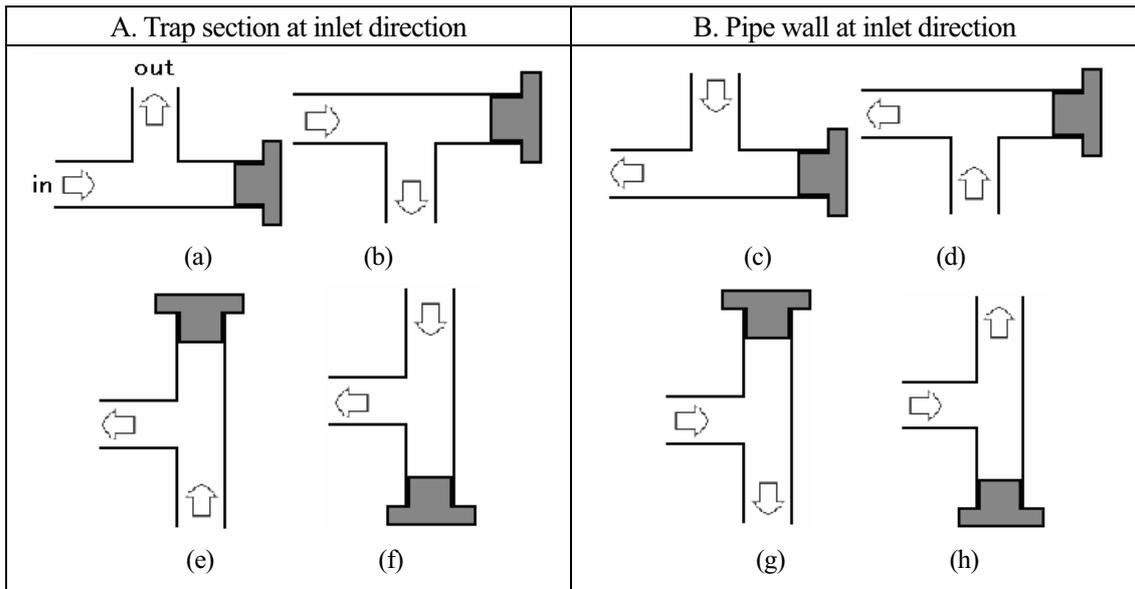


Fig.13 Kinds of direction of T-shape elbow

まず、第3章で示した形状は Fig. 12 (a)の形状である。これと比較するために Fig. 12 (b)および水平面内における形状を用いて実験を行いその影響を検討する。なお、Fig. 12 (a)の形状を流出方向上向き、Fig. 12(b)の形状を流出方向下向きと表記する。

3.1 節と同様の装置を用い、循環流の存在時間割合  $C_t$  を測定し、T 字形エルボの方向の変化にともなう循環流の形成時間の变化を調べる。トラップ部長さは各向きについて  $L = 30 \text{ mm}$  について計測し、実験結果をそれぞれの形状で比較した。

4.2 実験結果 流出方向が下向きの場合の流動状況 ( $D = 19 \text{ mm}$ ,  $L = 30 \text{ mm}$ ) を撮影した画像を Fig. 14 に示す。流出方向が上向きの場合とは異なり、逆周りの循環流が形成されることを確認した。しかし、T 字形エルボに対しては、相対的に同じ回転方向である。水平面内についても相対的に同じ回転方向の流れが確認された。

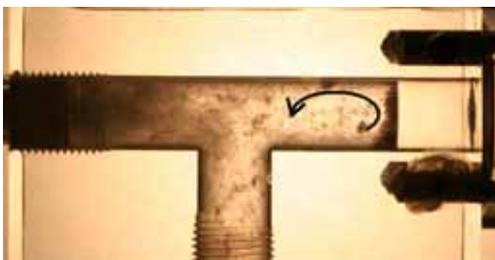


Fig. 14 Picture of flow in a T-shape elbow (downward)

実験結果を Table 1 に示す。流出方向が下向きの場合および水平面内に T 字形エルボを設置した場合における  $C_t$  の値が、流出方向が上向きの場合における  $C_t$  の値よりも低い。

Table 1 Result of experiment (difference of direction)

| Direction           |          | $C_t$ [%] |
|---------------------|----------|-----------|
| In vertical plane   | Upward   | 47.9      |
|                     | Downward | 6.3       |
| In horizontal plane |          | 2.6       |

4.3 数値計算と考察 Fig. 15 に流出方向の違いによる影響を見るために、 $L = 30 \text{ mm}$  における T 字形エルボ内の流線を示す。水平面内の流線については二次元的に表示するために上向きと同一方向に表示してある。

まず Fig. 15 に示すとおり、T 字形エルボ内の流れはトラップ部へ流れ込むものと、トラップ部を通らず直接下流へと流れる主流が存在している。これらを区別するために第3章と同様に主流の内、最もトラップ部に近い流線を太く表示してある。まず、上向きと下向きを比較すると、下向きの場合ではトラップ部へ流れ込む流れの領域は少なく、主流として直接下流へ流れる流れが多く見える。このことから上向きの場合と比べてトラップ部へ流入する流れの流量が低下し、流出方向が上向きの方が循環流の形成・維持に必要な流量を得やすかったのではないかと考えられる。

しかしながら、流量は流速によっても影響するため、流線を見るだけでは明確には示せない。このことを明確にするために、トラップ部入口における流速分布を示す。第3章と同様にトラップ部へ流入する流れを正とした。ただし、下向きおよび水平面内における速度分布は方向による比較をするためにすべて上向きに変えて表示してある。また、流出方向が上向きの場合と水平面内に設置した場合についてもここで考察を行う。

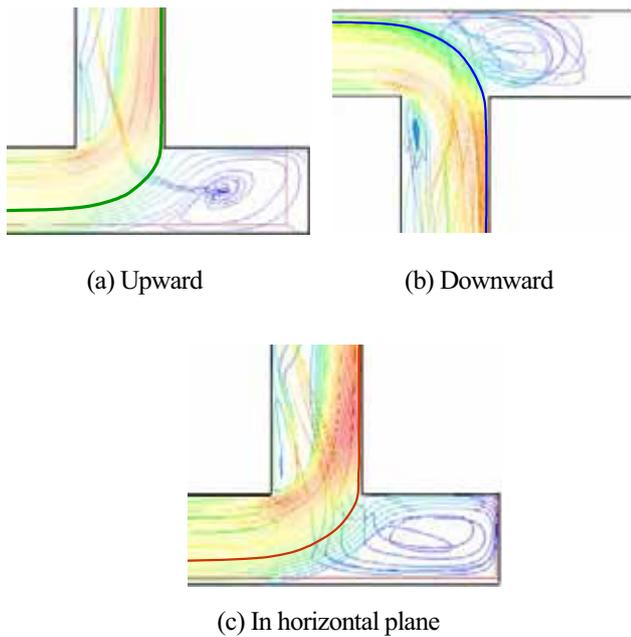


Fig. 15 Streamline in T-shape elbow (different direction)

Fig. 16 に示すように流出方向上向きと下向きでは速度分布の形状は似ているものの、流入する際の速度分布について、下向きの方が小さな流速である。3.3 と同様に、各メッシュ1つ当たりの流速であるから、流速の差は流量の差であるといえる。このことから、上述の考察における流量の違いを示せたことになる。

また、流出方向が上向きの場合と水平面に設置した場合を比較すると、上向きの方が流入・流出双方について速度分布の中心位置はトラップ部入口の中心位置から遠い位置にあるといえる。よって中心回りのモーメントが大きくなり循環流の形成・維持が容易であると考えられる。

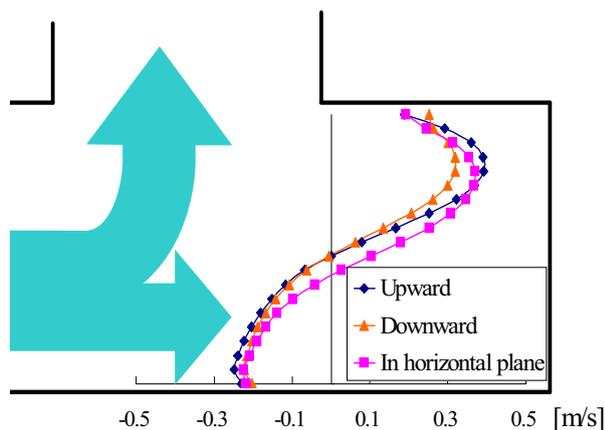


Fig. 16 Velocity at inlet of T-shape elbow

以上のことから、循環流によりキャビティをトラップする効果において流出方向が下向きおよび水平面に設置した場合は、流出方向が上向きの形状より劣ると考えられる。よって、T 字形エルボを効果的に使用するには

流出方向が下向きの形状より流出方向が上向きの方が良いといえる。

## 5. 結論

本研究では、T 字形エルボの壊食低減効果を実験室レベルで確認し、トラップ部長さ  $L$ 、T 字形エルボの向きがトラップ部内の循環流形成に与える影響を調べた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) T 字形エルボの壊食低減効果を実験室レベルで確認できた。
- (2) 循環流の形成されやすさは  $L$  に強く依存し、 $L \leq 30$  mm まで、流入位置の上昇による流量増加によりその形成は容易になる。一方、 $L > 30$  mm では、トラップ部における循環流の局所的な流速の低下により循環流の形成・維持は困難になる。
- (3) 循環流の存在時間割合  $C_t$  は T 字形エルボの向きにより大きく変化し、流出方向が下向きの場合より流出方向が上向きの方が壊食低減効果を効率的に得られる。
- (4) 以上の結果より、本研究で行った循環流に影響を及ぼす因子について管径  $D = 19$  mm の場合、トラップ部長さ  $L = 30$  mm で流出方向を上向きに設置した場合、最も壊食低減を効果的に得られる。

## 謝辞

本研究は油空圧機器技術振興財団の助成（平成 21 年度）を受けて実施したものである。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- (1) 松本, 宮澤, 赤対, 土居, 菊谷, 日詰, 管内湾曲部におけるキャビテーションの影響, 日本混相流学会年会講演論文集, pp. 198-199, 2006.
- (2) 社団法人日本フルードパワー工業会, フルードパワーの世界, 2009.
- (3) 馬場, 吉田, 機械工学必携 8 版, 三省堂, pp.817-818, 2002.
- (4) 高島, 潤滑油の基本物性(潤滑油の蒸気圧), 日石レビュー Vol.40, No.1, pp.30-36, 1998.
- (5) Jean-Pierre, Michel, Fundamentals of Cavitation, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- (6) 松岡, 宇崎, 林, 赤対, 掛札, 日詰, 菊谷, T 字形エルボにおけるキャビテーションの流動, 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会 CD-ROM 版講演論文集, G105, pp. 1-4, 2007.
- (7) 苗木, 松岡, 林, 赤対, 菊谷, T 字形のエルボ内を流動するキャビテーションに関する研究, 日本混相流学会年会講演論文集, pp. 244-245, 2008.
- (8) 日本原子力学会編, 混相流測定法, 森北出版, pp. 279-281, 2003.

# 非構造格子に基づく流体粒子数値予測手法に関する研究

長 正和\* , 林 公祐\*\* , 赤対 秀明\*\*\*

## Study on Interface Tracking Method based on Unstructured Grid

Masakazu CHO\* Kosuke HAYASHI\*\* Hideaki SHAKUTSUI\*\*\*

### ABSTRACT

Numerical methods of grid generation and velocity-pressure coupling are examined to develop an accurate interface tracking method. Grid type chosen is unstructured and element shape is triangle. A modified Delaunay triangulation is used to automatically generate triangle elements. The velocity and pressure fields are coupled based on the SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) with the collocated arrangement. These methods are examined through the following benchmark problems: (1) drag forces acting on a cylinder and a sphere in infinite medium, (2) drag forces acting on spheres in circular tubes and (3) grid regeneration for a deforming boundary. The result confirms that the SIMPLE based on the unstructured triangle elements gives good predictions for drag coefficients of the cylinder and sphere, and the modified Delaunay triangulation generates high quality elements even if the boundary deforms. It is, therefore, expected that an accurate interface tracking method for deforming fluid particles can be developed by combining the SIMPLE and the grid regeneration algorithm.

*Keywords* : Fluid particle, Delaunay triangulation, Unstructured grid, Finite volume method

### 1 はじめに

気泡や液滴（流体粒子）を含む流れは化学反応塔や石油輸送パイプラインなど、多くの工業装置で見受けられる。したがって、流体粒子の運動を正確に予測することは、工業装置の設計上重要である。近年では、流体粒子運動の詳細な数値予測が試みられているが、流体粒子に働く抗力や揚力などに関する知識および評価モデルは不足した状態にあるのが現状である。

単一あるいは少数の流体粒子の高精度な計算を目的とする場合、流体粒子と周囲流体中で成立する連続の式および運動方程式を、界面における跳躍条件を考慮して解く界面追跡法<sup>(1),(2)</sup>が用いられる。気泡の場合、気相の粘性が小さいため、跳躍条件において気相側粘性応力を無視できる。したがって、気泡体積一定の条件より跳躍条件における気泡内圧を与えれば、気泡内部の速度場を解かなくてもよい。流体粒子内部のメッシングを行う必要がない<sup>(3)</sup>。これまでに、流体粒子の界面に沿った構造格子を生成する境界適合格子法に基づく界面追跡法によって、三次元領域における変形気泡の流れの数値計算が行われている<sup>(3)</sup>。一方、液滴の場合、液滴内部の流れも同時

に解く必要があるため、流体粒子内部のメッシングが必要になる。しかしながら、変形液滴内部の流れを構造格子を用いて解く場合、時間経過に伴い変形・移動する液滴内部に質の良い構造格子を自動生成することは難しいため、これまでの構造格子に基づく境界適合格子法では変形しない液滴のみを対象としている<sup>(4),(5)</sup>。

本研究では、変形を伴う流体粒子の抗力や揚力などの流体力のモデリングに利用できる界面追跡法の開発を目標とする。本報ではその第一段階として、格子構造や数値解法に関して、目標の達成に適した要素技術を選定する。また、選定した各々の要素技術の特性をいくつかの検証計算を通して検討する。

### 2 基礎方程式

本研究では、非加熱系の非圧縮性二相流を対象とする。この場合、流体粒子内部および外部では、式(1)および(2)に示す運動方程式と連続の式が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega = \int_S (-\rho u_i u_j - p \delta_{ij} + \tau_{ij}) dS_j + \int_{\Omega} \rho g_i d\Omega \quad (1)$$

$$\int_S u_j dS_j = 0 \quad (2)$$

ここで、 $t$ は時間、 $\rho$ は密度、 $u_i$ は速度ベクトル、 $p$ は圧

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 神戸大学大学院 機械工学専攻

\*\*\* 機械工学科 教授

力,  $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタ,  $\tau_{ij}$ は粘性応力テンソル,  $g_i$ は重力加速度ベクトル,  $d\Omega$ は微小体積要素,  $dS_j$ は面積要素ベクトルである.

二相界面では, 相変化なし, すべりなしの条件下で, 式(3)~(6)に示す跳躍条件が成立する.

$$u_n^{(o)} = u_n^{(i)} \tag{3}$$

$$u_t^{(o)} = u_t^{(i)} \tag{4}$$

$$-p^{(o)} + \tau_{nn}^{(o)} = -p^{(i)} + \tau_{nn}^{(i)} - \sigma\kappa \tag{5}$$

$$\tau_m^{(o)} = \tau_m^{(i)} \tag{6}$$

ここで, 上付添字(i), (o)は各流体粒子内部および外部の量を意味し, 下付添字  $n, t$  は界面法線および接線方向成分を意味する. また,  $\sigma$ は界面張力,  $\kappa$ は界面曲率である.

### 3 変形を伴う流体粒子数値予測のための手法選定

気泡や液滴の運動を高精度に予測するためには, 以下の特性を具備する計算技術が必要となる.

- (a) 界面近傍など精度が必要な領域に格子を集中可能な格子構造
- (b) 流体粒子内外に質の良い格子を容易に生成できる格子生成法
- (c) 界面変形に伴って格子を再生成できる格子生成法
- (d) 内外の解を界面上でマッチングするための反復計算アルゴリズム

**3.1 格子構造** 跳躍条件を正確に考慮するためには, 界面上に格子点を設け, 格子線によって界面形状を表現する方法が良い. 従来は図 1(a)のような一般曲線座標に基づく構造格子を利用した研究例が多いが, 一般曲線座標では複雑に変形する流体粒子内部に質の良い格子を再構成することは難しい. そこで, (b)のような格子構造を非構造, 要素形状を三角形要素とする. 非構造格子は局所的な格子の集中が容易であり, また三角形要素は任意二次元領域を分割できる. したがって, 上記(a)~(c)の要求を満たせる.

#### 3.1.1 非構造格子による三角形体積要素の生成

気泡や液滴は, 図 2 に示すように, 非常に低い粒子レイノルズ数  $Re (= \rho v d / \mu, d: \text{流体粒子直径}, v: \text{上昇速度}, \mu: \text{粘性係数})$  においては球形を維持するが,  $Re > 1$  の場合は楕円体やキャップ形になる. 工業装置内の流れはほとんどの場合  $Re > 1$  であるため, 流体粒子の変形を考慮する必要がある.

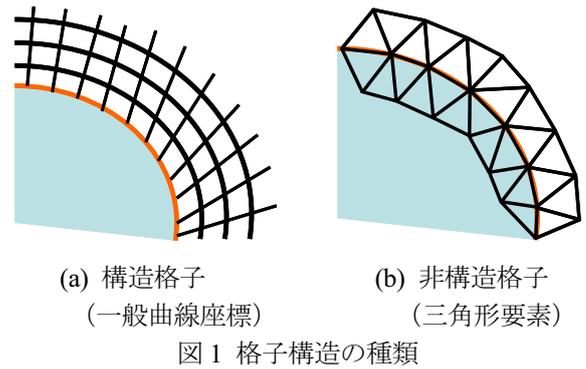


図 1 格子構造の種類

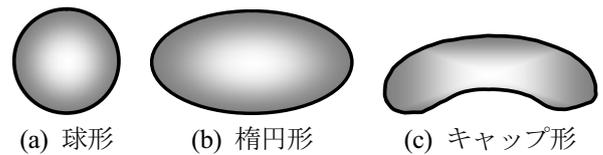


図 2 流体粒子の形状例

変形する流体粒子を扱うには, 流体粒子の運動に伴い, 界面に適合するように格子を再配置する必要がある. 特に三次元計算では, 構造格子による相界面近傍の複雑な形状に対する格子再配置は難しい. そこで, 三角形要素を利用することにより, 任意の二次元領域を分割でき, 界面近傍に要素を集中させることが容易となる. 本研究では, 内部境界を含む任意の二次元領域を一括で分割できるデローニー三角分割法を採用する. デローニー三角分割は, 図 3 に示すように, 生成されたある三角形の外接円内に他のいずれの節点も含まれないという特徴を持つ. この特徴によってひずみの少ない三角形要素が生成される.

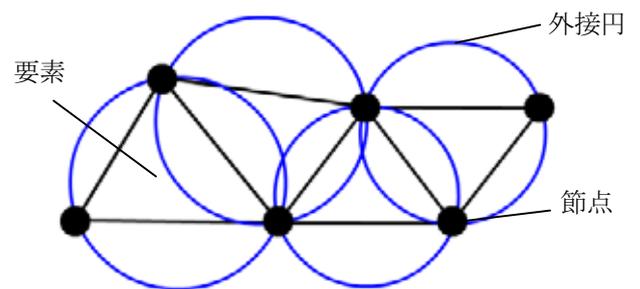
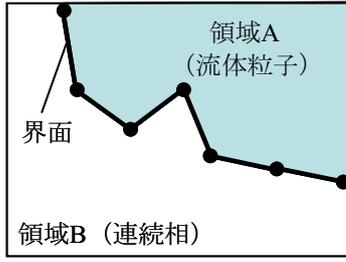
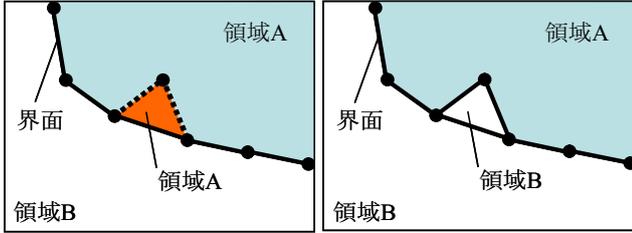


図 3 デローニー三角分割

しかしながら, デローニー三角分割法は, キャップ形のように界面が凹型部となっている場合, 正しく格子を生成できない. そこで, 凹型領域においても正しく格子生成ができるように改良された修正デローニー三角分割法<sup>6)</sup>を採用する. 従来のデローニー三角分割法では, 図 4(a)のような凹型領域を持つ計算領域を分割した場合, (b)のように実際とは異なる界面を形成してしまうが, (c)の修正デローニー三角分割法ではこの問題を解消している.

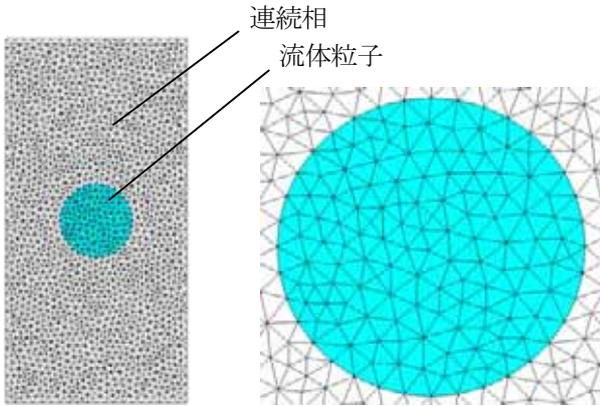


(a) 計算領域



(b) デローニー三角分割 (c) 修正デローニー三角分割  
図4 修正デローニー三角分割

**3.1.2 分割例** 図5に、流体粒子と周囲の連続相を修正デローニー分割法により分割した例を示す。総節点数は2000、総要素数は3864である。粒子内外の領域を、ほぼ均質な三角形要素で分割できている。



(a) 全体図 (b) 流体粒子近傍 (拡大図)  
図5 修正デローニー三角分割例

### 3.2 流れ場の解法

**3.2.1 数値計算法の選定** 修正デローニー三角分割法によって生成された各三角形体積要素上で、運動方程式(1)と連続の式(2)の離散化を行う。等間隔に配置された正方格子や一般曲線座標の場合は、数値計算手法として有限差分法が用いられることが多い。しかし、有限差分法では、本研究のような一定間隔に配置されていない格子配列に対する計算は困難である。

そこで本研究では、運動方程式の計算に有限体積法を用いる。有限体積法は、非構造の格子配列に対して用いられる手法のひとつである。

### 3.2.2 有限体積法に基づく運動方程式の離散化

式(1)の運動方程式を整理し、速度予測子  $u^*$  を求めるための代数方程式を導出する<sup>(7)</sup>。式(1)の右辺第一項を展開し、式(7)を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega = - \int_S \rho u_i u_j dS_j + \int_S \tau_{ij} dS_j - \int_S p \delta_{ij} dS_j + \int_{\Omega} \rho g_i d\Omega \quad (7)$$

ここで、式(7)の左辺は時間項、右辺の各項は第一項から順に、対流項、粘性項、圧力項、重力加速度項である。表面積分においては、要素表面を中心とする中心差分を行い、体積積分は微小体積要素を近似した。時間項の差分は二次精度の差分とした。

各項を離散化して整理すると、次の代数方程式が得られる。

$$A_P u_{i,P}^* = - \sum_N A_N u_{i,N}^* + Q_{i,P} \quad (8)$$

ここで、 $A$  は各項を離散化した際の速度  $u^*$  の係数、 $Q$  は陽的に計算される項（生成項）である。下付添字  $P$  は計算の対象となっている要素（セル）、 $N$  は要素  $P$  に隣接している要素を示す。

### 3.2.3 修正座標による計算精度の維持

これまでの近似では、要素重心座標  $\mathbf{r}_P$  と  $\mathbf{r}_E$  を結ぶ直線が要素表面中心  $\mathbf{r}_e$  を通ると仮定し、中心差分によって二次精度としていた。しかし、その仮定を満たすのは、2つの要素がどちらも正三角形である、あるいは同じ底辺を使用する二等辺三角形であるなど限定されており、実際は図6に示すように、 $\mathbf{r}_P$  と  $\mathbf{r}_E$  を結ぶ直線は、 $\mathbf{r}_e$  から離れた  $\mathbf{r}_e$  を通る。そのため、近似が二次精度を維持することができない問題が生じる。

この問題に対応するため、 $\mathbf{r}_e$  を通り、なおかつ要素表面に対して垂直に交わるような直線が結べる修正座標  $\mathbf{r}_{P'}$  と  $\mathbf{r}_{E'}$  を式(9)、(10)で求め、修正座標における物性値  $\phi_{P'}$ 、 $\phi_{E'}$  を式(11)、(12)で求める。

$$\mathbf{r}_{P'} = \mathbf{r}_e - [(\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_P) \cdot \mathbf{n}] \mathbf{n} \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_{E'} = \mathbf{r}_e - [(\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_E) \cdot \mathbf{n}] \mathbf{n} \quad (10)$$

$$\phi_{P'} = \phi_P + (\nabla \phi)_P \cdot (\mathbf{r}_{P'} - \mathbf{r}_P) \quad (11)$$

$$\phi_{E'} = \phi_E + (\nabla \phi)_E \cdot (\mathbf{r}_{E'} - \mathbf{r}_E) \quad (12)$$

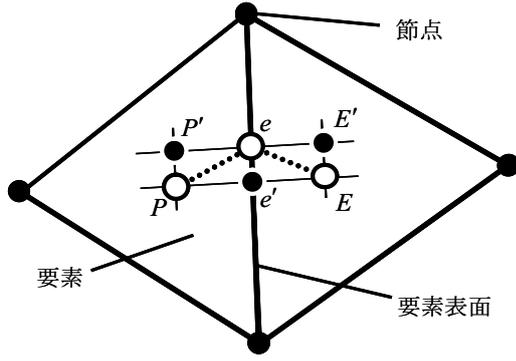


図6 修正座標の定義

ここで、 $\nabla\phi$ は各要素における平均勾配である。平均勾配は、式(13)のようにガウスの発散定理によって体積積分を面積分に近似する。そして、式(14)のように、対象要素を構成する要素表面の物性値と面積ベクトルの積の総和を、対象要素の体積で割ることによって求められる。

$$\int_{\Delta\Omega} \left( \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right)_P d\Omega = \int_{\Delta\Omega} (\nabla\phi)_P d\Omega \approx \int_S \phi n_i dS \quad (13)$$

$$(\nabla\phi)_P = \frac{\sum_N \phi_{N,e} S_{N,e}}{\Delta\Omega_P} \quad (14)$$

**3.3 反復計算法の選定** 代数方程式の解法として用いられる代表的なアルゴリズムには、MAC<sup>(7)</sup>(Marker And Cell method)や SIMPLE<sup>(8)</sup> (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)が挙げられる。MACは運動方程式より速度の予測値を求め、圧力方程式を解いて速度予測値を連続の式を満たすように修正し、時間を更新するため、得られた速度・圧力場は運動方程式を完全には満たしていない。これに対し、SIMPLEは運動方程式と連続の式の両方を満たすまで両式に対して外部反復と呼ばれる反復計算を行う。本研究では、流体粒子内部の流れを詳細に解けることを目標としており、そのために流体粒子の外側と内側の流れを交互に解き、界面近傍の速度が一致したとき時間を更新することを予定しているため、SIMPLEを採用した。これにより上記要求(d)を満たせる。

SIMPLEのアルゴリズム<sup>(8)</sup>を以下に説明する。

- 1) 圧力場  $p^*$  を推測する
- 2) 式(7)を離散化し、速度予測子  $u_{i,p}^{m*}$  を求める

$$u_{i,p}^{m*} = \frac{-\sum_N A_N^u u_{i,N}^{m*} + Q_{i,p}^{m-1}}{A_p^u} \quad (7)$$

- 3)  $u_{i,p}^{m*}$  を用いて、界面の法線方向速度成分  $v_{n,e}^{m*}$  を式(15)

で求める

$$v_{n,e}^{m*} = \left( v_n^{m*} \right)_e - \Delta\Omega_e \left( \frac{1}{A_p^{v_n}} \right)_e \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial n} \right)_e - \left( \frac{\partial p}{\partial n} \right)_e \right]^{m-1} \quad (15)$$

- 4)  $v_{n,e}^{m*}$  を用いて各界面を通過する質量流量  $\dot{m}_e^{m*}$  を式(16)で計算し、各要素別で総出入量を求める

$$\dot{m}_e^{m*} = \rho_e v_{n,e}^{m*} S_e \quad (16)$$

- 5) 質量流量が0であるならば、連続の式を満たしたことを意味するため、外部ループを抜け、速度および圧力を更新する。0でないならば、式(16)が0になるように速度の修正を行う必要がある。式(17)に示す、圧力修正の勾配による速度修正を用いて質量流束の修正を行う

$$\begin{aligned} \dot{m}'_e &= \rho_e v'_{n,e} S_e \approx -(\rho \cdot \Delta\Omega \cdot S)_e \left( \frac{1}{A_p^{v_n}} \right)_e \left( \frac{\partial p'}{\partial n} \right)_e \\ &\approx -(\rho \cdot \Delta\Omega \cdot S)_e \left( \frac{1}{A_p^{v_n}} \right)_e \left[ \frac{p'_E - p'_P}{(\mathbf{r}_E - \mathbf{r}_P) \cdot \mathbf{n}} \right] \\ &= A_E^p p'_E + A_P^p p'_P \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 $A_P^p$ 、 $A_E^p$ は質量流束の修正式によって得られる係数である。この考えを、対象要素を構成するすべての要素表面について適用すると、式(18)を得る。

$$\Delta\dot{m}' = \sum_N A_N^p p'_N + A_P^p p'_P \quad (18)$$

- 6) 式(18)より圧力修正量  $p'$  を求めるための代数方程式(19)を導き、 $p^*$ を式(20)によって新しく推測し、2)に戻り収束解が得られるまで全手続きを繰り返す

$$p'_P = \frac{-\sum_N A_N^p p'_N + \Delta\dot{m}'}{A_P^p} \quad (19)$$

$$p_P^* = p_P^* + \alpha_p p'_P \quad (20)$$

ここで、 $\alpha_p$ は緩和係数である。

流体粒子を計算対象とする場合、上記のアルゴリズムにおいて各外部反復の最初に跳躍条件を適用して界面上

の値を更新し、その後流体粒子内外の速度および圧力を更新する。粒子内外の全要素において連続の式および運動方程式が満たされたときに時間を更新する。

#### 4 要素技術の性能検証

**4.1 円柱周りおよび固体球周りの流れ** 一様流中の円柱および固体球に働く抗力については、過去の理論的、実験的研究により広範囲の条件において信頼性の高い値が得られている。そこで、これらの流れを上述の計算法により数値予測し、実験結果との比較を通して計算法の妥当性を検証した。

図8に各粒子レイノルズ数  $Re (=Ud/\nu)$  (ここで、 $U$ は一様流速度、 $d$ は円柱直径、 $\nu$ は動粘度である)における円柱周りの流線の計算結果を示す。 $Re=1$ においては円柱に沿った流れが形成されているが、 $Re=10, 100$ においては円柱後方に渦が形成されている。

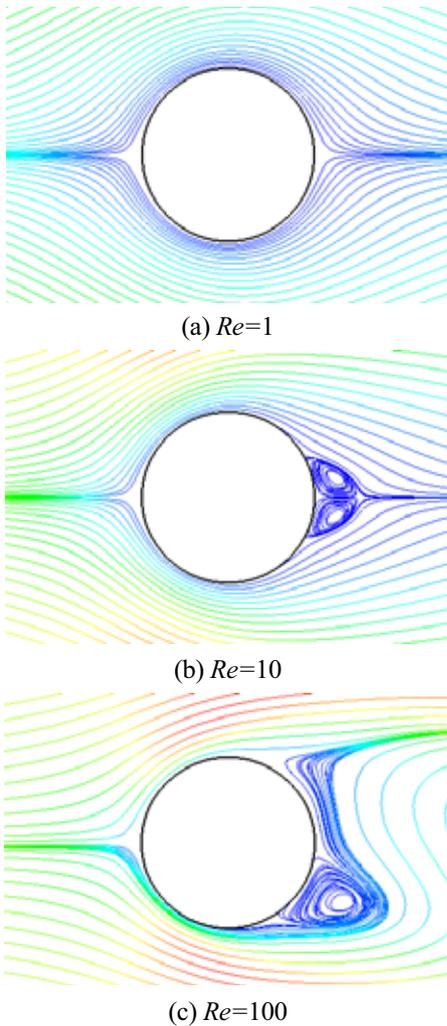


図8 円柱周りの流線

図9は固体球周りの流線である。低  $Re$  の場合、固体球周りの流れは軸対称になるため、ここでは二次元円筒座標系を用いて計算した。 $Re=1, 10$ においては、流線は固

体球表面に沿っているが、 $Re=100$ では剥離が生じて後方に渦が形成されている。これらの計算結果は可視化実験による結果と定性的によく一致している。

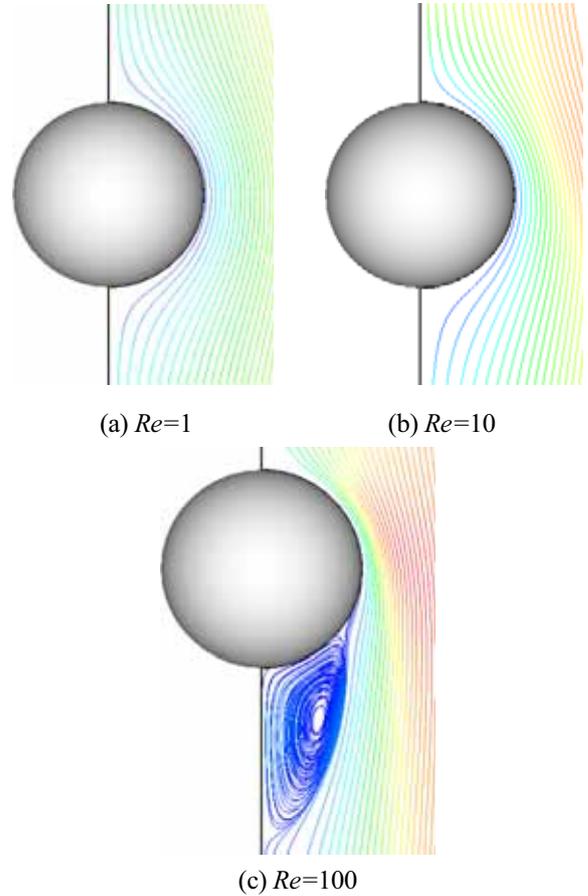


図9 固体球周りの流線

計算で得た円柱および固体球周りの抗力係数と理論値および測定値<sup>9)</sup>との比較を図10に示す。本計算法により、一様流中円柱および固体球の抗力係数を良好に評価できることが確認できた。

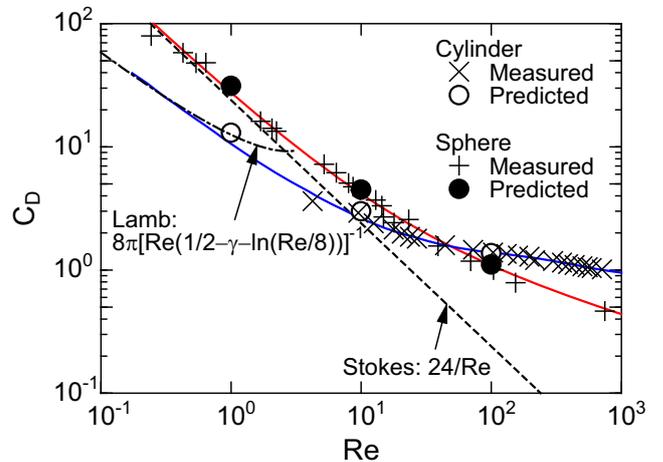
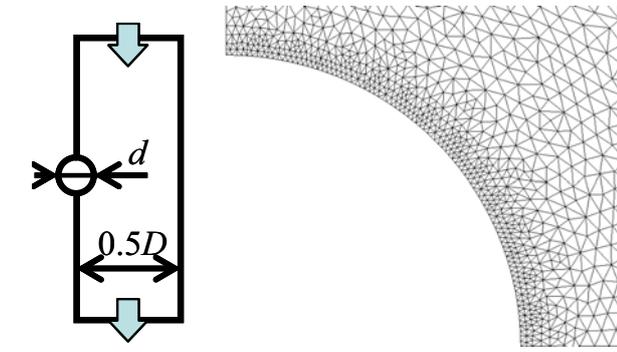


図10 抗力係数予測値と測定値および解析解<sup>9)</sup>との比較

**4.2 円管内固体球の抗力に対する壁効果** 工業装置内の流体粒子の運動は、流路形状や流路面積などの影響を受ける。そこで、円管内粒子に働く抗力に対する壁効果を精度良く評価できるか否かを調べた。図11に計算領域および固体球近傍の格子を示す。固体球直径  $d$  と円管直径  $D$  の直径比  $\lambda (= d/D)$  をパラメータとして、0.1, 0.2, 0.3, 0.4 の4条件の計算を実施した。



(a) 計算領域全体図 (b) 球近傍  
図11 計算領域

図12に抗力係数の計算結果と Haberman らの解析解<sup>(10)</sup>との比較を示す。予測値と解析解はよく一致しており、本計算法によれば、流路壁が流体粒子に働く抗力に及ぼす影響を良好に評価できることを確認できた。

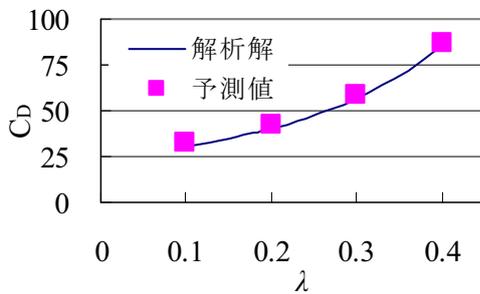


図12 円管内粒子の抗力係数

**4.3 界面の移動による格子の再構成** 移動及び変形を伴う粒子に対する自動格子再生成法を開発した。図13に本手法の適用例を示す。なお、ここでは流れを解かず、格子の移動量を入力値として与えた。本手法によれば、変形を伴う粒子周りの格子を容易に再分割できることが確認できる。

**5 おわりに**

非構造格子に基づく有限体積法によれば、一様流中球周りの流れや格子形状の時間変化を良好に扱えることを確認した。この流れ場の解法と本研究で開発した格子再生成法を組み合わせることにより、変形を伴う気泡や液滴の高精度数値解法を構築できる見通しを得た。

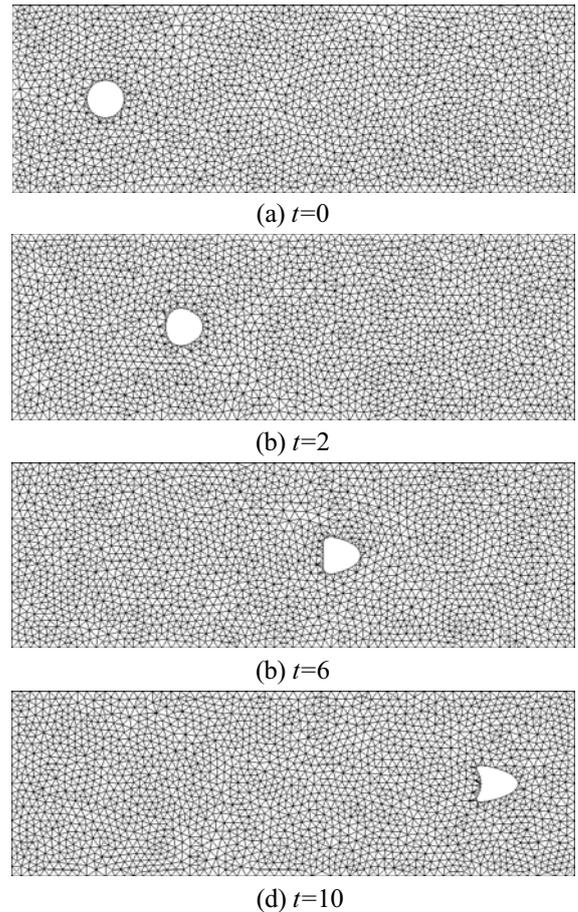


図13 界面の移動に伴う格子の再構成

**参考文献**

- (1) G. Ryskin and L. G. Leal, *Journal of Fluid Mechanics*, 148, 1-17, 1984.
- (2) C. W. Hirt, D. B. Nicholds, *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225, 1981.
- (3) 高木周, 松本洋一郎, 黄華雄, 日本機械学会論文集(B編), 61巻, 586号, 10-17, 1995.
- (4) D. S. Dandy, L. G. Leal, *Journal of Fluid mechanics*, 208, 161-192, 1989.
- (5) 杉岡健一, 小森悟, 日本流体力学学会, AM05-24-009, 2005.
- (6) 谷口健男:「FEMのための要素自動分割」, 森北出版株式会社, 1992.
- (7) J. H. ファーツィガー, M. ペリッチ:「コンピュータによる流体力学」, シュプリンガーフェアラーク東京, 2003.
- (8) S. V. パタンカー:「コンピュータによる熱移動と流れの数値解析」, 森北出版, 1991.
- (9) O. Wieselsberger, *National Advisory Committee for Aeronautics*, Technical Note No. 121, 1922.
- (10) W. L. Haberman, R. M. Sayre, *David Taylor Model Basin Report* No.1143, 1958.

# 簡易表面筋電位測定システムに関する研究

宮川 大毅\*

朝倉 義裕\*\*

## Study of Surface Myo-Electric Potential Measurement System

Daiki MIYAGAWA

Yoshihiro ASAKURA

### ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a measurement system for surface myo-electric potential. The amplifier of this system was assembled using Instrumentation amplifier I.C. with a gain of 500 times. To lower the impedance, a Voltage Follower circuit was added. A battery was used for the power supply. The amplifier showed the S/N ratio was 50dB. To measure two or more group of muscles simultaneously, the measurement channel was adjusted to 3 channels. The electrodes were put in three places (a trapezius muscle and a right and left sternocleidomastoid muscle) in total, an operation that moved the head in the upward and downward directions and right and left directions respectively were done in three sets for ten seconds each. The study concludes that the surface myo-electric potential has been measured quantitatively by the system in the experiment. The system was able to demonstrate in real time a measurement of stripe myo-electric in multi channel by using these circuits and a designed analytical software.

**Key words :** Surface Myo-electric potential, Bio-potential amplifier, Multi channel, Muscle of neck

### 1. はじめに

人が歩く、物を動かすなどの動作を行うときに、脳の指令により筋が収縮し、これが駆動力となる。脳から筋への指令は電気信号で行われる。筋の収縮時、筋に微弱な電流が流れている。これを筋電位信号という。筋電位は筋を収縮させるために、脳から伝達される電気信号が筋に到達して初めて観測される。筋電位信号は力の大きさや運動の柔らかさといった人の運動意図を反映して変化する。したがって筋電位信号を測定することにより、ある動作に対してどの筋がどの時点で、どの程度活動しているかを知ることができる。

筋電位の導出法は、用いる電極によって大きく2つに分かれる。1つは、筋内刺入する針電極を用いる方法で、臨床分野で用いられる。もう一つは、皮膚表面に取り付ける表面電極を用いるもので、これによって記録・表示されたものを表面筋電図と呼ぶ。表面筋電図法は、侵襲性がないので、体育・スポーツ、リハビリテーション、人間工学などの分野において主に用いられる<sup>(1)</sup>。

表面筋電図に関しては、義手の制御や動作識別を目的として、スペクトル解析や、多チャンネルの筋電位信号による多変量解析を用いた研究が盛んになり、バーチャルリアリティや手話などで、指の動作をPCに取り組み際にも表面筋電図が使われるようになった<sup>(2)(3)(5)</sup>。

このように現在、表面筋電位は電気生理学的な基礎研究や、臨床医学だけでなく、体育・スポーツやリハビリテーション、バーチャルリアリティの分野へと広い範囲で応用されている<sup>(4)</sup>。

現在さまざまなメーカーから筋電位測定用のアンプが市販されているが、どれもかなり高価なものである。自分で回路を作ることによりコストを削減するとともに、調整や改良などが自由に行えるメリットがある。

本研究は、将来的にゲームやシミュレータのコントローラとして応用することが目的である。現在、発売されているゲームや、カメラの視点操作は大半が手動のコントローラ操作で行われている。これに筋電位測定装置を応用すれば、例えば首や目の周辺に電極を装着し、実際の生活と同じように頭や目を向きたい方向に動かすことにより、ゲーム内での視点も連動して動くなど、より実体験に近い感覚で直感的に操作できるようになると考えている。

本研究は、簡単に筋電位を測定し、解析できるシステムを開発、改良することを目的とする。

### 2. 筋電位とは

筋電位は筋が収縮した時に発生するものではなく、筋を収縮させる原因である。したがって、弛緩している筋を押しても、圧縮素子のように電位が発生するわけではない。筋電位は筋を押しても、電位は発生しない。筋電位は筋を収縮させる電気信号が筋に到達して初めて観測されるものである。筋線維の活動は、運動神経細胞からの神

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 機械工学科 准教授

経パルス列がこないと電気的にはみえない。

神経筋接合部は通常、筋線維の長さ方向のほぼ中間に存在する。神経接合部から開始した電気的興奮は、筋線維の両端に向かって3~6m/sの速さで伝播していき、筋線維の末端に到達した時点で消滅する。筋線維上の脱分極は、細胞膜を通る膜電流を引き起こし、膜電流は周囲の容積導体を通して電位変化を生じる。この電位変化を導出したものが筋電位である。また、電位変化を時系列信号としてとらえた場合には筋電位信号と呼ぶ。

### 3. 測定回路

筋電位は皮膚表面のインピーダンスが高く、表面で得られる筋電位はわずか数十 $\mu$ Vから数mV、周波数が5~500Hzの微小な信号である<sup>(1)</sup>。これは計測時に周りの電化製品などから発生するノイズに消されてしまう恐れがあるほど微小な信号である。そのため筋電位信号を測定するためには専用の増幅回路が必要になる。

本研究では、電極で検出された筋電位信号に混入するノイズ(雑音)を効果的に抑制するために、双極誘導と呼ばれる測定方法を用いた。双極誘導とは、二つの電極を用いて、入力信号の差分を増幅する方法である。また微小な筋電位信号をA/Dコンバータで測定可能な $\pm 5$ Vを得るためには100~10000倍に増幅する必要がある。そこで、1000倍まで増幅可能なインストルメンテーションアンプを用いて増幅回路を構成した。次に、インピーダンスを下げるためにボルテージフォロワ回路を追加した。今後、筋電位をスイッチとするアプリケーション開発を行う目的で全波整流回路と平滑化回路を追加した。Fig. 1にシミュレーション構成を示す。

### 4. 回路シミュレーション

**4.1. 回路シミュレーション概要** 本研究では、回路製作に先立ち回路シミュレーションを行った。回路シミュレーションにはLinear Technology社のLTSpiceを用いた。このソフトは無料であり、Spiceのデータ形式で提供される多様な電子部品を用いてシミュレーションが可能である<sup>(6)</sup>。本研究で行ったシミュレーションの条件をTable 1に示す。

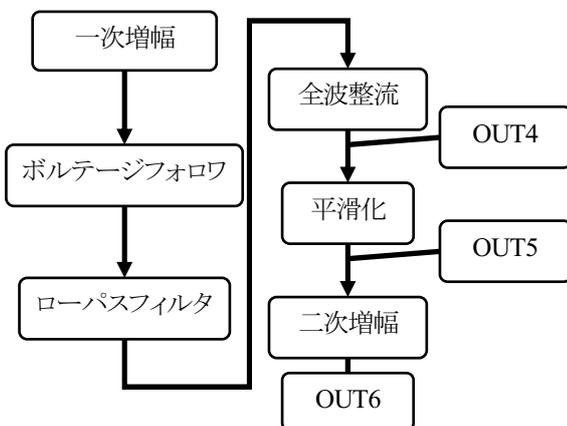


Fig. 1 シミュレーション構成

Table 1 シミュレーション条件

|               |                |
|---------------|----------------|
| 動作電圧[V]       | $\pm 6.0$      |
| 入力電圧(筋電位)[mV] | $\pm 10$       |
| 入力周波数[Hz]     | 100(+側), 0(-側) |
| シミュレーション時間[秒] | 0~1            |

**4.2. 回路シミュレーションの結果** Fig. 2にシミュレーション結果を示す。Fig. 2(a)は、Fig. 1中のOUT4とOUT5の出力結果をグラフ化したものである。擬似的な筋電位信号である入力電圧を500倍に差動増幅し、全波整流を行った後、平滑化された信号が確認できた。

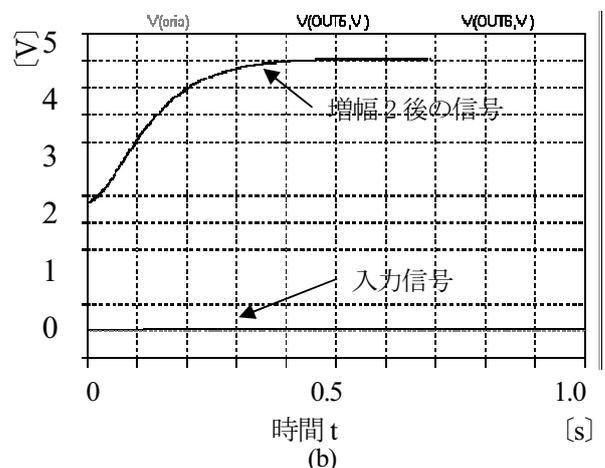
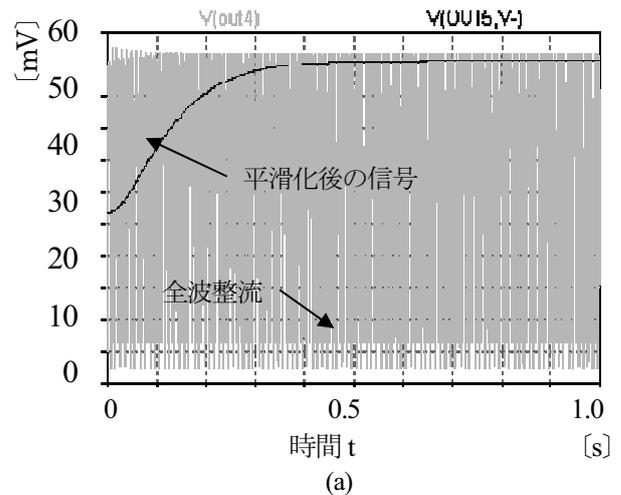


Fig. 2 シミュレーション結果

Fig. 2(b)は、OUT6での出力信号である。平滑後の信号を増幅することにより目的の出力電圧付近の値が得られることを確認した。

### 5. 実機の評価および考察

Fig. 1の回路に基づいた実回路を製作した。ノイズを受ける原因となる配線の交差等を避けるよう、部品のレイアウトと配線設計を行った。エッチングによりプリント基板を製作し、部品を実装した回路を製作した。

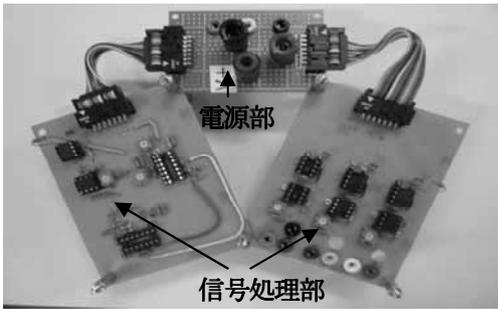


Fig. 3 製作した測定回路外観

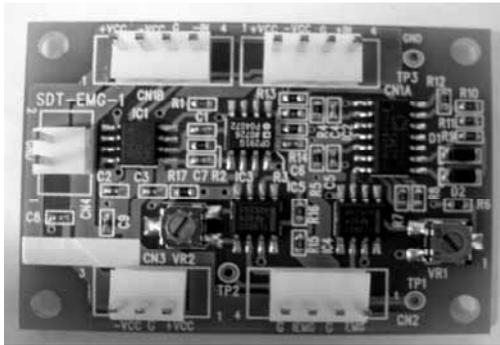


Fig. 4 既製品の測定回路外観

今まで電源を安定化電源から供給していた。そのため交流成分である 60Hz のノイズが入り込んでいたが、それを低減するため乾電池に変更した。Fig. 3 に製作した測定回路外観を示す。

また、製品化されている筋電位測定装置と比較することで、製作した回路が正常動作しているかの検証を行った。Fig. 4 に既製品の測定回路外観を示す。

評価にあたり擬似的な筋電位信号である 10mV、100Hz の信号を入力信号として与え性能評価を行った。Fig. 5, 6 にそれぞれの出力結果を示す。S/N 比は式(1)を用いて算出した。ノイズの出力電圧は、何も信号を入力していない状態で回路から出力された信号とした。

$$S/N[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{V_S}{V_N} \right) \quad (1)$$

ただし、 $V_S$ : 信号の出力電圧、 $V_N$ : ノイズの出力電圧

本実験により以下の結果が得られた。

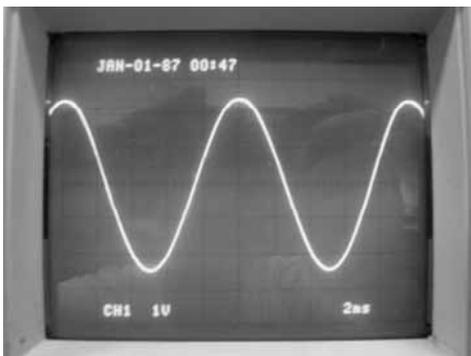


Fig. 5 製作した回路の出力

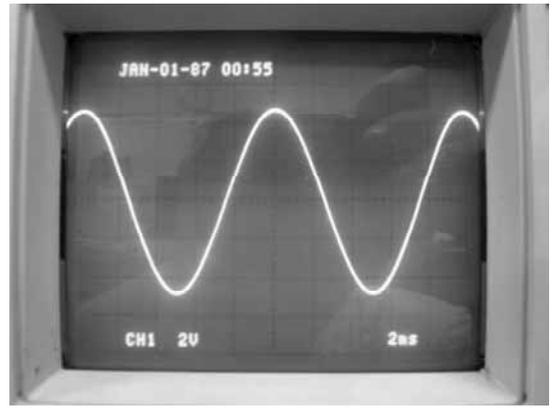


Fig. 6 既製品の回路の出力

- Fig. 5 より入力信号が 500 倍に増幅されて出力されていることがわかった。
- Fig. 6 より入力信号が 1000 倍に増幅されて出力されていることがわかった。
- Fig. 5, Fig. 6 より同じ入力信号から増幅率以外ほぼ同じ出力信号が計測できるとわかった。
- 式(1)よりノイズ耐性は製作した回路が S/N 比で 54dB, 既製品の回路が 56dB とわかった。

以上のことから正確に筋電位信号を測定でき、アプリケーション開発に必要な信号にまで変換できたといえる。

## 6. 解析ソフト

本研究で開発した解析ソフトは、筋電位信号から重要な特徴量である平均振幅とパワースペクトルを解析、算出する。これらの動作は窓関数をかけ、高速フーリエ変換 (FFT) により可能となる。筋電位の信号の周波数領域が 5 ~ 500Hz<sup>(1)</sup> であるのでパワースペクトル解析の前処理として 5 ~ 500Hz のバンドパスフィルタを用いた。非活動時と活動時の筋のスペクトル解析をするために、サンプリング波形の任意の範囲を解析するソフトを作成した。複数の筋を同時に計測するために、測定チャンネルを 3ch にした。測定値データを 0.25 秒おきに転送し、ファイルを記録できるようにした。

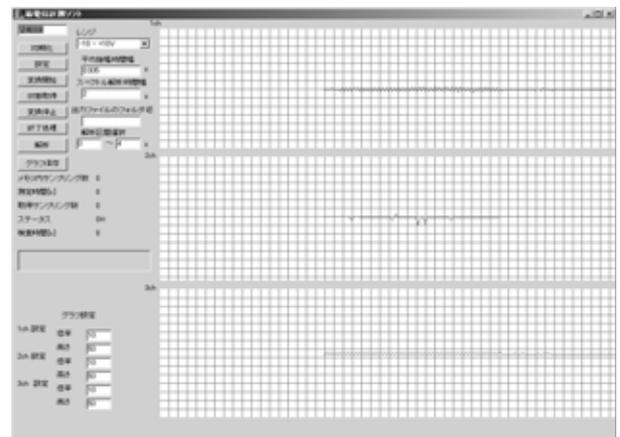


Fig. 7 解析ソフトによるディスプレイ表示の例

また、多チャンネルの同時計測、長時間測定にも対応しており、これらの機能により様々なシチュエーションの測定、解析を行うことができるように汎用性を持たせた。Fig. 7に解析ソフトによるディスプレイ表示の例を示す。

### 7. 測定実験

本研究で製作した回路を用いて基礎実験を行った。

•測定条件:

被験者は健常者の21歳男性。首周辺の筋を完全に弛緩させた状態にするため、仰向けに寝た状態で測定を行った。

•測定対象:

右側僧帽筋、左側胸鎖乳突筋、右側胸鎖乳突筋<sup>(7)</sup>

•測定方法:

首を上下左右に向けた状態、リラックスして力を入れず弛緩させた状態、首の被験筋すべてに力を入れた状態それぞれ10秒間保つ動作を行った。

### 8. 測定結果

僧帽筋を緊張させた結果を Fig. 8.1 に示す。僧帽筋を弛緩させた結果を Fig. 8.2 に示す。

Fig. 8.1 と Fig. 8.2 を比較すると筋電位が発生していることが見てとれる、しかし、ノイズが多く読み取りが困難なため周波数解析結果を示す。Fig. 8.2は本来ならば何も出力信号が出ていないことが望ましいがノイズによる電位が出力されている。

全部位を緊張させ、周波数解析したパワースペクトルを Fig. 8.3 に示す。筋電位の周波数である5~500Hz間ですべての筋において電位が発生しているのがわかる。

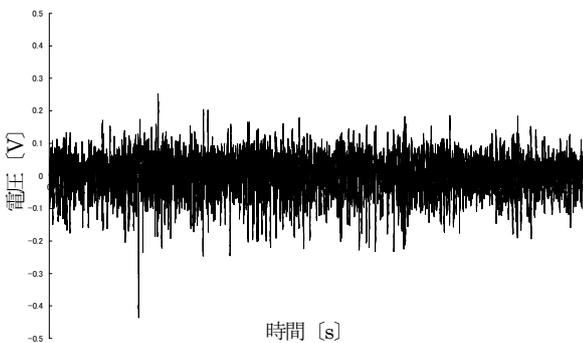


Fig. 8.1 右側僧帽筋の緊張状態の表面筋電図

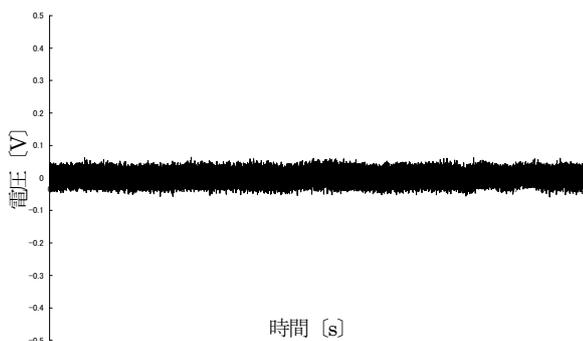
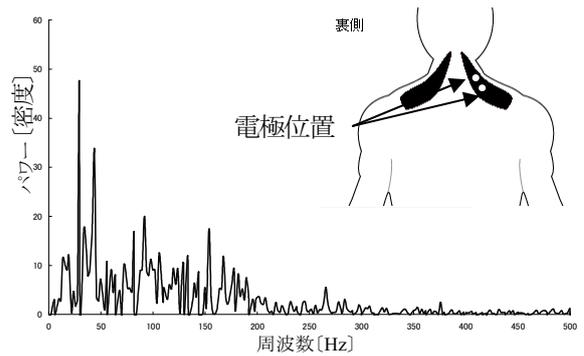
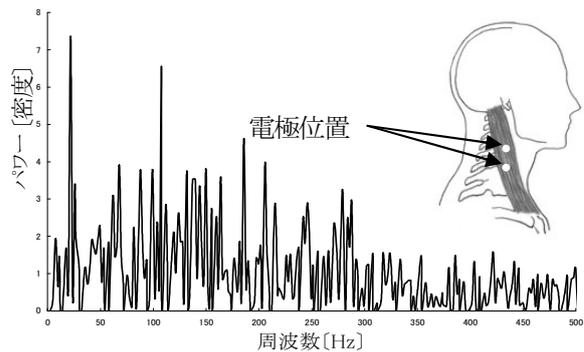


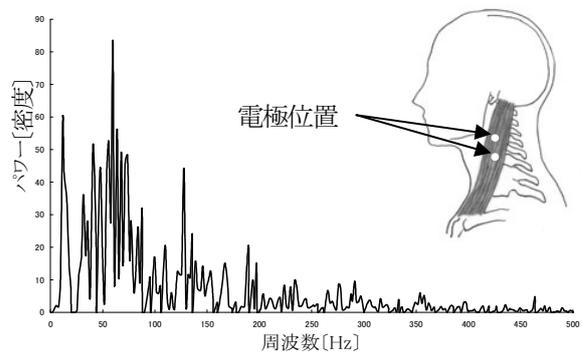
Fig. 8.2 右側僧帽筋の弛緩状態の表面筋電図



(a) 右側僧帽筋

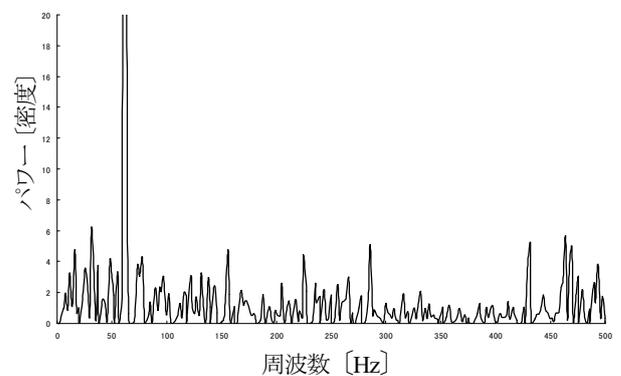


(b) 右側胸鎖乳突筋

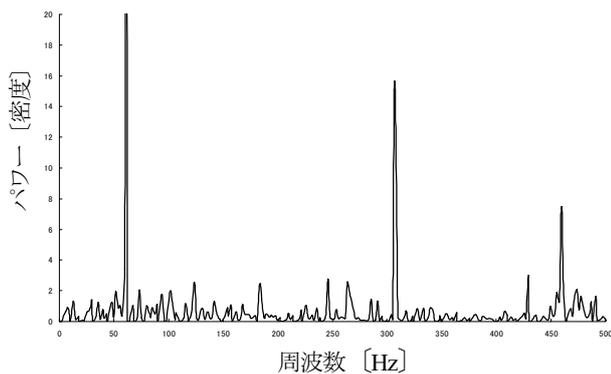


(c) 左側胸鎖乳突筋

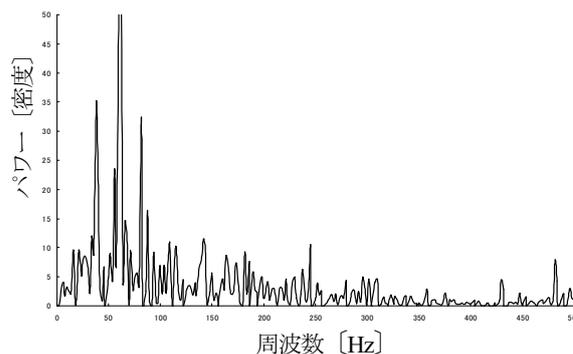
Fig. 8.3 実験結果(全部位緊張状態)



(a) 右側僧帽筋

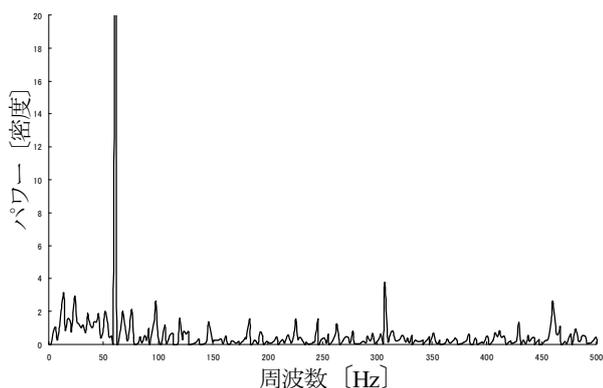


(b) 右側胸鎖乳突筋



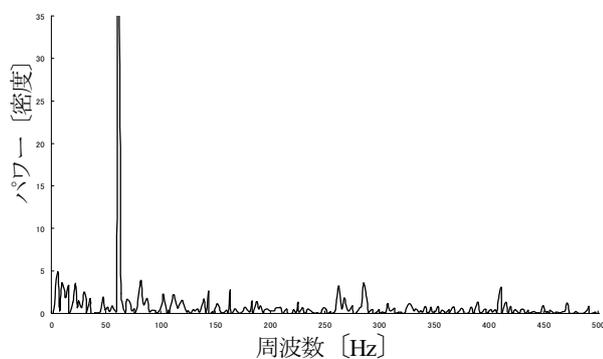
(c) 左側胸鎖乳突筋

Fig. 8.5 実験結果(下向き)

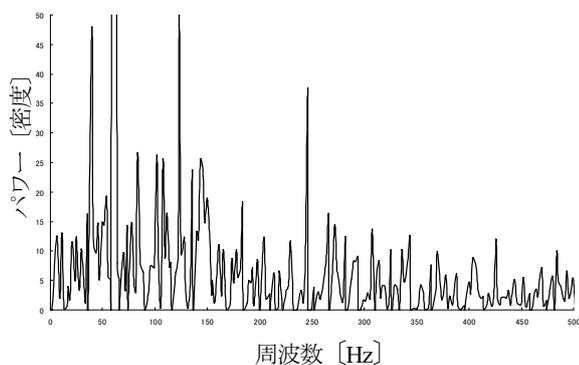


(c) 左側胸鎖乳突筋

Fig. 8.4 実験結果(上向き)



(a) 右側僧帽筋



(b) 右側胸鎖乳突筋

Fig. 8.4 は被験者に首を上に向ける状態を 10 秒間保ってもらった結果である。首の右後ろ側の筋である僧房筋が活動していることがわかる。逆に首の前側から頭の側面までの筋である左右の胸鎖乳突筋は活動していない。

Fig. 8.3(a)と Fig. 8.4(a)を比較すると首を上に向けたときの Fig. 8.4(a)のパワースペクトルが小さい。これは何度も計測を行った結果、筋が疲労してきたためと考えられる。

Fig. 8.5 は被験者に首を下に向ける状態を 10 秒間保ってもらった結果である。左右の胸鎖乳突筋だけが活動していることがわかる。逆に僧房筋は活動していない。

Fig. 8.4 と Fig. 8.5 を比較すると首を下に向けたとき、上に向けたときよりも全体的にパワースペクトルが大きいとわかる。これは、被験者に仰向けに寝てもらったため、頭を持ち上げようとする力が働いたためと考えられる。

以上、今回開発した装置にて測定できるかどうかの観点からまとめた結果を Table 2 に示す。

Table 2 筋電位発生の有無

|         | 上 | 下 | 右 | 左 |
|---------|---|---|---|---|
| 右側僧房筋   | ○ | × | △ | × |
| 右側胸鎖乳突筋 | × | ○ | ○ | × |
| 左側胸鎖乳突筋 | × | ○ | × | ○ |

ただし、○:電位発生 ×:電位無発生  
△:微弱な電位発生

以上の結果より頭を左右に動かしたときは胸鎖乳突筋がそれぞれ片方にだけ電位が発生していることが見て取れた。しかし、頭を右に向けた際に首の後ろ側の筋である僧房筋に微弱ながら電位が発生している。これは首の右側の僧房筋に電極を貼り付けたからと考えられる。

実験結果からそれぞれの筋と計測された筋電位が対応していることから首周辺の筋電位が計測できているとわか

る。全実験を通して、60Hz に大きな交流ノイズが混入しているが、どの筋も 10Hz～200Hz の範囲で大きな活動が見られた。

## 9. おわりに

エッチングによりプリント基板を製作し、部品を実装した回路を製作した。

改良前と比較して

- ・配線の交差等を避けるよう、部品のレイアウトと配線設計を行った。
- ・交流成分である 60Hz のノイズを低減するために乾電池に変更したことにより、ノイズ耐性を前年と比較すると S/N 比約 25 dB から 54 dB まで向上できた。
- ・測定回路と解析ソフトの 3ch 化に伴い異なった筋の同時測定を用い、その相互関係を考察した結果、首の動作を筋電図から読み取れるようになった。
- ・計測実験より、首を上に向けるときは僧帽筋が活動し、首を下に向けるときは両側の胸鎖乳突筋が活動し、首を左右に向けるときはそれぞれの胸鎖乳突筋が活動しているとわかった。首の姿勢に関する胸鎖乳突筋、僧帽筋の表面筋電位と首運動の関係を知り、大まかに動作を予測できる程度には測定できた。

以上の改良点の成果をみたが、問題として電源を乾電池に変更したことにより、低減されてはいるが、全体的に 60Hz の交流成分がみられる。これは、安定化電源からの混入だけではなく、皮膚表面や電極のリード線からも混入していると考えられる。

これらの回路と解析ソフトを用いてリアルタイムにおける多チャンネルの筋電位測定が行えるシステムを構築した。

## 参考文献

- (1) 木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 佐渡山亜兵, 「バイオメカニズム・ライブラリー 表面筋電図」, 電機大出版局, 2006.
- (2) 廣瀬和彦, 「筋電図判読テキスト」, 文光堂, 1992.
- (3) 伊福部達, 「感覚フィードバック型ハンド」日本ロボット学会誌, 7 巻 5 号. pp.496-500, 1989.
- (4) Clifford Hess and Larry C.H.Li, "APPLICATION OF DEXTEROUS SPACE ROBOTICS TECHNOLOGY TO MYOELECTRIC PROSTHESES", 2003 In NASA, Washington, Technology: The Fourth National Technology Transfer Conference and Exposition, Volume 2, pp.255-268.
- (5) Fernandez M "Electrode Contact Noise in Surface Biopotential Measurements.", 1992, Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 14th, Vol. 1, pp.123-124
- (6) 遠坂俊昭, 「電子回路シミュレータ SPICE 実践編」, CQ 出版社, 2004.

- (7) ジョン H. ウォーフィル, 「図説 筋の機能解剖 第 4 版」, 医学書院, 1993.

# 熟練者やワープロ文字の特徴を取り入れた 個人の手書き文字フォント

才木 常正\* 宮武 克幸\*\* 林 昭博\*\*\*

## Improvement of Personal Handwritten Character Fonts by Getting in Calligrapher's Character Features or Word-processing Ones

Tsunemasa SAIKI\* Katsuyuki MIYATAKE\*\* Akihiro HAYASHI\*\*\*

### ABSTRACT

In this paper, we describe visual impressions of novel word-processing fonts, which have both features of personal user's own handwritten characters and of expert calligrapher's ones or commonly used word-processing ones. Characters of the novel fonts are created from the handwritten characters and the referential ones by morphing technique. By using questionnaires of sentences consisted of the novel font characters, we investigate the relationship between the impression and interpolation rate that means the uptake levels of referential characters. As a result, it was found that subject readers could recognize almost exactly the interpolation rates. Furthermore, it was also found that the interpolation rates which the readers liked best were approximately 0.6 for the uptake of the calligrapher's character and approximately 0.5 for the uptake of the word-processing ones. From these results, we could have an idea of the uptake levels of the referential characters.

*Keywords:* word-processor, handwriting, character, font, calligrapher

### 1. はじめに

近年、事務文書においては、編集や校正機能等の利便性からワードプロセッサで印刷された文章（以後、ワープロ文章という）が多用されている。一方、個人間の手紙や葉書においては、書き手の個性が現れかつ読み手に温かみを感じさせることから、手書き文章が使われる場合も多い。これらワープロ文章と手書き文章の利点を考慮し、最近、手書き文字フォント制作のソフトウェア販売<sup>(1)</sup>やサービス<sup>(2)</sup>が行われ、文字フォントそのものを活字調（例えば、MS 明朝、MS ゴシックなど）から手書き風にしたワープロ文章（以後、手書き風ワープロ文章という）を簡単に作成できるようになっている。

個人の手書き文字フォントの制作においては、基本とする数少ない個人の手書き文字から筆跡の癖を抽出し、ぼう大な数の手書き文字フォントを自動生成できるプログラムを用いている。このため、従来では多くの労力が必要であった個人の手書きフォントの制作が低コストで行える。

一方、書道家などの熟練者の書く文章は文字形状そ

のものが美しく、また文字配置においてもバランスがよく美しく感じる<sup>(3)</sup>。このため、人は一般に熟練者の書くような綺麗な筆記を好み、自分の字をより綺麗にするために書道やペン字等を習う。このことから、個人の特徴を残しつつも熟練者のような綺麗な手書き風ワープロ文章を作成できれば、より多くの人が使用するようになると考えられる。筆者らは熟練者の特徴を取り入れたワープロ文章の文字配置方法について提案し、手書き風ワープロ文章において提案した文字配置方法の有用性を確かめた<sup>(4)</sup>。

本論文では、個人の手書き文字フォントの制作時に用意する基本とする個人の手書き文字に、熟練者やワープロ文字の特徴を取り入れ、個人の手書き文字フォントを改善する方法を提案し、特徴の取り入れ度合いと人が感じる印象について調べた結果について述べる。モーフィング<sup>(5)</sup>を用いて、個人の手書き文字と熟練者やワープロ文字の中間文字形状を持つ文字画像を制作し、これらの文字を配置して文章を作成する。そして、熟練者の文字形状の取り入れ度合いと作成した中間文章の印象を調べ、個人の文字に熟練者の特徴を取り入れることの有用性について検討する。次に、熟練者の文字とは異なった意味（整っていて読み易い等）で好まれる活字調のワープロ文字についても、その特徴の

\* 兵庫県立工業技術センター（平成元年度卒）

\*\* ソニーエムシー株式会社（平成 16 年度専攻科修了）

\*\*\* 電子工学科 教授

取り入れ度合いと印象について検討する。

## 2. 熟練者の特徴を取り入れた個人の手書き文字フォントと文章の作成

熟練者の文字形状の特徴を取り入れた個人の手書き文字フォントを制作するため、モーフィング<sup>(5)</sup>を用いて個人の文字と熟練者の文字の中間文字を制作する。ここでは、個人として習字歴のない人（以下、素人という）を対象とした。まず、素人と熟練者の手書き文字をイメージスキャナによって画像データとしてコンピュータに取り込み、2値化処理する。次に、図1に示すように、取り込んだ素人と熟練者の文字画像の対応する黒領域の輪郭点の座標 $(x_{ai}, y_{ai})$ と $(x_{si}, y_{si})$ を指定する。これらの輪郭点をもとにして、素人から熟練者の文字へ割合 $P$ 変化させた中間文字画像（以後、内挿の割合 $P$ の中間画像という）の輪郭点の座標 $(x_{mi}, y_{mi})$ を式(1), (2)によって求める。

$$x_{mi} = (1 - P)x_{ai} + Px_{si} \quad (1)$$

$$y_{mi} = (1 - P)y_{ai} + Py_{si} \quad (2)$$

その後、得られた中間文字画像の隣り合う輪郭点を直線で結び、これらの直線によって囲まれた範囲を塗り潰す。このようにして、内挿の割合 $P$ の中間文字画像を制作する。ちなみに、 $P=0$ の文字は素人そのものの文字であり、 $P=1.0$ の文字は熟練者そのものの文字である。

上記方法で制作した中間文字を並べて作成した文章、つまり熟練者の特徴を取り入れた個人の手書き文章の例を図2に示す。同図(a), (b), (c)は文字の羅列（以後、文章内容という）が異なる文章である。ここでは、文章内容として、漢字3文字とひらがな2文字から構成される5文字を3冊のペン字の教本<sup>(6)-(8)</sup>から引用した。このため、右端に示した熟練者の文章( $P=1.0$ )の書き手は同図(a),(b),(c)でそれぞれ異なる。また、左端に示した素人の文章( $P=0$ )についても同図(a), (b), (c)で異なる書き手の文章を採用した。これら素人の文章のサンプル作成時には、各書き手に教本と同じ幅17mmの罫線を引いた用紙に自然に書いてもらった。一方、図2の熟練者と素人以外の文章 ( $0 < P < 1.0$ の文章) はそれぞれの素人と熟練者の内挿の割合が $P$ の中間文章の例である。ここでは、図2に示した全ての文章の文字配置は文字の外接四角形の中心を揃え、一定の文字間隔（各熟練者の文字間隔の平均値）で行なっている。

図2(a)の文字「愛」の上部「ノ」に注目すると、熟練者の文字( $P=1.0$ )の「ノ」の長さは素人のそれ( $P=0$ )よりかなり短いことがわかる。その長さは $P$ の値が増えるにしたがって、徐々に短くなり素人の文字の長さから熟練者の文字の長さへ近づく。また、その形も、 $P$ の値が増えるに従って、中央部が凹んだ弓形の形から直線的な形状になってくる。同様の傾向が各文字の各部位に

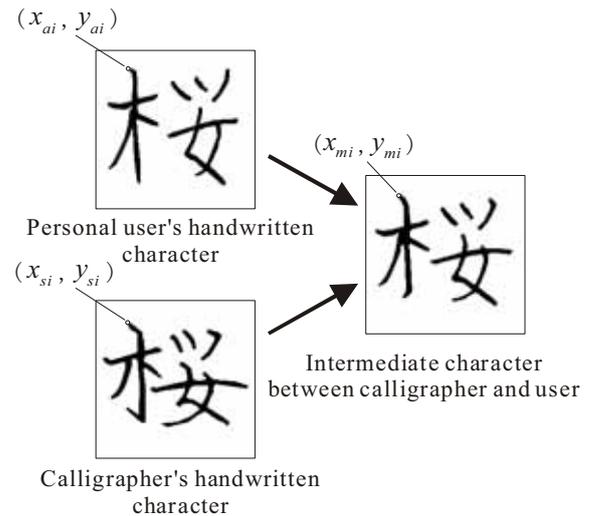
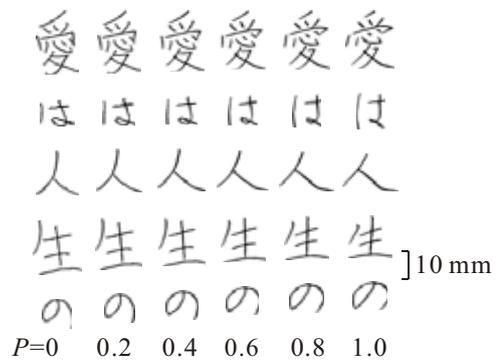
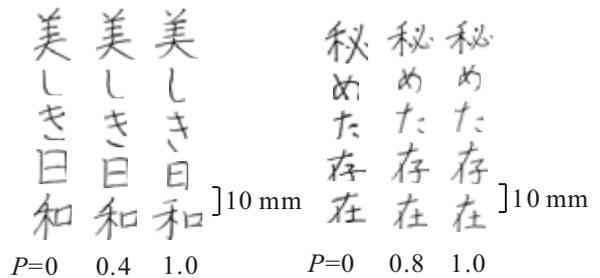


図1 熟練者の特徴を取り入れた個人の手書き文字の制作



(a) Content A



(b) Content B

(c) Content C

図2 熟練者の特徴を取り入れた個人の手書き文章の例

も見られる。このことから、 $P$ の値に応じて、熟練者の文字形状の特徴の取り入れ度合いが変化していることがわかる。また、図2(b)及び(c)に示した文章を見ても、それぞれの熟練者の特徴を取り入れたそれぞれの素人の中間文章が作成できていることがわかる。

## 3. 熟練者の特徴を取り入れた個人の手書き文章の印象

本章では、前章の方法で作成した熟練者の特徴を取り入れた個人の手書き文章の印象を調べるために行っ

た2種類のアンケート調査とその結果について述べる。一つのアンケートでは、熟練者の特徴の取り入れ度合いと読み手が感じる取り入れ度合いについて調べた。もう一方のアンケートでは、個人の特徴を残しつつ好ましいと感じる熟練者の特徴の取り入れ度合いについて調べた。

### 3.1 熟練者の特徴の取り入れ度合いの感じ方

熟練者の特徴の取り入れ度合いとその感じ方を調べるために用意した調査用紙を図3に示す。調査用紙は2種類からなり、一つは素人と熟練者の文章を印刷した用紙(図3(a)), もう一種類はそれら中間文章を印刷した用紙(同図(b))である。ここでは、用紙はA4判を用い、サンプル文章は3行30文字で構成した。ちなみに、用意した中間文章の内挿の割合 $P$ は0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.6, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9である。また、 $P=1.0$ の熟練者の文字はペン字の教本<sup>(9)</sup>より引用した。

アンケート調査では、素人( $P=0$ )と熟練者( $P=1.0$ )の文章を印刷した用紙を被験者に常時提示しておき、中間文章が書いてある用紙を被験者にランダムに一つずつ提示する。このとき、被験者に提示された中間文章がどの程度の割合で文字の形を変化させた文章として感じるかをその割合で答えてもらった。この被験者に答えてもらった割合は、素人の文章から熟練者の文章へ変化させた物理的な実際の内挿の割合 $P$ と区別するために、本論文では心理的な内挿の割合 $S$ と定義する。被験者数は30名(理工系学生)である。

熟練者の特徴の取り入れ度合いとその感じ方の結果を図4に示す。横軸は中間文章の物理的な内挿の割合 $P$ を、縦軸は心理的な内挿の割合 $S$ を表す。●印は被験者の心理的な割合 $S$ の平均値を表し、エラーバーはその標準偏差を表す。この図を見ると、心理的な割合 $S$ の標準偏差は0.14から0.23のばらつきがあるが、その平均値は物理的な内挿の割合 $P$ とほぼ等しい関係である。つまり、被験者一人一人としては多少のばらつきがあるが、被験者全体として平均すれば物理的な内挿の割合 $P$ と心理的な内挿の割合 $S$ とはほぼ一致していることがわかる。

次に、この実験結果を基に、物理的な内挿の割合 $P$ 毎に心理的な内挿の割合 $S$ のデータを分け、 $t$ 検定によりそれぞれのデータ群の差異を調べた。その結果をまとめて表1に示す。ここで、○印は有意水準5%で有意差が有ることを表し、×印はこれが無いことを表す。これより、ほとんどの組み合わせにおいて有意水準5%で有意差があるが、 $P$ の差が0.1の一部の組み合わせにおいて有意水準5%で有意差が見られないことがわかる。このことは、2つの文章の物理的な内挿の割合 $P$ の差が0.1以下になると、人は区別がつきにくいことを示唆している。

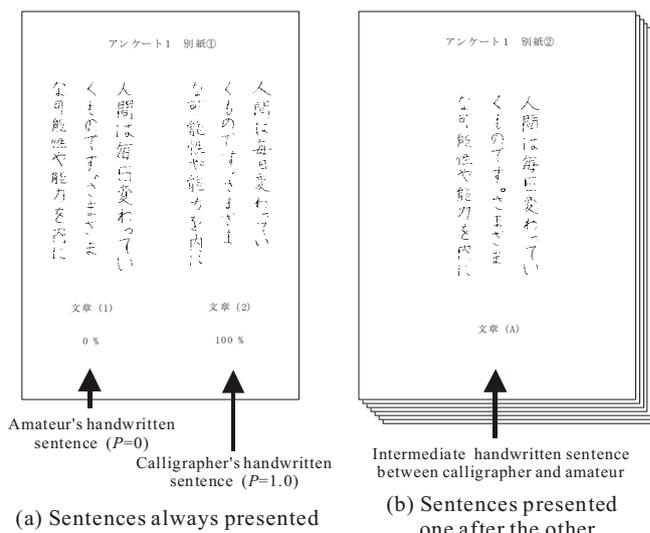


図3 熟練者の特徴の取り入れ度合いとその感じ方を調べるために用いたアンケート用紙

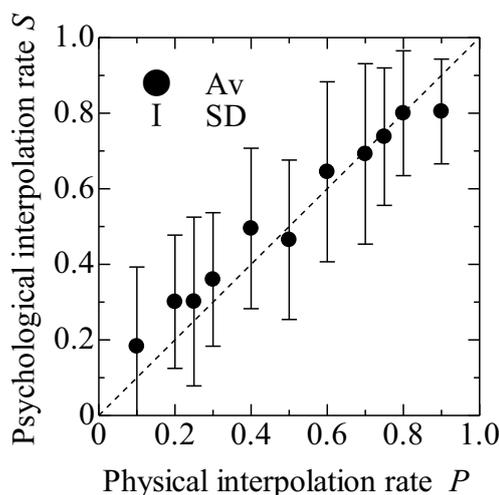


図4 熟練者の特徴の取り入れ度合いとその感じ方の関係

表1  $t$  検定によって求めた人が感じ取れる物理的な内挿の割合の差異

| Physical interpolation rate $P$ | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0.1                             | -   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 0.2                             | -   | -   | ×   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 0.3                             | -   | -   | -   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 0.4                             | -   | -   | -   | -   | ×   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 0.5                             | -   | -   | -   | -   | -   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 0.6                             | -   | -   | -   | -   | -   | -   | ×   | ○   | ○   |
| 0.7                             | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | ×   | ○   |
| 0.8                             | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | ×   |
| 0.9                             | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |

○ Significantly different at 0.05 level  
 × Not significantly different at 0.05 level

### 3.2 個人の文章の特徴を残しつつ好ましいと感じる文章

個人の特徴を残しつつ好ましいと感じる文章を調べるアンケート調査では、内挿の割合 $P$ が0.1刻みの0から1.0の11の文章を順に並べて印刷した用紙(A4判)を同時に被験者に提示した。例として、アンケート調査で用いた $P$ が0, 0.5, 0.6, 1.0の熟練者の特徴を取り入れた個人の手書き文章を図5に示す。そして、被験者に素人の文章( $P=0$ )の特徴を残しつつ最も好ましいと感じる文章を答えてもらった。ここでは、被験者の「好ましい」という印象をより限定するため、磯野らが手書き文字に対する印象について調べたときに用いた13の印象語<sup>(10)</sup>の内、関係があると考えられる「綺麗」、「読み易い」、「整っている」の3つを取り上げ、別々に選んでもらった。ただし、被験者に選んでもらった文章は $P$ が0.1から0.9の中間文章である。被験者数は30名である。

個人の特徴を残しつつ最も好ましいと感じる文章についてのアンケート結果をまとめて図6に示す。横軸は内挿の割合 $P$ を、縦軸はその $P$ の文章を選んだ被験者数を表す。●印は綺麗だと感じた文章、△印は読み易いと感じた文章、■印は整っていると感じた文章を表す。

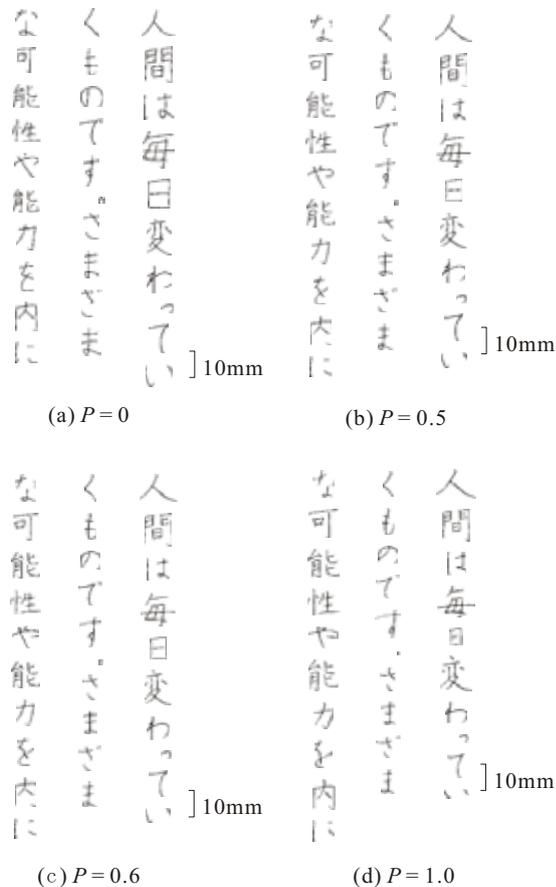


図5 アンケート調査で用いた熟練者の特徴を取り入れた手書き文章のサンプル例

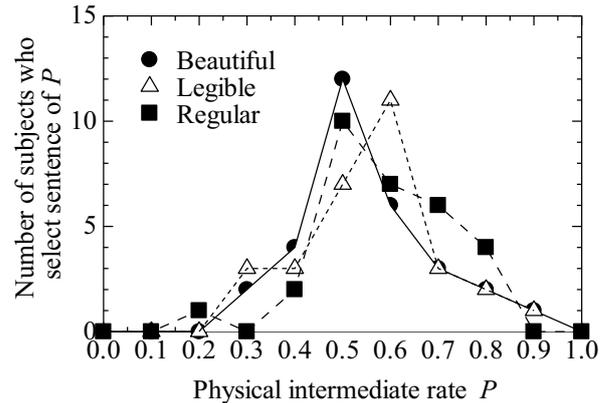


図6 熟練者の特徴を取り入れ個人の特徴を残した好ましい文章として選んだ人の数

綺麗だと感じた文章を見てみると、 $P$ が0.5, 0.6, 0.4の中間文章の順に選択した人が多かった。このことより $P$ が0.5~0.6の間に、個人の特徴を残しつつ最も好ましい文章があると推測される。そこで、より厳密にこの $P$ の値を推測するために、このヒストグラムから平均と標準偏差を求めた。その結果、平均が0.55、標準偏差が0.14であった。このことから、 $P$ が0.55程度度の中間文章が個人の特徴を残しつつ最も綺麗と感じる文章であると推測できる。次に、読み易いと感じる文章を見てみると、 $P$ が0.6, 0.5の文章の順に選択した人が多く、その平均と標準偏差は0.56と0.15であった。このことから、 $P$ が0.56程度度の中間文章が個人の特徴を残しつつ最も読み易いと感じる文章であると推測できる。最後に、整っていると感じる文章を見てみると、 $P$ が0.5, 0.6の文章の順に多く、その平均と標準偏差は0.59と0.14であった。このことから、 $P$ が0.59程度度の中間文章が個人の特徴を残しつつ最も整っていると推測できる。

以上のことより、個人の特徴を残しつつ最も綺麗、読み易い、整っていると感じる文章の内挿の割合 $P$ の値はそれぞれの印象毎に若干ばらつき0.5から0.6程度であるが、好ましさとしてまとめて平均すると0.57の値になる。

### 4. ワープロ文字の特徴を取り入れた個人の手書き文章の印象

2章と同様の方法で作成したワープロ文字の特徴を取り入れた個人の手書き文章の例を図7に示す。ここでは、MS明朝を書体として用いた。この図より、内挿の割合 $P$ が異なるワープロ文字の特徴を取り入れた個人の間文章が作成できており、本作成方法のワープロ文字への応用も可能であることがわかる。

次に、3.2と同様の方法で、ワープロ文字の特徴を取り入れた個人の手書き文章についてアンケート調査を

行い、個人の文章の特徴を残しつつ好ましいと感じる文章の内挿の割合  $P$  について調べた。このアンケート調査においても、最も綺麗、読み易い、整っていると感じる文章をそれぞれの印象毎に一つ答えてもらった。被験者数は30名である。それらの結果をまとめて図8に示す。●印は綺麗だと感じる文章、△印は読み易いと感じる文章、■印は整っていると感じる文章を表す。これらの結果より求めた最も綺麗、読み易い、整っていると感じる文章の  $P$  の平均はそれぞれ 0.42, 0.51, 0.59 であり、その標準偏差は 0.12, 0.14, 0.16 であった。これら内挿の割合  $P$  の平均をまとめると、個人の特徴を残しつつワープロ文字の特徴を取り入れ好ましいと感じる文章の  $P$  は、熟練者の特徴を取り入れた場合と比べるとほぼ同程度であるが若干小さく、平均すると 0.51 であることがわかった。一方、各印象における  $P$  の標準偏差においては、熟練者及びワープロ文字を取り入れた場合とも、同程度の値になった。

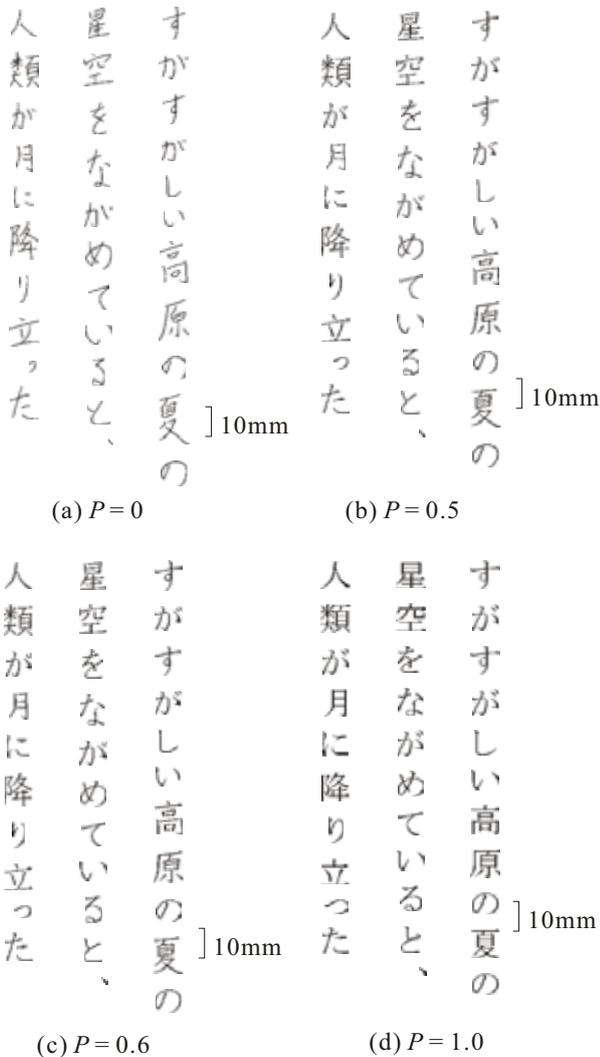


図7 アンケート調査で用いたワープロ文字の特徴を取り入れた手書き文章のサンプル例

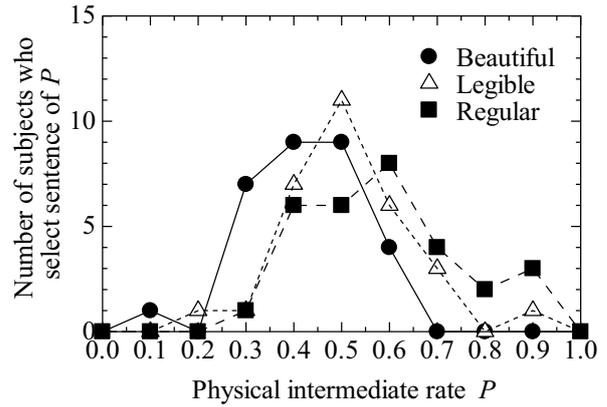


図8 ワープロ文字の特徴を取り入れ個人の特徴を残した好ましい文章として選んだ人の数

このような結果になった理由の一つとして、同種の手書き文字である熟練者の文字より異種のワープロ文字の方が個人の手書き文字との印象の差が大きかったために、被験者が個人の特徴をあえて残すようにワープロ文字の取り入れ度合いを少なくしたのではないかと推測できる。

### 5. まとめ

本論文では、個人(素人)と熟練者の手書き文字の中間文字をモーフィングにより制作し、それらの文字を用いて作成した文章により熟練者の文字形状の特徴を取り入れた個人の手書き文章の印象をアンケート調査により調べた。その結果、被験者30名の調査においては、物理的な熟練者の特徴の取り入れ度合いは人が感じるそれとほぼ比例関係にあり、平均すればそれらの値はほぼ一致することがわかった。この結果を基に行った  $t$  検定より、熟練者の特徴の取り入れ度合いの差が 0.1 以下になると区別できなくなることがあることもわかった。

また、好ましいとして「綺麗」、「読み易い」、「整っている」の印象を取り上げ、個人の特徴を残しつつ最も好ましい文章について調べた。その結果、3つの印象を含めて考えると、熟練者の文字形状の特徴を 0.57 程度取り入れた中間文章が個人の特徴を残しつつ最も好ましいと感じる文章であるという結果が得られた。一方、ワープロ文字の特徴を取り入れた個人の手書き文章を調べた結果では、熟練者の特徴を取り入れた文章より若干小さい 0.51 程度ワープロ文字の特徴を取り入れた文章が最も好ましい文章であった。これらの結果は、熟練者やワープロ文字の特徴を個人の文字へ取り入れるときの一つの目安と考えることができる。

また、熟練者やワープロ文字の特徴の好ましい取り入れ度合いが人によって異なるので、個人の手書き文字フォントの制作時に個人の好みを反映することも可

能である。最後に、本方法は有名人の文字と自分の文字を融合させた文字の制作が可能であるので、アミューズメント的な用途にも活用が期待される。

#### 参考文献

- (1) (株)ソースネクスト：「まるで手書き」,  
<http://www.source-next.com/titles/hob/61160/>
- (2) (株)テクノアドバンス：「手書き文字からフォントを自動生成」,IT 活用実例ハンドブック, 中小企業庁, No.2, pp.14-15, 2001.
- (3) T. Yamasaki and T. Hattori：「Computer Calligraphy -Brush Written Kanji Formation based on the Calligraphic Skill Knowledge-」, IEICE Trans. Vol.E80-D, No.2, pp.170-175, 1997.
- (4) 才木常正, 北川洋一, 林昭博：「文字構造を考慮した手書き風ワープロ文章の印字方法」, 電気学会論文誌 C, Vol.123, No.10, pp.1753-1759, 2003.
- (5) 安生健一他：「技術編 CG 標準テキストブック」,CG-ARTS 協会, p.185,1995.
- (6) 佐藤友理：「ペン習字のすべて」, 日本習字普及協会, p.80, 1983.
- (7) 法元康州：「ペン字のレッスンー1 [入門編]」, 二玄社, p.30, 1988.
- (8) 川端比呂子：「ペン習字ハンドブック」, 日本習字普及協会, p.59, 1991.
- (9) 狩田巻山：「4 級合格のポイント」, 日本習字普及協会, p.49, 2001.
- (10) 磯野美佳, 澤田恵理子, 押木秀樹：「手書き文章に対する読みやすさ等の感覚とその世代差に関する研究」, 書写書道教育研究, Vol.14, pp.21-30, 2000.

# エアロバイク型仮想空間移動シミュレータの 作製とその操作性の評価

上北一博\*

橋本好幸\*\*

## A Study on Operation Performance of Aero-Bike Simulator in a Virtual Space

Kazuhiro UEKITA\*

Yoshiyuki HASHIMOTO\*\*

### ABSTRACT

Recently, the virtual reality (VR) technology which can produce a real feeling artificially has been paid to attention in the application for aging society. The senior citizen can undergo rehabilitation in the house happily and safely by using the VR technology. We developed an bicycle simulator which is using the VR technology in three dimensional spaces. The bicycle simulator was made of an aero-bike with simple structure. The advancement and rotation operating tests of the bicycle simulator was done. From these results, the movement error increases at the curve as well as an actual bicycle when speed becomes faster.

*Keywords* : virtual reality technology, bicycle simulator, rehabilitation

### 1. はじめに

現在の日本において、平成20年の日本の65歳以上の高齢者数は2792万7千人となっており、総人口に占める割合は21.9%である。今後、高齢者の割合はより高くなり、今後5年間で25%を超え、新たな社会問題である高齢者問題が発生するといわれている。高齢者問題の解決方法の一つとして、高齢者の健康維持が考えられる。そこで、我々は高齢者の健康維持に、仮想空間技術が応用できないかと考えた。

ここで、仮想空間技術とは、コンピュータグラフィックスを駆使して、コンピュータ内に人工的な空間を作る技術である<sup>(1),(2)</sup>。現在、仮想空間技術は、テーマパークでの立体映像を使ったアトラクションなどのエンターテインメント分野、手術のシミュレーションなどの医療分野、飛行機や工事車両などの操縦訓練に利用されている<sup>(3)-(5)</sup>。しかし、これらの装置は、専門性が高く、その操作性や装置価格から、高齢者が使用するような応用には、すぐに適用することができない。高齢者の使用を考えた場合、簡単にかつ安全に使用できることが必要であり、仮想空間を移動する入力インターフェースの開発が必要である<sup>(6)-(8)</sup>。また、一般的な普及を考えると、装置価格が安価であることも重要である。

そこで、本研究では、高齢者が楽しく運動できる装置として、エアロバイクで仮想空間内を自由に移動することのできるシミュレータを開発することにした。本

シミュレータは、仮想空間を立体表示させるディスプレイモニターと液晶シャッター眼鏡、仮想空間を作りだすパーソナルコンピュータおよび仮想空間内の操作を行うエアロバイクから構成される。これらの部品は、すべて一般的に市販されているものであり、シミュレータを安価に構成することが可能である。

本論文では、作製したエアロバイク型移動シミュレータの概要とその操作性について検討したので、それらの結果について報告する。

### 2. エアロバイク型移動シミュレータの概要

図1にエアロバイク型移動シミュレータの概略図を示す。仮想空間はMicrosoft Visual C++とSence8社の仮想空間構築用ライブラリであるWorldToolKitを用いて、パーソナルコンピュータ(PC)で構築する。構築した仮想空間は、赤外線エミッタ(StereoGraphics社製IE1226)を介して三次元ディスプレイ(Electro Home社製Marquee8110Plus)に表示する。被験者は、このディスプレイを液晶シャッター眼鏡(StereoGraphics社製CrystalEYE3)を通して見ることで、立体映像として見ることができる<sup>(9)</sup>。

仮想空間内の移動速度および移動方向の決定は、エアロバイク型の入力デバイスで行う。使用したエアロバイクは市販のもので、これに自作した回転検出回路と移動方向検出回路を取り付けた。まず、エアロバイクに取り付けられた磁気スイッチと回転検出回路で、ペダルの回転を読み取る。その値を、USB通信を用いてPCに送信し、回転数に応じて、仮想空間内の視点位置

\*専攻科 電気電子工学専攻

\*\*電子工学科 教授

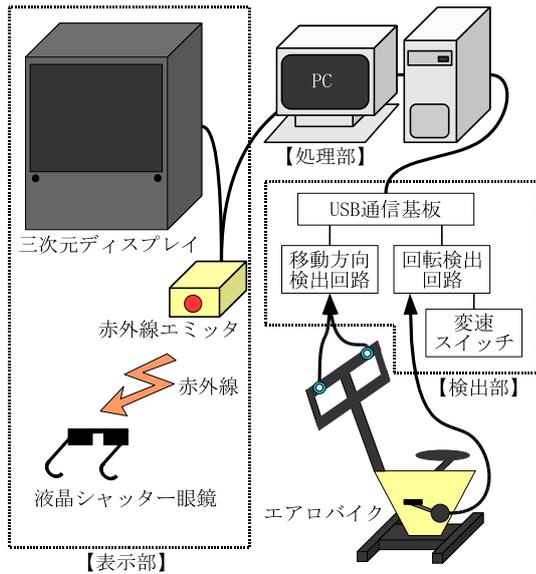


図1 エアロバイクシミュレータの概略図

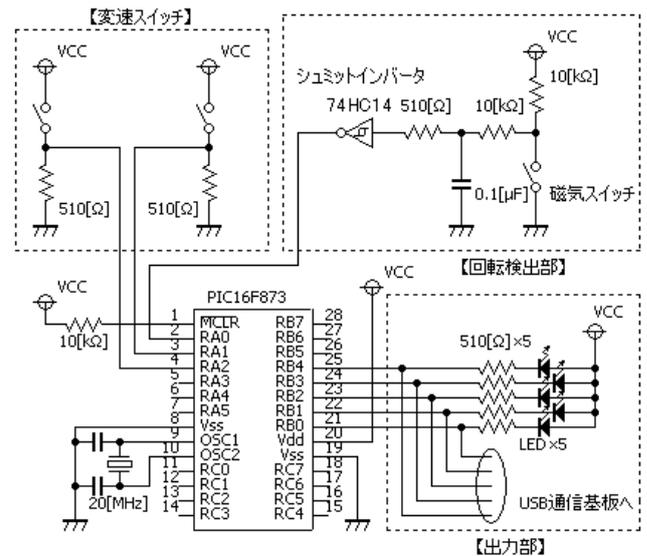


図2 回転検出回路の概略図

を前へと移動させることで、前進動作を実現している。また、回転検出回路において、実回転速度に倍率をかけてPCに送信することで、変速機能も実現している。

次に、仮想空間内の移動方向は、ハンドルの左右に取りつけた押しボタンスイッチで決定する。移動方向検出回路でボタンの状態を把握し、USB通信でPCに送信する。右ボタンが押された場合は、押された時間だけ、仮想空間内の視点を右方向に一定速度で回転させる。また、左ボタンが押された場合は、これと逆の動作を行うことで、転回動作を可能にしている。

### 3. エアロバイク型入力デバイスの作製と動作試験

3.1 回転検出回路の作製 仮想空間の視点の移動速度を検出するための、回転検出回路の回路図を図2に示す。まず、ペダルの回転を検出するために、エアロバイクのペダルの回転部分に内蔵されている磁気スイッチを使用した。この磁気スイッチは、ペダルが1回転する毎に1回導通する仕様となっている。また、PICマイコンにはピン数の豊富ななどの拡張性の高さからPIC16F873を使用した<sup>(10)</sup>。

磁気スイッチの状態を図2の回転検出部に示すように、コンデンサによる平滑化回路とシュミットインバータ74HC14を用いてチャタリングを除去し、PICマイコンに入力する。入力された信号は、PICマイコンで処理され、2進数5ビットの信号に変換されて出力部からUSB通信基板へ送信される。以上より、磁気スイッチの導通回数をPICマイコンでカウントし、ペダルの回転数を計測することで、前進動作を実現している。

次に、エアロバイクは自転車のような変速器を持たないので、ペダル速度を変えることができない。そこで、同じ回転数でも、仮想空間内での移動速度が変わる

ように、仮想的な変速機能を持たせることにした。図2の変速スイッチには、2個のトグルスイッチを用い、速度設定値を2進数2ビット信号としてPICマイコンで検出し、4段階の速度変化を可能とした。まず、速度設定値1は、ペダルの回転速度(元回転数)を、そのまま出力する。設定値2は、元回転数の2倍を回転数として出力する。以後、同様に、設定値3および設定値4は、それぞれ元回転数の3倍および4倍がそれぞれ回転数として出力される。

これらの動作をPICマイコンで行わせるために、C言語を用いてプログラムを作成した。PICプログラムでは入力パルスを1秒間カウントし、カウントした結果をUSB通信基板に出力する。これを1秒ごとに繰り返すため、タイマ割り込み処理を使用した。

PICプログラムの動作について説明する。まず、クロック、入出力ポート、変数、タイマ割り込みを設定し、メインプログラムに移る。メインプログラムでは、磁気スイッチの導通回数をカウントするため、無限ループを使用する。無限ループでは、スイッチの状態を読み取り、現在の状態がONならば前回の状態を確認し、前回の値がOFFならば立ち上がりエッジを表しているので、導通回数としてカウントする。逆に、前回の状態もONならば、スイッチの状態が変化していないため、カウントしない。

1秒間ごとに呼び出されるタイマ割り込みでは、メインプログラムでカウントした値に、変速スイッチによる重みづけをしたあとに、USB通信基板とカウント結果表示用LEDに5ビットで出力する。このように、1秒間ごとのペダルの回転数をカウントしLEDに表示す

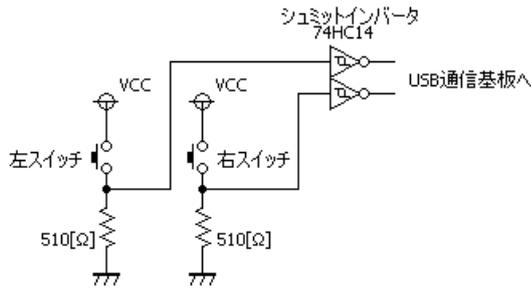


図3 移動方向検出回路の回路図

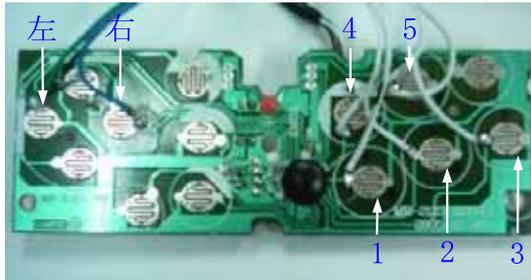


図4 USB 通信基板



図5 神戸高専をモデルとした仮想空間



図6 エアロバイクシュミレータ動作時の様子

るとともに、USB 通信基板へカウント結果を出力するプログラムを作成した。

3.2 移動方向検出部の作製 仮想空間の視点の移動方向を検出するための、移動方向検出回路の回路図を図3に示す。視点の移動方向は、エアロバイクのハンドルの左右に取り付けられた押しスイッチにより行う。押しスイッチのON/OFF 信号は、シュミットインバータ 74HC14 を通して、チャタリングを除去した後、USB 通信基板へ接続した。

3.3 USB 通信基板 USB 通信基板には、市販のゲームパッドである ELECOM 社製 JC-U2510TSV を用いた。図4にゲームパッド内の回路基板を示す。回転検出回路、移動方向検出回路の状態を出力することができるボタンは、連射機能を切り替えるための2つのボタンを除いた、12個の操作ボタンと十字ボタンである。そこで、回転検出回路からの出力に操作ボタンの1番～5番の5つを使用し、移動方向検出回路からの出力に十字ボタンの左右のボタンを使用した。PCでは、操作ボタンの値を2進数5ビットで受け取り、10進数に変換して仮想空間内の視点の移動速度を決定し、左右のボタンの状態から仮想空間の視点の移動方向を決定する。

3.4 エアロバイク型入力デバイスの動作試験 作製したエアロバイク型入力デバイスの動作確認を行った。動作の確認では、図5に示す神戸高専をモデルとした仮想空間を使用した。図6は、実際の動作確認時の写真である。被験者には、液晶シャッター眼鏡をかけて、前面のディスプレイを見ながら、エアロバイクのペダルを漕いでもらう。

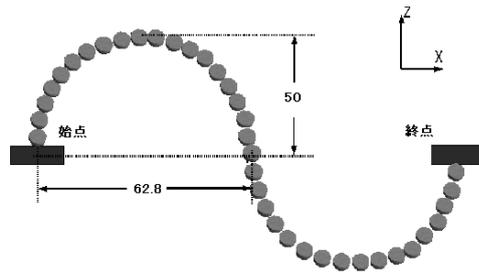
まず、前進動作について動作確認を行った。ペダルを漕ぐと、回転検出回路のカウント結果表示用LEDが点灯し、仮想空間内で前進移動ができた。これらのLEDはペダルの回転速度に比例して変化する仕様なので、ペダルを漕ぐ速度を変化させるとLEDの値(2進数5桁表示)が変化し、仮想空間内での移動速度が変化した。また、変速スイッチで速度設定値を大きくすると、LEDの値が大きくなるのと同時に、仮想空間内での移動速度が速くなった。逆に、速度設定値を小さくすると、LEDの値が小さくなり、仮想空間内での移動速度も遅くなった。

次に、移動方向検出回路の動作確認を行った。ペダルを漕ぎ、前進移動をしながら左右に取り付けられた押しボタンスイッチを押すと、仮想空間内の移動方向が変化した。

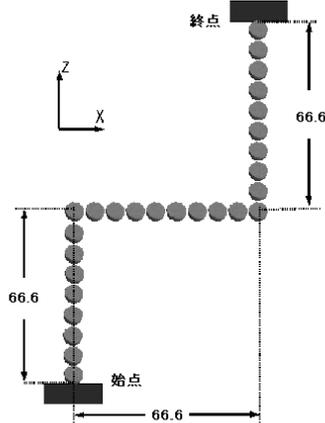
以上の結果より、作製したエアロバイク型入力デバイスによって、仮想空間内の視点の移動速度、および移動方向を変更することができ、設計通りに動作することが確認された。

#### 4. エアロバイク型シュミレータの操作性の評価

4.1 評価方法 エアロバイク型仮想空間移動シュミレータの移動の正確さ、操作性の評価を行った。評価では、図7(a)に示す曲線評価空間(sinカーブ型の曲線通路)と、図7(b)に示す直線評価空間(直線クランク型の通路)を使用した。まず、被験者に液晶シャッター眼鏡をかけてもらい、両評価空間でのエアロバイク型シュミレータの操作の練習を行う。操作に慣れたところ



(a) 曲線評価空間



(b) 直線評価空間

図7 評価空間の概要

で、曲線評価空間の始点から終点まで、できる限り円盤状のプレートによって描かれたラインに沿うように移動してもらう。その際、始点から終点に到達するまでにかかった時間、一定時間ごとの仮想空間内の視点の座標値とラインからのずれを、コンピュータで記録した。次に、回転検出回路の変速スイッチの速度設定値を1から4まで変化させ、移動速度を変更した上で、繰り返し測定した。同様の実験を、直線評価空間においても行った。評価実験後に、被験者にどの段階が一番操作しやすかったか、逆にどの段階が操作しにくかったか、どの段階が現実の自転車の動作に一番近いのか、改善すべき点はあるか、などのアンケート調査を行った。

4.2 評価結果とその考察 表1は、変速スイッチで速度設定値を1から4まで変化させ、仮想空間内の視点の移動速度を1~4倍まで変化させた際に測定した、始点から終点に到達するまでにかかった時間、円形プレートとの誤差の平均、誤差の最大値を人数で平均した結果を示す。また、表2は表1における各測定値の分散を表している。表1、表2共に、(a)は曲線評価空間、(b)は直線評価空間の結果を示している。

表1の結果より、視点の移動速度を大きくすると、曲線評価空間と直線評価空間の到達時間は共に小さくなった。しかし、両評価空間における平均誤差は、移動速度を上げるにつれて大きくなった。また、両評価空間

表1 評価空間における移動誤差と移動時間

(a) 曲線評価空間の場合

| 移動速度 [倍] | 到達時間 [s] | 平均誤差 | 最大誤差 |
|----------|----------|------|------|
| 1        | 29.2     | 1.32 | 4.48 |
| 2        | 20.6     | 2.11 | 6.21 |
| 3        | 17.6     | 2.44 | 7.29 |
| 4        | 14.2     | 4.63 | 12.1 |
| 平均       | 20.4     | 2.63 | 7.52 |

(b) 直線評価空間の場合

| 移動速度 [倍] | 到達時間 [s] | 平均誤差 | 最大誤差 |
|----------|----------|------|------|
| 1        | 23.8     | 1.10 | 4.91 |
| 2        | 16.8     | 2.10 | 6.60 |
| 3        | 13.5     | 2.39 | 8.07 |
| 4        | 11.3     | 4.14 | 9.56 |
| 平均       | 16.4     | 2.43 | 7.23 |

表2 評価空間における各測定値の分散

(a) 曲線評価空間の場合

| 移動速度 [倍] | 到達時間 [s] | 平均誤差  | 最大誤差 |
|----------|----------|-------|------|
| 1        | 4.96     | 0.263 | 3.18 |
| 2        | 7.44     | 0.471 | 5.57 |
| 3        | 8.24     | 1.04  | 10.0 |
| 4        | 4.56     | 4.68  | 31.5 |
| 平均       | 6.30     | 1.61  | 12.6 |

(b) 直線評価空間の場合

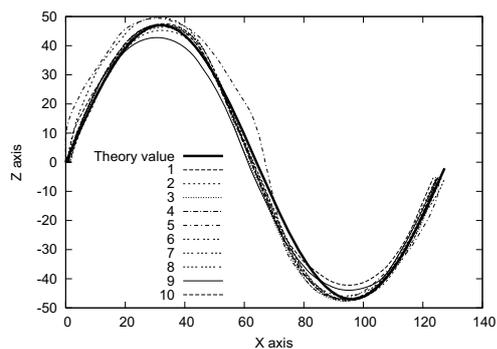
| 移動速度 [倍] | 到達時間 [s] | 平均誤差   | 最大誤差  |
|----------|----------|--------|-------|
| 1        | 1.36     | 0.0956 | 0.669 |
| 2        | 11.2     | 0.304  | 2.59  |
| 3        | 8.45     | 0.558  | 4.87  |
| 4        | 4.61     | 2.64   | 11.0  |
| 平均       | 6.41     | 0.899  | 4.78  |

における最大誤差も、移動速度を上げていくと大きくなった。以上の結果から、エアロバイク型シミュレータの操作性は、移動速度の上昇とともに、小回りがきかず、操作性が悪くなることから、実際の自転車の動作と同じであることがわかる。

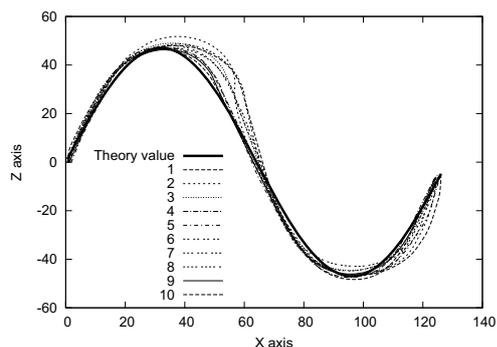
次に、表1(a)と(b)の結果を比較すると、移動速度が4倍の時を除いた最大誤差は、直線評価空間のほうが曲線評価空間より大きい値であった。自転車の動作では急に曲がれないため、小さく曲がる曲線評価空間のほうが誤差が小さく曲がれ、大きく曲がる必要のある直線評価空間では、最大誤差が大きくなったのだと考えられる。

また、すべての速度設定値で、曲線評価空間のほうが直線評価空間以上に平均誤差が大きくなった。自転車の動作では、曲線を移動する場合のほうが誤差が大きかった。

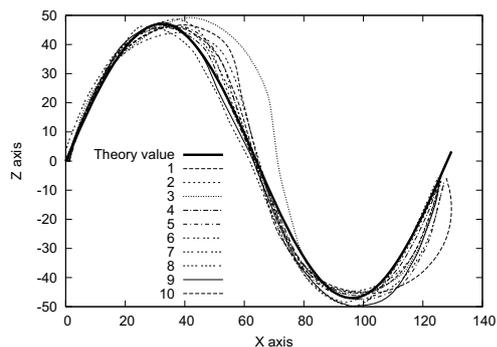
次に、表2より、視点の移動速度を大きくすると、両評価空間の平均誤差、最大誤差の分散が大きくなった。また、両評価空間における到達時間の分散は、移動速



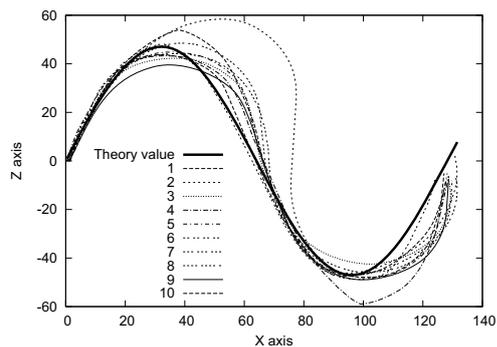
(a) 速度設定値 1 (移動速度 1 倍)



(b) 速度設定値 2 (移動速度 2 倍)

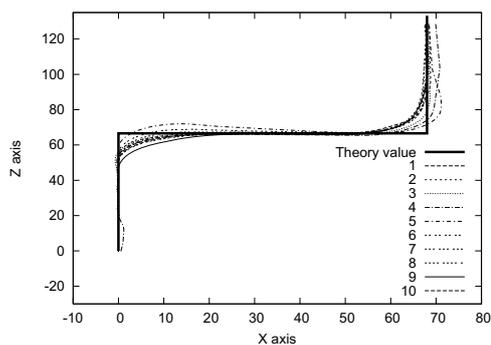


(c) 速度設定値 3 (移動速度 3 倍)

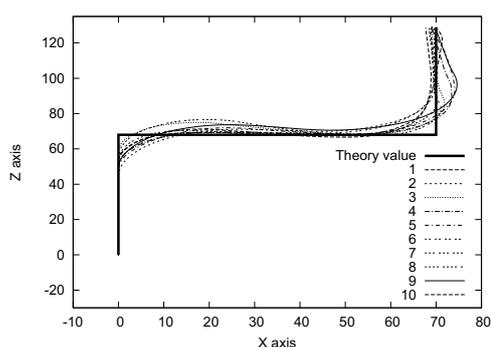


(d) 速度設定値 4 (移動速度 4 倍)

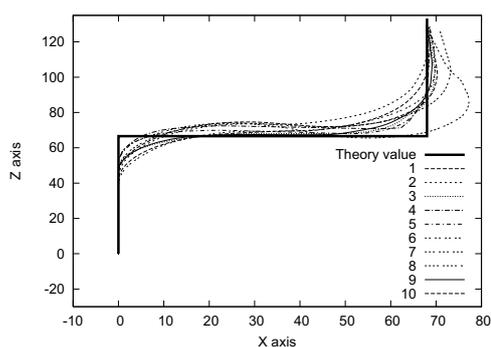
図 8 曲線評価空間における移動軌跡



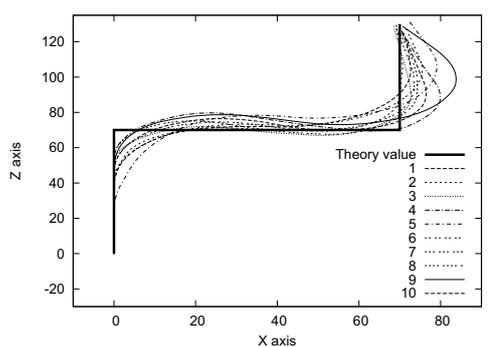
(a) 速度設定値 1 (移動速度 1 倍)



(b) 速度設定値 2 (移動速度 2 倍)



(c) 速度設定値 3 (移動速度 3 倍)



(d) 速度設定値 4 (移動速度 4 倍)

図 9 直線評価空間における移動軌跡

度を大きくすることは無関係であることがわかった。

図 8 および図 9 は、実際にエアロバイク型シュミレータで、それぞれ曲線評価空間および直線評価空間を移動した場合の評価ラインと被験者 10 人分の軌跡を示す。ここで、(a) は速度設定値 1 で移動速度が 1 倍、(b) は速

度設定値 2 で移動速度が 2 倍、(c) は速度設定値が 3 で移動速度が 3 倍、(d) は速度設定値 4 で移動速度が 4 倍の場合の測定結果である。図中の太線は Theory value(評価ライン)、data1 から data10 は、それぞれ各被験者の軌跡を示している。

図8の曲線評価空間での結果を見ると、(a)の速度設定値1では、各被験者の軌跡はほぼ同じで差は少ない。しかし、(b),(c),(d)と速度設定値が大きくなる(移動速度が大きくなる)につれて、各被験者の軌跡の差が大きくなるのがわかる。ただし、誤差が大きくなるのは、急なカーブの後で、その傾向は全被験者に同様である。

図9の直線評価空間での結果も、曲線仮想空間と同様の傾向であることが確認できる。各被験者は、直線部分では、ほぼ評価ラインに沿って移動しているが、クランク部分で大きく曲がった後に、移動誤差が大きくなるのがわかる。

次に、被験者のアンケート結果より、以下の結果を得た。まず、エアロバイク型シミュレータで、一番操作しやすいのは、速度設定値2(移動速度2倍)であると答えた人が多かった。速度設定値2は、移動誤差がある程度小さく、自転車らしい速度感があることから、一番操作しやすい段階に選ばれたのだと考えられる。逆に一番操作しにくいのは、速度設定値4(移動速度4倍)であると答えた人が多かった。速度設定値4では、到達時間は両評価空間で最も短かったが、平均誤差、最大誤差も最大であったことから、速度が上がりすぎても操作性はよくなるということが分かる。

両評価空間では、曲線評価空間のほうが直線評価空間より操作がしやすかったというアンケート結果がでた。これは、直線評価空間のほうが平均誤差、最大誤差が小さかったにもかかわらず、平均誤差、最大誤差が大きい曲線評価空間のほうが操作がしやすかったということである。よって被験者の多くに、「自転車の動作の場合、曲線のほうが直線以上に操作がしやすい」という感覚があることが伺える。

実際の自転車の動作の感覚にもっとも近いと答えた人は速度設定値3(移動速度3倍)が最も多かった。表1の結果より、到達時間は2番目に短い、平均誤差、最大誤差も2番目に大きいことから、現実の自転車を漕ぐ動作の感覚としては操作のしやすさ、移動誤差以上に移動速度が重要な要素であると考えられる。

他の感想として「ブレーキ動作が必要である」と答えた人が存在した。さらに、動作をよりリアルにするために、前進動作における速度変化を滑らかにし、ハンドルを操作する形式で転回動作を実現する必要があると思われる。

## 5. まとめ

エアロバイク型仮想空間移動シミュレータの作製とその操作性の評価を行った結果、以下の結論を得た。

1. ペダルを漕ぐことで前進、ハンドルの押しボタンスイッチを押すことで転回を行える、エアロバイクを用いた仮想空間移動シミュレータを作製し、設計通りに動作することを確認した。
2. 速度スイッチの設定値を大きくすると、実際の自転

車と同様に、移動速度は上がるが、小回りがきかず、操作性が悪くなる。

3. 評価空間において、大きく曲がる必要のある直線評価空間のほうが、曲線評価空間以上に最大誤差が大きくなる。また、平均誤差は、曲線評価空間のほうが直線評価空間以上に大きくなることから、自転車を漕ぐ動作では曲線を移動するほうが誤差が大きくなる。
4. 曲線評価空間のほうが直線評価空間以上に平均誤差、最大誤差が大きかったにもかかわらず、操作しやすいというアンケート結果がでた。被験者には曲線のほうが直線より操作しやすいといった感覚があることが考えられる。
5. エアロバイク型移動シミュレータで、現実の自転車を漕ぐ動作と似た感覚を得るためには、多少の誤差が存在しようとも、それ以上に速度感を満たすことが重要であることがわかった。

## 参考文献

- (1) 野村 淳二, 澤田 一哉: “バーチャルリアリティ”, 朝倉書店, pp.112-125, 1997.
- (2) 廣瀬 通孝: “バーチャル・リアリティ”, 産業図書, pp.31-33, 1997.
- (3) 佐藤 嘉伸: “外科手術支援システム研究の現状と将来展望”, 電子情報通信学会誌, Vol.89, No.2, pp.144-150, 2006.
- (4) 北川 英志, 安田 孝美, 横井 茂樹, 鳥脇 純一郎: “仮想空間操作を利用した対話型手術シミュレーションシステムの基本機能の実現” 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.6, pp.1088-1098, 1996.
- (5) 服部 桂: “人工現実感の世界”, 工業調査会, pp.15-30, 1991.
- (6) 西尾 崇, 井谷 彰太, 上北 一博, 橋本 好幸: “仮想空間での歩行動作のための方位検出法の考察”, 平成19年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G341, 2007.
- (7) 折田 真一, 橋本 好幸, 林 昭博: “仮想空間内の視点の高さによる操作感”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-A, No.1, pp.134-136, 2002.
- (8) 高嶋 和毅, 橋本 好幸: “仮想空間内の奥行き感の評価”, 神戸高専研究紀要, No.42, pp.53-58, 2004.
- (9) 木本 恭平, 橋本 好幸: “歩行動作による仮想空間操作デバイス開発”, 平成17年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G329, 2005.
- (10) 後閑 哲也: “誰でも手軽にできる電子工作入門”, 技術評論社, pp.35-42, 2001.

# レーンキーピングアシストシステムの開発

益田 祐次\*

笠井正三郎†

## The Development of Lane Keeping Assistance System

Yuji MASUDA\*

Shozaburo KASAI†

### ABSTRACT

If we drive a car for a long time on the road such as expressways, the driver might mistake an acknowledgement and a judgment in the operating. As a result, he might cause a traffic accident. And so, we are paying attention the lane keeping assist system. The system recognizes traffic lane by the camera in the front of the car. If the car shifts from the vicinity of the center of the running lane, it assists maintenance of the traffic lane with addition the steering force to the steering wheel. We develop the lane keeping assistance system. First of all, we extract white line from the road image, and we forecast running line. Next, we design the hardware that uses FPGA. The system sets up CMOS camera and FPGA that is high integration, high speed, and low cost. We test circuit that displays check and display an image taken from CMOS camera. Finally, we will develop the lane keeping assist system.

*Keywords* : lane keeping assistance system, image processing, FPGA

### 1. 序論

交通事故の発生には様々な要因が関わっている。このうち、人の身体能力や心身状態に関わる人的要因は、交通事故の原因の90%を占めるとも言われており、交通事故防止対策の検討対象となることも多い。また、自動車運転作業は、認知・判断・操作という一連の作業から構成されており、交通事故の原因についても、認知ミス、判断ミスあるいは操作ミスに分類して論じられている<sup>(1)</sup>。運転者の認知・判断ミスを防ぎ、交通事故を減らすことは急務であり、近年、自動車の運転支援を行うレーンキーピングアシストシステムが注目されている。レーンキーピングアシストシステムは、車の前方部に設置したカメラにより道路上の白線を抽出することによって自動車が車線から逸脱するのを自動的に防ぐものである。

本研究では、まずは走行線を決めるために必要な基準線として、白線を画像処理により抽出するアルゴリズムを検討する。さらに、車載用に小型化し、実動作に対応できる様に処理速度を上げるためにハードウェアで実現させる。そしてほとんどの高速道路で使用可能なレーンキーピングアシストシステムを開発し、所期の目標を達成することが出来たので報告する。

### 2. 画像の前処理

**2.1 概要** 道路画像から白線を抽出するための基本的な手法を確立するため、カメラで撮影した静止画像(320×240のJPEG)をパソコンに取り込み、OpenCVを使用しソフトウェア処理により、撮影画像から白線を抽出する<sup>(2)</sup>。図1に走行中の自動車から撮影した写真を示す。この画像より白線を抽出するため以下の処理を行う。



図1 取り込み画像

**2.2 2値化処理** 一般のカラー画像では、1つの画像から多くのことが分かる反面、情報が多すぎて処理が複雑になるという欠点を持っている。この欠点は画像が大きくなるほど顕著になってくる。その膨大な情報の中で欲しい情報だけを抜き出して作業の1つが2値化である。2値化処理は多くの画素の色情報を整理し分類する処理である。画素の値がある基準値(閾値)よりも大きい小さいかで分類し閾値より大きいときは1、小さいときは0とすることで画像の色情報を1と0の2値に分けて画像を単純化する<sup>(3)(4)</sup>。

道路には様々な色が存在するが、抽出する白線は白(あるいはオレンジ)である。取得した画像を2値化し、道路を「黒」、白線を「白」にする。色は0~255の256段階で表現されている。閾値を半分の128とし、2値化した画像を図2に示す。

光の反射や道路の凸凹により、白(オレンジ)線以外までもが白になってしまっている。そこでこの画像で白(オレンジ)線を「白」と判断するのに適している値150とし、2値化した画像を図3に示す。光の反射もほぼなく、道路が「黒」、白線が「白」になっている。

\*電気電子工学専攻2年

†電子工学科 教授



図 2 2 値化画像 (閾値 128)



図 3 2 値化画像 (閾値 150)

2.3 ノイズ除去処理 最適な閾値で 2 値化を行っても、道路には凸凹や光のあたり方などによる点や穴といったノイズが残っている。これを膨張と収縮を繰り返し行うことにより、ノイズを除去する。膨張とは近傍に 1 つでも白があれば白にする処理 (図 4) で、収縮とは近傍に 1 つでも黒があれば黒にする処理 (図 5) である。ノイズ除去処理を行った画像を図 6 に示す。この処理により画像中心部の白点や白線中の黒点が除去されて

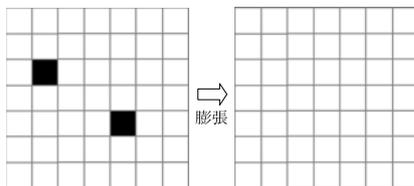


図 4 膨張処理

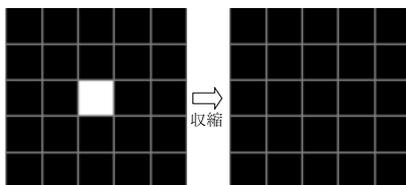


図 5 収縮処理



図 6 ノイズ除去処理を行った画像

いることがわかる。

### 3. 白線の抽出

白線の抽出には、道路と白線で色の变化する部分をエッジとして抽出する手法、白線を幅のある白画像としてテンプレートマッチングで抽出する手法、最後にこれらを組み合わせた方法で抽出を行う。

3.1 エッジ強調による抽出 Sobel オペレータを用いて画像から白線の向きである垂直方向のエッジを抽出する。Sobel オペレータとは局所積和演算でグラジエントの強度 (微分値) を求める方法で、急激に色が変わる部分をエッジとして抽出する。あるピクセルの周辺ピクセルの濃度の微分を求め、それを新たな濃度値とする。つまり、周辺のピクセルとの濃度値の差分を加算することで、計算対象のピクセルの濃度値を強弱させる。この差分は 2 次元に対して行われるので、垂直方向の係数行列  $V (= v_{ij})$  と対象となるピクセルとその周辺からなる  $3 \times 3$  の行列  $I (= i_{ij})$  について各要素毎の積を足し合わせた値の絶対値になる。

$$\text{差分} = \left| \sum_{i,j=1}^3 v_{ij} \times i_{ij} \right|$$

垂直方向の係数行列  $V$  を以下に示す。

$$V = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sobel オペレータを用いた計算例を図 7 に示す。これを用いて道路と白線で色の变化する部分をエッジとして抽出する。

ここでの問題点は道路と白線以外のエッジも抽出してしまう点である。道路以外の風景にエッジが存在すると白線ではない部分までが白線と判断されてしまう。そこで、複数のサンプル画像により画像中にある白線の位置を仮定し、その範囲でエッジを抽出する。

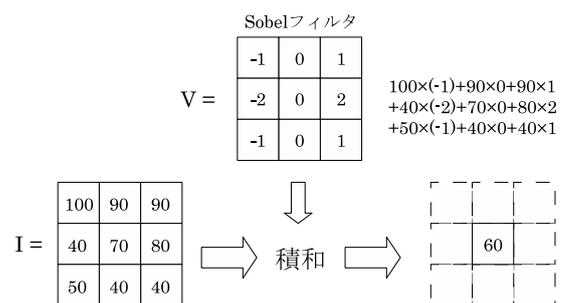


図 7 Sobel 画像

3.2 テンプレートマッチングによる抽出 テンプレートマッチングとは、あらかじめ用意した特定のテンプレート画像と入力画像で重なっている部分を探す方法である。テンプレート画像には、白の正方形画像を用いる。2 値化した画像では白線の幅のある直線であることに注目する。複数のサンプル画像により白線の幅を仮定し、その範囲内で最適であろう  $7 \times 7$  画素の正方形をテンプレート画像として用いた。画像の下方中心部から左右にマッチングさせていき、一致した座標を記録していく。

初めて一致したところから白線の部分までは連続して一致すると予想できる。その一致した座標を記録していき同じ y 座標での一致した最初と最後の座標から白線の幅は算出できる。これにより y 座標がわかると白線の幅と白線の中心の座標が算出できる。

**3.3 マッチング改善法による抽出** 今まで述べてきたものは 1 ピクセルに対して毎回演算処理をしており、処理が多くなってしまったり一致した座標を全て記録しておくため多くのメモリを使用するなどの問題点がある。そこで、道路と白線で色の变化する部分をエッジとして抽出する手法とラスタ操作により白線以外のものを抽出しないようにするテンプレートマッチングの良い点を用いたマッチング改善法を行う。これは道路から白線に変わる場所つまりエッジの部分下方中心部から左右に探していく。図 8 は画像の右側白線の左端を拡大した図である。これを用いて詳しく説明する。

1 つの正方形が 1 画素である。斜線の画素では黒から白に変わっている最初の画素である。つまりエッジである。この画素に注目し、左右 2 画素の色を見て、左 2 画素が「黒」、右 2 画素が「白」であると、斜線の画素を右側白線の左端と判断する。同様にして、左右の白線の両端座標を取得することができ、白線の位置と中心座標を得ることができる。全ての中心座標を結び白線を抽出する。図 9 に左右の白線を抽出した結果を示す。赤で示した線が、画像処理によって白線と判断した線である。画像の白線上に赤線が表示されており、白線の抽出ができているのがわかる。

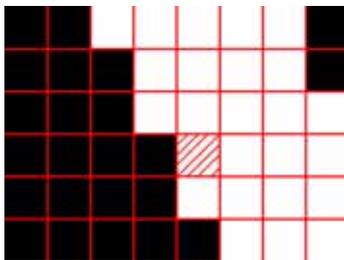


図 8 拡大画像

#### 4. 走行線予測

**4.1 最小二乗法を用いた走行線予測** 白線の抽出が行えたため、それらを用いて走行線を表示する。左右の白線の中心座標を算出し、それらに最小二乗法を用いて直線をひき、それを走行線とする。最小二乗法を用いることにより走行線の方向を出すことができるため、先のフレームでの目標が求めることができる。図 10 に走行線を青で表示した画像を示す。

**4.2 動画への対応** 静止画では走行線を表示することができたため、静止画の連続である動画で試みた。実際に高速道路を走行中に車のダッシュボードからビデオカメラ（日本ビクター製：GR-HD1）で撮影した動画を入力として実行した。動画から静止画を入力し、それに白線抽出処理を行い、走行線の表示までを行う。入力に使用した動画は SD モードで録画したもので、解像度 320×240、フレームレート 60Hz である。動画でも問題なく走行線の表示に成功した。



図 9 左右白線の抽出画像



図 10 走行線を表示した画像

### 5. システム設計

**5.1 概要** 前章までの画像処理は、コンピュータ上で動作するソフトウェアで実現してきた。しかし画像処理アルゴリズムをハードウェアで実装することにより、ソフトウェア処理よりも、小型・高速かつ低消費電力で行うことができる。近年、ハードウェアの進歩は目を見張るものがあり、高集積・多機能・高速・低価格なプログラマブル・デバイスである FPGA を用いることが可能となった。白線の抽出では市販のデジタルカメラで撮影した画像及び動画をを用いて行ったため、ハードウェアに画像を取得するためのカメラが必要である。システム全体の構成を図 11 に示す。カメラから画像を読み込み、読み込んだ画像データに対して白線抽出処理を行い、走行線の予測を行うハードウェアを設計する。また、取得した画像及び処理後の画像を示すためにディスプレイに転送を行う<sup>(5)</sup>。

信号処理システムはカメラ制御モジュール、画像処理モジュール、データ転送モジュールから構成される。カメラ制御モジュールは、CMOS イメージ・センサからの画素値を読み取る。その画素値は、FPGA で構成される画像処理モジュールに転送され、画像処理を行う。画像処理後のデータは、データ転送モジュールにより FPGA 外部に送り出され、ディスプレイに表示する。

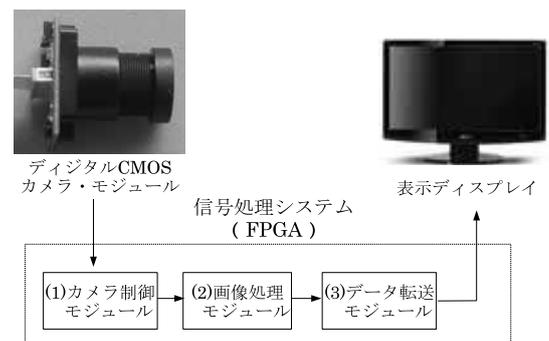


図 11 画像処理システムの構成

本研究では、FPGA として Xilinx 社の Spartan-3E を用いて画像処理回路を実現している。FPGA 開発ツールには設計入力・論理合成・配置配線・タイミング解析・FPGA への回路データのダウンロードなど、FPGA 開発の一連の作業を行える Xilinx 社の「ISE WePACK 9.1i」を使用する。

**5.2 VGA デジタル CMOS カメラ・モジュール** 画像を取得するために使用したカメラ・モジュールは、カラー CMOS イメージ・センサ「OV7640」(米国 OmniVision Technologies 社)にレンズ系を付け、カメラ・モジュールとして商品化されたものである。画素数は 640×480 ピクセルである。デジタル画像データの出力フォーマットは、YUV(4:2:2)、RGB(4:2:2)などが選択できる。画像フレーム・レートは VGA のとき 30 フレーム/秒、QVGA のとき 60 フレーム/秒である。FPC ケーブル接続用のコネクタが実装されており、0.5mm ピッチの FPC ケーブルを接続することにより画像データを取り出すことができる。

**5.3 FPGA(Spartan-3E)** 本研究で使用した FPGA は「Spartan-3E ファミリ」の「XC3S250E」であり、大量生産される民生機器でも使われている低コスト FPGA である。XC3S250E は、66 本のユーザ I/O と 25 万ゲート相当の論理ブロックを搭載している。

**6. ハードウェア製作**

ハードウェア構成のブロックを図 12 に示す。以下、主となる処理について説明する。

**6.1 カメラ・インターフェース回路** FPGA の内部にあるカメラ・インターフェース回路は、CMOS イメージ・センサが出力した画像データをメモリ (VRAM) に書き込み、そのデータを読み出して D-A コンバータへ出力する。カメラ・モジュールの画像信号を FPGA でビット数や同期信号を付加するなどの加工をし、D-A コンバータへ出力する。その構成を図 13 に示す。カメラ・モジュールへは基準となるクロックを出力する必要があり、このクロックに同期してピクセル・クロック及び画像データが出力される。CMOS イメージ・センサからは 640×480 ピクセルの画像が 30 フレーム/秒で出力される。これをディスプレイで表示しようとする場合は、60 フレーム/秒でアナログ RGB コネクタへ出力する必要がある。これはフレーム・レートを合わせるために、同じ画像を 2 回出力することにした。この処理を実現するため、1 フレームの画像すべてをフレーム・

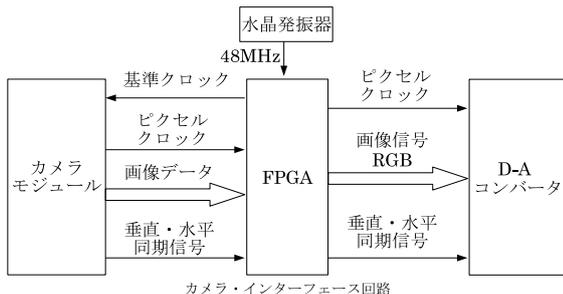


図 12 ハードウェア構成のブロック図

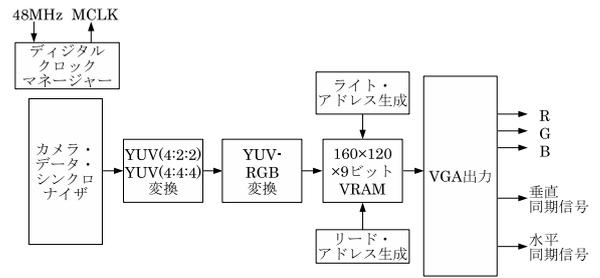


図 13 カメラ・インターフェース回路

メモリ (VRAM) へ保存する必要がある。今回の回路では使用できるメモリは FPGA の内部の RAM しかない。RAM として使用できるサイズは、

$$18 \times 1,024 \times 12 \div 8 = 27,648 \text{ バイト}$$

である。640×480 ピクセルの画像を RGB 各 8 ビットで保存しようとした場合、必要なメモリサイズは、

$$640 \times 480 \times 3 = 921,600 \text{ バイト}$$

となる。すべてのメモリブロックを使用しても収まらない。そこで画像の解像度を 4 分の 1 に落とし、解像度 160×120 で色のデータ RGB を各 3 ビットで保存することにした。カメラインターフェース回路を構成する主な回路について、以下に説明する。

**デジタル・クロック・マネージャ (DCM)** DCM は外部から入力されたクロック信号を分周することができる。水晶発振器から入力された 48MHz のクロックから、基準となる 24MHz のクロックを生成し、カメラ・モジュールの MCLK に出力する。カメラ・モジュールは、MCLK を基準として PCLK を出力する。画像データ、垂直同期信号及び水平同期信号は PCLK に同期して出力する。DCM は出力したクロックをフィードバックし、外部から入力されたクロックと比較することにより、これらの時間的ずれを補正する。

**YUV-RGB 変換** パソコンのディスプレイ信号は RGB の 3 原色データで表現されている。人間の目が色の変化よりも明るさの変化に敏感な性質を利用して、輝度情報により多くのデータ量を割り当てるのが YUV フォーマットである。輝度信号 (Y) と、輝度信号と青色成分の差 (U)、輝度信号と赤色成分の差 (V) の 3 つの情報で色を表す形式である。YUV のフォーマットでは、輝度と色のデータが分離されており、このままでは人間にとって正しい色彩で画像を表現できない。従って、輝度と色のデータを人間が知覚することのできる光の 3 原色 (RGB) に変換する。

YUV から RGB への変換は、以下の式により表される。

$$R = 1.164(Y-16) + 1.596(V-128)$$

$$G = 1.164(Y-16) - 0.392(U-128) - 0.813(V-128)$$

$$B = 1.164(Y-16) + 2.017(U-128)$$

固定小数点で計算するため、YUV の係数を 4096 (12 ビット左シフト)、定数項を 16 倍 (4 ビット左シフト) し、各項をまとめ、係数を 16 ビットの 16 進表示にすると以下の通りになる。

$$R = 0x12a0 \times Y + 0x18d5 \times V + 0xf211$$

$$G = 0x12a0 \times Y + 0xf9ba \times U + 0xf2fe \times V + 0x087a$$

$$B = 0x12a0 \times Y + 0x2046 \times U + 0xeeb3$$

符号なし 8 ビット × 符号つき 16 ビットの演算を行う乗算器を 9 個用意し、YUV と各係数を乗算する。これらの結果に、定数項を 256 倍（8 ビット左シフト）した値を加算する。その結果を 12 ビット右シフトして 8 ビットの RGB を求めている。

**ライトアドレス生成** カメラモジュールが出力する垂直同期信号及び水平同期信号から、入力データの有効画像をカウントし VRAM へ書き込むアドレスを生成する。横方向、縦方向ともに 3 ピクセル間引きして VRAM へ書き込んでいる。

**160×120×9 ビット VRAM** 1 フレームを格納する RAM。RGB 各 3 ビットをひとまとめにして書き込み、読み出しを行う。デュアルポート RAM になっているため、書き込みと読み出しにはそれぞれ別のクロックを使用することができる。

**リード・アドレス生成** 出力に使用するクロックをカウントし、VRAM から読み出すアドレスを生成する。書き込みとは逆に、VRAM から読み出された 1 ピクセルのデータを、横方向、縦方向ともに 4 ピクセルに拡大する。

**VGA 出力** 出力に使用するクロックをカウントした値から、アナログ RGB のコネクタへ出力する水平・垂直同期信号を生成する。RGB 各 5 ビットずつ設定する必要があるため、VRAM から読み出した RGB 各 3 ビットと下位 2 ビットに 0 を設定したデータを出力する。

**6.2 アナログ RGB 表示出力回路** アナログ RGB 信号は、パソコン表示装置の標準インターフェース信号として使われている。本研究では 15 ピン・シュリンク D サブ・コネクタを用いて RGB 信号を出力する。アナログ RGB 出力信号は、3 原色アナログ画像信号及び水平同期信号、垂直同期信号の 5 本で構成されている。この 5 種類の信号でパソコン用表示装置にカラー画像を表示する。FPGA から出力されるデジタルの画像データを 3 チャンネル 8 ビット高速ビデオ D-A コンバータ「ADV7125」でアナログ画像信号に変換する。FPGA 基板のピン数の制約により、RGB 各 6 ビットとする。64×64 ピクセルのタイルを並べている。水平・垂直カウンタの重みのある下から数えて第 6 ビット目の内容が変化するとに色を変化させている。水平カウンタの第 6 ビット目と垂直カウンタの第 6 ビット目とで排他的論理輪をとって、その結果で色を決定する。市松模様を表示させた結果を図 14 に示す。

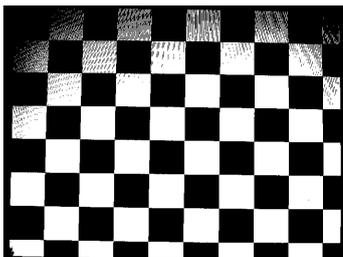


図 14 市松模様の表示

**6.3 実行結果** 製作したハードウェアでカラー CMOS カメラから取り込んだ画像を VGA 表示した画面を図 15 に示す。VGA の解像度を 4 分の 1 に間引いて表示しているため、画像の粗さが目立つ。また、メモリ容量の制約から D-A コンバータへの出力も RGB 各 3 ビットしか使用していないため、色の表現にも限界がある。しかし、カメラからの画像入力ができ、ディスプレイに表示することには成功している。



図 15 回路で表示した画面

**6.4 2 値化** カラー CMOS カメラから取り込んだ画像の 2 値化を行う。RGB 形式の画像に 2 値化処理を行いディスプレイに表示する。パソコンのディスプレイに図 16 の静止画を表示する。その画面を CMOS カメラで撮影し、2 値化処理を行いディスプレイに表示する。ディスプレイに表示した画面を図 17 に示す。白線以外にも原因不明のノイズがあり、白線抽出処理には適切ではない。

次に YUV-RGB 変換を行う前の輝度 (Y) データのみを使い、2 値化を行った画面を図 18 に示す。こちらは道路には特にノイズといったものがなく 2 値化できている。しかし、輝度データのみであるため、いきなり光が強くとったりすると真っ白になってしまったりするといった欠点がある。これらのどちらを用いるか今後検討を行い、改善していく必要がある。



図 16 2 値化処理に用いる入力静止画



図 17 2 値化を行った画面 (RGB 形式)



図 18 2 値化を行った画面 (輝度データのみ)

## 7. 結論

静止画を用いて白線の抽出をするため OpenCV を用い、静止画像から白線の抽出をするアルゴリズムを決定した。続いてそれらが動画でも対応できるかを確認し、動画での白線抽出に成功した。さらに白線抽出をすることにより車が走る走行線を予測するアルゴリズムを決定した。OpenCV でレーンキープ走行ができることが確認できたため、処理速度が速いハードウェアで実行できるようにシステム的设计を行った。ディスプレイに表示でき、カメラからの画像を出力できるようにした。白線抽出の前処理の段階である 2 値化を行った。まだ適切な 2 値化方法が決定していないので、今後検討していく。

今回設計した回路でのカメラ画像では画像は粗く、解像度も小さくしていた。今後はメモリを節約し、解像度をあげ精度をあげていく。また、2 値化処理において最適な 2 値化処理を決めていく。さらに 2 値化画像から白線を抽出し、走行線を算出するプログラムを組みこんでいく。

### 参考文献

- (1) 西田泰: 『医学と工学からみた交通安全対策』日本交通医学工学研究会, Vol.2007, p27.
- (2) 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム: "OpenCV プログラミングブック", 株式会社毎日コミュニケーションズ, 2007.
- (3) JAE S.LIM: "TWO-DIMENSIONAL SIGNAL AND IMAGE PROCESSING", PRENTICE HALL, 1989.
- (4) E.R.DAVIES: "MACHINE VISION", MORGAN KAUFMANN, 2004.
- (5) 鳥海 佳孝, 田原 迫仁治, 横溝 憲治 共著: "実用 HDL サンプル記述集", CQ 出版社, 2002.

# ウェーブレット変換を用いた音声認証の実現可能性についての検討

田中 英之\*

笠井正三郎†

## Study on Realization of Voice Authentication Using Wavelet Transform

Hideyuki TANAKA\*

Shozaburo KASAI†

### ABSTRACT

Recently, biometric authentication is spreading to strengthen security. The voice authentication is a kind of biometric authentication and extracts the individual feature from the voice using Fourier Transform or Short-Time Fourier Transform(STFT). Continuous Wavelet Transform(CWT) is a method of analyzing signal such as Fourier transform. CWT is similar to STFT. But CWT has changeable resolution of frequency and time which STFT doesn't. In this paper, we show a result of analysing voices using Wavelet transform. At first, because the the image of transformed voice is periodic, we compare a cycle image of stable part(middle of voice). And, we compared a contour of whole image. But we can't find the individual feature. So, we use Wavelet Packet Analysis instead of CWT. Wavelet Packet Analysis is a kind of Wavelet Transform. As a result, we find the individual feature like STFT. Finally, we think the voice authentication is able by using Wavelet Packet Analysis.

*Keywords* : biometrics authentication, wavelet transform

### 1. 緒論

現在、認証方法として最も多く普及しているのはパスワード認証である。パスワード認証にはとても安価にシステムを構成することができるなどの利点があるが、パスワードが盗まれたり、本人が忘れてしまうなどの欠点も存在する。近年では、このような欠点を突いて他人が本人になりすます犯罪も増えてきており、それを防止するために、セキュリティの強化が見込めるバイオメトリクス認証を採用する機会が増えてきている。バイオメトリクス認証とは個人の身体的特徴から認証を行う方法である。身体的特徴は他人に利用されにくいいため、バイオメトリクス認証はパスワード認証よりも強固な認証システムであるといえる。

本研究ではバイオメトリクス認証のひとつである音声認証に着目した。音声認証は、システム構築に必要なハードウェアがマイクだけでよい、電話越しの認証が行える、指紋などに比べて個人データの登録に対する心理的抵抗が少ないなどのハードルの低さから、バイオメトリクス認証技術の中では比較的導入しやすいとされている。現在使用されている音声認証の多くはフーリエ変換や短時間フーリエ変換を用いて、周波数スペクトル、後者ではさらにその時間変化も抽出し、本人確認が行なわれている。

フーリエ変換などと同じ信号解析の手法として、ウェーブレット変換が存在する。ウェーブレット変換は、信号解析の手法としては比較的新しい技術であり、これに関する研究はフーリエ変換と比べればまだあまり行なわれていない。ウェーブレット

変換は、短時間フーリエ変換と同じく、周波数と時間を同時に軸にとって解析を行うことができる。しかし、短時間フーリエ変換と全く同じというわけではなく、分解能が可変である点などの利点がある。ウェーブレット変換はその性質上、短時間信号や時間軸の情報が重要な意味を持つ信号の解析に有利であると考えられる。本研究ではウェーブレット変換を用いた音声認証の実現可能性について検討した。本論文ではその検討方法、検討結果を報告する。

### 2. ウェーブレット変換<sup>(1)(2)</sup>

ウェーブレット (Wavelet) の語源は「波 (wave)」と「小さな (let)」の複合語であり、「小さなさざなみ」を意味する。三角関数や対数関数のような特定の決まった関数ではなく、局在する波を表すさまざまな関数の総称であり、「時間的にも周波数的にも局在性のある関数」のことである。

ウェーブレットの一例として、メキシカンハット基底  $\psi(t)$  を図 1 に示す。このようなウェーブレットを拡大縮小、および平行移動したものをを用いて、観測パターンとの相似性により、時

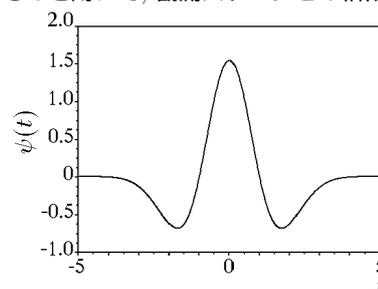


図 1 メキシカンハット基底

\*電気電子工学専攻 2 年

†電子工学科 教授

間周波数特性の解析を行うものをウェーブレット解析と呼ぶ。

2.1 連続ウェーブレット変換 連続ウェーブレット変換 (continuous wavelet transform) は、2乗可積分区間の空間  $L^2(R)$  に属する関数  $\psi(t)$  を基底として、 $L^2(R)$  に属する任意の信号を表現する手段である。このとき  $\psi$  を、全体の積分値が0で時間的に(原点  $t=0$  の周りに)局在する関数と考える。この関数  $\psi(t)$  をマザーウェーブレット、あるいは単にウェーブレットと呼ぶ。これを拡大縮小(スケール)、およびシフトすることにより、式(1)のように基底  $\psi_{a,b}(t)$  を生成する。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

ここで、 $a$  はスケール、 $b$  はシフトのパラメータであり、 $1/a$  が周波数、 $b$  が時間シフトに対応する。また、 $1/\sqrt{a}$  は正規化のための係数である。ウェーブレット変換は式(1)と信号  $f(t)$  との内積であるため、式(2)で表される。

$$(W_{\psi}f)(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

ここで、 $\overline{\psi(t)}$  は  $\psi(t)$  の複素共役を表している。連続ウェーブレット変換では、式(2)において、パラメータ  $a, b$  が連続的な値をとる。基底としては既に様々なものが考案されており、条件を満たす関数ならば、新しい基底として定義することもできる。そのため、解析目的、解析対象に適した基底を選択することができる。

### 3. 解析方法

解析対象となる音声信号はフリーソフトの SoundEngine Free を用いて、モノラル wave ファイルとして録音した。10人から母音である「あ」行を2回ずつ、いずれも自然に発声したものを録音した。「あ」は音高が変わるように発声した場合など追加録音したものもあるため37個、他の音に関しては全て20個、計117個のサンプルを録音した。サンプリング周波数と量子化ビットは電話音質を意識し、8kHz、8bitを採用しようと考えたが、電話で話す際に相手が誰か判別できない事もあるため、サンプリング周波数はより高く、11.025kHzとした。量子化ビットについては、8bit、16bitの2つのサンプルをウェーブレット変換して比べた結果、特に差異はなかったため、8bitを採用した。本報告書にて解析を行った結果は主に「あ」に対してであるため、音声について何も明示されていない場合は「あ」についての解析結果である。また、解析には Matlab、scilab 及び、それぞれ Toolbox である WaveletToolbox を用いた。

3.1 変換における基底の選択 ウェーブレット変換において、解析に適した基底の選択は重要である。そこで、同じ音声に対して、いくつかの基底を用いてウェーブレット変換を施し、その結果から用いる基底を Coiflets 基底(以下 coif と略す)に決定した。coif 以外の基底の詳細については参考文献(3)を参照されたい。MexicanHat 基底や、Haar 基底、Daubechies 基底(以下 db 基底と略す)なども検討を行ったが、それぞれ次のような問題があったため使用しなかった。MexicanHat 基底の結果は約100以下の比較的低いスケールに情報が偏った結果となっていた。スケールの刻み幅とスケールの幅を半分にするれば

無駄な結果を省くことができるが、他の基底と同じ条件と比較すると高周波成分などの特徴が把握しにくいという事が考えられた。Haar 基底の結果では値の大きい部分がばらついているため、どのスケールの成分が強いのか把握しにくいという事が考えられた。db 基底は coif 基底と同じく複数のバリエーションが存在しており、その変換結果も coif 基底に近いものがあったが、coif を用いた場合の変換結果の高スケール(低周波)部分を歪めたような結果となったため、coif 基底を使用する事にした。

3.1.1 Coiflets 基底 (coif 基底) Coiflets 基底は高次の消滅モーメントを持ち、式(3)を満たすように考案された基底である<sup>(4)</sup>。

$$\int x^l \psi(x) dx = 0, \quad l = 0, \dots, L-1 \quad (3)$$

ここで、 $L$  は Coiflets の次数と呼ばれる。次数が高い基底ほど高い周波数成分を含むため、次数は高い方が高周波の解析に適していると考えられる。図2に  $L=5$  である coif5 基底の波形、図3(a)に変換対象の「あ」の波形と同図(b)に coif5 を用いた変換結果を示す。ただし、変換対象と変換結果を全て表示すると形がわかりにくくなるため、それぞれ部分的に示している。図3の横軸は時間軸でデータの数が250個、(a)の縦軸は

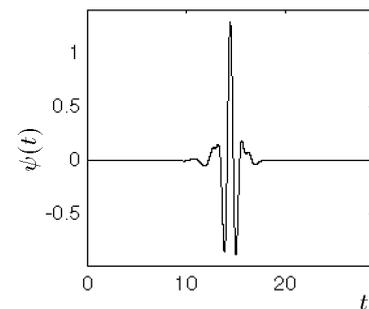
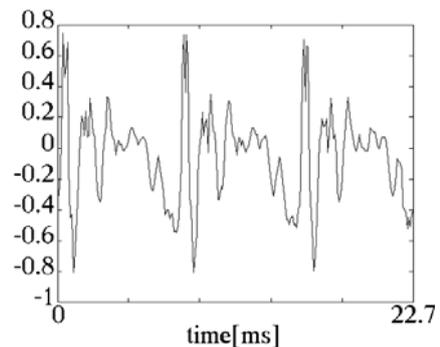
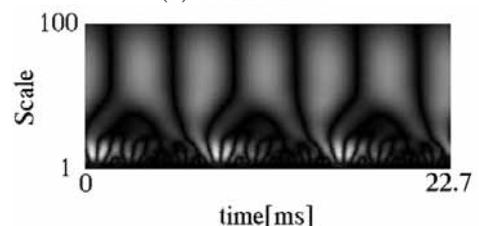


図2 Coiflets5 基底



(a) 信号強度波形



(b) coif5 によるウェーブレット変換結果

図3 「あ」音の信号

信号の強度, (b) の縦軸はスケールの範囲で 1 ~ 100 の目盛りを取る. 横軸は 1 目盛り  $90.7\mu s$  で, 最大約  $22.7ms$  となる.

4. 音声信号のウェーブレット解析

4.1 音声の中間部に対する検討 音声をウェーブレット変換した結果は図 3(b) を見てもわかるように, もとの音声は周期的なために周期的な画像となった. そこで, 変換画像において 1 周期を定義し, 比較する事で認証が行なえるか検討する. ただし, 発声開始や, 終了付近では安定した特性が得られないため, もっとも安定していると考えられる中間に存在する 1 周期を比較対象とした.

4.1.1 1 周期の定義 本研究における 1 周期の定義は複数の変換画像から次のように決定した. まず, 変換画像のスケール 70 までの範囲に注目する. 変換画像を閾値 0 で 2 値化すると図 4 のようになる. 次にラベリングを行い, スケール 70 に存在する山に注目する. この時注目した山と同一のラベルをもつ最も右に存在する画素と, 注目した山より 1 つ左の山と同一のラベルをもつ最も右に存在する画素の間を 1 周期とする.

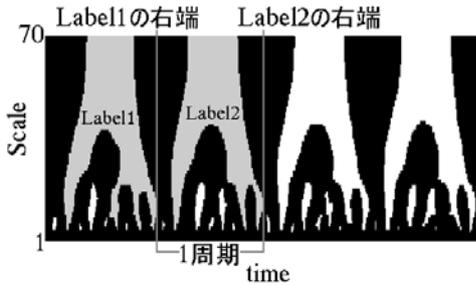


図 4 スケール 1 から 70 までの 2 値化変換画像

4.1.2 相関係数 相関係数とは 2 つの変数集合 ( $\{x_i\}, \{y_i\}$ ) の間の類似性を示す指標である. 相関係数は -1 から 1 の範囲に存在し, 1 に近い場合は 2 つの変数の間に正の相関があるといい, 逆に -1 に近い場合には 2 つの変数の間に負の相関があるという. また, 0 に近い場合は 2 つの変数に類似性はないということになる. 2 次元データにおける相関係数  $R$  は式 (4) で表せる.

$$R = \frac{\sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} (f(x, y) - \bar{f})(g(x, y) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} (f(x, y) - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{y=0}^{H-1} \sum_{x=0}^{W-1} (g(x, y) - \bar{g})^2}} \quad (4)$$

$f(x, y)$  と  $g(x, y)$  が位置  $(x, y)$  での画素値であり,  $H$  と  $W$  は画像の高さ方向と幅方向のピクセル数を,  $\bar{f}$  と  $\bar{g}$  はそれぞれの平均値を示している. 本章では, これを用いて定量的に比較を行う.

4.1.3 比較結果 ここでは, 変換画像から 1 周期を取得して, 輝度を高さに変換し, 立体画像として比較する. これは輝度の違いよりも高さの違いの方が, 違いがわかりやすいためである. ここでは 3 人の音声サンプルの解析結果を示し, 比較考察を行う. 図 5 に人物 A, 人物 B, 人物 C それぞれにたいする解析結果を示す. 1 周期の長さは同一人物でも多少違っていたが, 1 周

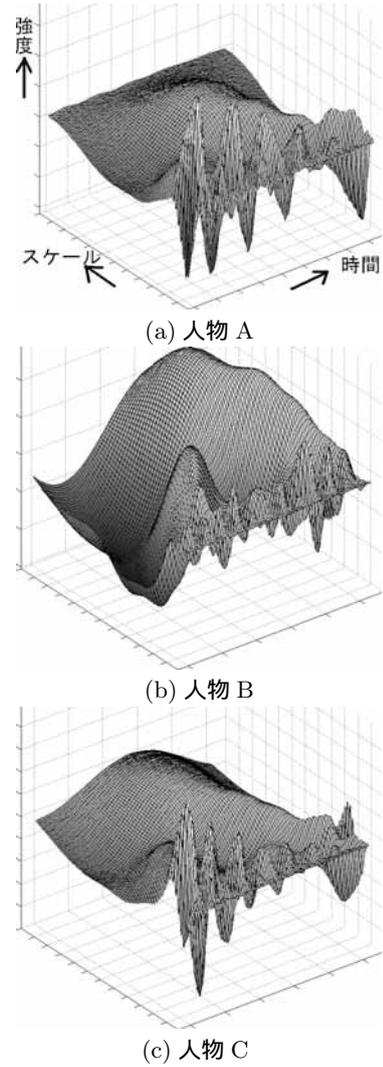
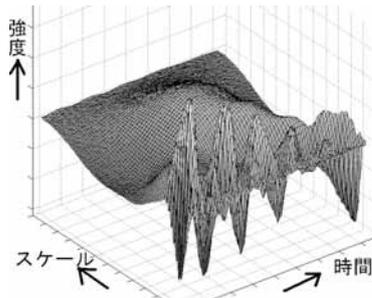


図 5 1 周期画像の比較

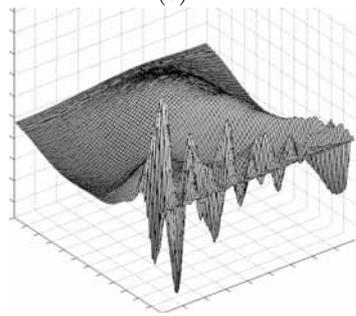
期の形に注目するため, 相関係数を用いる時は画像サイズが同じになるように修正した.

人物 A と人物 C は似た結果となっているが, 人物 B はこれらに比べて大きく異なった結果となっている. 人物 A と人物 C でも, 高スケール (低周波) における成分の強さは人物 C の方が高く, 個人の違いは見られる. 同一人物であれば同じような結果となるのを確認するため, 図 5(a) を A-1 とし, これとは別に録音した人物 A の音声の抽出結果を A-2 として図 6 に示す. 低スケール (高周波) の挙動が若干異なった結果となっているが, 図 5 の人物 B や人物 C よりも, やはり人物 A に近い結果となっている. 表 1 にこれらそれぞれについて相関係数を求めた結果を示す.

図 5 の結果で人物 A, 人物 C と人物 B は大きく異なっていたため, 相関係数もそれに応じた結果となっている. しかし, 人物 A 同士よりも, 人物 A と人物 C の相関が高いという結果も現れている. このことから, 相関係数ではある程度の類似は検出できるが, 細部の違いにまでは対応できていないことがわかる. この他にも組み合わせを変えて比較したが, 同一人物の方が似た結果とはなりやすいが, 他人同士でも似た結果となってしまう事も少なくなかった. また, ウェーブレット変換の特徴であ



(a)A-1



(b)A-2

図6 同一人物の比較

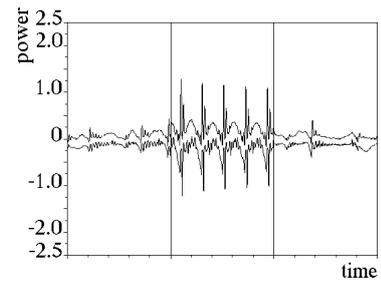
表1 相関結果

| 組み合わせ      | 相関係数   |
|------------|--------|
| 人物 A と人物 B | 0.4371 |
| 人物 A と人物 C | 0.8039 |
| 人物 B と人物 C | 0.4382 |
| 人物 A 同士    | 0.7822 |

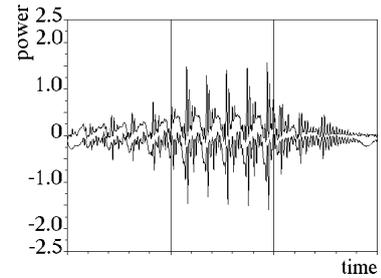
る時間的特徴もみられるという事を考えると、1周期は平均して約9msという短い期間のため、この方法ではウェーブレット変換の特徴を活かせていない可能性があり、全体的に変換画像をみる必要がありそうである。

4.2 発声開始/終了部に対する検討 変換画像全体を一度に把握することは難しいため、発声開始、中間部、発声終了の各部分を等間隔(約45ms)に取得し、時間軸方向からみた場合の強度の輪郭(以下、強度輪郭と示す)を比較に用いる。図3(b)を見ればわかるように、連続ウェーブレット変換の結果は、高スケール(低周波)部分は凹凸の変化が緩やかであり、低スケール(高周波)部分は凹凸の変化が激しい。したがって、強度輪郭の変化が緩やかである場合は高スケールが支配的であり、逆に変化が激しい場合には低スケールが支配的であるという事がわかる。この事に注目して比較を行う。図7に人物A、人物B、人物C、それぞれの各部における強度輪郭を示す。縦軸は強度、横軸は時間を示している。

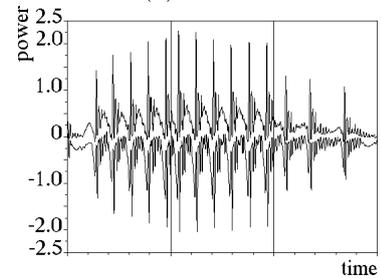
人物Aの終了部に注目すると、変化が緩やかであることから低周波成分が強くなっていることがわかる。逆に人物Bや人物Cでは変化が激しいため、高周波成分が強くなっていることがわかる。また、人物Cの開始部を見てみると、中間部が安定した状態だとすれば、人物Aや人物Bに比べ安定するのが速いことがわかる。なおかつ、人物Cの終了部では、人物Bの終了部が比較的緩やかに減衰しているのに対して、部分的な突起が目立っている事がわかる。図8に人物Cの別の音声から同じように比較した結果を示す。



(a) 人物 A



(b) 人物 B



(c) 人物 C

図7 強度輪郭の比較

人物Cの特徴であると考えられた、「安定するのが速い」、「終了部において部分的な突起が目立つ」などの特徴が見られる。これらのことから、時間的特徴があるとすれば、音声の開始や、終了部に存在する可能性がある。しかし、時間的な特徴というのは、発声の仕方への依存も大きいことが予想される。現在までに使用したのは、自分が一番楽な発声の仕方での発声してもらったものである。必然的に、人によって発声方法が固定されてくることになると考えられるので、音程が変わるように発声をかえた2つの音声の強度輪郭を比較した。図9に人物Dによる、発声を変えた場合の同一人物の比較結果を示す。

この結果から、個人の特徴であると考えていた「終了部には高周波成分が大きく現れている」などの特徴は、発声の仕方ひとつで大きく変わってしまうことがわかった。この事から、時

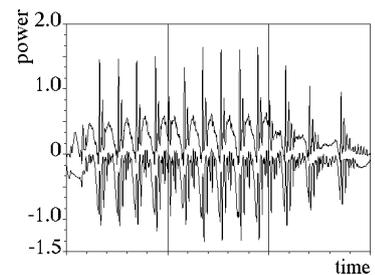


図8 人物Cの別音源の強度輪郭

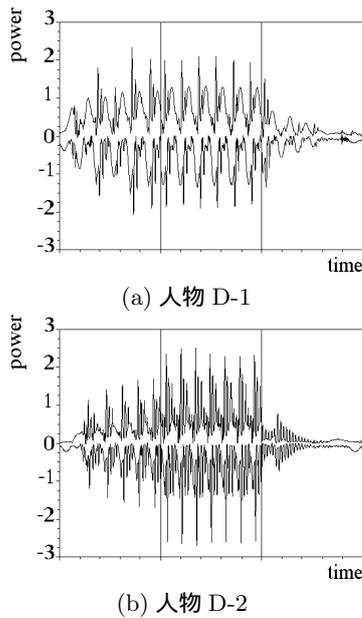


図9 発声を変えた場合の同一人物の比較

間軸側から見た強度の輪郭は個人の特徴というより、発声の仕方の特徴である可能性があり、音声認証には使用できないという事がわかった。

4.3 短時間フーリエ変換の利用 前節までは連続ウェーブレット変換結果のみに着目して個人の特徴について検討してきたが、有用な特徴は得ることができなかった。そこで、短時間フーリエ変換を用いた場合に得られる特徴について考察し、その特徴が連続ウェーブレット変換の結果に現れているかどうか検討する。ここで使用する短時間フーリエ変換では窓関数として約23.2msのハミング窓を使用し、その窓関数をずらす間隔は約2.9msとした。短時間フーリエ変換の結果から音声認証を行う場合はさらに特徴抽出を行うが、今回は個人の特徴をある程度把握できればよいので短時間フーリエ変換結果の比較を行う。

4.3.1 短時間フーリエ変換による特徴抽出 周波数的な特徴を抽出するため、同一人物から新たに3つのサンプルを採取した。音声は全て「あ」だが、全て音高をかえて発声したものを録音した。楽器用チューナーでそれぞれの音高を調べると、表2のような結果となった。また、それぞれの短時間フーリエ変換の結果を図10に示す。

表2の周波数成分は個人の意思で変える事ができるため、特徴として使用できない。また、「あ」と発音した場合、1100Hzと800Hz付近の周波数成分が含まれることが分かっており<sup>(6)</sup>、これも個人の特徴としては使用できない。この事を踏まえて、それぞれの短時間フーリエ変換結果について考察する。それぞれの変換結果を見てみると、いずれにも0Hz～約1500Hz、約2500Hz～約4200Hzの間に周波数成分が含まれている事がわ

表2 サンプルの音高

| 番号      | およその基本周波数 [Hz] |
|---------|----------------|
| サンプル A1 | 130            |
| サンプル A2 | 162            |
| サンプル A3 | 190            |

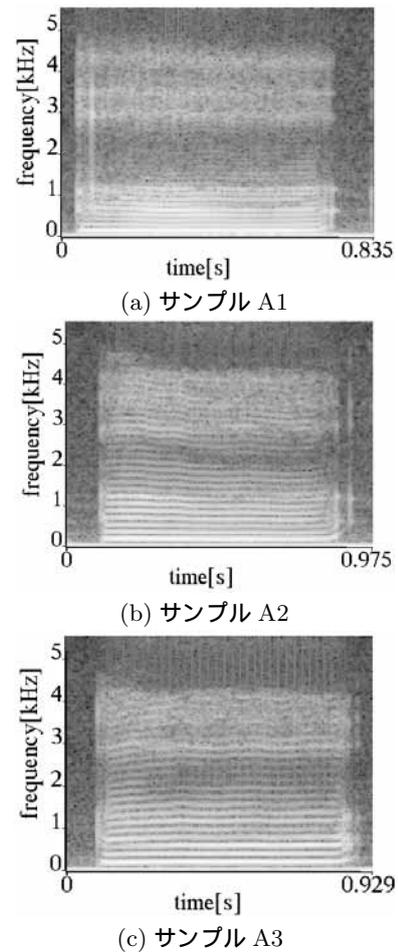


図10 短時間フーリエ変換結果

かる。しかし、0Hz～1100Hzにはさきほど説明したように個人の特徴としては見ることができない成分も多く含まれているため、それより高い周波数成分に着目し、他のサンプルと比較して個人の特徴となるかどうか検証する。

図11は別の人物Bから得たサンプルを短時間フーリエ変換

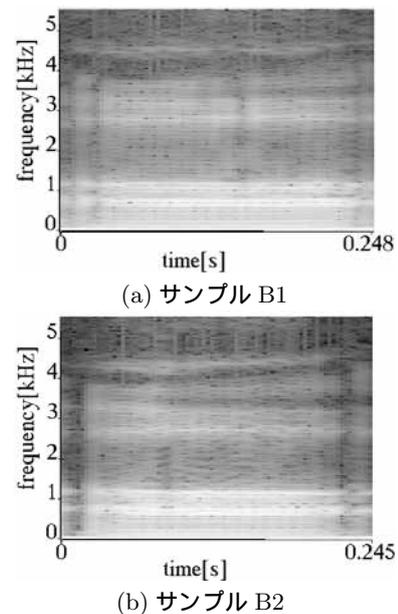


図11 短時間フーリエ変換結果2

した結果である。人物 A と同じく 0Hz ~ 約 1000Hz までに強い周波数成分があるが、次に周波数成分の多い部分は約 2500Hz ~ 約 3400Hz と、人物 A よりも範囲が狭くなっている。また、それより少し周波数の高い位置や、4000Hz ~ 4500Hz の間に孤立した成分が存在している事がわかる。これは人物 A にはなかった特徴である。さらに、約 1000Hz ~ 約 2500Hz の成分が多少ではあるが人物 A よりも多いように思える。この結果から、1000Hz より高い周波数の強度とその時間変化は音声認証に使用できる可能性がある事がわかった。

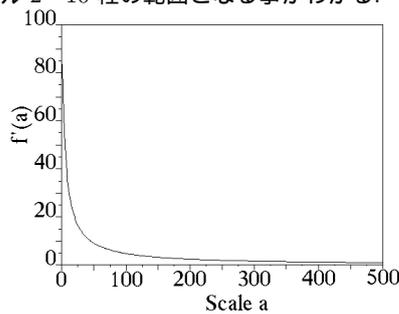
4.3.2 連続ウェーブレット変換において 1000Hz 以上に対応する部分 前節で個人の特徴は 1000Hz より高い成分とその時間変化を見ることが有用であると考えられた。ここでは連続ウェーブレット変換の結果ではその周波数成分はどこに対応するか調べた結果を示す。ただし、個人の特徴が考えていたよりも高周波に存在していたため、今までのような一定間隔のスケール範囲ではなく、周波数に近い軸  $f'(a)$  を式 (5) のように定義する。

$$f'(a) = \frac{F'A}{F'a + A} \quad (5)$$

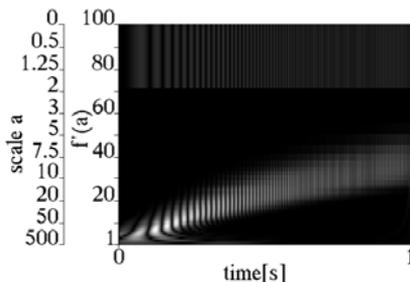
ここで、 $F'$  は  $f'(a)$  の最大値、 $a$  はスケール、 $A$  はスケールのおよその最大値を示している。 $A$  を 500、 $F'$  を 100 とすると図 4.3.2(a) のような範囲となる。このスケール範囲を用い、式 (6) のように時間に比例して周波数 0Hz ~ 1000Hz まで変化する sin 波の変換結果を図 4.3.2(b) に示す。

$$Sign(t) = \sin(2000\pi \frac{t^2}{T}) \quad (6)$$

ここで、 $T$  は  $t$  の最大値である。変換元の sin 波から考えて、スケール 2 以下に現れているのは異常な結果であるという事がわかるが、この異常な部分を無視すると、基底を  $\text{coif5}$ 、サンプリング周波数 11.025kHz としている場合、1000Hz より高い部分はスケール 2 ~ 10 程の範囲となる事がわかる。



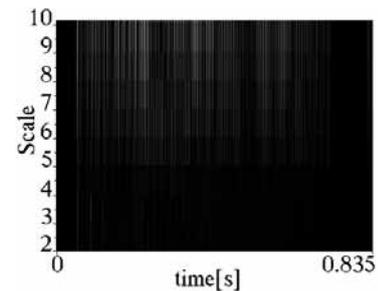
(a) スケール変換



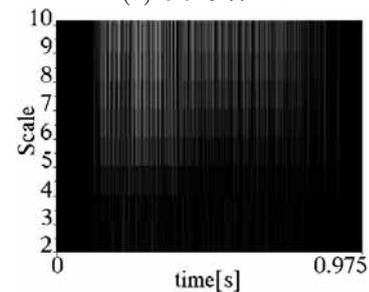
(b) 新しいスケールでのウェーブレット変換

図 12 スケール変換を行なった場合のウェーブレット変換

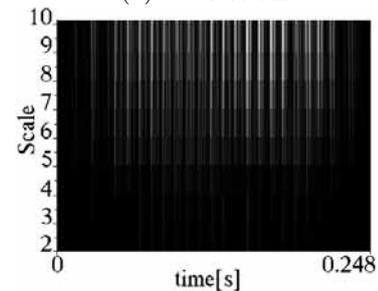
次に、2 ~ 10 (0.1 刻み) のスケール範囲を用いて、図 10 の A1 と A2、図 11 の B1 を連続ウェーブレット変換した結果を示す。図 13(a)(b) が A1、A2、(c) が B1 の変換結果である。短時間フーリエ変換の時に見られたような A1 と A2 の共通点や違いは結果からは把握できないものとなっている。この事から、1000Hz より高い成分を詳しく解析するには、サンプリング周波数やウェーブレット変換時の基底の再検討を行う必要があるということがわかった。サンプル録音時のサンプリング周波数を上げた場合の比較も行ったが、画像の粗さが緩和されただけで、短時間フーリエ変換で得られたような特徴は得られなかった。そのため、低周波における特徴や時間的な特徴など新たな指標の提案が必要であると考えられる。



(a) サンプル A1



(b) サンプル A2



(c) サンプル B1

図 13 スケール 2 ~ 10 の連続ウェーブレット変換結果

4.4 ウェーブレットパケット解析<sup>(5)</sup> ある信号を離散ウェーブレット変換した場合、その信号は高周波と低周波に分解される。得られた低周波に対して離散ウェーブレット変換を行い、またそこで得られた低周波に対して離散ウェーブレット変換を行う、といった手順を、決めた回数だけ繰り返すのが離散ウェーブレット変換の基本的な用法だが、ウェーブレットパケット解析の場合は高周波に対しても分解を行うため、より高度な解析が可能となっている。繰り返し分解した回数はレベルといい、分解の深さを表している。様々なレベルで音声のウェーブレットパケット解析を行い、比較した結果、レベルは 7 が最も適して

いと判断し、使用した。また、基底は引き続き `coif5` を使用している。図 14 に 4.3.1 節で使用したサンプル A1, B1 をウェーブレットパケット解析し、周波数 - 時間表示した図を示す。連続ウェーブレット変換で得た結果とは異なり、1000Hz 以上の成分も解析できている事がわかる。人物 B の 4000Hz ~ 4500Hz の間に存在する孤立した成分に関してはやや把握しにくい結果となっているものの、解析結果の大部分が短時間フーリエ変換の結果と類似しているため、ウェーブレットパケット解析を用いる事で、ウェーブレット変換を用いた音声認証は実現可能であると考えられる。

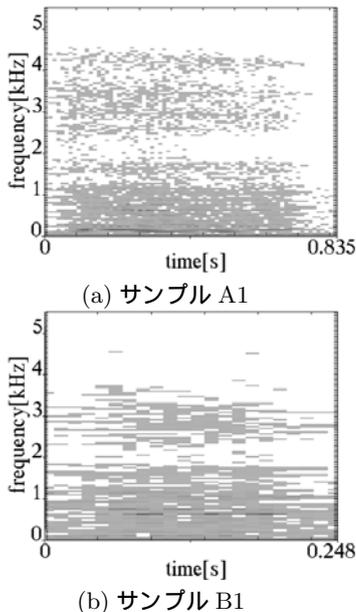


図 14 ウェーブレットパケット解析

## 5. 結論

連続ウェーブレット変換を用いた場合、抽出できる個人的な音声の特徴は、発声の中間部に対する検討においても、発声開始や発声終了部に対する検討においても個人を識別できるだけの十分なものではなかった。そこで、短時間フーリエ変換を利用して個人の特徴がどのように現れるか調べると、考えていたよりも高周波に特徴が存在する可能性がある事がわかった。つまり、中間部などにおいて得られた変換結果は大部分が 1000Hz 以下の解析で、個人の特徴として使えるものではなかった可能性がある。そこで、1000Hz より高い成分を重視してみるために変換結果において対応する部分を調べたが、現在使用している基底、サンプリング周波数でのウェーブレット変換結果ではその部分を詳しく解析できないことがわかった。対策としてサンプリング周波数を 44.1kHz まであげてサンプルを録音し、解析を行なったが、画像の粗さが改善されただけで、短時間フーリエ変換で見られたような高周波における特徴は得られなかった。また、本論文には載せていないが、基底を変えたとしても、変換結果の低スケール（高周波）部分で大きな変化は見込めない事がわかった。これらの事から、短時間フーリエ変換で得られたような高周波における特徴ではなく、低周波における特徴や時間的な特徴が存在すれば、連続ウェーブレット変換を用いて行う音声認証の実現は可能であると考えられる。しかし、低

周波における特徴や時間的な特徴は、中間部に対する検討でも、発声開始や発声終了部に対する検討でも得る事ができなかったため、連続ウェーブレット変換を用いての音声認証の実現は難しいと判断した。

一方、ウェーブレットパケット解析を用いて周波数 - 時間解析を行った結果、短時間フーリエ変換で得られたような特徴がある程度得る事ができた。本研究では主に連続ウェーブレット変換を用いる場合を考えていたため、ウェーブレットパケット解析について十分な検討を行うことができなかったが、解析結果の大部分が短時間フーリエ変換の結果と類似しているため、ウェーブレットパケット解析を用いた音声認証は実現可能である判断した。また、 $N$  をデータの長さとする、ウェーブレットパケット解析は計算量が  $O(N)$  である離散ウェーブレット変換を元としており、 $O(N \log N)$  の計算を要する高速フーリエ変換を元としている短時間フーリエ変換よりも処理が速いなどの利点も考えられる。

## 参考文献

- (1) B.B. ハバード 山田道夫/西野 操 訳：“ウェーブレット入門 - 数学的道具の物語 -”，朝倉書店，2003 .
- (2) C.Sidney Burrus, Ramesh A.Gopinath, Haitao Guo : “Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms”, Prentice-Hall Inc ., 1998 .
- (3) Michal Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi, サイバネットシステム株式会社 訳：“ウェーブレットツールボックス ユーザーズガイド”，サイバネットシステム株式会社，pp.1-27 ~ pp.1-32, pp.6-48 ~ pp.6-58, 1996 .
- (4) I. ドブシー 山田道夫/佐々木文夫 訳：“ウェーブレット 10 講”，シュプリンガー・フェアラーク東京，pp.100 ~ pp.103, 2003 .
- (5) Michal Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi, サイバネットシステム株式会社 訳：“ウェーブレットツールボックス ユーザーズガイド”，サイバネットシステム株式会社，pp.5-1 ~ pp.5-4, 1996 .
- (6) 古井 貞熙：“音響・音声工学”，近代科学社，pp.100 ~ pp.103, 1992 .



## 4次元超曲面に基づくFDG-PETからの異常陰影抽出と解析

戸崎哲也<sup>\*1</sup>, 千田道雄<sup>\*2</sup>, 山根登茂彦<sup>\*2</sup>

### Extraction and Analysis of Abnormal Nodules on FDG-PET Images Using Curvature of Four Dimensional Hyper Surface

Tetsuya TOZAKI<sup>\*1</sup>, Michio SENDA<sup>\*2</sup>, Tomohiko YAMANE<sup>\*2</sup>

#### ABSTRACT

Recently, PET equipment has been used for the cancer diagnosis. In this paper, we propose the extraction method of the abnormal nodule on FDG-PET images and we analyze the characteristics of abnormal nodules for the diagnosis of the malignant cancer or benign. For the abnormal nodule extraction, we use the curvature of four dimensional hyper surface. We treat the three dimensional PET images as a hyper surface in the four dimensional space, and we extract the abnormal nodule by the curvature which estimated by its eigen value. Then we analyze abnormal nodules from three viewpoints such as accumulating pattern, accumulating degree, and segmental degree. We apply these extraction and analysis method to 18 colon/rectum cancer patients, and we show the usefulness of the computer assisted diagnosis for the cancer diagnosis using PET images.

*Keywords:* abnormal nodule, curvature of four dimensional hyper surface, colon/rectum cancer

#### 1. はじめに

近年、PETを用いたがんの検診や診断を行う医療機関が増加している。このPET検診や診断はトレーサにFDGを用いている。FDGはブドウ糖と同じような性質があるため、糖代謝の活発な心筋や筋肉、脳に多く集積する一方、がん組織にも多く集積するという傾向を持つ。平成14年からこのFDGを用いたPET検診が保険適用され、また最近では、FDGの医薬品販売が開始されたこともあり、今後も多くの医療機関でPETを導入することが予想される。一方、1症例あたり200枚ほどの画像を1日数症例読影する医師の負担は増大しているのが現状である。

PETを導入する医療機関は増加するものの、PETの読影には診断基準が確立されておらず、ある機関ではがんを疑う陰影だと指摘したものが、他の機関では陰性として処理されるケースも多々あるという問題点も指摘されつつある。2005年度に行われた全国50,000件のFDG-PETがん検診を対象とした全国FDG-PETがん検診アンケート調査によると、各施設の要精査率は1.7-24.6%とかなりのばらつきが認められた<sup>(1)</sup>。このことから、各施設ごとに要精査判定の基準がまちまちであると考えられる。

このような医療機関ごとの診断基準のばらつきに対し

て、FDG集積の形態や集積度によってどの程度異常の可能性があるか、さらには併用検査の所見も加味することによって精査を進める必要があるかを検討し、統一した読影基準を作成する動きが見られるようになってきた。文献<sup>(2)</sup>では、FDG-PETがん検診で発見されることの多い乳腺、甲状腺、肺、大腸の4種類のがんに関して読影判定試験を行い、診断基準ルールの作成の妥当性について検証を行っている。これによると、4臓器に共通して「集積形態」と「集積度」が読影上重要視すべき点として挙げ、定量的な評価の必要性が述べられている。

我々は、<sup>(3)-(6)</sup>にあるようにPET像からの異常陰影自動検出に関する研究を行ってきた。これらは、PET像上の3次元曲率に基づいて異常陰影候補の検出を行い、さらに濃度の特徴に基づいて異常陰影を絞り込むというものである。PET像自体の解像度の低さから、疑陽性陰影が多く存在するといった欠点や、医師の診断結果との対応が取れていないといった問題点を残していた。そこで本研究では、4次元超空間での曲率に基づいて異常陰影候補を3次的に抽出し、その候補陰影ごとに「集積度」「集積形態」「陰影の形状」等を定量的に表現し、読影する医師の支援を行うシステムの開発を行うことを目的とする。本論文では、大腸がんを疑う陰影を対象に候補陰影の抽出と解析に関して医師との読影結果との比較を行ったのでその報告をする。2章では今回使用したPET像の概要を、3章では異常陰影候補抽出手法を、4

<sup>\*1</sup>電子工学科 准教授

<sup>\*2</sup>先端医療センター分子イメージング研究部

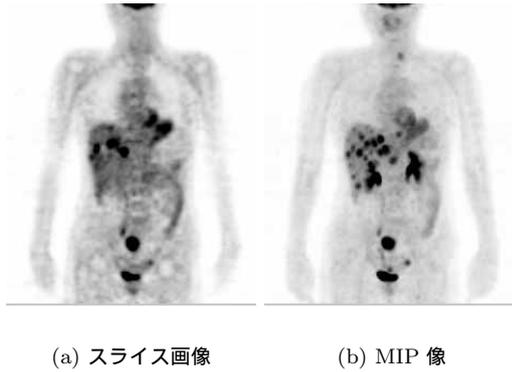


図 1: 回盲部がん症例

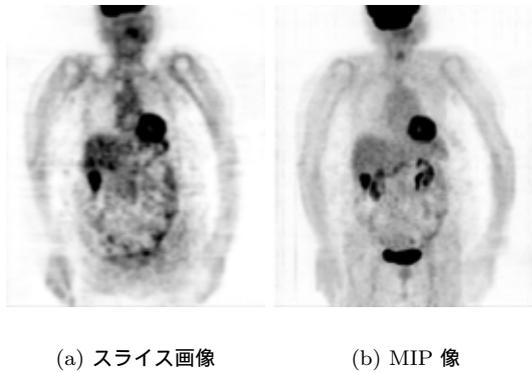


図 2: 上行結腸がん症例

章では異常陰影候補の解析結果を示す．5章では，本報告のまとめを行う．

## 2. FDG-PET 像

本研究で使用する PET 像は，神戸市にある先端医療センターにおいて GE 社製 Discovery により撮影されたものである．ピクセルサイズは 4.69mm，スライス厚 3.27mm で，体軸方向のスライス枚数は身長に応じて異なるものの，142-187 枚である．大腸がんを疑う患者に対して撮影を行った 18 症例のうち，手術等で 5 症例が大腸がんを確定された．内訳は，1 症例が回盲部がん，2 症例が直腸がん，2 症例が上行結腸がんである．図 1 に回盲部にがんが存在する症例を，図 2 には上行結腸にがんが存在する症例のコロナル像を示す．それぞれ (a) にがんが存在するスライス像を，(b) には，MIP 像を示す．ここで，MIP とは Maximum Intensity Projection を意味し，投影方向の視線上に存在する最大輝度値を投影面に投影するものである．簡単な処理ではあるが表示能力が高い 3 次元表示として医療分野で多く使用されている．

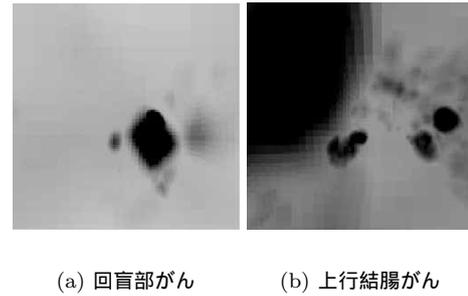


図 3: 人体内部の MIP 像

また，図 3 に，人体内部を MIP 像で表現した様子を示す．これは，投影する空間領域を 30 スライスと定め，この領域を頭部から脚部に移動させることで実現した．投影法に透視投影を採用することで，奥行き情報が付加され，さらにこのような画像を連続的に表示することで，あたかも人体内を通り抜けているような感覚が得られる．(a) は回盲部に存在するがんであり，中央の大きな塊がそれである．また (b) は上行結腸に存在するがんであり，図右にがん陰影が確認される．ちなみに，中央に存在する左右対象な陰影は腎臓の陰影であり，図左に大きく存在する陰影が心筋である．どちらの図も頭方向から腹部方向を覗いた様子である．

## 3. 候補陰影抽出

FDG は，心筋や脳，膀胱やがん領域に多く集積する．このため，これらの組織の濃度値は周辺のそれよりも高くなる．ここでは，4 次元超曲面の曲率に基づいてそれらの領域を抽出することとする．

4 次元超曲面の曲率は，<sup>(7)</sup> によるもので，3 次元濃淡画像の空間方向の三つの軸に加え，第 4 軸目として濃度値をとり，3 次元濃淡画像を 4 次元空間内の 4 次元超曲面と考えたときの法曲率である．4 次元超曲面の曲率は三つ存在し，これらの曲率に基づいて異常を疑う候補陰影として抽出する．

4 次元超曲面の曲率は，式 (1) で示す第 1 基本式と式 (2) で示す第 2 基本式から式 (3) の行列を求め，この行列  $W$  の固有値  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  として与えられるものである．ここで， $f_x, f_y, f_z, f_{xx}, f_{xy}, f_{xz}, f_{yy}, f_{yx}, f_{yz}, f_{zx}, f_{zy}$  はそれぞれ  $f(x, y, z)$  の偏導関数を表し，3 次元 PET 像と 3 次元ガウス関数の偏導関数との畳み込みによって計算する．また，ガウス関数の標準偏差を表すパラメータは対象によって変動させる必要があるが，今回は  $\sigma = 3.0$  で固定した．今，行列  $W$  の三つの固有値を  $|\lambda_3| \leq |\lambda_2| \leq |\lambda_1|$  とすると，固有値に対応する固有ベクトル  $e_1, e_2, e_3$  は互いに直交し，その方向は各固有値から得られる曲率に

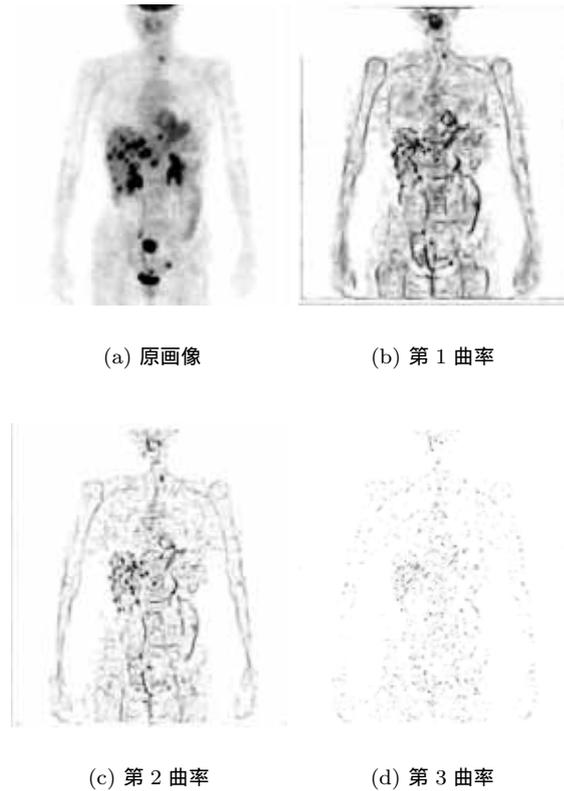


図 4: 曲率の結果

対応する輝度変化の方向と一致する．ここでは，固有値の絶対値の大きい順に第 1 曲率，第 2 曲率，第 3 曲率と定めることとする．

$$F_1 = \begin{pmatrix} 1 + f_x^2 & f_x f_y & f_x f_z \\ f_y f_x & 1 + f_y^2 & f_y f_z \\ f_z f_x & f_z f_y & 1 + f_z^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$F_2 = -\frac{1}{D} \begin{pmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{yx} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{zx} & f_{zy} & f_{zz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{ただし, } D = \sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}$$

$$W = F_1^{-1} F_2 \quad (3)$$

曲率計算の処理結果を図 4 に示す．(a) が原画像を，(b) は第 1 曲率，(c) は第 2 曲率，(d) は第 3 曲率を示す．どの図も MIP 表示を施してある．第 1 曲率および第 2 曲率の方向は濃度勾配を表しており，第 3 曲率は空間的な連結方向を表しているものと考えられる．図 4 から，第 1 曲率と第 2 曲率は背景成分に影響されることなく線状陰影や孤立陰影といった陰影の骨格が表現されている

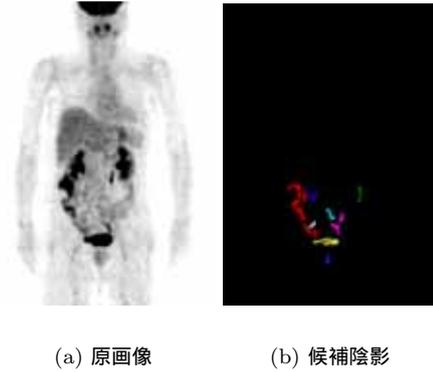


図 5: 候補陰影抽出結果

ことが確認できる．このため，候補陰影の抽出には第 1 曲率を用いることとする．

候補陰影の抽出手順は以下のとおりである．

Step1) 第 1 曲率が  $th_1$  以上かつ SUV が  $th_2$  以上の陰影を抽出する．

Step2) Step1) で抽出された陰影の要素数を調べ，その要素数が 100 以下のものはノイズとして除去し，それ以外は候補陰影として抽出する．

ここで，SUV とは Standardized uptake value を意味し，FDG の取り込みを投与量と被験者の体重で規格化したものである<sup>(8)</sup>．この SUV と第 1 曲率により候補陰影を 3 次元的に取得する．ここで， $th_1$  と  $th_2$  は経験的に定め，それぞれ 1.0, 2.0 とした．ちなみに，大腸領域においては，SUV が 2.5 を超えると低度の集積が確認されるとされており<sup>(2)</sup>， $th_2 = 2.0$  はこのような低度集積様陰影をカバー出来るものである．図 5 に候補陰影を抽出した結果の 1 例を示す．(a) が抽出する前の MIP 像を，(b) が 3 次元的に抽出した候補陰影を示す．抽出された候補陰影にはラベルが与えられており，異なった色で表現している．腸管といった線状の陰影も抽出されていることが確認できる．

#### 4. 定量解析と結果

2002 年から 2005 年にかけて，神戸市にある先端医療センターで大腸がんの疑いのため PET 撮影された患者 18 症例を対象に解析を行った．そのうち，5 症例が手術等でがんを確定された．その内訳は，回盲部がん 1 例，直腸がん 2 例，上行結腸がん 2 例である．この全 18 症例から異常を疑う候補陰影 111 個，1 症例あたり平均約 6 個を抽出し，それらについて解析を行った．尚，各症例において SUV が最大となる領域は膀胱の領域であるとしてあらかじめ除外してある．これは，最終的に FDG は尿として排泄されるため，膀胱は FDG の集積が非常

表 1: 最大 SUV による評価

| 順位 | 最大 SUV | M/B | 分散   | 画素数  | SPR  |
|----|--------|-----|------|------|------|
| 1  | 12.11  | M   | 2.62 | 698  | 0.48 |
| 2  | 9.81   | M   | 1.44 | 485  | 0.66 |
| 3  | 9.43   | B   | 1.19 | 1302 | 0.38 |
| 4  | 9.40   | B   | 1.52 | 3904 | 0.18 |
| ⋮  | ⋮      | ⋮   | ⋮    | ⋮    | ⋮    |
| 13 | 4.46   | B   | 0.55 | 1196 | 0.37 |
| 14 | 4.31   | M   | 0.52 | 320  | 0.75 |
| ⋮  | ⋮      | ⋮   | ⋮    | ⋮    | ⋮    |
| 17 | 3.95   | M   | 0.45 | 224  | 0.82 |
| ⋮  | ⋮      | ⋮   | ⋮    | ⋮    | ⋮    |
| 28 | 3.35   | B   | 0.28 | 416  | 0.50 |
| 29 | 3.26   | M   | 0.25 | 316  | 0.58 |
| ⋮  | ⋮      | ⋮   | ⋮    | ⋮    | ⋮    |

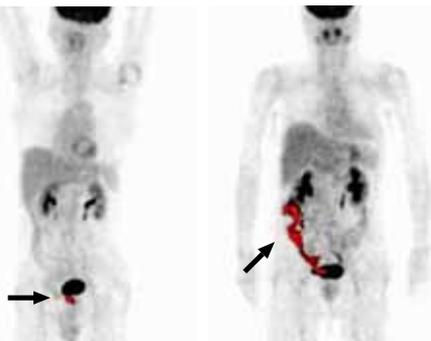
M は悪性 (malignant), B は良性 (benign) を表す.

表 2: 分散による評価

| 順位 | 分散   | M/B | 最大値   | 画素数  | SPR  |
|----|------|-----|-------|------|------|
| 1  | 2.63 | M   | 12.11 | 698  | 0.48 |
| 2  | 1.52 | B   | 9.40  | 3904 | 0.18 |
| 3  | 1.44 | M   | 9.81  | 485  | 0.66 |
| 4  | 1.18 | B   | 9.43  | 1302 | 0.38 |
| ⋮  | ⋮    | ⋮   | ⋮     | ⋮    | ⋮    |
| 11 | 0.55 | B   | 4.46  | 1196 | 0.37 |
| 12 | 0.52 | M   | 4.31  | 320  | 0.75 |
| ⋮  | ⋮    | ⋮   | ⋮     | ⋮    | ⋮    |
| 32 | 0.25 | M   | 3.26  | 316  | 0.58 |
| ⋮  | ⋮    | ⋮   | ⋮     | ⋮    | ⋮    |

M は悪性 (malignant), B は良性 (benign) を表す.

に強いという生理的特徴に基づくものである.



(a) 低度集積・悪性例 (b) 高度集積・良性例

図 6: SUV 最大による評価

評価する項目は、先に挙げた文献<sup>(2)</sup>に基づくものとした。すなわち、1.集積形態、2.集積度、3.連続型を評価した。集積形態は、限局性集積かびまん性集積かを評価するものであり、限局性が強ければ悪性を強く疑うものである。しかしながら、びまん性であっても悪性のケースである可能性も少なからず存在するものである。このような集積形態に関しては、候補陰影内の分散を用いて評価する。すなわち、分散が小さいほど限局性を強く表現し、また逆に分散が大きければびまん性であると判断する。集積度は、FDG 集積の強さを表すものであり、高集積から低集積までの判断を行う。これは、候補陰影中の最大 SUV を用いて評価することとする。また、大腸では集積部位が縦方向に連続する形状も比較的多く見られるため、単連続型集積と長連続型集積に評価する

必要がある。そこで、線状陰影か否かの判断は球形度という指標を設け、また連続の強さは候補陰影を構成する画素数で判断することとした。球形度の求め方として、まず注目する候補領域の重心を求め、候補領域の画素数からその重心を中心とする球を考慮する。次に、この球と候補陰影のアンド領域に存在する画素を計数する。最後に、計測された画素数と球の体積の比を球形度とする。すなわち、候補領域が球に近い程 1 の値に近くなり、逆に球形から離れるほど 0 に近くなるというものである。

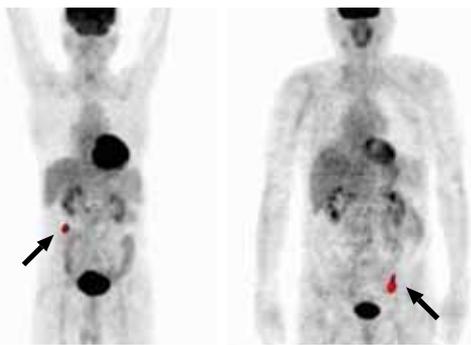
4.1 最大 SUV による評価 表 1 に全 111 候補領域に対して、各領域中の最大 SUV を調べ、それらを値の大きい順にソートした結果を示す。参考として、SUV の分散、構成画素数、球形度 (SPR) を併記する。がん陰影 5 陰影とも上位に位置し、SUV の最大値を診断の基準にすることの妥当性が確認できる。最上位に存在する陰影は、先の図 2 に示した症例であり、上行結腸にがんが存在し、典型的な高集積を示している。しかし、悪性 5 領域中最下位の領域は、直腸に存在するがんであり、低度の集積を示していた。この症例を図 6(a) に示す。このようながんに関しては、集積度とは別の指標を用いる必要があることが確認できた。また、上位から 4 番目の集積を持つ陰影は、高度の集積を有しているが、構成する画素数が非常に大きくかつ球形度が 0 に近いことから腸管状陰影であると判断できる。この症例を図 6(b) に示す。

4.2 分散による評価 表 2 に分散の大きい順にソートした結果を示す。参考のため、SUV 最大、構成画素数、球形度 (SPR) を併記する。がん候補 5 領域は、全体として上位に存在し、候補陰影の分散も悪性の診断基準として使用することの妥当性が確認された。特に、上位から 3 番目に位置する陰影は、典型的なびまん性集積を示していた。しかし、候補陰影を抽出する段階でガウス関

表 3: 球形度による評価

| 順位 | SPR  | M/B | 最大値   | 画素数 | 分散   |
|----|------|-----|-------|-----|------|
| 1  | 0.85 | B   | 2.98  | 171 | 0.23 |
| 2  | 0.83 | B   | 2.52  | 159 | 0.12 |
| 3  | 0.82 | B   | 3.61  | 146 | 0.39 |
| 4  | 0.82 | M   | 3.95  | 224 | 0.45 |
| ⋮  | ⋮    | ⋮   | ⋮     | ⋮   | ⋮    |
| 10 | 0.73 | M   | 4.31  | 320 | 0.52 |
| ⋮  | ⋮    | ⋮   | ⋮     | ⋮   | ⋮    |
| 18 | 0.56 | M   | 9.81  | 485 | 1.44 |
| ⋮  | ⋮    | ⋮   | ⋮     | ⋮   | ⋮    |
| 35 | 0.58 | M   | 3.26  | 316 | 2.32 |
| ⋮  | ⋮    | ⋮   | ⋮     | ⋮   | ⋮    |
| 52 | 0.48 | M   | 12.11 | 698 | 2.62 |
| ⋮  | ⋮    | ⋮   | ⋮     | ⋮   | ⋮    |

M は悪性 (malignant), B は良性 (benign) を表す.



(a) 高球形度・良性例 (b) 高球形度・悪性例

図 7: 球形度による評価

数を用いた曲面当てはめを施しているため、本来なら限局性あるいはびまん性の判断は平滑化の度合いを決定する  $\sigma$  の値に影響される。今回は、この  $\sigma$  を固定して行っているため、集積の形態の具体的な様子を得られるものではなかった。

4.3 球形度による評価 表 3 に球形度の大きい順にソートした結果を示す。参考のため、SUV 最大、分散、構成画素数を併記する。SUV 最大、分散による評価と比べ、悪性を顕著に示す指標とはならなかった。すなわち、球形を示していても悪性ではない陰影は数多く存在するということである。例えば、3 番目に位置する良性の陰影は、図 7(a) に示すような陰影であり、4 番目に位置する悪性の陰影は、図 7(b) に示すようなものである。どちらも似たような陰影を呈しているが、前後スライスとの関係や位置関係で悪性が良性かの判断が分かれ

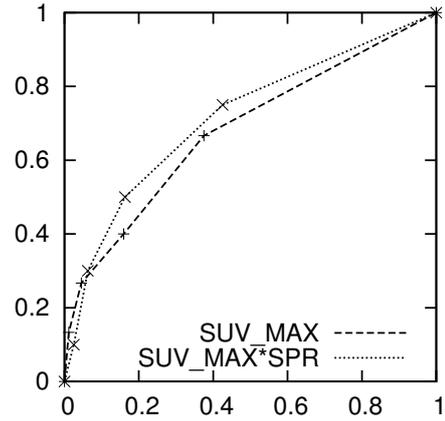


図 8: ROC 曲線による評価

る。この球形度に関しては、他の特徴と組み合わせることで、診断に応用することが必要であると考えられる。

4.4 ROC 曲線による評価 解析結果と診断結果の比較を ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線 (9), (10) を用いて評価する。悪性症例を正しく判断した場合を真陽性、良性症例を悪性と判断した場合を疑陽性とする。ROC 曲線は判別のための閾値を変化させたときの真陽性と疑陽性の変化を表すものであり、曲線の左上隅に近づくほどその判別能力は高いとされる。ここでは、SUV 最大による判別と、SUV 最大に球形度を掛け合わせた値による判別の ROC 解析を行った。それぞれ閾値を定め、これらの閾値より高い陰影を陽性、それ以外を陰性とした。閾値の決定は、判別分析法に基づく 2 群分割を 5 回繰り返すことで行った。得られた判定結果と読影医による診断結果から、真陽性率および疑陽性率を計算しグラフ化した結果を図 8 に示す。この図において、横軸が疑陽性率、縦軸が真陽性率を示している。疑陽性率および真陽性率とは、全候補領域数に対する疑陽性あるいは真陽性の割合を示しており、どちらも最大値が 1、最小値が 0 になる。この図より、SUV と球形度を組み合わせると診断を行ったほうが、SUV 単独で診断を行うよりも、診断精度が良いという結果が得られた。これにより、いろいろな指標を組み合わせると計算機で診断を支援することの有効性が確認できた。

### 5. まとめ

本報告では、PET により撮影された 18 症例の大腸がんを疑う陰影に対し、その異常陰影の抽出および異常陰影の特徴の解析を評価して読影を行う医師を支援する手法を検討した。異常陰影抽出に関しては、FDG-PET 像を 4 次元超空間の曲率で表現し、濃度の勾配に基づく画像へと変換することにより、背景要素によるバイアス成

分に影響されることなく、3次元的に抽出することが可能となった。これらの領域を、集積度、集積形態、連続性に基づいて定量解析を行った。集積度、集積形態単独でも診断の基準として有効であるが、計算機により例えば球形度と集積度を組み合わせることで診断精度が向上することが確認できた。

今後は、診断に有効な新しい指標を追加して診断精度をさらに向上させる必要がある。さらには、症例数を増やして信頼性を向上させる必要がある。また、CTなどの他のモダリティーの情報も考慮するような柔軟性のある診断支援システムへと発展させる予定である。

#### 参考文献

- (1) Minamimoto R., Senda M., Uno K., Junnouchi S., Inuma T., Ito K.: "Performance profile of FDG-PET and PET/CT for cancer screening on the basis of a Japanese Nationwide Survey" *Ann Nucl Med* 21:481-498, 2007.
- (2) 南本亮吾, 千田道雄, 陣之内正史, 吉田毅 et al: "集積パターンと併用検査に基づく FDG-PET がん検診の要精査判定方法" *核医学*, 第 46 巻, 2 号, pp.73-93, 2009.
- (3) Tozaki T., Senda M., Sakamoto S., et al: "Computer Assisted Diagnosis Method of Whole Body Cancer Using FDG-PET Images", *IEEE ICIP 2003, CD-Proc.*, 2003.
- (4) Tozaki T., Senda M., Sakamoto S., et al: "True Positive Reduction Method for Cancer Diagnosis on FDG-PET Images using Image Registration", *6th IASTED SIP*, pp.390-394, 2004.
- (5) Tozaki T., Senda M., Sakamoto S., et al: "True Positive Reduction Method for Cancer Diagnosis Based on FDG-PET images" *IEEE MIC, M5-186*, 2004.
- (6) Tozaki T., Senda M., Sakamoto S., et al: "Analysis of FDG-PET Images for Cancer Diagnosis based on Anatomical Information of Human Body" *8th IASTED SIP*, pp.297-300, 2006.
- (7) O.Monga and S.Benayoun: "Using partial derivatives on 3D images to extract typical surface features", *Computer Vision and Image Understanding*, vol.61, no.2, pp.172-189, 1995.
- (8) 日本核医学技術学会編: "PET ポジトロン断層撮影 技術マニュアル", pp.82-89, 2006.
- (9) C.E.Metz: "ROC methodology in radiologic imaging", *Investigative Radiology*, vol.21, pp.720-733, 1986.
- (10) 日本放射線技術学会専門委員会: "ROC 解析の基礎と応用", 日本放射線技術学会, 1994.

# 有機金属塗布光分解法による 硫化物蛍光体の作製とフォトルミネッセンス

西 敬生\*

## Photoluminescence studies and preparation of sulfide fluorescent thin films by metal organic decomposition technique

Takao NISHI

### ABSTRACT

Blue and green emitting thioaluminate and thiogallate phosphors are key materials for the fabrication of full color flat panel displays such as the field emission display (FED) and the electroluminescent display (ELD). The purpose of this study is to prepare the blue emitting phosphor Eu-doped  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  and the green emitting phosphor Eu-doped  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  thin films on Si (100) substrates by the metal organic decomposition (MOD) and sulfurization technique. Eu-doped  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  and  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  thin films were also prepared by novel photolysis process, which was compared with ordinary pyrolysis process. The photoluminescence (PL) emission bands have been observed at around 480 nm in Eu-doped  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  films, and at around 530 nm in Eu-doped  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  films, which can be associated with  $4f^65d \rightarrow 4f^7$  transition in  $\text{Eu}^{2+}$  ions. Improvement of surface morphology in Eu-doped  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  thin films prepared by photolysis process has been observed.

*Keywords:* Eu doped  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$ , Eu doped  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$ , MOD, photolysis process, photoluminescence

### 1. はじめに

現在、次世代の自発光薄型ディスプレイとして、電界放出ディスプレイ(FED)やエレクトロルミネッセンスディスプレイ(ELD)などが研究・開発されている。これらのディスプレイ用いられる蛍光体として、 $\text{CaAlSiN}_3$  や  $\text{SiAlON}$  などの酸窒化物や、 $\text{SrGa}_2\text{S}_4$ 、 $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  などの硫化物に Eu を添加したものが候補として研究されている。

Eu 添加  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  は青色蛍光体として 1999 年に明治大が 2 源パルス電子ビーム蒸着法を用いて作製した<sup>(1)</sup>。また、Eu 添加  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  は緑色蛍光体として、古くから研究されているが、最近では静岡大が 2 源電子ビーム蒸着法を用いて作製している<sup>(2)</sup>。これらを作製する際には、高真空技術や大きな製造装置といったものが要求される。そこで、本研究では比較的安価で容易に、酸化物薄膜を作製できる有機金属塗布熱分解法(MOD法)を応用して Eu 添加  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$ 、 $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  硫化物薄膜を作製することを目的とした。これらの蛍光体が MOD 法で製膜できれば、原料が液体であるため、望みの形状にパターニングでき、広範囲の応用も期待できる。

また、MOD 法では熱処理によって有機金属化合物を分解して前駆体膜を作製する手法が一般的であり、例えば Eu 添加  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  なら Ba, Al, Eu 用の三種類が必要となる。これまでの研究<sup>(3)</sup>によると、今回用いた溶液中の有機金属の分解温度は有機化 Ba と有機化 Al で 250°C 付近、有機化 Eu で 400°C 付近である。それぞれの分解温度が異なるため、三種類の有機金属溶液を混合して用いると、熱処理では最も高い分解温度を

有する有機金属に合わせなければならず、低い分解温度の有機金属が分解と同時に酸化したり、別の化合物やアモルファスの物質として生成されたりする。これまでの研究では、三種類の溶液を交互に積層するといった手法も試されたが、均一な薄膜ができず、特に基板の面内方向において Eu の濃度に大きな偏りが生じていた。そこで本研究では混合液中の三種類の有機金属を紫外線を用いて一度に分解する光分解法を試み、熱処理とどのように異なるかの比較を行った。光分解法は紫外線によって有機金属化合物の分子結合を切ることで分解を行う。

### 2. 実験方法

MOD 法による Eu 添加  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  の製膜には Ba, Al, Eu の有機化合物溶液をそれぞれ 0.95:2:0.05 の比率で混合した溶液を用いた。また Eu 添加  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  の製膜には Sr, Ga, Eu の有機化合物溶液を Sr:Ga:Eu = 0.95:2:0.05 の混合比で混ぜた溶液を用いた。使用した溶液は全てシメトリック社製である。基板には Si 単結晶(100)ウェーハ(10×10 mm<sup>2</sup>, 厚さ 0.63 mm)を使用し、スピコートにより混合液の塗布を 10 回行った。分解工程は熱分解では 400°C, 5 min, 光分解では紫外線を照射しながら 100°C, 5 min, 行った。本焼成工程は  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$ :Eu では 990°C,  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$ :Eu では 900°C でそれぞれ 60 min, 硫黄雰囲気中で行うことで硫化した。

作製した薄膜の X 線回折(XRD)測定を RIGAKU 社製 XRD 装置 MultiFlex で行い、JCPDS カードのデータと比較して、得られた物質の同定を行った。また、フォトルミネッセンス(PL)スペクトル測定は Ocean Optics

\*電子工学科

社製 USB2000 Spectrofluorometer で行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 Eu添加 BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜の作製と PL スペクトルの測定

熱分解を行って得られた薄膜の XRD 測定結果を図 1 に示す。熱分解で行った薄膜では、回折ピークとして判別できるほど大きな強度のものは得られず、XRD 測定ではどのような物質が得られているかは確認できなかつた。20°付近にブロードな回折線は非晶質からの回折であるハローパターンである。結晶からの回折線が得られず、ハローパターンが得られるということは、分解工程である仮焼成で有機化合物の十分な分解ができなかつたか、本焼成工程で結晶化せず、膜全体が非晶質になっているか、結晶化が進まず微細な結晶粒が粗く分布したかのいずれかと思われる。

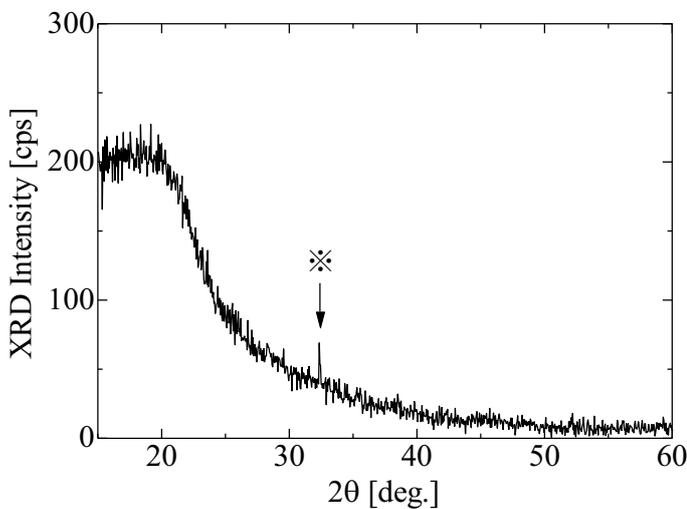


図 1 熱分解で得られた BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜の XRD パターン

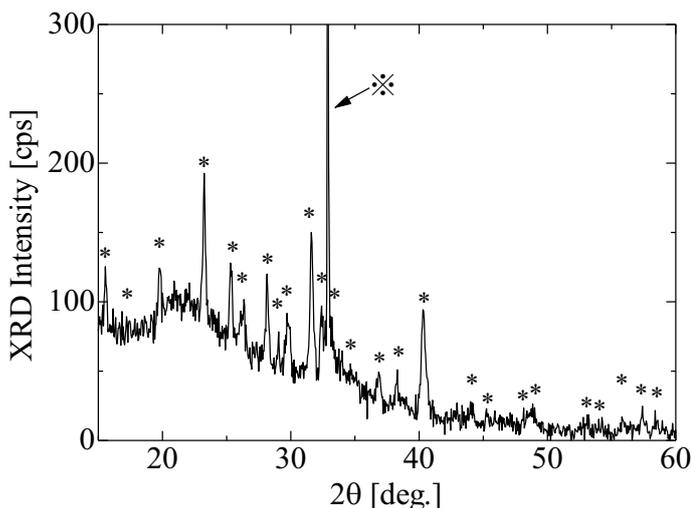


図 2 光分解で得られた BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜の XRD パターン

図 2 に分解工程を光分解で行って得られた薄膜の XRD パターンを示す。図 2 中の \* 印は BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> の JCPDS カードのデータと一致したピークであり、\*\* 印は Si 基板からのピークである。JCPDS カードと一致するピーク

クを多数確認できたため、得られた薄膜が BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> として結晶化していることが確認できた。また図 1 で確認された 20°付近のブロードな回折の強度が図 2 では弱くなっているのがわかる。このことから光分解では熱分解より十分に有機金属化合物が分解され、薄膜全体で結晶化が進んだことによって、薄膜中の非晶質が減り、ハローパターンが弱くなったと考えられる。

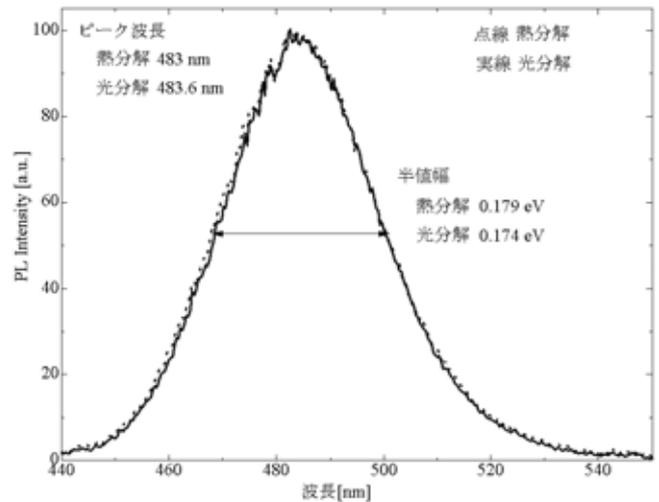


図 3 光分解、熱分解で得られた BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜の PL スペクトル

図 3 に両方の分解法で得られた薄膜からの PL スペクトルを示す。図 3 中の実線で示したのが光分解によって作製した薄膜から得られた PL スペクトル、点線で示したのが、熱分解によって作製した薄膜の PL スペクトルである。発光のピーク波長は熱分解が 483.0 nm、光分解が 483.6 nm であり、半値幅は熱分解が 0.179 eV、光分解が 0.174 eV と、ほとんど変わらなかったが、どちらも報告されている<sup>(4)</sup>ピーク波長である 470 nm より長波長側にシフトしていることがわかった。ただ BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> およびこれに近い組成の硫化物においては、Eu を添加していない場合、このような発光はこれまでに報告されていないため、Eu<sup>2+</sup>イオンの f-d 遷移による発光と考えられる。

熱分解で作製した薄膜では、図 1 で示したように XRD では BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> の合成は確認できなかったが、光分解によって作製した薄膜とほぼ等しい PL スペクトルを示すということは熱分解にも光分解と同様の結晶が合成されていると思われ、XRD ではピークが確認できないほど結晶粒が微細で、かつ粗く分布していることが予想される。

熱分解および光分解で作製した薄膜の PL の様子を光学顕微鏡で観察すると熱分解の薄膜は青色発光している部分が斑に存在し、膜の凹凸が激しいことがわかる。それに対して光分解の薄膜は青色発光している粒子が緻密に分布して存在し、一面が発光しているように見え、表面が比較的平坦であることがわかった。このことは上述した XRD パターンの考察とも合致している。熱分解では分解時に生じる H<sub>2</sub>O や CO<sub>2</sub> などのガ

スの運動エネルギーが、高温であるため、大きく、膜から蒸発する際に表面を荒らすのに対し、光分解時は基板温度が 100°C 程度であるため、熱分解ほど表面が荒れないと考えられる。これが分解方法の違いによる表面モルフォロジーの違いを生んでいると思われる。

また光学顕微鏡観察では、どちらの薄膜からも点々と緑色蛍光した粒が確認された。これまでの研究で本焼成後に大気中に放置した場合や、950°C よりも低温で本焼成した場合に、緑色蛍光する薄膜が得られることが経験的にわかっている<sup>(5)</sup>。大気中に置かれた  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  は大気中に含まれる水蒸気と反応し、硫化水素を発生する。この反応により  $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  よりも硫黄組成の低い相が形成されているか、分解してアモルファス相となっていると思われるが、 $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  が結晶化する直前か、本焼成を終えた直後に形成された硫黄組成の低い物質による緑色蛍光が、 $\text{BaAl}_2\text{S}_4:\text{Eu}$  の青色蛍光に重畳しピークの長波長側へのずれを生んでいるのではないかと考えられる。他の研究機関による報告例では Eu 添加  $\text{Ba}_2\text{Al}_2\text{S}_5$  ではピークが約 490 nm で半値幅が 0.285 eV の、よりブロードな発光が報告されている。<sup>(6)</sup> 現状では緑色蛍光している部分がどのような組成かは不明であるが、XRD でも異相の存在が確認されているため、これらの解析が今後の課題である。

### 3.2 Eu 添加 $\text{SrGa}_2\text{S}_4$ 薄膜の作製と PL スペクトルの測定

Eu 添加  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  薄膜の作製において熱分解および光分解で得られた薄膜の XRD 測定結果をそれぞれ図 4、図 5 に示す。それぞれの図において、JCPDS カードチャートのデータと一致するピークは\*印で示している。\*印は基板である Si のピークである。また 20°付近にみられるブロードなピークは結晶化しなかったものからのハローパターンである。

熱分解および光分解で得られた薄膜の XRD 測定結果と JCPDS カードのデータとを比較したところ、 $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  の回折パターンの特徴である  $2\theta = 17^\circ, 24^\circ, 34^\circ, 38^\circ$  付近に強く回折するピークとともに、多くのピークが JCPDS カードのデータとの一致が見られた。したがってどちらの分解法で作製した薄膜も  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  の結晶が形成していることが確認できた。しかし熱分解と光分解の XRD 測定結果を比較すると、光分解の方が強いピーク強度の回折線が得られた。ほとんどのピーク強度で 1.5~2 倍近く光分解の方が増加しているため、光分解を行った薄膜の方が熱分解のものよりも薄膜中の  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  の結晶量が多いことは間違いない。したがって仮焼成の段階で紫外線を照射することは、有機金属化合物を効果的に分解できていることは、 $\text{BaAl}_2\text{S}_4$  の場合も合わせて考えれば、明らかである。

図 6 に熱分解および光分解で作製した Eu 添加  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  薄膜の PL スペクトル測定結果を示す。どちらの方法で作製した薄膜においても緑色蛍光を得ることに成功した。ピーク波長と半値幅はそれぞれ、熱分解では 528.6 nm, 0.221 eV, 光分解では 531.6 nm, 0.220 eV であり、報告されている<sup>(2)</sup>ピーク波長 530 nm とほぼ同じであった。

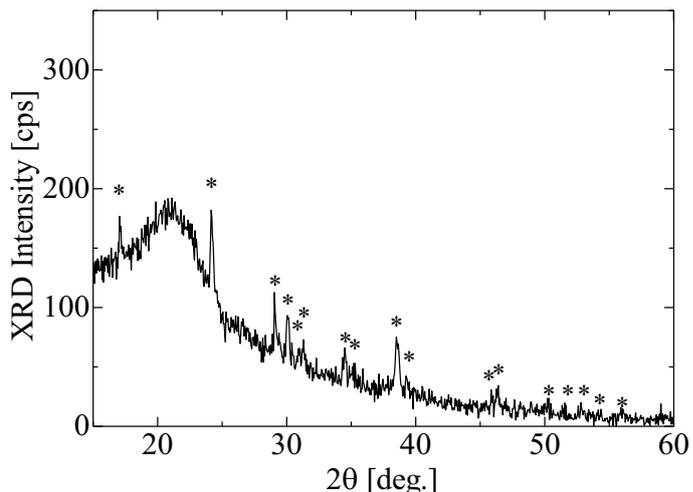


図 4 熱分解で得られた  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  薄膜の XRD パターン

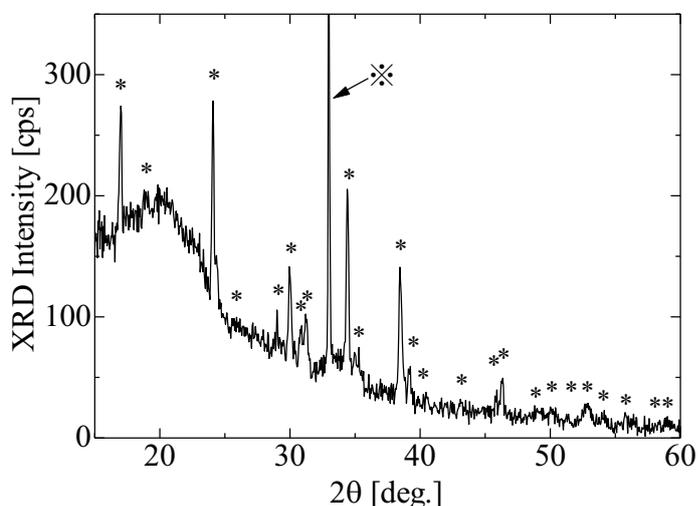


図 5 光分解で得られた  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  薄膜の XRD パターン

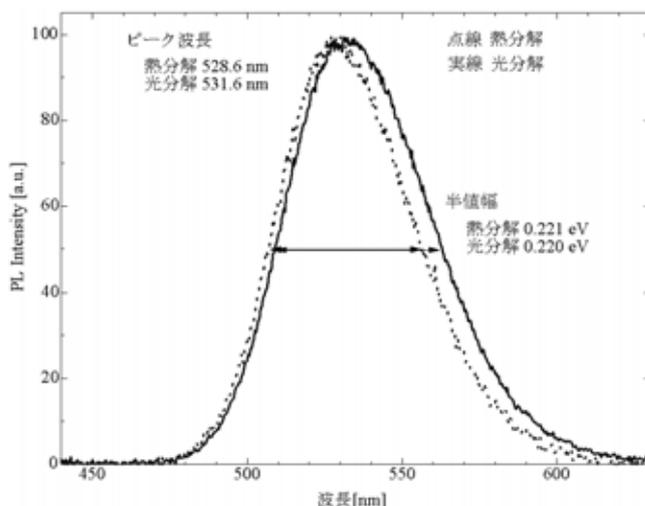


図 6 熱分解、光分解で作製した  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  薄膜の PL スペクトル

図 6 の PL スペクトルより、熱分解で作製した薄膜と比べて光分解で作製した薄膜の方が半値幅が広く、ピークも長波長側にある。過去の報告<sup>(2)</sup>で熱処理温度

を 800°C から 900°C に上げることによって SrS などの異相が合成され、発光ピーク波長が 530 nm から 550 nm にずれたとされており、今回のスペクトルの違いも異相に起因しているかもしれないが、そのずれはわずかであるため、Eu 濃度などや不純物の存在など他の原因も考えられる。

また、熱分解および光分解のどちらの方法で作製した薄膜も、光学顕微鏡で PL を観察した結果、表面は同様の状態で、BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> のような明らかな違いは見られなかった。

#### 4. まとめ

MOD 法を応用し、熱分解および光分解法で Eu 添加 BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜および SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜を作製することに成功した。また光分解法で行った方が、熱分解を行うより、有機金属化合物を効果的に分解することが明らかになった。

Eu 添加 BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜は青色蛍光したが、発光ピークは報告されているものより長波長側にシフトしていた。Eu 添加 SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜は熱分解、光分解法ともに緑色蛍光が得られたがわずかな波長のずれを観測した。

光分解法の優位性は PL の光学顕微鏡観察によっても確認でき、Eu 添加 BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜においては熱分解より表面モルフォロジーが改善され、一様な青色蛍光が得られることがわかった。

#### 参考文献

- (1) 「Recent Status and Prospects of Inorganic EL phosphors」 N. Miura, 第 293 回蛍光体同学講演会講演予稿集, pp. 25-33, (2002).
- (2) 「Luminescent properties of SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> thin film phosphors deposited by 2EB sources」 Y. Arai, H. Kominami, Y. Nakanishi, and Y. Hatanaka, IEICE technical report. Electron devices, Vol. 104, No.520, pp. 19-22, (2004).
- (3) 「MOD法によるEu添加BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜作製へのアプローチ」 角田洋, 神戸市立工業高等専門学校電子工学科平成 17 年度卒業研究報告書, (2005).
- (4) 「Blue-Emitting BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Eu Thin-Film Electroluminescent Devices Prepared by Two Targets Pulse Electron Beam Evaporation」 N. Miura, M. Kawanishi, H. Matsumoto and R. Nakano, IEICE TRANS. ELECTRON, vole83-c, No.10, pp. 1618-1621, (2000).
- (5) 「MOD法によるEu添加BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 薄膜の作製」 鳴尾貴至, 神戸市立工業高等専門学校電子工学科平成 18 年度卒業研究報告書, (2006).
- (6) 「Investigation of the MS-Al<sub>2</sub>S<sub>3</sub> systems (M = Ca, Sr, Ba) and luminescence properties of europium-doped thioaluminates」, K. T. Le thi, A. Garcia, F. Guillen and C. Fouassier, Materials Science and Engineering, B14, pp. 393-397, (1992).

MOD 法による CuAlS<sub>2</sub> の作製

西 敬生\*

Preparation of CuAlS<sub>2</sub> by MOD technique

Takao NISHI

## ABSTRACT

CuAlS<sub>2</sub> thin films on (111) and (100) Si and fused silica substrates have been prepared by metal organic decomposition (MOD) technique. The measurement of X-ray diffraction (XRD) revealed that the obtained thin films for Si single crystal substrate consists single-phase chalcopyrite type CuAlS<sub>2</sub> polycrystalline. Scanning electron microscope observation showed that the two-dimensional growth of singly oriented crystals with (112) CuAlS<sub>2</sub> could occur on (111) Si substrate. The XRD pattern of the films on the fused silica substrates showed diffraction line from CuO as a major component. These results suggested that the oxide such as CuO and CuAlO<sub>2</sub> in the films was formed by residual oxidant in precursor.

*Keywords: copper aluminum sulfide, Metal organic decomposition(MOD) technique, Si substrate, XRD*

## 1. はじめに

カルコパイライト構造(図1)を有する I-III-VI<sub>2</sub> 族化合物半導体は、直接遷移形のエネルギーバンド構造を有し、II-VI 族および III-V 族の化合物半導体を補完する半導体材料として注目されている。これらの半導体は、元素の組み合わせが豊富なため、幅広くバンドギャップの制御ができることや、高い吸収係数を有し、光や放射線による劣化が極めて少ないといった特徴を持つため、光デバイス材料、主に太陽電池材料として実用化されている。

このカルコパイライト形半導体の中で、CuAlS<sub>2</sub>は最も広い 3.55 eV の禁制帯幅を持つため無色透明の物質である。そのため、これまでに透明の太陽電池や既存

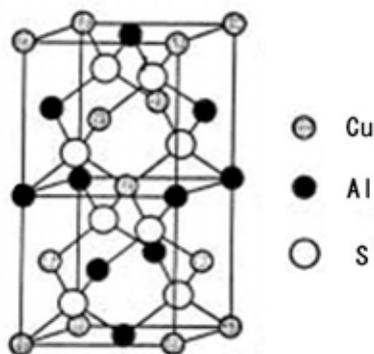


図1 カルコパイライト構造

の太陽電池と組み合わせるタンデム形といった応用や、遷移金属不純物を添加して着色させ、その着色を電氣的に制御するエレクトロクロミックデバイスへの応用が考えられている<sup>(1)</sup>。また Mn を添加することにより室温で強磁性を示す理論的な報告<sup>(2,3)</sup>などもあり、幅広い応用が期待される物質である。

カルコパイライト型半導体薄膜を作製する方法としては MOCVD 法<sup>(4)</sup>や MBE 法<sup>(5)</sup>などが知られており、他に東京理科大等<sup>(6)</sup>は太陽電池への利用を目指して有機金属塗布熱分解法(以下 MOD 法)を用いた CuInSe<sub>2</sub> 薄膜作製についての研究を行っている。MOD 法は他の薄膜作製法に比べ真空システムを使わない分、安価で工程が容易であり、大面積に作製できるといった利点がある。本研究室ではこれまでの研究でデラフォサイト構造を有する I-III-VI<sub>2</sub> 族半導体 CuAlO<sub>2</sub> を MOD 法を用いて作製することに成功している<sup>(7)</sup>。そこで本研究では、この CuAlS<sub>2</sub> の良質な薄膜を、この MOD 法の本焼成工程において硫黄蒸気の雰囲気中で行う硫化法を施すことによって作製することを試み、得られた膜の評価を行うことを目的とした。この中で特に基板に着目し、数種類の基板上に同条件で作製した場合の薄膜を X 線回折測定などで評価および比較検討を行った。

## 2. 実験方法

2.1 使用原料と基板について CuAlS<sub>2</sub> 薄膜の作製に用いた原料は(株)高純度化学研究所製 MOD コート材, AlCu-03, 基板は(1)熔融石英ガラス板, (2) Si(111)

\*電子工学科

面単結晶, (3) Si(100)面単結晶で, 全て約  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ , 厚さは  $0.5 \sim 1 \text{ mm}$  であった. 石英ガラス板を用いた理由は, 安価で熱的な安定性も高く(熱膨張係数が小さい), アモルファスであるため基板から薄膜に与える影響が少ないと考えたからである. また, 基板が無色透明であることから, 光学的な評価を行いやすい. Si 基板を用いた理由は, 高品質でありかつ比較的入手が容易で, 表面処理の方法など取り扱い方法が確立している点があげられる.

**2.2 製膜条件** MOD法による製膜条件について説明する.  $\text{CuAlS}_2$  薄膜は MOD 法で Cu-Al プリカーサを作製し, 本焼成工程で硫化することで作製した. 実験における作製条件を表 1 にまとめる.

表 1 MOD 法による  $\text{CuAlS}_2$  の製膜条件

|        |  |
|--------|--|
| 使用基板   | 石英ガラス基板(三理化器械(株))<br>Si(111), (100)基板(信越化学(株)) |
| MOD 溶液 | AlCu-03<br>(株)高純度化学研究所<br>スピコート法               |
| 塗布条件   | 初段 1500 rpm 20 秒<br>次段 3000 rpm 50 秒           |
| 仮焼成条件  | 500°C 窒素雰囲気中 5 分間                              |
| 本焼成条件  | 900°C 硫黄雰囲気中 1 時間                              |

**2.3 評価方法** 作製した試料は(株)リガク製 X 線回折(XRD)装置 Multiflex にて回折ピークを測定し, 試料の結晶構造の同定を行った. 試料の表面観察像を得るために, 日本エフイー・アイ(株)製電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)を用いた.

### 3. 結果および考察

**3.1 石英基板上的薄膜の XRD パターン** 図 2 は石英ガラス基板上に作製した薄膜の X 線回折測定結果である.  $\text{CuAlS}_2$  の合成を示す回折線は観測されず,  $\text{SiO}_2$  と  $\text{CuO}$  の合成を示す回折線が観測され, 硫化物と思われる物質の存在を示すものは観測されなかった. 大気中や酸素雰囲気での焼成であれば,  $\text{CuO}$  は  $500^\circ\text{C}$  以上で合成される. 本焼成工程の  $900^\circ\text{C}$  への温度上昇の途中で合成されたと思われるが, 温度上昇過程では窒素雰囲気中であるため, 酸化種はプリカーサ膜中の残留物と考えられる.

また  $\text{SiO}_2$  のピークの観測はガラスである基板の表面が結晶化されたことを示す. 石英の軟化点( $1700^\circ\text{C}$ )を考えると  $900^\circ\text{C}$  の焼成で融けることはないが, MOD 溶液と反応したり, 溶液成分が不純物として基板に混入したりすることで結晶化が行われたと思われる. Al は  $\text{SiO}_2$  と  $900^\circ\text{C}$  程度の温度でよく反応することが知られており, アモルファス状態から結晶化を促す役割を果たしたのではないかと考えられる. ここで重要なことは, 本焼成工程において試料を硫黄蒸気で満たした

にもかかわらず, 硫化物が得られず, 基板と薄膜との反応の方が優先的に起こったことである.  $\text{CuO}$  が先に合成され, Al が基板と反応することでこのような結果を生んだと思われるが, 薄膜の反応は蒸気-薄膜界面の反応ではなく, 基板-薄膜界面や薄膜内部が優先されることがわかり, 製膜条件における基板の重要性が確認された.

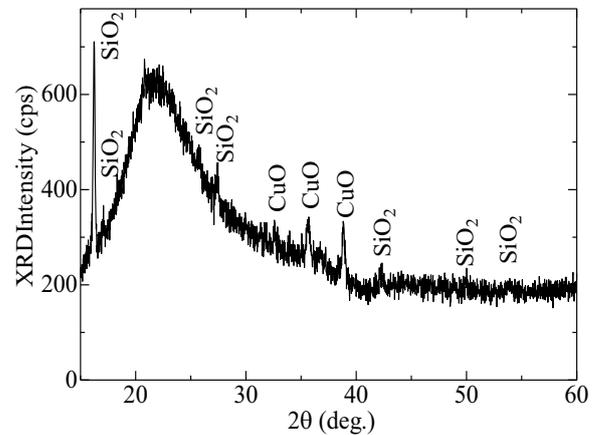


図 2 合成石英基板上的薄膜の XRD パターン

### 3.2 Si 基板上に作製した薄膜の XRD パターン

**3.2.1 Si(111)基板を使用した場合** 図 3 は塗布回数を 5 回として Si(111)基板上に作製した場合の XRD パターンである.  $2\theta = 29.3^\circ$  に  $\text{CuAlS}_2$  特有の非常に強い回折ピークが観測された. また基板表面には白っぽい粉状のものが見られたため, 無色透明な  $\text{CuAlS}_2$  薄膜が多結晶薄膜として作製されたことがわかった.

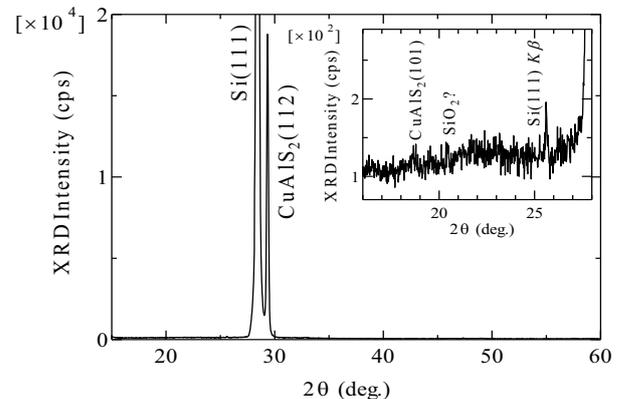


図 3 Si(111)基板上的薄膜の XRD パターン

この XRD パターンからは石英基板上で見られた  $\text{CuO}$  といった酸化物によるピークが観測されなかったため, 使用基板を Si に替えることでプリカーサ中に残留した酸素成分は Si 中に拡散することで減少し, 効果的に Cu や Al を硫化することができたと考えられる. 表 2 は International Center for Diffraction Data(ICDD)の Joint Committee on Powder Diffraction Standards(JCPDS)で編集, 刊行された ICDD データカードに記載されている  $\text{CuAlS}_2$  の多結晶粉末の XRD データである.

作製された薄膜が無配向ならば表 2 より(112)回折線

と(101)回折線の強度比は10：1になる．しかし、 $2\theta = 16 \sim 28^\circ$ の範囲を拡大した図3中の挿入図を見ると130：1と圧倒的に(112)の回折強度が強いため、薄膜が(112)面に配向して結晶成長している可能性が高い．

CuAlS<sub>2</sub>にはカルコパイライト構造の他にCuとAlが不規則に並んだ閃亜鉛鉱構造の相も存在する．この閃亜鉛鉱型のCuAlS<sub>2</sub>も(111)面からの回折線は29°付近に表れる．カルコパイライト型のCuAlS<sub>2</sub>であれば見られる表2の中の(abc)のcが奇数の面からの回折線は閃亜鉛鉱型ではみられない．図5を見ると18.7°や38°付近、46°付近などにcが奇数の面からのピークが観測されているため、カルコパイライト型のCuAlS<sub>2</sub>が得られたことがわかった．

表2 ICDD データカードのCuAlS<sub>2</sub>の粉末XRDデータの一部

| 2θ (deg.) | X線相対強度 | 回折面方位 (abc) |
|-----------|--------|-------------|
| 18.735    | 108    | (101)       |
| 29.288    | 999    | (112)       |
| 30.730    | 59     | (103)       |
| 33.718    | 14     | (200)       |
| 34.398    | 6      | (004)       |
| 37.995    | 1      | (202)       |
| 38.849    | 59     | (211)       |
| 46.262    | 17     | (213)       |
| 46.787    | 14     | (105)       |
| 48.428    | 175    | (220)       |
| 48.935    | 336    | (204)       |
| 52.369    | 14     | (301)       |
| 54.588    | 1      | (310)       |
| 57.606    | 182    | (312)       |
| 58.504    | 88     | (303),(116) |
| 58.903    | 8      | (215)       |

3.2.2 Si(100)基板を使用した場合 図4はSi(100)基板を使用し、塗布回数を5回にして作製した薄膜のXRDパターンである．Si(111)基板を使用した場合と同様に、 $2\theta = 18.7^\circ$ と $29.3^\circ$ にそれぞれCuAlS<sub>2</sub>の(101)面と(112)面からの回折線が観測された．またSi(111)面基板上ではわずかにしか観測されなかった $48.2^\circ$ と $48.7^\circ$ などCuAlS<sub>2</sub>の回折線を明確に確認することができた．このように複数の回折ピークを明確に確認でき、どの回折ピークも、表2の強度比からの大きなずれがないため、Si(100)基板上ではCuAlS<sub>2</sub>は無配向の状態に結晶成長が行われていると思われる．なぜSi(111)基板では配向し、Si(100)では無配向膜になるのか明らかにするため、電子顕微鏡で薄膜表面を観察することにした．

### 3.3 Si基板上の薄膜のFE-SEMによる表面観察

結晶成長の基板依存性について調べるため、塗布

回数を1回にした薄膜の表面をFE-SEMにて観察した．Si(111)基板上の薄膜のSEM写真を図5、Si(100)基板のものを図6に示す．

図5や図6のどちらにも結晶の形成を示す幾何学的な形状が見られた．拡大していくとこれらの結晶の縁は正三角形を並べたノコギリの刃のような形状を有していたため、CuAlS<sub>2</sub>の(112)面が表出していることが確認できた．CuAlS<sub>2</sub>は(112)面に平行な方向への結晶成長スピードが速いため(112)面が表出する．

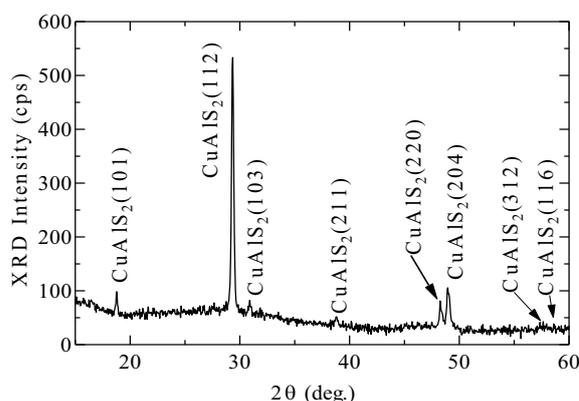


図4 Si(100)面基板使用時のXRDパターン

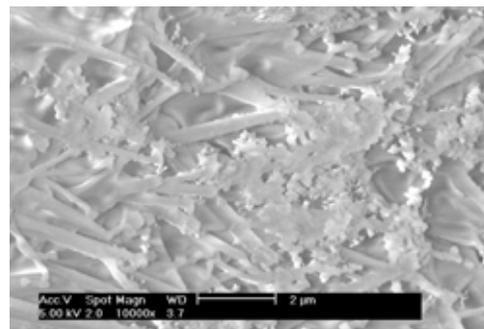


図5 Si(111)基板上の薄膜のSEM像

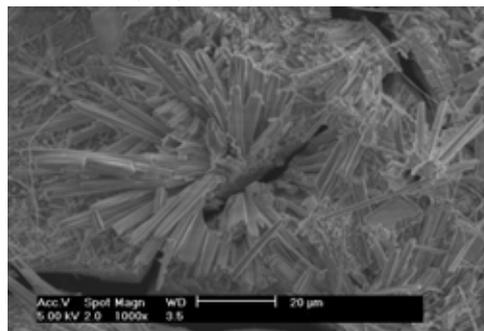


図6 Si(100)基板上の薄膜のSEM像

図5では結晶は平面上に2次元成長しており、全体が単結晶になっているように見える．それに対し図6では針状結晶が多方向に向いており、三次元的に結晶成長しているのがわかる．この比較からSi基板の面方位によって結晶成長モードが明らかに異なることが確認できた．特にSi(111)基板ではCuAlS<sub>2</sub>は平面的な結晶成長を行っており、(112)面配向を示した図3のXRDパターンとも矛盾ない．

図1のように、カルコパイライト構造は、Siの結晶

構造であるダイヤモンド構造を二つ重ねた構造に近く、Si(111)面と CuAlS<sub>2</sub>(112)面はほぼ同様のパターンで原子が配置される。二つの物質の格子定数も、Si が  $a=5.431\text{\AA}$ 、CuAlS<sub>2</sub> は  $a=5.325\text{\AA}$  と、格子不整合度が 2% と近い。したがって Si(111)基板上で CuAlS<sub>2</sub> の(112)面からの回折線が強かった理由として、Si 基板の(111)面と CuAlS<sub>2</sub> の(112)面において原子同士の配列がほぼ同じ間隔を持っていたために CuAlS<sub>2</sub> の(112)面がその上に成長しやすい条件を与えたことが考えられる。これは MOD 法によって作製されたプリカーサがゲル状であることから、本焼成工程で結晶化するとき薄膜が基板の結晶方位の影響を受けやすい状態にあったためではないかと考えられる。また、Si(100)基板では 3 次元に結晶成長が行われ、それぞれの CuAlS<sub>2</sub> 微結晶は(112)面を表出しているが、その向きがばらばらであるため、図 6 のように無配向な XRD パターンが得られたことがわかった。

また図 7 は Si(100)基板上の薄膜の SEM 像の拡大図である。100~200 nm 幅の髭状結晶が基板に接合せずに形成している。これは金属原料が蒸発して硫黄ガスと反応する気相の結晶成長が行われたことを示しており、この成長機構が三次元成長を促したと思われる。金属原料の蒸発は有機基に含まれる水素と化合することにより起きたと考えられ、有機金属を分解する仮焼成工程の時間を長くし、有機基の分解によって生じる H<sub>2</sub>O や CO<sub>2</sub> をできるだけ排出することにより、このような結晶成長を抑制できると思われる。

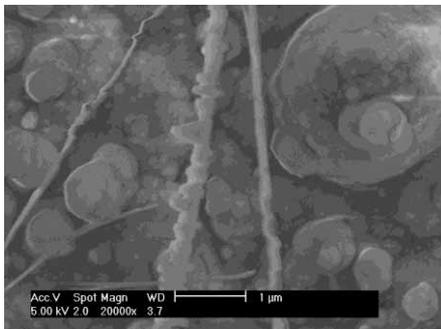


図 7 Si(100)基板上の薄膜の SEM 像 (拡大)

#### 4. 結論

カルコパイライト型半導体 CuAlS<sub>2</sub> を MOD 法によって Si 基板上に作製することができた。石英ガラス基板では CuAlS<sub>2</sub> のピークは得られず、酸化物である SiO<sub>2</sub> と CuO しか確認できなかった。これはプリカーサ中に残留した酸素が Si 基板中には拡散されるが、石英ガラス基板中には拡散できずに、プリカーサ中に留まったためと思われる。また、Si(111)と(100)基板を用いた場合、得られた CuAlS<sub>2</sub> 薄膜の配向性に大きな違いが現れた。Si(111)基板上薄膜の XRD パターンは CuAlS<sub>2</sub> 薄膜が(112)配向していることを示し、SEM 像は CuAlS<sub>2</sub> 結晶が、2 次元成長していることを示した。これに対し

て Si(100)基板上では配向性がほとんどない XRD パターンが得られ、SEM 観察からは、多くの微結晶が(112)面を表出しながら、多方向に結晶成長している様子が確認できた。これは CuAlS<sub>2</sub> が(112)面を表出して結晶成長しやすいことと、CuAlS<sub>2</sub> と Si の結晶構造が非常に似ており、格子不整合度も 2% と小さいことから、Si(111)基板では基板面に沿って 2 次元成長し、Si(100)基板では CuAlS<sub>2</sub>(112)面を表出するために 3 次元成長が行われたと考えられる。

この結果より Si(111)基板上で CuAlS<sub>2</sub> の 2 次元成長を確認できたため、できるだけ 3 次元成長を抑えるために、非常に薄いプリカーサを形成することができれば MOD 法で Si 基板上に CuAlS<sub>2</sub> エピタキシャル薄膜を得られると思われ、MOD 溶液の濃度と硫黄ガス供給の精密な制御が今後の課題と思われる。

#### 謝辞

FE-SEM での試料の観察は兵庫県立工業技術センターにおいて行われました。測定に際しご指導くださいました技術企画部の吉岡秀樹氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- (1) N. Ishibashi, T. Nishi, N. Hayashi, C. Furuhashi and K. Sato, 「Electrically Induced Optical Absorption in Al-CuAlS<sub>2</sub>-Au Diode」 Jpn. J. Appl. Phys. 38, pp. L626-L628 (1999).
- (2) Y. Zhao, P. Mahadevan, and A. Zunger, 「Comparison of predicted ferromagnetic tendencies of Mn substituting the Ga site in III-V and I-III-VI<sub>2</sub> chalcopyrite semiconductors」 APPLIED PHYSICS LETTERS 84, pp. 3753-3755 (2004).
- (3) Y. Zhao and A. Zunger, 「Electronic structure and ferromagnetism of Mn-substituted CuAlS<sub>2</sub>, CuGaS<sub>2</sub>, CuInS<sub>2</sub>, CuGaSe, and CuGaTe<sub>2</sub>」 Physical Review B 69, 104422, pp. 1-8 (2004).
- (4) S. Chichibu, H. Nakanishi and S. Shirakata, 「Ultraviolet photoluminescence from CuAlS<sub>2</sub> hetero-epitaxial layers grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition」 Applied. Physics Letters 66, pp. 3513-3515 (1995).
- (5) Y. Morita and T. Narusawa, 「Characterization of CuAlS<sub>2</sub> Films Grown by Molecular Beam Epitaxy」, Japanese Journal Applied Physics 31, L1396 (1992).
- (6) K. Mukouyama, H. Noguchi, and S. Ando, 「Preparation of CuInSe<sub>2</sub> thin films by metal organic decomposition method using metal octoate」 第 51 回応用物理学会講演会 講演予稿集, p. 1634 (2004).
- (7) 裕香織, 西敬生, 林昭博, 「MOD 法による遷移金属添加 CuAlO<sub>2</sub> の作製と評価」, 神戸市立工業高等専門学校 研究紀要第 43 号, pp. 79-82, (2005).

# Gaussian98 における NMR スペクトル予測のスケール因子の決定

渡辺昭敬\* 安田圭祐\*\*

## Determination of the Scaling Factors for NMR Spectroscopy in Calculation with Gaussian98

Akihiro WATANABE\* Keisuke YASUDA\*\*

### ABSTRACT

The scaling factors of the chemical shift for the  $^1\text{H}$ -NMR and  $^{13}\text{C}$ -NMR spectroscopy were determined with Gaussian98 by using HF/3-21G, B3LYP/6-31G\*\*, and B3LYP/LanL2DZ. The errors of the scaling factors were estimated within 10%. Since the solvent effect was not considered in this study, the scaling factors for NH and OH were excluded from the estimation of the scaling factors. The scaling factor depended on the bond state.

*Keywords:* Gaussian98, Scaling Factor, NMR, Hartree-Fock, Density Functional Theory

### 1. 序論

1920年代に Heitler と London<sup>1)</sup>が中性の水素原子間にどのような力が働いて安定な水素分子が作られるかという問題を量子力学的原理に基づいて説明したのが量子化学の始まりである。しかし、水素原子では解釈できた量子力学もそれ以上の複雑な原子や分子に厳密に適用することができないために、近似を取り入れた原子価結合法や分子軌道法などが開発された。この分子軌道法の歴史を見ると、計算が簡単で $\pi$ 電子のみを取り扱うヒュッケル MO 法<sup>2)</sup>の時代、 $\sigma$ 結合も含めて計算のできる MINDO/3, AM1 などの半経験的方法が開発された時代、そしていまだ適用できる分子の大きさに限界はあるものの、種々のレベルの非経験的方法を用いることのできる現代となり、計算の対象の多様さ、複雑さへの対応についてもその速度や信頼性の向上が見られ、着実に進歩をとげてきた。特に密度汎関数法に代表されるような優れた近似法の出現により、量子化学計算を短時間で容易に、しかも正確に求められるようになってきている。このため、分子構造に関する種々の分子定数の決定はもとより、有機合成化学の分野においても、量子化学計算の結果が、NMR スペクトルや X 線結晶構造解析の結果と同様にその構造の確認のために取り上げられてきている。また、発がん反応や薬理作用などの予測や反応動力学の分野においても量子化学計算が使用されてきており、多岐の分野に渡って活用されている。

量子化学計算は種々の近似を用いている性質上、単純に実験結果と計算結果を比較することは難しく、

誤差を含むことを考慮して比較する必要がある。その誤差を補正するための代表的な例として、スケール因子(Scaling Factor)<sup>3)</sup>の利用が挙げられる。スケール因子とは、計算結果にこの値を乗ずることで実験によって得た実測結果と計算結果がほぼ同等のレベルで扱えることが可能になる補正因子である。特に振動数計算や零点エネルギー補正(ZPE)及び熱エネルギー補正に関して利用されており、代表的な計算方法と基底関数の組み合わせについてのスケール因子を Table 1 に示す<sup>4)</sup>。計算の誤差は近似の方法によって異なるため、スケール因子は計算方法や基底関数によって異なる値を示す。それ故に使用する組み合わせによってスケール因子を求めていく必要がある。Table 1.のように振動数計算や零点エネルギー補正及び熱エネルギー補正についてのスケール因子が決定されているが、NMR の化学シフトの予測に関してのスケール因子は求まっていない。そこで本研究では量子化学計算を用いて NMR のスペクトル予測のためのスケール因子を決定した。計算には ab initio 計算の代表的ソフトウェアである Gaussian98<sup>5)</sup>を用い、計算方法に Hartree-Fock 法と Becke 型パラメータ密度汎関数法(B3LYP 法)を用いて、種々の基底関数における  $^1\text{H}$ -NMR,  $^{13}\text{C}$ -NMR における化学シフトのスケ

Table 1. 振動数及び ZPE/熱補正のスケール因子

| 計算方法           | スケール因子 |         |
|----------------|--------|---------|
|                | 振動数    | ZPE/熱補正 |
| HF/3-21G       | 0.909  | 0.941   |
| HF/6-31G(d)    | 0.893  | 0.914   |
| B3LYP/6-31G(d) | 0.961  | 0.980   |

\*応用化学科 准教授

\*\*専攻科 応用化学専攻

ール因子の決定を試みた。本研究の結果から Gaussian98 による NMR スペクトルの予測の精度についても議論できると考えられる。

## 2. 計算方法

NMR スペクトルの予測は構造最適化により得られた分子構造に、GIAO 法<sup>6)</sup>(Gaussian98 に内包)を適用し、その磁気遮蔽定数の計算結果から行った。分子の最適構造は対象分子の初期構造を一般的な結合距離、結合角、二面角を用いて予測し、HF/3-21G, B3LYP/6-31G\*\*, B3LYP/LanL2DZ の3種類の計算方法と基底関数の組み合わせにおいて構造最適化により求めた。さらに得られた構造について磁気遮蔽定数を NMR キーワードにて算出し、NMR の化学シフトを実験の場合と同様に Gaussian98 で計算した TMS(Tetra-MethylSilane)のメチル基の磁気遮蔽定数と対象分子の磁気遮蔽定数との差より算出した。

対象分子の化学シフトの文献値<sup>5)</sup>を計算値で割ることによりスケール因子を決定した。また、溶媒効果の影響を均一にするため、文献値の対象分子には溶媒に CDCl<sub>3</sub>を用いているものを選択した。

計算対象とした分子は特定の分子を選択せずにランダムに参考文献<sup>7)</sup>に掲載されている C, H, O, N, S, X などを含む有機化合物を用いた。HF/3-21G の<sup>1</sup>H-NMR では 590 種、<sup>13</sup>C-NMR では 357 種、B3LYP/6-31G\*\*の<sup>1</sup>H-NMR では 584 種、<sup>13</sup>C-NMR では 342 種、B3LYP/LanL2DZ の<sup>1</sup>H-NMR では 554 種、<sup>13</sup>C-NMR では 335 種の分子についてスケール因子を決定した。

## 3. 結果と考察

**3.1 計算例** 計算結果の一例として pyridine の<sup>1</sup>H-NMR の化学シフトの計算値及び実験値、文献値を Table 2 に示す。Table 2 から読み取れるように、計算方法によって計算値が違う値を示しており、また、各計算値と文献値及び実験値との間に差が生じている。その差を補正するための補正因子である文献値を計算値で割ったスケール因子も Table 2 に示している。このように化学シフトごとにスケール因子を求め、全ての対象分子の化学シフトのスケール因子の算術平均をとることにより、対象とする計算方法と基底関数の組み合わせにおけるスケール因子が求まる。決定

Table 2. Pyridine の実験値・文献値・計算値・スケール因子

|               | 化学シフト(ppm) |      |      | スケール因子 |       |       |
|---------------|------------|------|------|--------|-------|-------|
|               | 1位         | 2位   | 3位   | 1位     | 2位    | 3位    |
| 実験値           | 8.61       | 7.28 | 7.67 |        |       |       |
| 文献値           | 8.60       | 7.25 | 7.64 |        |       |       |
| HF/3-21G      | 9.59       | 7.52 | 8.00 | 0.897  | 0.964 | 0.955 |
| B3LYP/6-31G** | 8.80       | 7.22 | 7.57 | 0.977  | 1.004 | 1.009 |
| B3LYP/LanL2DZ | 9.31       | 7.77 | 8.14 | 0.924  | 0.933 | 0.939 |

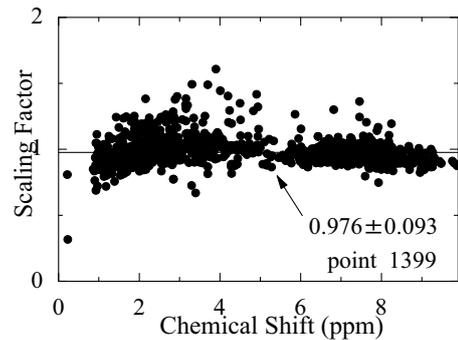


Figure 1. HF/3-21G <sup>1</sup>H-NMRのスケール因子

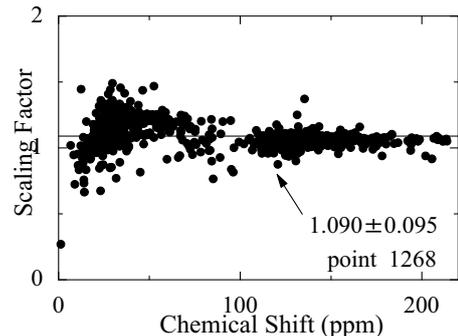


Figure 2. HF/3-21G <sup>13</sup>C-NMRのスケール因子

したスケール因子を計算値に乗ずることで実験値と同様に扱えることができるため、NMR スペクトルの化学シフトの予測が可能になる。

**3.2 スケール因子の決定** HF/3-21G における<sup>1</sup>H及び<sup>13</sup>C-NMR の量子化学計算を行なった全ての分子についてのスケール因子の分布を Figure 1 及び Figure 2 に示す。この図は、横軸に対象分子の化学シフトの文献値、縦軸に量子化学計算により求めたスケール因子で表し、この図から、視覚的に分布の程度が判断できる。

3つの計算方法の組み合わせの算術平均により一つのスケール因子を決定し、誤差は標準偏差を算出して求め Table 3 に示す。Table 3 より、計算方法の違いでは Hartree-Fock 法に比べて B3LYP 法の方が誤差の少ないスケール因子が得られた。その差違は計算方法に電子相関が考慮されているかどうかなどの近似の程度によるものと考えられる。また基底関数に着目すると、わずかではあるが 6-31G\*\*の方が、LanL2DZ よりも誤差が少なかった。計算方法と基底関数の組み合わせでは B3LYP/6-31G\*\*が最も誤差の

Table 3. 各計算方法におけるスケール因子

| 計算方法    |                     | point | スケール因子 | 誤差    |
|---------|---------------------|-------|--------|-------|
| HF/     | <sup>1</sup> H-NMR  | 1399  | 0.976  | 0.093 |
| 3-21G   | <sup>13</sup> C-NMR | 1268  | 1.090  | 0.095 |
| B3LYP/  | <sup>1</sup> H-NMR  | 1378  | 1.018  | 0.073 |
| 6-31G** | <sup>13</sup> C-NMR | 1189  | 1.023  | 0.075 |
| B3LYP/  | <sup>1</sup> H-NMR  | 1281  | 0.963  | 0.076 |
| LanL2DZ | <sup>13</sup> C-NMR | 1140  | 0.910  | 0.095 |

少ないスケール因子が得られた。いずれにしても計算精度の高い計算方法ほどスケール因子の分布はほぼ平均的になると考えられる。Table 3 に示したスケール因子は全対象分子のスケール因子であるために、様々な結合状態のスケール因子を含んでいる。スケール因子の誤差の原因について更に考察するために結合状態別のスケール因子を決定した。

**3.3 溶媒効果** 有機化合物中に含まれる OH 及び NH のプロトンについて、各計算方法で決定したスケール因子を Table 4 に示す。Table 4 よりスケール因子の平均値が 1 付近の値ではなく、さらに誤差がかなり大きくなっており、スケール因子のばらつきが目立つ。これは、実際の分子は溶媒分子との相互作用があるが、本研究は真空中で対象分子を単分子として考え計算しているため、計算上は周囲の溶媒分子の存在を考慮していない。そのため文献値と計算値に大きな誤差が生じたため、スケール因子の誤差も大きくなったと考えられる。そのため、本研究で決定したスケール因子には OH 及び NH のスケール因子は含めないことにした。

Table 4. 各計算方法による NH, OH のスケール因子

| 計算方法          |    | point | スケール因子 | 誤差    |
|---------------|----|-------|--------|-------|
| HF/3-21G      | NH | 20    | 1.154  | 1.828 |
|               | OH | 13    | 2.637  | 3.743 |
| B3LYP/6-31G** | NH | 16    | 1.385  | 0.624 |
|               | OH | 10    | 1.369  | 0.495 |
| B3LYP/LanL2DZ | NH | 12    | 1.621  | 0.314 |
|               | OH | 8     | 1.413  | 0.416 |

### 3.4 結合状態別スケール因子の決定

3.2 で決定したスケール因子には、様々な結合状態が混在しており、結合状態による影響は考慮していない。そこでスケール因子の結合状態による依存性の有無を調べた。これにより結合状態別のスケール因子を決定した。

**3.4.1 HF/3-21G** HF/3-21G における結合状態別に分類した場合における、 $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ -NMR に関するスケール因子をそれぞれ Table 5 及び 6 に示す。 $^1\text{H}$ ,

Table 5. 結合状態別スケール因子 (HF/3-21G,  $^1\text{H}$ -NMR)

| 結合状態別     | point | スケール因子 | 誤差    |
|-----------|-------|--------|-------|
| 全体        | 1399  | 0.976  | 0.093 |
| 1 重結合     | 531   | 1.007  | 0.131 |
| 2 重結合     | 865   | 0.958  | 0.051 |
| 3 重結合     | 3     | 0.860  | 0.022 |
| 芳香環       | 783   | 0.957  | 0.050 |
| 直鎖(1 重結合) | 299   | 0.991  | 0.145 |
| 直鎖(2 重結合) | 26    | 0.940  | 0.053 |
| X-CH      | 28    | 1.172  | 0.188 |

Table 6. 結合状態別スケール因子 (HF/3-21G,  $^{13}\text{C}$ -NMR)

| 結合状態別 | point | スケール因子 | 誤差    |
|-------|-------|--------|-------|
| 全体    | 1268  | 1.090  | 0.095 |
| 1 重結合 | 514   | 1.139  | 0.126 |
| 2 重結合 | 734   | 1.057  | 0.039 |
| 3 重結合 | 20    | 1.014  | 0.098 |
| 芳香環   | 554   | 1.060  | 0.035 |
| 直鎖    | 402   | 1.093  | 0.122 |
| C-X   | 26    | 0.997  | 0.137 |
| C-N   | 91    | 1.125  | 0.090 |
| C=N   | 89    | 1.049  | 0.032 |

$^{13}\text{C}$ -NMR の両方とも、近傍にハロゲンを含むスケール因子の誤差が大きくなっている。計算方法の HF とは Hartree-Fock 法の略であり、計算においては電子相関を考慮せず、そのため電気陰性度が大きいハロゲンが近傍に存在しているので、実際の構造と最適構造が大きく異なったためと考えられる。 $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ -NMR の両方とも、2 重結合の方が 1 重結合よりも誤差が小さくなっている。これは  $\pi$  結合が存在しており、分子の電子密度が 1 重結合に比べて低くなったためだと考えられる。また、2 重結合の方が 1 重結合に比べて結合が強いため、構造のぶれが少なくなるためだと考えられる。同様の理由より芳香環を形成している C やそれに結合している H のスケール因子の誤差が小さくなっている。Hartree-Fock 法は電子相関を考慮しない近似法のために、分子の電子密度にスケール因子の値が左右されると考えられる。

**3.4.2 B3LYP/6-31G\*\*** B3LYP/6-31G\*\* における結合状態別に分類したスケール因子を決定し、それぞれ  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ -NMR に関するスケール因子を Table 7 及び 8 に示す。B3LYP/6-31G\*\* は電子相関を考慮しているため全体的に HF/3-21G のスケール因子より誤差が小さいスケール因子が得られた。HF/3-21G の場合で、近傍にハロゲンが存在したときに大きな誤差が生じたが、B3LYP/6-31G\*\* の場合では比較的、誤差が小さいスケール因子が得られた。また、 $^1\text{H}$ -NMR においては結合状態に分類できない炭化水素化合物に分類しても誤差の小さいスケール因子が得られ

Table 7. 結合状態別スケール因子 (B3LYP/6-31G\*\*,  $^1\text{H}$ -NMR)

| 結合状態別   | point | スケール因子 | 誤差    |
|---------|-------|--------|-------|
| 全体      | 1378  | 1.018  | 0.073 |
| 1 重結合   | 547   | 1.037  | 0.092 |
| 2 重結合   | 828   | 1.004  | 0.050 |
| 3 重結合   | 3     | 1.333  | 0.066 |
| 炭化水素化合物 | 131   | 0.989  | 0.057 |
| 芳香環     | 757   | 1.004  | 0.048 |
| 直鎖      | 333   | 1.033  | 0.102 |
| X-CH    | 23    | 0.976  | 0.054 |

Table 8. 結合状態別スケール因子  
(B3LYP/6-31G\*\*,  $^{13}\text{C}$ -NMR)

| 結合状態別   | point | スケール因子 | 誤差    |
|---------|-------|--------|-------|
| 全体      | 1189  | 1.023  | 0.075 |
| 1重結合    | 474   | 0.994  | 0.106 |
| 2重結合    | 698   | 1.042  | 0.027 |
| 3重結合    | 17    | 1.090  | 0.052 |
| 芳香環     | 527   | 1.041  | 0.026 |
| C-X     | 19    | 0.956  | 0.071 |
| 炭化水素化合物 | 231   | 1.001  | 0.075 |

た。HF/3-21Gと同様に $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ -NMRの両方とも、2重結合の方が1重結合よりも誤差が小さくなり、芳香環を形成しているCやそれに結合しているHのスケール因子の誤差も小さくなっている。

**3.4.3 B3LYP/LanL2DZ** B3LYP/LanL2DZにおける結合状態別に分類したスケール因子を決定し、それぞれ $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ -NMRに関するスケール因子をTable 9及び10に示す。

Table 9. 結合状態別スケール因子  
(B3LYP/LanL2DZ,  $^1\text{H}$ -NMR)

| 結合状態別      | point | スケール因子 | 誤差    |
|------------|-------|--------|-------|
| 全体         | 1281  | 0.963  | 0.076 |
| 1重結合       | 462   | 0.991  | 0.106 |
| 2重結合       | 816   | 0.947  | 0.043 |
| 3重結合       | 3     | 0.937  | 0.061 |
| 芳香環        | 747   | 0.950  | 0.041 |
| X-CH       | 27    | 1.104  | 0.134 |
| 炭化水素化合物    | 120   | 0.929  | 0.068 |
| Benzene環のH | 107   | 0.942  | 0.044 |

Table 10. 結合状態別スケール因子  
(B3LYP/LanL2DZ,  $^{13}\text{C}$ -NMR)

| 結合状態別       | Point | スケール因子 | 誤差    |
|-------------|-------|--------|-------|
| 全体          | 1140  | 0.910  | 0.095 |
| 1重結合        | 465   | 0.826  | 0.082 |
| 2重結合        | 661   | 0.966  | 0.047 |
| 3重結合        | 14    | 1.058  | 0.064 |
| C-X         | 25    | 0.804  | 0.114 |
| 炭化水素化合物     | 224   | 0.911  | 0.086 |
| 芳香環         | 523   | 0.970  | 0.043 |
| Cyclohexane | 84    | 0.850  | 0.047 |
| Octane      | 129   | 0.777  | 0.046 |
| Benzene     | 219   | 0.973  | 0.048 |

$^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ -NMRの両方とも上述の2つの計算方法と同じ傾向が見られた。更にBenzene環を形成しているCやそれに結合しているHなどの細かい分類を行なう

ことにより、スケール因子の傾向があることがわかった。 $^{13}\text{C}$ -NMRについては、1重結合と2重結合のスケール因子の値が大きく異なっている。また、大きい原子についての計算に適していると考えられるLanL2DZはC, Hなどの小さな原子についての計算でも優れた計算結果を示すことが分かった。

#### 4. 総括

以上の結果より以下の結論が得られた。

HF/3-21G, B3LYP/6-31G\*\*, B3LYP/LanL2DZの3種類での計算方法別にNMRの化学シフトについてのスケール因子の決定を試み、誤差10%以内の実用的なスケール因子を決定した。また、B3LYP/6-31G\*\*の計算が最も誤差の少ないスケール因子の値を示したが、近似が粗いと思われるHF/3-21Gの組み合わせでも実用レベルな計算精度のスケール因子の値を示した。

OH, NHなど水素結合や分極している化合物についてのスケール因子は誤差が大きいものとなった。これは量子化学計算において、溶媒分子を考慮していないためであり、本研究ではそれらの分子をスケール因子の決定には含めなかった。必要ならば溶媒効果を含めたスケール因子を決定する必要がある。

各計算方法で結合状態別のスケール因子を決定することにより、それぞれの組み合わせで、2重結合の方が1重結合よりも誤差が小さくなるなどの傾向が見られた。それ故に、必要に応じて結合状態別のスケール因子を適用することが望ましいと考えられる。大きい原子についての計算に適していると考えられるLanL2DZはC, Hなどの小さな原子についての計算でも優れた計算結果を示すことが得られた。

Gaussian98を用いた量子化学計算において、NMRの化学シフトにおけるスケール因子を決定することにより、NMRスペクトルの予測には多少の誤差があるが、十分な精度であることが得られた。ただし、溶媒効果の顕著なOHやNHには不向きであることも明らかになった。

#### 参考文献

- 1) W. Heitler, F. London *Z. Phys.* **44**, 455(1927)
- 2) E. Hückel *Z. Phys.* **60**, 423 (1930)
- 3) M. W. Wong *Chem. Phys. Lett.* **256**, 391(1996)
- 4) J. B. Foresman, E. Frisch 電子構造論による化学の探究 (Gaussian Inc. 1998)
- 5) M. J. Frisch et.al Gaussian Inc.
- 6) J. R. Cheeseman, et. al *J. Chem. Phys.* **104**, 5497 (1996)
- 7) E. Pretsch, T. Clerc, J. Seibl, W. Simom 有機化合物スペクトルデータ集 (講談社、1999)

# 国内ミヤコグサ系統間のアルミニウムイオン応答解析

下村 憲司朗\*， 堅田 夏輝\*\*， 松野 光樹\*\*， 藤岡 睦未\*\*

## Aluminum Ion Response Comparison between Domestic *Lotus japonicus* Lines

Kenshiro SHIMOMURA\*, Natsuki KATADA\*\*, Kouki MATSUNO\*\*, Mutumi FUJIOKA\*\*

### ABSTRACT

Aluminum cation ( $Al^{3+}$ ) toxicity due to soil acidity inhibits root growth and function. Organic acid (OA) released from roots has been identified in several crop plants as a major component of Al tolerance. But OA secretion mechanism in a leguminous plant is not understood well. We tried acquisition of Al sensitive lines and Al resistant lines that facilitated Al resistant mechanical analysis by using *Lotus japonicus* as the leguminous model plant. Fourteen Al resistant lines, four Al sensitive lines, and a promotion line were obtained by the extension comparisons of roots under the  $Al^{3+}$  existence. As quantitative-PCR analysis of orthologs of already-known genes related to aluminum tolerance, LjALMT1 gene showed  $Al^{3+}$  inductivity. In addition, the expression of ortholog of STOP1 gene that took part in the transcript of ALMT1 was confirmed. These results suggest *L. japonicus* have the malate secretion mechanism.

*Keywords:* acid soil, Al stress, Al tolerant mechanism, legume, symbiosis

### 1. 緒言

作物の生育が悪く農耕地に適していない土壌は問題土壌と呼ばれる。中でも酸性土壌は熱帯、温帯の農耕地の 30-40%を占め、その面積は 3.95 億ヘクタールといわれている<sup>(1)</sup>。酸性土壌は特にアジア、アフリカ等の発展途上国に多く存在するが、このような地域は人口増加が著しいため、食糧生産のための酸性土壌利用が必要となっている。

酸性土壌はプロトンとの交換溶脱のために、栄養塩類に乏しいやせた土壌であるが、酸性土壌中において植物の生育阻害となる最も大きな因子は酸性化に伴って溶出するアルミニウムイオン (Al イオン) である。一般に Al イオンは根の根端に集積することで縦方向への伸長を阻害し、横方向へと肥大化させてしまう<sup>(2)</sup>。結果として、根の正常な形態形成が阻害され、作物の生育に影響が及ぶ。そのため、マメ科植物等の根圏で根粒菌と共生窒素固定を行う作物は特に影響を受けると予想される。実際にマメ科作物の栽培前には石灰による土壌の中和が行われている。一方、マメ科植物の中でもシロツメクサ (*Trifolium repens* L.) は酸性条件下で、根の伸長と根粒の着生が促進されることが知られている<sup>(3)</sup>。酸性条件下による根の伸長・根粒着生の

増大の分子メカニズムはシロツメクサの遺伝子リソースや形質転換法の整備が不十分であることから、解明に至っていない。

植物の Al イオン耐性機構には大別して、Al イオン排除機構と細胞内抵抗性機構の二つの方法があるが、有機酸分泌による Al イオン排除機構が主要なものと考えられている。植物は一般的に、Al イオンに対し根圏でリンゴ酸やクエン酸等の有機酸を分泌する事で無毒化する事が知られている。シロイヌナズナやコムギの場合、Al ストレスシグナルを感知すると、ALMT1 (アルミニウム誘導性リンゴ酸トランスポーター) が誘導され、根からリンゴ酸を分泌し、Al イオンとキレート結合を形成させることで根内への Al イオンの取り込みを抑制する事が報告されている<sup>(4)</sup>。また、ALMT1 遺伝子の発現にはプロトン感受性転写因子、STOP1 が関与する<sup>(5)</sup>。一方、オオムギは AACT (アルミニウム活性型クエン酸トランスポーター) が関与し、クエン酸を分泌することが報告されている<sup>(6)</sup>。マメ科植物についてもエンドウ、ダイズを中心に Al イオン耐性機構の解析が行われてきたが、遺伝子資源や形質転換法の整備が不十分であることから、解明に至っていない。マメ科のモデル植物であるミヤコグサは Al イオン耐性機構の分子レベルの解析を可能にする遺伝子資源が整っているが、ミヤコグサによる解析例は報告されて

\*神戸高専応用化学科 講師

\*\*神戸高専応用化学科

いない。ミヤコグサの Al イオン耐性および感受性系統を得ることができれば、マメ科植物の Al イオン耐性機構の解析を行う上で、有用なツールとなると考えられる。

本研究では、マメ科モデル植物のミヤコグサの国内自生系統の Al イオン存在下における根の伸長を評価し、Al イオン耐性系統および感受性系統を得ることを目的とした。更に、ミヤコグサ Al イオン耐性に関する遺伝子の検索を試みた。

## 2. 材料

Al イオン耐性能評価には、ゲノム解析や EST 解析が完了している系統 "gifu" とナショナルバイオリソースプロジェクト (<http://www.legumebase.agr.miyazaki-u.ac.jp/>) より配布されている 18 系統のミヤコグサを使用した(表 1)。

表 1. Al イオン耐性能評価に用いたミヤコグサ系統

| 系統名   | 採取地  |     | 系統名    | 採取地  |     |
|-------|------|-----|--------|------|-----|
| MG-3  | 神奈川県 | 横浜市 | MG-70  | 和歌山県 | 印南町 |
| MG-8  | 京都府  | 亀岡市 | MG-71  | 熊本県  | 阿蘇町 |
| MG-27 | 沖縄県  | 読谷村 | MG-73  | 大分県  | 久住町 |
| MG-42 | 秋田県  | 田沢湖 | MG-74  | 愛媛県  | 宇和町 |
| MG-44 | 宮城県  | 石巻市 | MG-109 | 岩手県  | 盛岡市 |
| MG-49 | 兵庫県  | 香住町 | MG-117 | 福井県  | 九頭竜 |
| MG-52 | 高知県  | 斐川町 | MG-119 | 新潟県  | 信濃川 |
| MG-56 | 宮崎県  | 日南市 | MG-122 | 長野県  | 真田町 |
| MG-60 | 鹿児島県 | 枕崎市 | MG-131 | 大阪府  | 大和川 |

### 3.1 Al イオン耐性能評価

各ミヤコグサ系統の種子をサンドペーパーで硬実打破し、22℃で一晩吸水させた。十分に吸水した種子のみを 1/5 濃度の Nifal 水耕液に 0.8% アガロースを加え、オートクレーブ滅菌後の培地に播種し、24℃、16/8 時間の明暗条件下で 3 週間培養した。培地の Al イオンと pH 条件は AlCl<sub>3</sub> 0 μM, pH5.5 と AlCl<sub>3</sub> 50 μM, pH4.5 とした。培養には 200ml のプラントボックスを使用した。3 週間の栽培後の根長を測定し、Al イオンの影響を評価した。その際、根長 3mm 以下の個体は種子自体の発芽不良と判断をし、根長測定から排除した。

### 3.2 Al イオン耐性候補遺伝子の検索

シロイヌナズナで既に報告されている AtALMT1 (EU181365) と AtSTOP1 (AB300237) のアミノ酸配列を基にさ DNA 研究所 (<http://www.kazusa.or.jp/>) のミヤコグサ EST およびゲノムデータベースで検索を行った。同様に、オオムギの HvAACT (AB302223) のアミノ酸配列を用いて候補遺伝子の検索を行った。

### 3.3 定量的 PCR 解析

ガラスビーズ(粒径 0.71-1.40mm)を疑似土壌として用い、ミヤコグサの gifu を 1/5 濃度の Nifal 水耕液で 3 週間栽培した。水耕液の Al イオン濃度と pH 条件は AlCl<sub>3</sub> 0 μM, pH5.5 と AlCl<sub>3</sub> 50 μM, pH4.5 とした。各条件下で栽培した個体の根の先端約 5mm をサンプリングし、ISOGEN (ニッポンジーン社)を用いて、トータル RNA を抽出した。トータル RNA 1 μg を鋳型とし、PrimeScript RT-PCR Kit (タカラバイオ社)、オリゴ dT プライマー (5'-TTTTTTTTTTTTTTTTTTNN-3') を用いて逆転写反応を行った。定量的 PCR の内部標準には恒常的に発現していることが知られている Ubiquitin を用いた。各候補遺伝子(LjALMT1, LjSTOP1, LjAACT) の解析には逆転写後の反応液から 1 μl を鋳型とし、Ubiquitin の解析には 30 倍希釈した反応液から 1 μl を用いた。PCR に使用したプライマーセットを表 2 にまとめた。PCR の増幅サイクルは 94℃ -15sec, 50℃ -15sec, 72℃ -30sec, 24 サイクルとした。PCR 反応産物をアガロースゲル電気泳動し、エチジウムブロミドで染色した。

表 2. 定量的 PCR プライマー配列

| primer name       | sequence                  |
|-------------------|---------------------------|
| ALMT1 forward     | TGTGATAAGAGTTACATTTGCAGC  |
| ALMT1 reverse     | CTACAGATTGTCAGAACATGGTTC  |
| STOP1 forward     | TCAATACCTACCTCTATCATCCCTC |
| STOP1 reverse     | CACACTTGGATCCCAATCTTGGAG  |
| AACT forward      | GTAGCAGTAACATTTTGTGTGACC  |
| AACT reverse      | GGTCTGAACATGTTCCCATCCTG   |
| Ubiquitin forward | AGAGGTTGATTTTTGCTGGTAAGC  |
| Ubiquitin reverse | TATTCACAGCCAGAAGAGGCCAC   |

## 4. 結果

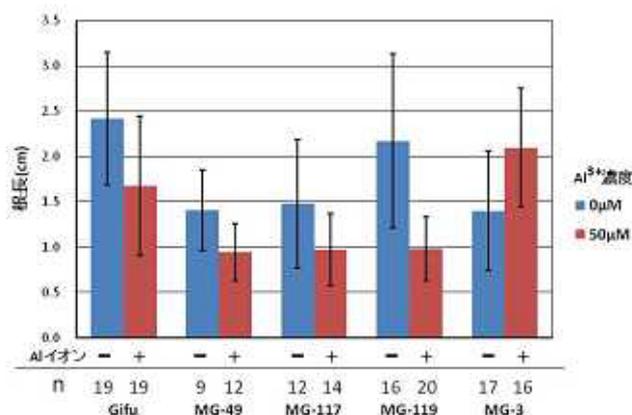
### 4.1 Al イオン耐性能評価

ナショナルバイオリソースプロジェクトより提供を受けたミヤコグサ国内野生系統 18 種と実験系統として最も用いられている gifu の計 19 系統について、酸性条件・Al イオン耐性能を根長測定によって評価した。シロイヌナズナやコムギ、オオムギの Al イオン感受性品種では AlCl<sub>3</sub> 濃度 10-50 μM で明らかな根の伸長阻害が確認されている。ミヤコグサの Al イオン耐性能評価では 50 μM AlCl<sub>3</sub> とした。発芽不良を除く個体の根長を測定し、平均長、標準偏差を求めた。t 検定(p<0.05)の結果、MG-8, MG-27, MG-42, MG-44, MG-52, MG-56, MG-60, MG-70, MG-71, MG-73, MG-74, MG-109, MG-122, MG-131 系統では Al イオンによる根の生育抑制は確認されなかった(表 3)。一方、gifu, MG-49, MG-117, MG-119 系統では有意に Al イオンによる根の

伸長抑制が観察された(図1). MG-3 系統は 50 μM の Al イオン添加によって 根の伸長促進が観察された(図1).

**表3. Al イオン添加条件下の国内ミヤコグサ自生系統の根長測定** 各条件下で 3 週間の栽培後の根長を測定した. 括弧内は標準偏差を表す.

|        | 平均根長 (cm)   |  | num ber | 平均根長 (cm)   |  | num ber |
|--------|-------------|--|---------|-------------|--|---------|
|        | Alイオン0μM    |  |         | Alイオン50μM   |  |         |
| MG-8   | 0.92 (0.34) |  | 16      | 0.89 (0.29) |  | 15      |
| MG-27  | 1.16 (0.41) |  | 17      | 1.36 (0.56) |  | 15      |
| MG-42  | 1.08 (0.48) |  | 19      | 0.96 (0.36) |  | 13      |
| MG-44  | 0.98 (0.31) |  | 12      | 0.87 (0.40) |  | 14      |
| MG-52  | 1.12 (0.56) |  | 12      | 1.05 (0.33) |  | 8       |
| MG-56  | 1.84 (0.60) |  | 20      | 1.95 (0.76) |  | 16      |
| MG-60  | 0.92 (0.48) |  | 14      | 1.11 (0.62) |  | 19      |
| MG-70  | 0.85 (0.27) |  | 15      | 0.89 (0.41) |  | 12      |
| MG-71  | 1.00 (0.58) |  | 8       | 1.09 (0.45) |  | 14      |
| MG-73  | 1.00 (0.39) |  | 14      | 1.23 (0.34) |  | 20      |
| MG-74  | 1.33 (0.46) |  | 19      | 1.17 (0.32) |  | 19      |
| MG-109 | 1.08 (0.37) |  | 13      | 1.61 (1.09) |  | 9       |
| MG-122 | 1.63 (0.59) |  | 24      | 1.41 (0.66) |  | 20      |
| MG-131 | 0.98 (0.33) |  | 19      | 1.02 (0.55) |  | 17      |



**図1. Al イオンによる根の伸長抑制系統と伸長促進系統の根長測定** AlCl<sub>3</sub>の添加は 50 μM とし, 3 週間の栽培後の根長を測定した. n は根長測定個体数を示す.

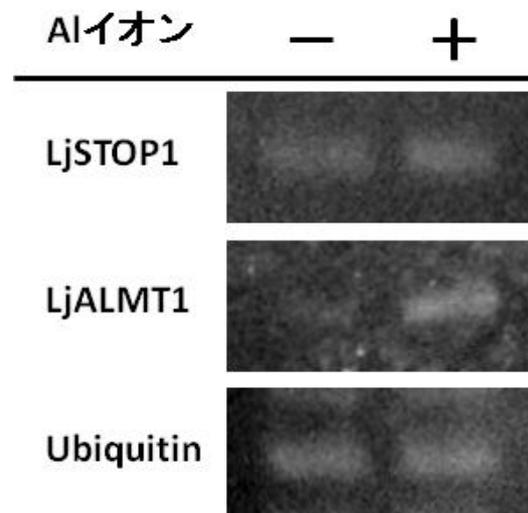
#### 4.2 Al イオン耐性関連遺伝子候補の検索

植物根が Al イオンを感知して有機酸を分泌する分子メカニズムはよく分かっていない. しかし, 双子葉植物のモデル植物であるシロイヌナズナや単子葉植物のオオムギ, コムギを用いた研究によって, リンゴ酸の分泌には ALMT1, クエン酸の分泌には AACT, ALMT1 遺伝子の発現誘導には STOP1 が関与することが報告されている<sup>(4)-(6)</sup>. 一方, ミヤコグサの Al 耐性機構は全く未知である. ミヤコグサが ALMT1, AACT, STOP1 オルソログを有するのかを確認するために, シロイヌナズナの AtALMT1 と AtSTOP1, オオムギの HvAACT のアミノ酸配列を基に, かずさ DNA 研究所

のミヤコグサ EST ( Expressed Sequence Tags ) データベースとゲノムデータベースで相同性検索( BLAST 検索 )を試みた. その結果, AtALMT1 とアミノ酸レベルで 45.8%の相同性を持つ ALMT1 候補遺伝子 ( LjALMT1 遺伝子, TAC/BAC クローン CM0361 ), AtSTOP1 と 62.7%の相同性をもつ STOP1 候補遺伝子 ( LjSTOP1 遺伝子, TM1667 ), HvAACT と 53.0%の相同性を持つ AACT 候補遺伝子 ( LjAACT 遺伝子, LjT09I09 ) が得られた.

#### 4.3 定量的 PCR 解析

Al イオン耐性関連候補遺伝子 ( LjALMT1 遺伝子, LjSTOP1 遺伝子, LjAACT 遺伝子 ) の塩基配列を基に特異的プライマーを設計した. Al イオン存在下と非存在下で栽培した gifu の根から得た RNA の逆転写によって得られた cDNA を鋳型として定量的 PCR を行った ( 図2 ). LjSTOP1 遺伝子は AtSTOP1 遺伝子と同様に Al イオンの添加に関連なく, 一定で発現していた. また, LjALMT1 遺伝子は AtALMT1 遺伝子と同様に Al イオンの添加によって発現が誘導されていた. 一方, LjAACT 遺伝子の発現は検出されなかった.



**図2. Al イオン耐性関連候補遺伝子の定量的 PCR 解析**

### 5. 考察

酸性土壌の利用は食料の増産, 持続的農業生産の確立を目指すためには必要不可欠である. それゆえ, 植物の Al ストレスに対する応答機構の解明が望まれている. 近年の研究によって, Al イオンを無毒化する機構の有機酸分泌に関わる遺伝子 ( ALMT1, AACT ) や ALMT1 の遺伝子発現を誘導するプロトン感受性転写因子, STOP1 が同定された. 加えて, コムギの研究によって Al イオンによるリンゴ酸分泌に 48kDa のタンパクキナーゼが関与していることが示唆されている<sup>(7)</sup>.

これらの研究には Al ストレス耐性品種と感受性品種や感受性変異体が用いられている。

マメ科作物は根粒菌との共生により、大気窒素を生育に利用しうる重要な農業形質を持つことから、古くから共生機構や生理学的な研究が進められてきた。しかしながら、マメ科植物の Al ストレス耐性に関する分子レベルの研究例は極めて少ない。本研究ではマメ科モデル植物のミヤコグサを研究材料とし、栽培実験から 14 系統の Al イオン耐性系統と 4 系統の Al イオン感受性系統を得た。これらの系統の比較解析は、マメ科植物の Al ストレス耐性機構の解明に有用である。興味深いことに、低 pH、Al イオン存在下で根の伸長が促進した系統 (MG-3) も得ることができた。低 pH 条件下での根の伸長促進は、同じマメ科植物であるシロツメクサで観察されているが分子機構は不明である。MG-3 系統は根の伸長促進メカニズムの解明に重要な役割を持つかもしれない。

gifu 系統を用いた定量的 PCR 解析では LjALMT1 遺伝子は既知の ALMT1 遺伝子と同様に Al イオン誘導性を示した。更に、ALMT1 の発現誘導に関与する転写因子、STOP1 の発現も確認されたことから、ミヤコグサはリンゴ酸分泌型の Al 耐性機構を有していることが示唆された。今後、LjALMT1 遺伝子を指標として発現量と耐性能の相関を解析すれば、LjALMT1 の役割がより明らかとなるだろう。

### 謝辞

本研究で使用した国内ミヤコグサ系統種子はナショナルバイオリソースプロジェクトより提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- (1) Baligar C., Ahlrichs L. : "Nature and distribution of acid soils in the world. ", In Schaffert RE. ed., Proceeding of the Workshop to Develop a Strategy for Collaborative Research and Dissemination of Technology in Sustainable Crop Production in Acid Savannas and other Problem Soils of the World. Purdue University 1-11, 1998.
- (2) Sasaki M., Yamamoto Y. et al. : "Lignin deposition induced by aluminum in wheat (*Triticum aestivum*) roots", *Physiol. Plant.* 96: 193-198, 1996.
- (3) Sugawara K. and Stanley D. : "The effects of low pH Growth Medium on nodulation and N<sub>2</sub> fixation of alfalfa(*Medicago sativa* L.) and white clover (*Trifolium repens* L.)", *J. Japan. Grassl. Sci.* 38 : 53-62. 1992.
- (4) Sasaki M., Yamamoto Y. et al. : "A wheat gene encoding an aluminum-activated malate transporter", *The Plant Journal.* 37: 645-653, 2004.

- (5) Iuchi S., Koyama H et al. : " Zinc finger protein STOP1 is critical for proton tolerance in Arabidopsis and coregulates a key gene in aluminum tolerance", *Proceedings of National Academy of Science*, 104(23): 9900-9901, 2007
- (6) Furukawa J., Yamaji N. et al. : " An aluminum-activated citrate transporter in Barley", *Plant Cell Physiol.* 48(8):1081-1091, 2007.
- (7) Osawa H., Matsumoto H. : " Possible involvement of protein phosphorylation in aluminum-responsive malate efflux from wheat root apex", *Plant Physiol.*, 126: 411-420, 2001.

# ALS 罹病者の病（やまい）の語りにみる療養の場に関する研究

亀屋恵三子\*

## Study on Convalescent Based on Writing of ALS Patients

Emiko KAMEYA\*

### ABSTRACT

We recognized the relationship between convalescent based and human beings by reference to the process of medical care for the ALS patients and the writing of their minds. Consequently, we found out the following three items: (1) An announcement of ALS to the patients was made in various places such as outpatient clinic room, conference room and hospital room, but the selection of these places was little effective because this announcement gave the patients a great shock in the same way. (2) When the use area of home service caregiver overlapped with the main staying place of the family caregiver in a care environment, both caregivers performed direct patient care services. (3) Since the ALS patients took all actions such as eating and excreting on the bed, it showed a tendency to make their individual room a “public” space and make it difficult for them to keep a “private” space.

*Keywords:* ALS patients, writing of their minds, convalescent based

### 1. はじめに

ALS (Amyotrophic Lateral Sclerosis : 筋萎縮性側索硬化症) は、徐々に全身の筋肉が萎縮し、最終的には呼吸筋まで侵されて死に至る疾病であり、1973年に難病に認定された。現在、ALS 罹病者は全国に7700人ほどいるとされ<sup>1)</sup>、その主な療養先は、住宅が7割、残り3割が病院及び療護施設などの福祉施設であるようだ<sup>2)</sup>。これまでALS 罹病者の療養を病院<sup>3)</sup>、住宅<sup>4)</sup>、福祉施設<sup>5)</sup>の3つの場からみてきた。しかし、ALS 罹病者のように身体が完全に奪われてしまう人々にとっては、物理的な空間との関係を捉えるだけでは場と人との関係が顕在化しにくくなる。従ってここでは、療養過程を中心にALS 罹病者を図1に示すように多面的に捉えることで、今後の療養の場の可能性を明らかにすることを目的とした。以下では、療養過程に従い、ソフト面でのケアを要する告知の場を考察した後、告知と同時に必要とってくるケア環境をハード・ソフトの両面から分析し、ついで意思伝達方法の一つとしての仮想空間とハード・ソフトの両面を多角的に分析していく。

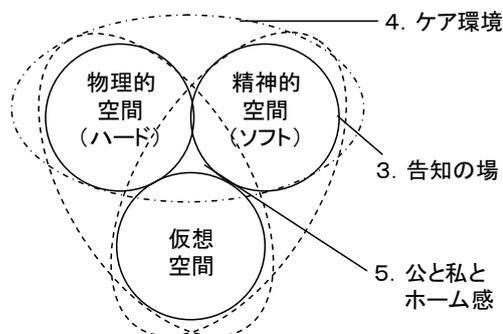


図1 本稿による研究の枠組み

### 2. 調査の概要

2.1 調査対象者 調査者の対象は、基本的には病院・住宅・施設の三つの対象者を主としているが、意思伝達手段によって調査の制約を受けるため、各節によって対象者が異なっている。第三節は、長期間におけるメールのやり取りが可能であった罹病者と、深いヒアリングが出来た家族介護者を対象としている(表1)。続く第四節では、在宅でのケア環境を中心として、病院や施設での対象者もそこに加えている。第五節では、在宅でインターネットを使用している罹病者と「家」をコンセプトとして設計した施設に入所している罹病者をそれぞれ対象

\*都市工学科 講師

とした。

**2.2 調査指標** この研究は、主に ALS 罹病者とその家族へのヒアリング調査とメールによる発信で得られた言葉をもとに分析したものである。ここでヒアリングではなく、メールという文書を分析に用いた背景には、ALS という病による所が大きく影響している。罹病者が最も語りやすい方法が、意志伝達装置を通して語るメールという方法であるためである。ALS 罹病者は、意志伝達装置や文字盤を用いることで、通常のヒアリング調査と同等の調査方法を用いることが可能であるが、前者の機器を用いる場合、誤操作が常に付きまとうため、罹病者に焦りや負担を感じさせてしまうことがある。後者の道具を用いた場合も、文字盤を読み取る介護者の存在が必要不可欠であり、罹病者と介護者双方の負担が大きく、さらには意見が他者に漏れてしまうので、罹病者の本音を聞き出せにくくなる。そのため、ここではメールを分析軸に据えている。

メールは文書であり、言葉である。その言葉の分析方法は、文学や小説などのテキスト分析やライフストーリー分析など、既に社会学の分野でいくつかの方法論が確立されつつある。しかし、メールは小説や闘病記などの書籍ではなく、それらと同一に分析できないと判断した。それは双方向の交流を前提とした語りであるため、完全な「筆者一読者」の関係にある小説や闘病記とも異なり、さらにはヒアリングとも異なると考えたからである。そのため本研究では、主にはメールで筆者に向けられた「語り」を中心に、場を記述することを試みる。

表2 告知をめぐる場

|             | MH1   | FH2   | MW3   | MW4   |
|-------------|---|---|---|---|
| 告知の場の再現イメージ | 外来診療室<br>   | カンファレンスルーム<br>  | 病室<br>  | 最初に検査を受けたA病院では、<br>「いくつかの病名が考えられるが、ALSの初期症状の可能性が<br>あります」と、告げられました。<br>＜中略＞ピンとこなかった私は、<br>パソコンにて徹底的に調査した結果<br>愕然としました。「本当かよ！なぜ」。<br>A病院に言われた病名に物凄い<br>不安を抱き、信じられず二つ目の<br>病院であるB病院の検査を受けま<br>した。結果はA病院と同じでした。<br>病名は、脊髄性筋萎縮症、そのとき<br>先生から「この病名はALSの一步<br>手前の病名です。ALSに進行する<br>可能性があります」と、いわれました。<br>しかし、心の中では認める事は出来<br>ないでいました。<br>その後、B病院からC病院を紹介さ<br>れました。C病院神経内科医長、<br>I先生は「脊髄性筋萎縮症はALSと<br>同じだよ」と言い、それからゆっくり<br>と今後訪れる症状について説明さ<br>れました。 |
| 会話の状況       | A:「先生、私の病名もしかしてALSではないでしょうね。」<br>B:「そこまで分かっているのならお話ししましょう」<br>A:「え！やっぱりALS?」<br>「あとの位の命ですか?」<br>B:「そう遠くない時期に呼吸困難になります。人工呼吸器を着ければ延命出来ますが、その場合は24時間介護になります。」<br>A:「先生、安楽死できませんか?」 | B:「いろいろ検査をしたが、考えている病名には該当しなかった。最終的に運動ニューロン病と考える。筋肉が侵される病気で残念ながら、今の医学では原因不明で、薬も治療法も無い…」<br>A:「……」(小さく頷く)<br>C:「……」<br>B:「100%ではないが……」<br>A:「……」(黙って部屋を出た)。 | B:「平均3年から4年で…絶命」、「四肢麻痺…」、「呼吸停止…」<br>…<br>D:「……」(うつむく)<br>A:「(心の中で)「いやだ！そんな事あるはずがない！」」 |   |
| 関係図と場       | ホスト: 医師<br>ゲスト: 罹病者, 家族<br>告知の場: ナシ<br>サービスマン: ナシ   | ホスト: 医師<br>ゲスト: 罹病者<br>告知の場: 姉長<br>アシスト: 姉長<br>サービスマン: ナシ   | ホスト: 医師, 研修医<br>ゲスト: 罹病者<br>告知の場: フィールド<br>アシスト: 研修医<br>サービスマン: ナシ                    | ホスト: 医師<br>ゲスト: 罹病者<br>告知の場: ナシ<br>サービスマン: ナシ   |

表1 調査対象者の概要

| 略名       | MH1                               | FH2                               | MW3                              | MW4                               |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 年齢/主介護者  | 62歳/妻/山形                          | 62歳/娘/宮城                          | 47歳/千葉                           | 55歳/千葉                            |
| (同居)家族   | 妻                                 | 夫・娘夫婦・孫3人                         | 妻・娘                              | 娘・両親                              |
| 発病時期     | 1993年10月                          | 2001年頃                            | 1999年7月                          | 1999年10月                          |
| 診断年月     | 1995年10月                          | 2002年6月                           | 2000年5月                          | 2000年3月                           |
| 告知年月     | 1995年10月                          | 2002年7月                           | 2000年5月                          | 2000年3月                           |
| 人工呼吸器の装着 | 1996年5月                           | 未装着                               | 2002年8月                          | 2000年8月                           |
| 現在の住まい   | 在宅                                | 在宅                                | 療護施設                             | 療護施設                              |
| 呼吸       | 人工呼吸器                             | 自力呼吸                              | 人工呼吸器                            | 人工呼吸器                             |
| 起座/移乗介助  | 全介助                               | 全介助                               | 全介助                              | 全介助                               |
| 食事方法     | 経管栄養                              | 経管栄養                              | 経管栄養                             | 経管栄養                              |
| 排泄使用具    | 尿器/ゴム便器                           | 留置カテーテル/オムツ                       | 留置カテーテル/オムツ                      | 留置カテーテル/オムツ                       |
| 意思表示方法   | 意志伝達装置(口)プザー(指)                   | 透明文字盤/意志伝達装置(足)                   | 意志伝達装置(額)                        | 意志伝達装置(額)                         |
| 利用居宅サービス | 訪問看護 4日/週<br>ヘルパー 1日/週<br>入浴 1日/週 | 訪問看護 3日/週<br>ヘルパー 4日/週<br>入浴 2日/週 | 入浴 2日/週                          | 入浴 2日/週                           |
| 略名       | MH5                               | MH6                               | MH7                              | MH8                               |
| 年齢/主介護者  | 69歳/妻/山形                          | 56歳/妻/宮城                          | 52歳/妻/宮城                         | 67歳/妻/山形                          |
| (同居)家族   | 妻・次男                              | 妻                                 | 妻・息子3人                           | 妻                                 |
| 発病時期     | 1993年頃                            | 1997年1月                           | 1998年9月                          | 2002年3月                           |
| 診断年月     | 1993年5月                           | 1997年10月                          | 1999年3月                          | 2002年5月                           |
| 告知年月     | 1993年5月                           | 1997年10月                          | 2000年2月                          | 2002年7月                           |
| 人工呼吸器の装着 | 1995年1月                           | 1999年10月                          | 2002年2月                          | 2002年6月                           |
| 現在の住まい   | 在宅                                | 在宅                                | 在宅                               | 在宅                                |
| 呼吸       | 人工呼吸器                             | 人工呼吸器                             | 人工呼吸器                            | 人工呼吸器                             |
| 起座/移乗介助  | 全介助                               | 全介助                               | 全介助                              | 全介助                               |
| 食事方法     | 経管栄養                              | 経管栄養                              | 経管栄養                             | 経管栄養                              |
| 排泄使用具    | 尿器/ゴム便器                           | オムツ                               | 留置カテーテル/オムツ                      | 尿器/ゴム便器                           |
| 意思表示方法   | 意志伝達装置(口)プザー(指)                   | 意志伝達装置(額)                         | 透明文字盤                            | 筆談/プザー(指)                         |
| 利用居宅サービス | 訪問看護 2日/週<br>ヘルパー 2日/週<br>入浴 1日/週 | 訪問看護 3日/週<br>ヘルパー 2日/週<br>入浴 2日/週 | 訪問看護 2日/週<br>介助人 1日/週<br>入浴 3日/週 | 訪問看護 5日/週<br>ヘルパー 5日/週<br>入浴 1日/週 |

3. 告知の場と相互関係

3-1 告知の場 4名の罹病者全てが、病院で医師による告知を受けている。そのときの様子を、罹病者の記述からみとめることにする(表2)。MW4は告知の場が三病院にわたっているため、記憶が混同してしまっており、一つのイメージを描くことができなかったが、

MH1, FH2, MW3 はそれぞれ異なる場で告知を受けていることがわかる。

まずは、通常外来の診察で告知を受けた MH1 からみる。外来診療室は、基本的には診察を行うことを目的とした部屋であるが、MH1 は自分で調べた悪い可能性を打ち消そうと、「ALS ではないでしょうね」と外来診療室で医師に質問をぶつけてしまう。その結果、医師は隠し通せないと判断し、告知を行ってしまうこととなり、医師・罹病者双方にとって、十分に心の準備ができていない段階での告知となってしまった。

一方の FH2 は、カンファレンスルームで告知を受けている。医師は、告知を行うことを目的としてこの部屋を選択し、今後のケアのことも考え、婦長を同行させている。医療者側は、十分に罹病者に配慮し、告知を行っていることが示唆される。

次の MW3 は、上記二つの例とは異なり、検査入院中の病室で告知を受けている。罹病者 1 名に対し、医師 1 名、研修医が 2 人の計 3 名の医師が立ち会う中、菌に衣着せぬ物言いで率直な告知が行われている。また MW4 は、状況としては MH1 の外来診療室に近い状況であることが文面から推察される。しかし、告知の内容は MW3 のような率直な内容であったようだ。

これを関係図と場からさらにみってみる。これを人的関係から見ると、FH2 以外は全て二者関係、すなわち「与える人/与えられる人（ホスト/ゲスト）」だけの関係で告知の場が成り立っていることがわかる。また、告知の場は、医師側の home（外来診療室）であったり、医師・罹病者の双方にとっての away（カンファレンスルーム）であったり、罹病者側の home（病室）であったりと多様であった。FH2 のように、人的環境や場の選択からも、告知への細心の注意・配慮がみられる例もあれば、MW3 のように、病室という home であっても、医師 3 名のホスト優勢の場となる例もみられた。しかしながら、『告知』された内容が大きいあまり、状況のとしての場の効力は殆ど発揮されていないように感じられた。

**3-2 告知後の心的状況の変遷** このような告知を受けた後、罹病者とその家族はどのような過程を辿るのであろうか。まずは、罹病者の言葉をもとにみってみることにする。なお、これは ALS 罹病者によって、概ね告知直後から 3 ヶ月後までの心情が綴られたものである。

**HM1**：私と妻の意見は真っ向から対立し、人工呼吸器を着けて生きて欲しい、と懇願する妻に、着けないと言う私との話し合いは何日にも及び、泣き明かす夜も幾度かありました。しかし、この間にも妻は、ALS に関する情報を得る為、設立してまもない ALS 協会山形県支部を見つけ、連絡を取っていました。

一方、私は ALS 患者でも受け入れてくれるホスピスが何処かに無いものか、と不自由になった指で電話をかけ続けていました。しかし、残念ながら ALS 患者を受け入れてくれる施設を、探せないまま時だけが過ぎてい

表 3 死の受容過程にみる罹病者と家族の告知後の心的状況

| キューパー・ロスの死の受容の過程                                | 罹病者   | 家族   |
|---|---|--|
| 第一段階：「否認」<br>「認めたくない、病気にかかっていないと思いたいもうとする。」     | 現実を拒む(FH2)                                      | そんなはずない(MH5)                                   |
| 第二段階：「怒り」<br>「自分自身や周囲に対する怒り。直接それを周囲にぶつける場合もある。」 | 我儘を言う(FH2)<br>何で自分が(MW4)                        | うちの人が何をした(MH7)<br>何でうちの人が(MH8)<br>何でうちの人が(MH7) |
| 第三段階：「取引」<br>「周囲、もしくは何か見えないもの(神様・仏様等)との取引。」     |   | 神様、私と夫の身体の変換して(MH5)<br>神様、私と夫の身体の変換して(MH6)     |
| 第四段階：「抑鬱」<br>「為すすべもなく諦めている状況。」                  | ホスピスを探す(MH1)<br>案に死にたい(MW3)<br>誰と会っても意味がない(MW3) |  |
| 第五段階：「受容」                                       |   |  |

きました。妻は、事務局から情報を得ると、私を説得する日々が続きました。それでも、人工呼吸器は着けない、と言い張る私に妻は、泣きながら叫んだ。

「せっかく生きられる道があるのに！」  
「死んでいくあなたはいいけど、残された私達はどのようなのよ！」

**FH2**：朦朧としたまま部屋（カンファレンスルーム）を出た。職員用のエレベーターホールから陸奥湾の夕日に染められた穏やかな海が見えた。涙がとめどなく溢れた。＜中略＞神経内科の通院では、決まってやがて来る呼吸困難にどう対処するのか、最期をどこで過ごすのか、家族はどう受け入れつつあるか等の繰り返しだった。孤独と絶望感に不安は広がり我侭になる事もあったが、周りは優しく受け止めてくれた。「死にたくない」と夫を困らし、現実を恨んだ。

**MW3**：死刑宣告とも言える告知が終った後、担当医の内の一人でこの 4 月研修医になったばかりという若い先生が、＜略＞こう話されました「C 病院の I 先生の元へいらしてみてください。色んな生き様を知って頂けます…。どうか結論を急がないで下さい。」そうです、その時の私の心の内には「絶望」すなわち死を望む気持ちしかありませんでした。ベッドの上で考える事は“楽に死にたい”“眠っているうちに死にたい”そんな事ばかりなのです。やがて、その当時の私は“この先誰と会っても意味がない”という感情に支配されつなかりを殆ど断ちました。そして、退院後も私は「絶望」に苛まれ、のたうちまわりました。

**MW4**：インターネットで病気について調べていた私は、今後訪れる症状についてわかっていましたが、先生にじかに言われた内容に大きなショックを隠すことが出来ませんでした。その日から、今後訪れるであろう逃げる事の出来ない現実から、人生の崩壊（人生設計、将来の希望、夢、家族との別れ、経済不安）、そして迷い、戸惑い、…怒り：なぜ自分に…いろいろなことが頭の中を駆け巡り、悩み続けていました。

このように、告知の場はそれぞれ異なっていながらも、罹病者は一様にショックを隠し切れず絶望感に苛まれることとなる。これらの様子を代表的なキューブラー・ロスの死の受容過程<sup>6)</sup>に整理してみる(表3)。すると、罹病者側では、「取引(第三段階)」に関する発言は聞かれず、否認(第一段階)し怒り(第二段階)をぶつけるFH2, MW4の例と、諦めて死を望む(第四段階 抑鬱)のMH1, MW3の例がみられていた。また、これらの段階の経過が告知後3ヶ月以内にみられるのは、FH2を除く3名の罹病者の告知から人工呼吸器の装着までの期間が1年以内であることに示唆され、病気の進行と向き合わずにいられなかったことが窺い知れる。このように、キューブラー・ロスのモデルとの相違がみられるのは、彼女のモデルは主にガン罹病者への聞き取りから得られたことにあると考えられる。即ち、避けることのできない死と徐々に衰えて行く身体を前提としたガンと、ALSのように急激に身体能力が衰えて行き、人工呼吸器をつけることで延命できるという可能性を含んでいる病との差ではないかと考えられた。その仮説は、家族が語った言葉によってさらに裏付けられることとなる。

ここで、家族の発言をみてることにする。家族の発言の特徴は、本文中のMH1の最後にも語られているよ

うに「生きられる道がある」ということが前提とされている所である。それが、第4段階の抑鬱に関する発言がない所に如実に示されている。即ち、家族はALSの告知に罹病者と同様に絶望し、否認・怒り・取引を繰り返しながらも、「諦めない」のである。この家族の思いが、病気の受容と人工呼吸器の装着の選択に関係してくることとなる。

**3-3 病気の受容をめぐる相互関係** 罹病者は難病を宣告されることで、否認、怒り等を覚えながらも、ある人は受容へ、ある人は非受容のまま療養生活を送っている。この違いはどこで生まれるのであろうか。再び罹病者の手記をみてることにする(表4)。

**MH1:** 病室に案内されKさんと奥様を紹介されました。人工呼吸器をつけたKさんは、ベッドの上から、笑顔で私達を迎えてくれました。その上、Kさんは奥様との見事な連携プレーで文字盤を操り、話されました。「ようこそ、おいでくださいました。」とてもスムーズな会話に気持ちの和らいだ私は、これまでの経緯や色々な事情を考え、人工呼吸器をつけないつもりでいることなど、今の思いを全て打ち明けました。私の話に涙を流されながら、「つらいでしょう、わたしも、ずいぶんなやみました。これが、いまのALSのげんじょうなのです。」

表4 罹病者が語る受容のきっかけ

| MH1   | FH2  | MW3   | MW4   |
|---|--|---|---|
| <p>A:罹病者 B:同病者</p>  | <p>A:罹病者</p>   | <p>A:罹病者 B:同病者 C:医師</p>   | <p>A:罹病者 B:同病者</p>  |
| <p>B:「出来ることなら人工呼吸器をつけて生きる道を選んで欲しい。そして、ALSの撲滅と、後に続く患者さんの為にも、生きられる環境づくりを手伝って欲しい…」<br/>A: 私は、ALSの為に死のうとしてるのに、この方はALSの為に生きて欲しいと言う。余りにも、私との考え方の違いに、心の大きさと考えの深さを感じ私の心は揺らぎました。</p> | <p>障害者となった今、人様から頂く親切や暖かい思いやりに、心から感謝出来る素直な自分があるのを知りました。野に咲く花の力強さにも気付かず、自然の偉大さにも気付かず、恵まれる事のない多くの人々に思いを寄せることもなく、ただただ重なる我が身の不幸に、天さえも見放し賜うたかと嘆く日々が続きました。<br/>治すことの出来ない病気と知り、神様は何時如何なる時も立ち直る私の力強さを、お話しになっておられるのでは…そう思うことにより病魔と闘う覚悟と勇気を持つ事が出来ました。</p> | <p>C:「新しくALSの告知を受けた方に向け、何かアドバイスになる事を書き、それをオリエンテーションしてみたらどうか。」<br/>A: それを実践する事が他のALS発症者の方に役立つ事であり、ひいては自分が必要とされる事により、社会にその存在が許される最後の砦ではないかと感じました。</p> | <p>病棟の中でALS患者の現実を目の当たりに見せ付けられ、最初は心が変になりそうでした。でも、何日か経つうちに心に変化が出てきて素直にALS患者と接することが出来るようになってきたのです。</p> |

表5 家族が語る受容・非受容のきっかけ

| MH5   | FH6   | MH7  | MH8  |
|---|---|--|--|
| <p>A:罹病者 D:家族(妻)</p>  | <p>A:罹病者 C:同僚(医師) D:家族(妻)</p>   | <p>A:罹病者 E:人々</p>  | <p>A:罹病者</p>   |
| <p>・妻との対話の繰り返し<br/>「私のために生きてください」<br/>・強い信仰心<br/>・2週間の北海道旅行で自然の偉大さに気がつき、病気を受容</p> | <p>・妻の「私のために生きて」<br/>・同僚の「(人工呼吸器を)つけて生きる」<br/>・本人「治らない病気の方が諦めが ついてむしろ気持ちがいい」。</p> | <p>はじめは受容に前向きだったが、初めて外出した際に、周りの人の目や発言「かわいいそうに…」から一気に非受容へと変わる。「こんな自分をみられたくない」「何でこんな風になったんだ」</p> | <p>自覚症状のないまま病気がすすみ、気がついた時には人工呼吸器が装着されている状態。どうして自分は生かされているのかこうなってしまったのかわからないままであり、人とも会いたがらない。</p> |

Kさんの思いが、文字盤を通して奥様の口から語られたとき、これまでずっとこらえていた気持ちの張りが、一瞬の内に解き放たれた様に、涙が溢れ出てしまいました。そして「ぜんたいの、7わりのかんじゃさんが、あなたとおなじような、りゆうで、しを、えらんでいます。とても、かなしいことです。」

Kさんは、ALSについて何も分からなかった私に、その現状を説明された上で、是非、出来ることなら人工呼吸器をつけて生きる道を選んで欲しい。そして、ALSの撲滅と、後に続く患者さんの為にも、生きられる環境づくりを手伝って欲しい、と言われたとき私は、愕然としてしまいました。私は、ALSの為に死のうとしているのに、この方はALSの為に生きて欲しいと言う。余りにも、私との考え方の違いに、心の大きさと考えの深さを感じ私の心は揺らぎました。

**FH2**：(先生へ当てた手紙) この病名を告げられた時、心は乱れ、冷静に受け止めることは出来ませんでした。段々身体を自由を奪われていく、自分の姿を確認し、運命を受け止め、気持ちを落ち着かせる事にしました。

(カンファレンス室で) 難病と宣告されました時は絶望の淵に立ち、嘆き悲しみの日々が続きました。自分に負ける事は病気にも負ける事になると考え、自分自身を奮い立たせ、病魔と闘う勇気と力強さを身に付け、我が身の辛さ、苦しみの現実を素直に受け入れ、それなりに頑張るって参りたいと存じております。

**MW3**：通院先の外来日、私は耐え切れない焦燥感に背中を押され、当時の主治医の先生に、I医師への紹介状をお願いしました。そして実は、心の底では死を恐れる私は、「このままではいけない。この先の生き方を考えなくては…」とすがる気持ちでI医師の元へと向かったのです。

そんな私にピアサポートという、生き甲斐を掴むチャンスが巡って来ました。実はこのピアサポートは、私自身が当初より、生き甲斐にしようと考えていた訳ではありません。I医師から「新しくALSの告知を受けた方に向け、何かアドバイスになる事を書き、それをオリエンテーションしてみたらどうか。」との提案を頂きました。〈中略〉その時は、「ピアサポート」という言葉さえ知りませんでした。それを実践する事が他のALS発症者の方に役立つ事であり、ひいては自分が必要とされる事により、社会にその存在が許される最後の砦ではないかと感じました。正に生き続けて行く為にはギリギリの折に「提案の受諾」という選択をきっかけとし、後は『社会に必要とされる限りは、命与えられる』との信念の元、ただ一直線に「ピアサポート」に取り組むだけでした。

**MW4**：症状が少しずつ進行していく中、教育と称した三週間のなんの治療も無い入院生活が始まったのでした。病棟の中でALS患者の現実を目の当たりに見せ付けられ、最初は心が変になりそうでした。でも、何日か経つうちに心に変化が出てきて素直にALS患者と接するこ

とが出来ようになってきたのです。

以上より、MH1やMW3のように、同病者の役に立とうとすることで受容のきっかけを掴んだ例や、同病者の様子を目の当たりにすることで病気を認識し、受容したMW4の例など、病気の受容に関しては同病者の存在が大きな影響を与えていることが確認された。一方で、FH2のように同病者と触れ合うことなく、自分を奮い立たせて受容した例もみられている。また、受容の背景には、否応なく進行して行く病の存在と、そこに背を向けつつづけている自分の存在がある。「病対自分」という一元的な世界から、他者との関係を通して「病対自分対他者」というように多面的なものに変わって行く様子がみてとれた。

他方、家族を通して受容について語られたMH5～MH8を表5に示す。ここでも、受容のきっかけは多様である。基本的には家族の根強い説得と理解が、罹病者を支えていることが窺える。非受容者については、世間の目や病気の急激な進行が、非受容に結びついており、先述の罹病者の役割にみられるような社会対自分の位置付けと、病気を認識する期間が受容にかかわっていることがわかった。

#### 4. 罹病者—家族—居宅サービス者の三者間関係にみるケア環境

4-1 介護者からみたケア環境 では次に、病に付随して発生してくるケア環境をみてみることにする。図2は居宅サービスを受けている時の居宅サービス者の使用領域と、主家族介護者の主な滞在場所、居宅サービス者と家族、罹病者との関係を示したものである。

これをみると、居宅サービス者の使用領域に家族介護者の滞在場所が重なっている場合は、家族も居宅サービス者と一緒になって罹病者をケアする(直接介護)のに対し、居宅サービス者の使用領域と家族の滞在場所が重なっていない場合は、居宅サービス者への助言と罹病者の意志伝達を手伝うのみ(間接介護)で、殆ど直接介護を行っていない。さらには、隣接・別室の家族介護者の殆どは、居宅サービス者に留守を頼み、1時間以上の外出を積極的に行うのに対し、同室の家族介護者は1時間以内の消極的な外出のみであることがわかった。外出を積極的に行う「居宅サービス者中心隣室」の家族介護者は、介護力が乏しいことも共通しており、「外出しなければ、介護を続けられない」と語るMm20妻の言葉も現れているように、日頃の介護ストレスも蓄積していた。これより、介護力が少ないながらも介護現場を離れることが長期介護の維持・継続につながっていることも考えられた。

さらに、図2を介護者に行った「居宅サービス者が自宅に入ることに対し抵抗があるか」というヒアリング結果と照合してみる。すると、家族中心同室である家族介護者の抵抗感は全くなく、居宅サービス者を「助けてく

れる人」、「力強い」、「安心」、「いてもらわないと困る」と答えていた。居宅サービス者との良好な関係が築けていることが示されているが、直接介護を自身が行っている安心感と自分は“ホスト”であるという思いがそれを誘発しているように考えられた。一方、「抵抗がある」と答えた介護者の殆どは、居宅サービス者がホスト役となり、直接介護を行っている場合に多くみられていた。それは、任せられる居宅サービス者に会おうまで、何度も居宅サービス者を替え、試行錯誤をした経験があること、プライベートなスペースに居宅サービス者という他者を入れるということ、トイレ・洗面・浴室などの水廻りを含め、住宅の全体を見られ、観察されているようで落ち着かないなどが抵抗感につながっていた。積極的に外出を行う居宅中心隣室のタイプにも、このような傾向がみられているのは、想定とやや異なる結果となった。それについて、このタイプの介護者は「私たちも息抜きしないとやっていられない」、「今は割り切って任せている」、「それなりに症状も落ち着いてきているので、前ほどの不安はない」と語っており、外出頻度は、居宅サービス者への信頼関係及び抵抗感と直接関係していないことが読み取れる。また、2事例ではあるが、水廻りを居室内に設けた Mm19 と、完全に LDK と罹病者室・水廻り分離されている Mm11 の介護者の抵抗感がゼロだったことから、罹病者室と水廻りの位置関係が、居宅サービス者などの「他者」との関係性の抵抗感に影響していることも窺わせる結果となった。

**4-2 罹病者からみたケアとケア環境** では、罹病者が望むケアはどのようなものなのだろうか。意志伝達手段の制約によって、罹病者から直接意見を聞いた事例は限られているが (Mm12, Mm13, Mm15, Mf16, Mm19)、直接意見を聞いた人の全てが「よいケアを提供してもらっている (Mm19)」、「ありがたい (M1m12, Mf16)」、「安心して任せられる (Mm15, Mf16, Mm13)」と語っていた。それは、意志伝達の確立が QOL に関係しているという報告もあること<sup>7)</sup>や、Mm19 を除く罹病者の罹病期間が長いこと、居宅サービス者との関係も落ち着いてきていることから、このような問題が具現化されにくくなっていること、他者への不満を露にすることに対し、抵抗があるという心情も影響しているのではないかと思われた。先ほどの図1の関係図にみるように、ケアとは相互関係の間で生まれるものである。多かれ少なかれ、よい関係を築きたいと願うし、いい罹病者であり、いい居宅サービス者でありたいと願うことはあるだろう。しかし、ALS 罹病者のように 365 日、24 時間の介護が必要で、指一本も動かすことが俚ならない罹病者にとって、いい人でありつづけることは難しい。そのため、罹病者は初めは「いい罹病者」として接しようと努めながらも、その身体の俚ならなさ、俚ならなさを理解されないことに対する苛立ちを募らせていき、素のままの自分を表出せざるを得なくなることもある。

それを、居宅サービス者との関係を模索中の FH4 の事例よりみてもいいことにする。これは、FH4 が居宅サービス者に宛てた手紙の一部である。

いつもお世話になってます事をお礼申し上げます。皆様方におかれましては、数ある患者の一人のお考えかもしれませんが、口も聞けない手足も動かせない私にとりまして皆様の存在は手となり足となり口となる、家族の一員だと受け止めています。＜中略＞小さなことを言うとお思いでしょうが、指が曲がっても痛いし、腰の位置が違っても痛いし、足が曲がっても痛いし、枕の位置が違っても苦しいし、腕のタオルの高さが違っても苦しいし…。こんな事くらいと思われているかもしれませんが、私にとりましては、たとえ 1cm でも狂えば、一晩中苦しむ事になります。ですから、セットの仕方を簡単に考えないで下さい。

この手紙からわかることは、FH4 にとってのケアとは、欠損部分を補うだけのケアではなく、自分の一部として、例えば自分の手となり足となるようなものを指しているということと、物理的なケアがうまくできなくとも、誠心誠意で取り組んでいる姿勢やケアを補う言葉、気持ちを持つことである。しかしながら、ケアは仕事であり、居宅サービス者は友人でも家族でもない。だから、このような意見を持つことはあまり意味を持たないかということ、そういうわけでもない。石川はケアにみられる関係をとりながら、以下のように語っている。「介護する・されるの関係には脱社会的な付き合いを誘発する可能性がある。社会的に振舞えない障害者がいることで、そこに脱社交<sup>8)</sup>の関係が生じる。障害者の非作為的脱社交が、介護者の脱社交を支援する。＜略＞先に裸になっている人がいると、裸になることが恥ずかしくなくなる。よそゆきのかっこうをしているほうがむしろ恥ずかしくなる。」

つまり、こうして“よそゆきでない”自分を開示して行くことが、良好なケア環境を築く一歩だとしているのだ。互いに意見をぶつけ合い、時には譲歩しながらもある程度の妥協点を認識しあいながら、ケア環境は構築されるものと考えられる。それは、先の外出する介護者の意見にもあるように「割り切って任せている」という言葉からも汲み取れ、その“割り切り”地点を持つことが、罹病者—家族介護者—居宅サービス者の良好なケア環境を築くことにつながるのではないかと考えられた。

## 5. 罹病者の公と私と home 感

**5-1 罹病者の公と私** 介護者は、外出することによって「介護者」という役目をおりることができる。居宅サービス者もまた、仕事が終れば「ケア提供者」という役目をおりることができる。しかしながら、ALS 罹病者は 24 時間、365 日罹病者でありつづければならない。そしてそれは、空間の立場からも、同じことが言えるのではないだろうか。



図2 ケア従事者の使用領域と家族の滞り場所およびその関係

ここで、細かい時間まで把握できた在宅罹病者 (Mm10,Mm13,Mf16) の一週間のケアサービスの状況についてみることにする(表6)。これをみると、多い人は1日の8時間を居宅サービス者と過ごしていることがわかる。この結果は、家族介護力や家族の職業の有無、罹病者の身体状況なども密接に関わっているものであるが、日曜日を除くほぼ毎日、居宅サービス者が訪問していることは、ALS 罹病者の日常的ケアの大変さを示すものでもある。そして、これだけ頻繁に居宅サービス者が訪れるということは、罹病者のベッドがある居室は、もはや私的な居室にはなりえず、公的な居室へと変化せざるを得なくなることである。今一度、図2を再見してみる。家族は居宅サービス者と関わりたくなければ、関わらないようにすることもできる。自身の「私」的な場所を確保することもできる。家族にとっても、居宅サービス者にとっても、罹病者居室は「一時的な公」である。しかし、罹病者にとっての居室は、永続的な「公」である。入浴・排泄・食事・睡眠・余暇・・・などのすべての行為が、同じ居室の同じベッド上、もしくはベッドサイドで行われる。そして、それらの動作は必ず「人の手」を介すことが余儀なくされ、罹病者にとっての「私」は「病」を得ることによって、消滅するといっても過言ではない。もちろん、ALS 罹病者のような死と隣り合わせで生きている者にとって、いつも誰かに見守られていることは、安心感にもつながるが、その反面、時として不自由感も同時に罹病者に与えるのである。そこで彼らは、残存機能を最大限に使って、再び「私」の確立を試みる。しかし、それは現実の居室の中にする「私」ではない。インターネットというメディア空間につくられる「私」である。それをいくつかの事例から、みてみることにしよう。

罹病者にとって、意志伝達装置(パソコン)を使うことの当初の目的は、文字通り意志の伝達にあった。人工呼吸器の装着によって声を失う罹病者は、パソコンを使うことによって、好きなときに好きなことを発言できるようになる。そしてそれは、介護者にとっても、文字盤という道具を用いなくて済むことにもなり、両者にとって理に叶ったものとなる。しかし、近年の電子メディアの発達により、それは単なる介護者に意思を伝えるためだけの装置にとどまらなくなった。罹病者も、同病者や全く知らない人と、直接会わずに交流を行うことが可能となったのである。

それでは、意志伝達装置(パソコン)で電子メールやインターネット使用している人の生活をみてみることにする(Mm13,Mf16,Mm15,Mm11,MW3,MW4)。まず、メールやネット使用時間の多さが大きな特徴である。彼らにとってのインターネット内での交流は、「生き甲斐(MW3,MW4)」、「たのしみ(Mm13,Mf16)」、「役目(Mm4)」、「人として生きて行くための手段(Mm15)」と語られており、自分が自分として居れる一つの大きな

表6 在宅罹病者の一週間の居宅サービス量

|   | Mm10   |                                      | Mm13   |                              | Mf16  |  |
|---|--|--------------------------------------|--|------------------------------|---|--|
|   | 時間   | 居宅サービス                               | 時間   | 居宅サービス                       | 時間  | 居宅サービス                                     |
| 月 | 9:00~12:30<br>13:30~17:00  | 訪問介護<br>訪問介護<br>訪問介護                 | 12:00~15:00  | 訪問看護                         | 9:00~11:00<br>9:30~10:30<br>13:00~15:30<br>15:30~16:30                | 訪問看護<br>訪問介護<br>訪問介護<br>訪問介護<br>訪問リハビリ     |
| 火 | 10:30~12:30<br>13:30~17:00<br>15:30~16:00<br>16:00~17:00               | 訪問介護<br>訪問介護<br>訪問リハビリ<br>往診         | 9:00~11:00<br>9:00~11:00<br>9:00~11:00<br>9:00~11:00 | 訪問介護<br>訪問介護<br>訪問介護<br>訪問看護 | 9:00~11:00<br>9:00~10:00<br>11:00~13:30<br>13:30~16:30                | 訪問看護(入浴)<br>訪問介護<br>訪問介護<br>訪問介護<br>訪問介護   |
| 水 | 9:00~11:00<br>14:30~17:00<br>15:30~16:00<br>16:00~17:00<br>17:00~18:00 | 訪問介護<br>訪問介護<br>訪問入浴<br>訪問入浴<br>訪問介護 | なし   |                              | 9:00~11:00<br>9:30~10:30<br>11:00~13:30<br>13:30~16:30<br>15:00~17:00 | 訪問看護<br>訪問介護<br>訪問介護<br>往診<br>訪問介護<br>訪問介護 |
| 木 | 9:00~12:30<br>10:30~12:30<br>13:30~17:00                               | 訪問介護<br>訪問介護<br>訪問介護                 | 13:00~15:00  | 訪問看護                         | 9:00~11:00<br>11:00~13:00<br>11:00~13:00<br>13:00~16:00               | 訪問介護<br>訪問介護<br>訪問看護<br>訪問看護               |
| 金 | 9:00~12:30<br>14:30~17:00  | 訪問介護<br>訪問介護                         | 11:00~12:00<br>12:00~15:00                           | 訪問リハビリ<br>訪問看護               | 9:00~11:00<br>9:30~10:30<br>14:00~15:00<br>15:00~16:30                | 訪問看護<br>訪問介護<br>訪問リハビリ<br>訪問介護             |
| 土 | 9:00~12:00<br>14:30~15:30<br>14:30~16:30<br>15:00~16:00                | 訪問介護<br>訪問介護<br>訪問入浴<br>訪問介護         | 13:00~16:00  | 訪問看護                         | 9:00~11:00<br>9:00~10:00<br>11:00~13:30<br>13:30~16:30                | 訪問看護(入浴)<br>訪問介護<br>訪問介護<br>訪問介護           |

手段であるとともに、居室内や療養生活に「最も大切な道具・機械」であると語る人も少なくはない。今日では、電子化が進み、顔と顔を向かい合わせてのふれあいが失われて、人間関係がより代理的・間接的になることが危惧されているが<sup>9)</sup>、ALS 罹病者のように身体的な自由を奪われるものにとっては、ハンデを感じることもないインターネット上での交流が、彼らの生活の一部を支えていた。

5.2 ALS 罹病者にとっての環境と home 感 ALS 罹病者にとってメディアコミュニティが、生活の質に影響を与えていることはみてとれた。その一方で、メディアコミュニティは伝えられる情報が制約されるが、「時間」と「空間」という制約のないコミュニケーションを可能にしていると言われている<sup>10)</sup>。ここで、一つの疑問が生じることとなる。それは、自身の力で動くことができない罹病者にとっては、もはや環境や空間は必要ないのだろうか。効果を発揮できないのであろうかという疑問である。そこで、数名の ALS 罹病者に『何によって「home」を感じますか?』という質問を行った。答えは表7に示す通りである。

家庭ではない、施設で暮らす MW3,MH4 は異なる回答を寄せている。MW3 は施設であっても(どこであっても)自己実現できる環境があれば、そこは自分にとってのホームだと語っている。それに対して、MW4 は、今の自分の環境はアウェイとして、それとは異なる自分の考えるホーム感を6つの点から示している。

一方、在宅で暮らす Mm13,Mf16 の home 感をみてみることにする。Mm16 は今の在宅の生活を思い浮かべながら、そこに漂う一連の雰囲気、特に生活音が home 感を呼び起こすとし、Mf16 は入院した時の生活を思い浮かべながら、同じく在宅生活の中での生活音に home 感を見出している。これは ALS 罹病者が自身で移動し、何かを見、何かを触ることが困難であることも同時に示唆しているのだが、臥床状態で感じられる家庭内

の音という名の出来事が『家族としての罹病者』を演出しているのではないかと考えられた。

ここで、緩和ケア病棟で音環境を調査した山本の報告を参考にみている<sup>11)</sup>。すると、音環境に関するスタッフのトピックとして『誰かが近くで生活する音を聞きたい』という結果が報告されていた。そのことから、罹病者や罹病者と接する医療従事者の『音』に関する意識が高いことが把握できる。

一方、同じ在宅生活を送っているFは、家族と食事も生活の場も完全に切り離されているながらも、最も自室がくつろげる場だという。それには、プライバシーが守られていること、自分の部屋（ある程度静寂な場）に来ることによって、介護者である母も落ち着けるということが示されている。これにより、生活音によって家族の一員と感じる家族の中の父や母のMm13,Mf16と、娘として位置するFとではhome感が異なっていることがわかる。そこには、居室というものの捉え方の違いも示されているように思われる。Mm13,Mf16は生活の場としての居室＝ホーム感(自分の場)と捉えているのに対して、F8は落ち着ける場所＝ホーム感(自分と家族の場所)と捉えている。そしてそれは、病院や施設における居室像を述べる所にも現れている。

私の理想は、まず基本的な設備は整った上で、散歩出来る庭があり、家族だけで過ごせる空間があり、窓からは眺めのいい風景、時には家族が泊まれたり、…なんつって。さらに、この状況と、今の自分の部屋を比べて私、時々思うの。部屋の天井も屋根もなかったらいいのにな。そしたら星が見えるのにな。なかったら大変なのにおバカよね。でも、ちょっとしたベランダがあって、楽に行けたら最高に嬉しい。空も星も見れて、外に出た～！って気分も味わえるしね。…私にとっての+

表7 罹病者におけるhome感

|      | 療養施設   |  | 在宅   |  |   |
|------|--|--|--|--|---|
|      | MW3  | MW4  | Mm13   | Mf16   | F   |
| ホーム感 | 私のホームとは、私の生き甲斐を体現する為の機器があり、それらをいつ何時にでも自由に使える空間です。今の部屋、まさに理想です。 | ホーム感とは<br>①安心感が生ずるところ<br>②生きる勇気もらえる<br>③リラックス出来る<br>④気持ちに自由を感じる<br>⑤孤独感を感じない<br>⑥心が落ち着ける<br><br>こんなところでしょうか。難しい質問でした。私自身施設というどちらかというとアウェーの方に属する生活しか経験していませんので。 | 私の家庭感、ホーム感とは、それぞれの家庭にしかない音、匂い、その家だけに流れるゆったりした時間。<br>私が在宅にはいて、何が一番心が癒されたかと言うと、台所から聞こえる家内が調理する包丁の音とか生活感のある音に安らぎを覚えました。<br>これらは、病院や施設では味わえない癒しの空間と思っています。 | 病院は生活感が無く、在宅は生活の雑音は活力を生み、家族の一員として、ふるい立たせてくれるのです。<br>自宅におれば近所の人や友達も来てくれて、色々な話題も聞け、自宅ならではの幸せです。これが私にとってのホームです。 | ホームで何を意識するかと言われたら、やっぱり家族かな。家族みんながくつろげる場所。今私が一番くつろげるのは自分の部屋です。<br>増築する時、わざわざ高いエレベーターを付けなくても一階でいいのに…と思ってたんだけど、二階でよかったなって今は思う。プライバシーが無くなっちゃうような気がしてね。言葉が不自由になつてから、人に話し掛られると(家族は別、会話する用意がある時も別)緊張するようになってしまったもので、それもあるかな。<br>私自身だけでなく、介護する母にとっても居心地がいい事が大事な。母は私の部屋に居る時間も多いいので、居心地良く感じて貰えれば、それがお互い伝わって、よりいい関係でいられると思う。施設や病院だったら、患者自身だけでなく、面会者もくつろげたら最高だ。<br>私の理想は、まず基本的な設備は整った上で、散歩出来る庭があり、家族だけで過ごせる空間があり、窓からは眺めのいい風景、時には家族が泊まれたり、…なんつって。<br>『我が家が一番』でも、心遣いが感じられる+αがあれば「ここ(病院や施設)もなかなかいいんだよね。」となるはず。 |

α はベランダ??

と、記述しており、療養において景色が見えることとそこから感じる外の世界が、解放感につながることを示してくれている。

一般的にALS罹病者のように看護・介護要求の高い罹病者は、病院や施設においては、ナースステーションやケアステーション付近に病室が配置される傾向がみられているのだが、罹病者や面会者が集うデイルームに近い位置に病室や居室を配置することも、生活音を求める罹病者にとっては、生活の質の維持・向上につながるのではないかと考えられた。これについては、山下<sup>12)</sup>も「食べるという場を精神的に捉える必要がある」と述べており、食と場の関係は療養において重要な視点であることが窺える。

## 6. まとめ

主にメールによる罹病者の病の語りによって、療養の場を明らかにした。以下に簡潔に記す。

(1) 告知の場は、外来診察室やカンファレンスルーム、病室など多様であったが、罹病者は告知によって一様に大きな衝撃を受けるため、場の効力は殆ど発揮されていなかった。告知後は、大きな絶望に苛まれるものの、否応なく進行して行く病の現実と、家族や同病者とのかわりによって、病の受容がなされていたが、その一方で他者による好奇心や急激な病の進行が、受容の妨げとなっている例もみられていた。

(2) ケア環境は、居宅サービス者の使用領域に家族介護者の主な滞在場所が重なっている場合は、家族も居宅サービス者も一緒になって罹病者を直接的にケアするのに対して、その領域が重なっていない場合は、助言や罹病者の意志伝達など間接的なケアのみに留まっていた。

しかしながら、居宅サービス者への抵抗感は、直接ケアを行っている家族の方が少ない傾向がみられており、ケア主導による安心感と疲労感が混在していることが窺い知れた。また、居宅サービス者が使用する水廻りが、住宅内のどの位置にあるのかによっても抵抗感に差がみられており、水廻りは住宅計画において配慮すべき課題であることが再確認された。

(3) ALS 罹病者は、食事や排泄などのすべての行為がベッド上で行われることや、居宅サービス者が多く出入りすることから、罹病者の居室が「公」的な空間となり、「私」的な空間の保持が困難となる傾向がみられた。そこで罹病者は、インターネット上に「私」的空間を設けることによって、それを補完していた。インターネット上で自己開示し、見えない相手と双方向につながることで、ALS 罹病者の QOL の維持・向上に寄与していた。

また、ALS 罹病者のように臥床生活を余儀なくされる人にとっては、インターネットなどの仮想空間が果たす役割も大きいものの、罹病者が居れる場合は、家族の生活音や自然環境を享受できる場、プライバシーなどの物理的環境とも深く関わっており、home 感を助長させるような住環境整備の重要性が示唆された。

以上より、現段階における療養環境の課題は、生活の基盤となる罹病者の居室をどこまで“ひらく”かに行きつくものと考えられる。罹病者の年齢や性別、家族や介護士等のケア提供者との関係によって異なるが、そのひらき方を調整できるパソコンなどの機器も含めた居住環境が必要となってくると思われる。また、食の場を中心とする住計画や施設計画などを新たに見直すことで、重度の障害をもつ罹病者の QOL の維持・向上に寄与する可能性も示唆された。

#### 注釈と参考文献

- 1) 厚生労働省、2008 年
- 2) 澤田甚一・安達国良・高野正子：介護保険に伴った ALS 患者への支援活動—保健所難病事業のあり方を考える—、公衆衛生 64 巻 12 号、pp.865-868、2000.12.
- 3) 菅野實・徳永摂子・亀屋恵三子他：病院における ALS 患者の療養環境に関する事例的研究、日本建築学会計画系論文集、pp.23-28、2002.7
- 4) 亀屋恵三子他：長期療養の場としての ALS 罹病者と家族の住まいに関する事例的研究、日本建築学会計画系論文集、pp.41-47、2005.7
- 5) 亀屋恵三子他：身体障害者療護施設における ALS 罹病者の療養環境に関する事例的研究、日本建築学会計画系論文集、pp.339-345、2009.2
- 6) E・キューブラー・ロス：死ぬ瞬間、読売新聞社、1971.
- 7) 野村良彦・朝倉園子：ALS 患者の在宅支援—新しい意志伝達法を中心に—、ガンと化学療法 27 (Suppl 1)、18-22、1997.
- 8) 石川は、「他者を承認する身振りを構成する要素、つまり、よそゆきの自分を見せる身振り、感情ワーク、目的のない会話、礼儀作法のうちの一つ以上が存在しないか、あるいはこれら以外に、何かしら他者を承認する身振りとなるような要素が追加されている場合、そのような関係を「脱社会的」と定義する」と述べている(石川准：見えないものと見えるもの—社交とアシストの障害学—、医学書院、2004.)
- 9) アドヴィン・トフラー(翻訳:徳山孝夫):第三の波、中公文庫、1982.
- 10) 川上康至・山下清美・川上善郎：人はなぜウェブ日記を書き続けるのか—コンピュータ・ネットワークにおける自己表現、社会心理学研究 第 14 巻 3 号、133-143、1999.
- 11) 西田幸子・山本和恵：緩和ケア病棟における音環境の実態とその評価に関する研究—緩和ケア病棟における音環境の実態と療養環境のあり方に関する研究 その 1—、日本建築学会大会学術講演梗概集 E-1 分冊、323-324、2001.9
- 12) 山下哲郎：在宅患者の生活様態にみる療養環境の素形 その 1、日本建築学会計画系論文集、第 545 号、pp.167-172、2001.7

# GISによる出石周辺の洪水記録の作成

中尾幸一\*

## Creation of the Flood Record Around Izushi by GIS

Kouichi NAKAO\*

### ABSTRACT

Since the Edo period, the floods have occurred frequently in Izushi-town of Toyooka-city in Hyogo prefecture and they have been recorded on the documents. Moreover, disaster prevention constructions are known from references and various maps. The data which can be processed by a geographic information system is created by giving position data to these record with place names as clues. This study arranges records of the floods around Izushi-town intelligibly by a geographic information system using these data.

Keywords : flood , geographic information system

### 1. はじめに

兵庫県豊岡市出石町では、これまでにたびたび洪水が起きており、その対策がとられてきた。現在の出石町の洪水に対する安全性を考えるうえで、地形的特徴、過去の洪水の状況、改修工事の記録等を整理してまとめたデータベースは有効な資料となると考えられる。また、ここにGISを活用すればさらに便利なものとなる。本研究は、出石町周辺に関する各種文献や過去の地図から、洪水や実施された防災工事を読み取り、これらの記録に、地名等を手掛かりにして、過去の地図および現在の地図を基に位置データを与えて、地理情報システムとして扱えるデータとし、出石町周辺の洪水、改修工事の記録等を整理し、検索システムとしてまとめたものである。

### 2. 対象地域



図1 対象地域

データベース作成の対象は、出石町を中心とした地域とした。具体的には、平面直角座標系で-56000,45000を左上とし、-62000,54000を右下とする図1に示す地域である。

### 3. データベースの構成

本研究では次の項目のデータベースを作成した。

- ・出石町周辺の河川の流路と流域の記録
- ・文献にある災害記録
- ・土地利用状況
- ・各種主題図

その構成を図2に示す。

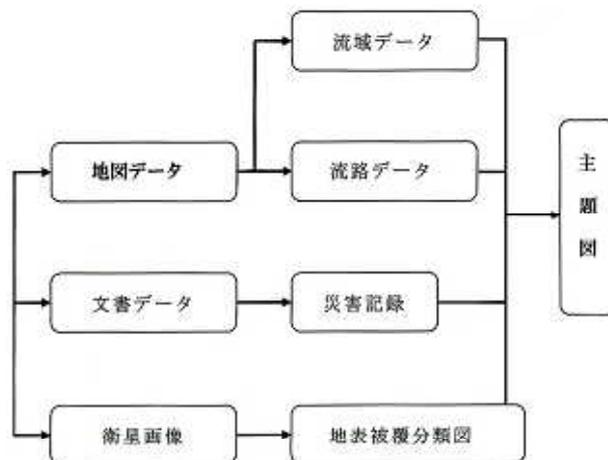


図2 データベースの構成

\*都市工学科 教授

#### 4. 流域データ

流域データとして、出石町の中心街に大きな影響がある、谷山川と揚枝谷川の流域に関して、国土地理院発行の数値地図 25000 地図画像を用いて、その流域線、流路を表すベクタ型数値地図データを作成した。

また、流域線を求めると同時にその流域面積、流路長、流路勾配も求めた。図 3 はその流域を示す図であり、表 1 は各流域の諸値を表すものである。また、流路の縦断面図、横断面図も作成した。図 4 は谷山川の流路の縦断面図であり、図 5 は横断面位置、図 6 は横断面図である。これらの図により、谷山川流域を立体的にとらえることができる。さらに、数値地図 25000(空間情報基盤)からは、鳥瞰図を作成することができる。図 7 は、一例で、南方より見たものである。出石周辺の地形を、さらにわかりやすく表現している。

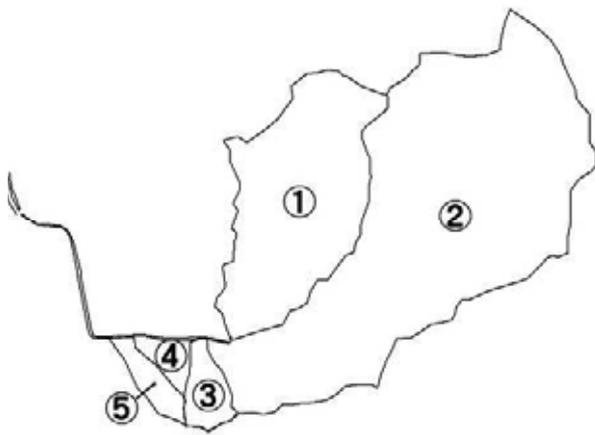


図 3 出石町周辺河川の流域

表 1 流域の諸値

| 番号 | 流域   | 面積<br>ha | 流路長<br>km | 勾配      |
|----|------|----------|-----------|---------|
|    | 揚枝谷川 | 1,687    | 1.2       | 5 ° 14  |
|    | 谷山川  | 4,089    | 3.0       | 2 ° 52  |
|    | 放水路裏 | 187      | 0.6       | 20 ° 56 |
|    | 豎堀   | 104      | 0.2       | 33 ° 36 |
|    | 城山   | 229      | 0.6       | 14 ° 16 |
|    | 合計   | 6,296    |           |         |

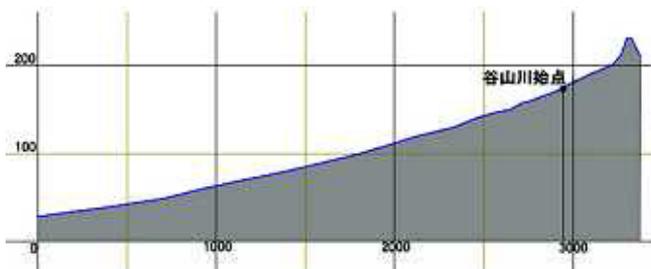


図 4 谷山川縦断面図

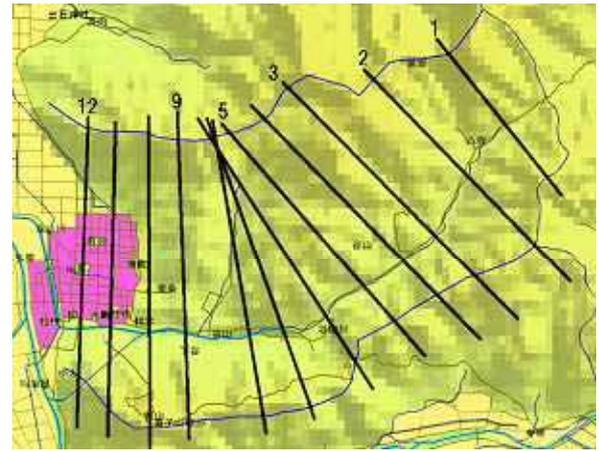


図 5 谷山川横断面図の横断位置

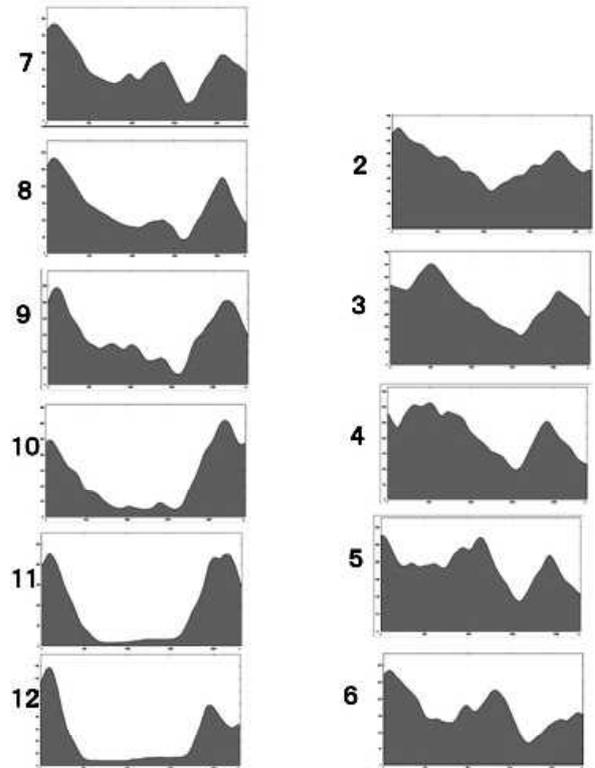


図 6 谷山川横断面図



図 7 出石周辺の鳥瞰図



図 8 出石町周辺の等高線図

図 8 は出石町周辺の等高線図である。町の周辺は比較的平坦で、出石川が増水すると、出石川に谷山川の水が流れ込みにくくなり、町が浸水する一因となっていたと思われる。また、北部の水田地帯は、標高がさらに低く、洪水時に水没する可能性が大きいものと思われる。

### 5. 流路データ

図 9 の改修前は 1810 年作製の出石御城下絵図<sup>(2)</sup>をもとに作成し、改修後は現在の流路を示して、「出石町史」<sup>(1)</sup>に述べられている出石の町周辺の流路改修工事(1935 年頃)による流路の変化を表現したものである。この改修により、出石の町の水害に対する危険性がかなり少なくなったものと考えられる。しかし、出石川の水位があがると、谷山川の水が流れにくくなることに対しては改善されていない。



流路改修前 流路改修後  
図 9 流路改修前後の図

対象域全体の流路については、大日本帝国陸地測量部製版の 1898(明治 31)年、1935(昭和 10)年、内務省発行の 1946(昭和 21)年、地理調査所発行の 1953(昭和 28)年、国土地理院発行の 1983(昭和 58)年の 5 万分の 1 地形図、および 2003(平成 15)年数値地図 25000(空間情報基盤)をもとに平面直角座標系系で、流路を表すベクタ型数値地図の作成を行い、明治時代から

の流路の変化を表現するものとした。図 10 は明治期の流路を表し、図 11 は現在の流路を表す。<sup>(3)</sup>北部の蛇行していた区間を直線的に付け替えており、また、出石の町周辺の流路の付け替えの様子が観察できる。



図 10 明治期の流路



図 11 現在の流路

### 6. 江戸時代の災害記録

文献<sup>(1)</sup>にある災害記録は、電子ファイルとして保存する。また、「仙石家譜」等に記されている洪水の状況が詳細にわかる 1722 年と 1850 年の 2 度の洪水に関して、その記述内容を地図上で検証し、状況を示す図の作成を行った。また、文章にもまとめた。

#### 6-1 災害記録

江戸時代の災害記録を、以下のような表現で電子ファイルとして保存した。

##### 6-1-1 災害記録の例

- 1573 年 円山川、六方川、新田、三江村(豊岡東部)、  
氾濫、大洪水多数、作物の収穫皆無、特に  
六地藏、下宮、法花寺に被害が集中。出石  
気多、城崎でも被害多し
- 1606 年 中国、四国、近畿、東海各地大風雨
- 1608 年 近畿、東海などの諸国、風雨洪水

1672年 但馬地方、大雨、洪水 悪作  
 1673年 大雨、洪水、ヒエをまく  
 1674年 近畿、大水、出水悪作  
 1675年 八鹿村、家屋流出 15 軒流される  
 1679年 大水  
 1680年 出水、5月26日～6月7日までに3度。  
 10月23日に大雪、麦が腐る

## 6 - 2 洪水の状況を示す鳥瞰図とその文章

文章よりも、図で表す方が洪水の様子を分かりやすく表現できる。平面図で表すこともできるが、鳥瞰図の表現の方が、よりわかりやすいものとなる。

### 6 - 2 - 1 1722年6月の洪水

図12は1722年6月24日の洪水の状況を示す図である。また、この洪水の状況を伝える文章を簡条書きにして保存した。その内容を次に示す。



図12 1722年6月の洪水

6月23日朝より雨降続く。24日夕に至って3mほど増水  
 揚枝谷より谷山川急に満水  
 杉原主人が宅脇の堀より伊木町、材木町に水押し東堀に流れ入る  
 東門土橋押し切れ内町岩波半右衛門が宅前まで押し崩し、大手門土橋をも押し崩し、大手西の角石垣その他土居、石垣所々破損  
 夕午後4時過ぎ、山里曲輪より水押し出し山里門危うく、  
 城下町、郡中に至りて水破多し  
 侍屋敷破損45軒、侍屋敷半壊8軒、町家破損60軒、町家潰家10軒、町家流家6軒、在々潰家35軒、在々流家16軒、溺死者8人、田畑2万石程水入(約12km<sup>2</sup>)

### 6 - 2 - 2 1850年3月の洪水

図13は1850年3月3日の洪水の状況を示す図である。また、この洪水の状況を伝える文章を簡条書きにして保存した。その内容を次に示す。

3月2日夜より強い雨が降りだす  
 3月3日午前4時頃より北東の風がつのり大風雨となる  
 谷山川筋の出水が殊の外烈しく、川も道路も一面の奔流となる。(3月3日夜、大橋下で2.8mに増水)  
 欄干橋の上から岩鼻(岩鼻稻荷社のあたりで武家町)への道路、宗鏡寺町丁字屋辺(東条区・武田窯工付近)まで一面の河原となる。元の川筋は石や砂で埋まってしまう  
 欄干橋辺から材木町へ水は溢れ出して、東御門に突き当たる  
 城山からの水も烈しく落下して、堀の水が溢れて奔流となり、東門前の土手が切れ、溢れ出た水が内町に流れ込む  
 大手でも堀の水が溢水して、八木町、田結庄町の町屋が床上浸水、さらに鉄砲町辺も床上浸水。  
 昌念寺御廟辺で土砂崩れ、大木3本が根こそぎとなる  
 如来寺の善光寺(善光寺如来をまつた堂)前の松も根から倒れる  
 松罨の松並木も数十本倒れる  
 馬場町(松枝区)も床上浸水。同地区の道路では深いところでは約2.1m深さの浸水があった

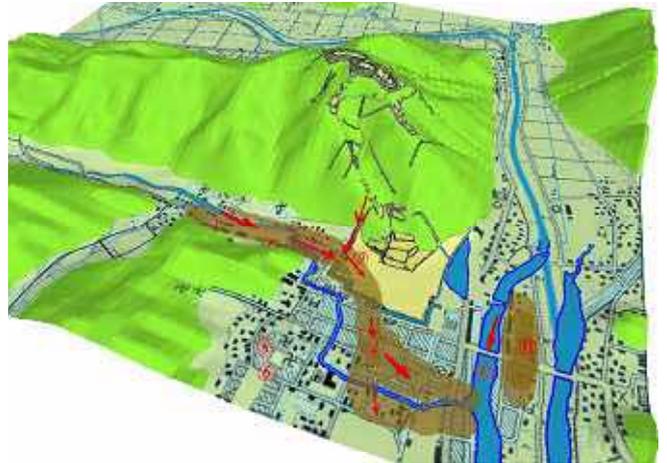


図13 1850年3月の洪水

## 7 . 1959(昭和34)年以後の洪水の記録

1959(昭和34)年の伊勢湾台風による洪水で大きな被害が出て以来、主として台風による洪水が起きている。表2<sup>(4)</sup>はその主なものをあげている。図14は1990(平成2)年の洪水での出石川流域の浸水域を表したものである。図15は2004(平成16)年の洪水による浸水域を表したものである。また、越水した堤防の位置も示している。図17は1990年と、2004年の浸水域を重ねて表示したもので、両度の洪水に浸水している地域が示されている。

表 2 主要洪水の要因と被害

| 項目               | 災害                  |                      |                         |                 |                  |                 |                  |  |
|------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|--|
|                  | 1959.9<br>伊勢湾<br>台風 | 1961.9<br>第2室戸<br>台風 | 1972.7<br>梅雨前線<br>と台風6号 | 1976.9<br>台風17号 | 1979.10<br>台風20号 | 1990.9<br>台風18号 | 2004.10<br>台風23号 |  |
| 流域平均2日雨量mm       | 253                 | 184                  | 233                     | 322             | 211              | 364             | 278              |  |
| 立野地点観測流量 $m^3/s$ | 3043                | 2624                 | 2786                    | 2595            | 2461             | 3064            | 4127             |  |
| 被害状況浸水家屋(戸)      | 16833               | 1933                 | 749                     | 2855            | 610              | 2212            | 7944             |  |
| 浸水面積 ( $km^2$ )  | 169.26              | 23.03                | 17.15                   | 21.15           | 1.85             | 19.23           | 40.83            |  |



図 14 1990年の出石川流域の浸水域



図 15 2004年の出石川流域の浸水域



図 16 1990年・2004年の出石川流域の浸水域

## 8. 堤防の築造記録

出石川の両岸には、堤防が築かれているが、明治以後の状態を地図から読み取り、その位置をデジタルマップデータとして保存した。作成したのは、明治初期と、昭和初期に築造されたものである。



図 17 明治初期の堤防

図 17 は明治初期の堤防を示し、図 18 は昭和初期の改修工事による堤防を示している。<sup>(3)</sup> 図 17 と図 18 を比較すると、双方の同じ位置の堤防があり、昭和初期に、既存の堤防を改修したことが推察できる。また、堤防の位置から、洪水で浸水していた地域が推測できる。この地域と、2004年の洪水時の浸水地域を比較すると、一致する地域が多いことがわかる。

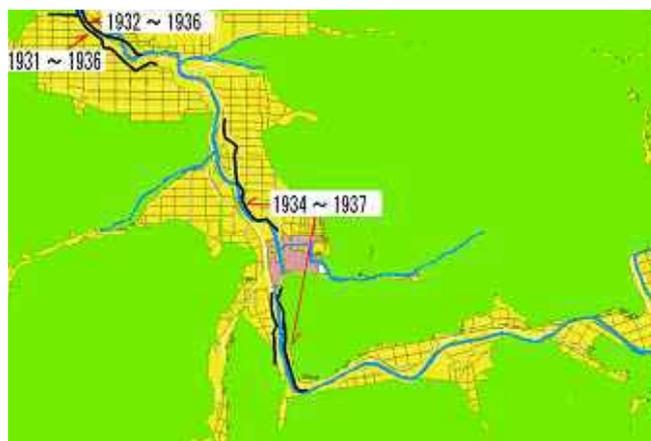


図 18 昭和初期の改修工事による堤防

## 9. 地表被覆分類図

出石町周辺の農耕地の分布状況を表すため人工衛星画像データを用いてフォールスカラー画像を作成した。図 19 がフォールスカラー画像である。これは、2006.8 観測の ASTER のデータを用いたもので、山間部の状況、農耕地の状況などが観測できる。出石川の

流路も鮮明にわかる。図 20 は図 19 を地表被覆分類したもので、植生域、農耕地、市街地、水域、裸地に分類している。また、図 21 は図 20 のから求めた各分類項目の面積比を表したものである。(裸地は農耕地に含んでいる。)同様の処理を 1993 年、1998 年についても行っている。このデータから、土地の利用の状況を読み取ることができる。特に、森林、農耕地の分布状態を把握するためには有効な資料である。



図 19 出石町周辺のフォールスカラー画像

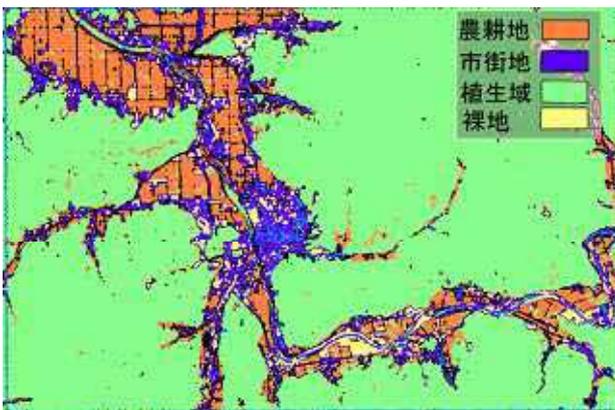


図 20 出石町周辺の地表被覆分類図



図 21 分類項目の面積比

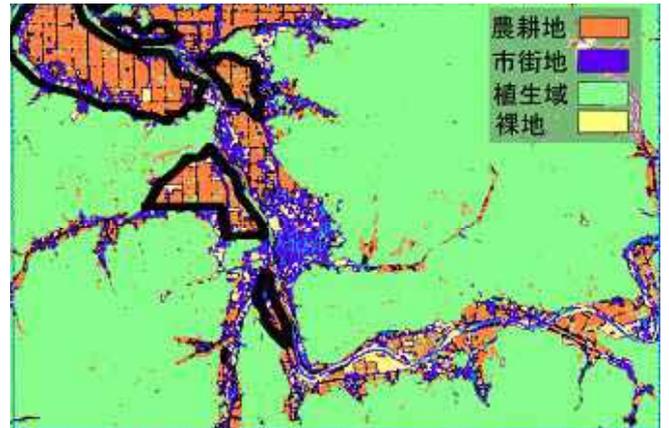


図 22 2004 年の洪水浸水域

図 22 は地表被覆分類図に 2004 年の洪水の浸水域を重ねがきしたものである。ほとんどの浸水域は農耕地であるが、市街地で浸水した地域もあり、その状況を知ることができる。

#### 10. おわりに

出石町周辺の江戸時代から現在までの期間についてのデータをまとめた。今後データをさらに充実させて、また、対象を豊岡市中心街までひろげる予定である。

#### 参考文献

- (1) 出石町史編集委員会編：「出石町史第一巻」；出石町；1984 年
- (2) 高橋洋二編：「城下町古地図散歩 5」；平凡社；1997 年
- (3) 岸本昭人：「出石周辺における GIS による水害に関するデータベース作成」；卒業研究報告書；2009 年
- (4) 伊藤康一：「円山川破堤による豊岡の洪水被災調査 1 報」；<http://leo.nit.ac.jp/~int/>

# 水位変化を考慮した海浜断面形状と 粒径分布特性に関する実験的研究

酒井 大樹\* 辻本剛三\*\*

An experimental study on cross-shore profile and sand grain size distribution  
under conditions of water level changes

Daiki SAKAI\* Gozo TSUJIMOTO\*\*

## ABSTRACT

In this study, focusing on the water level changes due to tidal wave action, a beach profile changes and sand grain size distributions at a mixed sand beach have been examined experimentally. The beach profile was measured using a slope gauge and sand grain sizes were measured using a digital camera. In order to examine the vertical distributions of sand grain size, the sand layer was sliced by about 5mm from the surface. In a water flume, irregular waves with Bretschneider-Mitsuyasu spectrum were generated for about one hour with changing the water level. It is found that the fine sand particles were deposited at the berm and it was the same as the result of our field study. That was the similar result in the field.

*Keywords:* beach, irregular wave, cross-section, mixture grain size, water level, grain size distribution

## 1. はじめに

わが国では「海岸保全」といえば、「防護施設を造ること」という考え方が約40年間続いた。その後、2000年に新海岸法が施行されたが、海岸保全の精神には、未だ「箱モノづくり」こそが保全事業であるという考えが色濃く残っている。このため、海岸が痩せるのを防ぐために投入した砂が流出しないよう、突堤、離岸堤、人工リーフなどにより箱庭のように囲い込むことが大事ということになった。しかし、自然の砂浜はそれ自体平面的、縦断的に安定化機構を備えており、その原理に基づいた砂浜づくりを行えば、防護施設としての砂浜づくりが可能である。そこで砂浜が海岸保全施設として位置づけられ、2000年以降は、養浜により砂浜を造成する事業が増えた。養浜によって形成された砂浜は、越波量の低減、生物の生息場、レクリエー

ション効果などの機能を有する<sup>(1)</sup>。養浜を行うにあたって重要なのは、防護的な役割を果たしながら、安全に人が利用できるということである。そのため、養浜後の際に地形がどのように変化するかを把握しておく必要がある。一般的に、水位を一定にした場合の海浜変形や砂の分級に関する研究は既に多数行われている。しかし、実際の海岸では潮位変化に伴い水位が変化しているが、水位変化の影響を考慮した研究は極めて少ない。さらに養浜で投入される砂が混合粒径であることが考慮されていない。そこで本研究では、混合粒径で構成されている砂浜で、水位が変化するときの海浜断面形状と粒径分布特性について調べることを目的とする。

## 2. 現地調査概要

2.1 調査場所 現地調査は、平成21年2月22日、2月23日、3月14日、4月11日、5月9日、5月10

\*専攻科 都市工学専攻

\*\* 都市工学科 教授

日、6月6日、7月6日、8月19日、9月14日にアジュール舞子海岸(兵庫県神戸市垂水区)で行った。

2.2 調査方法 現地の地形を干潮時の汀線から陸側に約15mの区間を勾配計を用いて、斜面角度を60cm間隔で計測した。底質粒径はデジタルカメラを用いて、表層を測線に沿って0.5m間隔で3か所ずつ撮影した。また、底質粒径の鉛直分布を調査するために、測線に沿って1m間隔で、表面から平均0.5cm間隔で底面をスライスし、画像を撮影した。

2.3 現地データの整理方法 Rubinの画像計測の方法に従って、撮影したデジタル画像より砂粒子の中央粒径と淘汰係数を求めた。Rubinの画像計測の方法とは、デジタル画像の基準となる矩形領域とその矩形領域から一定距離だけ離れた同じ大きさの矩形領域の輝度値を読み取り、空間的自己相関係数を求め、検定曲線と比較して粒径を決定する方法である<sup>(2)</sup>。この方法であれば篩い試験をする手間が省けるのでデータ整理にかかる時間の短縮を図れる。淘汰係数とは底質の均一性を示す量であり、値が小さいほど均一性が高い。淘汰係数  $S$  を導く式は以下の式(1)である。 $d_{25}$ 、 $d_{75}$  は粒径加積曲線において通過重量百分率 25、75%に対応する粒径である<sup>(3)</sup>。

$$S = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (1)$$

### 3. 実験概要

3.1 実験方法 長さ18m、幅0.6m、高さ0.8mの2次元造波水路の一端に表-1の底質で1/15勾配の斜面を敷設し、表-2のプレットシュナイダー・光易型のスペクトルを有する不規則波を作用させた。現地の潮位変化を再現するために、水深35cm~45cm~35cmを5時間に変化させながら波を作用させ、1時間15分毎にレーザー距離計を用いて2cm間隔で地形を計測した。粒径は現地と同様に表面粒径をデジタルカメラで撮影し、Rubinの画像計測の方法に従って求めた。鉛直方向の粒径分布は、最終地形の表面を数mmずつスライスしてデジタル画像の撮影を行った。表-1の偏わい度  $Sk$  は  $Sk = d_{75}d_{25}/d_{50}^2$  で定義されており、 $Sk < 1$  の場合、粒度組織が中央粒径付近に集中し、 $Sk > 1$  の場合、粒径加積

曲線が  $d_{50}$  よりも大きいほうに偏り、 $Sk < 1$  の場合、 $d_{50}$  より小さいほうに偏るということを意味する。

表-1 実験試料

|          | $d_{50}$<br>(mm) | $d_{75}$<br>(mm) | $d_{25}$<br>(mm) | 淘汰<br>係数 $S$ | 偏わい<br>度 $Sk$ |
|----------|------------------|------------------|------------------|--------------|---------------|
| 混合<br>粒径 | 0.46             | 0.62             | 0.36             | 1.31         | 1.03          |

表-2 実験波の条件

|             | 水深<br>(cm) | 不規則波       |           |            |           |
|-------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|
|             |            | 平均波        |           | 有義波        |           |
|             |            | 波高<br>(cm) | 周期<br>(s) | 波高<br>(cm) | 周期<br>(s) |
| 堆<br>積<br>型 | 35         | 2.022      | 0.886     | 3.207      | 1.043     |
|             | 40         | 2.183      | 0.893     | 3.536      | 1.032     |
|             | 45         | 2.322      | 0.907     | 3.768      | 1.070     |
| 中<br>間<br>型 | 35         | 7.085      | 1.226     | 11.301     | 1.410     |
|             | 40         | 7.472      | 1.208     | 12.265     | 1.412     |
|             | 45         | 7.682      | 1.178     | 12.905     | 1.399     |
| 侵<br>食<br>型 | 35         | 6.708      | 1.191     | 10.586     | 1.378     |
|             | 40         | 7.297      | 1.218     | 11.280     | 1.346     |
|             | 45         | 7.770      | 1.217     | 12.254     | 1.351     |

## 4. 現地調査結果

### 4.1 季節ごとの変化(2月~9月)

4.1.1 斜面形状の変化 図-1に2月~9月の斜面形状の変化を示す。2mから7mの区間では、2月から4月の間に堆積と侵食を繰り返していた。5月には10mより陸側で堆積しており、6月以降は0m~15mに渡って堆積していた。

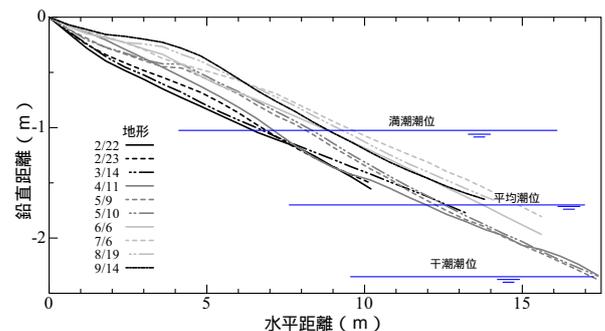


図-1 現地の地形変化(2月~9月)

4.1.2 表面の粒径の変化 図-2に2月～8月の表面の粒径分布の変化を示す。7月を除いて平均潮位と満潮潮位の間(8m 付近)では、表面粒径の変化が約 0.3mm という結果が見られる。他の箇所では表面粒径が0.5mm 以上変化しているのがわかる。また、平均潮位と干潮潮位の間では、干潮潮位に近づくほど粒径が大きくなるという傾向が見られる。

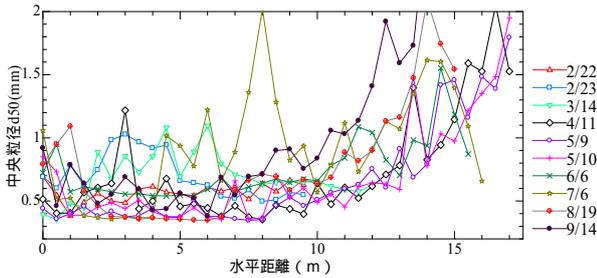


図-2 現地の表面粒径分布(2月～9月)

4.2 2月22日～2月23日の潮汐間での変化

4.2.1 斜面形状の変化 図-3に2月22日～2月23日の地形変化と表面の粒径分布の変化を示す。2月22日～2月23日は1日2回潮であった。満潮潮位の位置より岸側では堆積が進んでいた。堆積が進んだ箇所では表面粒径が大きくなった。満潮潮位の位置より沖側では表面粒径の変化はほとんどなかった。

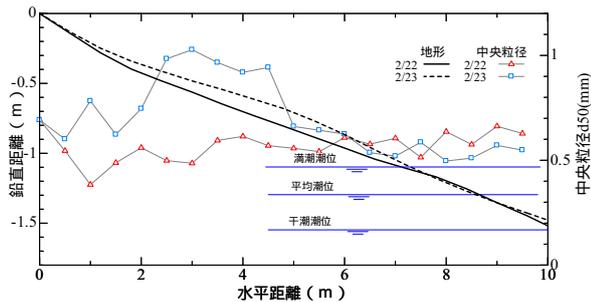


図-3 現地の地形変化と表面の粒径分布の変化 (2月22日～2月23日)

4.2.2 5m 地点の鉛直分布の粒径変化 図-4 に堆積している箇所の代表的なデータとして図-3 の 5m 地点の鉛直分布の変化を示す。2月22日では表層に粒径 0.6 mm の層が見られる。潮位変化後の 2月23日には22日に表層にあった層が深さ 50 mmより深いところに見られる。そして23日には表層に粒径の小さい層が見られ

る。これらより、潮位変化後は表層に粒径の小さい砂粒子が移動し、堆積したと推定される。

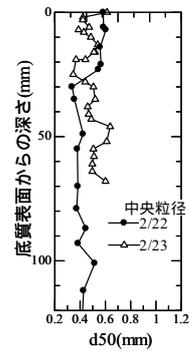


図-4 5m 地点の鉛直分布の変化 (2月22日～2月23日)

5. 実験結果

5.1 堆積型の波を作用させた場合

5.1.1 斜面形状の変化 図-5 に堆積型の波を作用させた場合の斜面形状の変化を示す。水深 35-40cm で 1m 付近に形成されたバームは、水深が 45cm まで上昇した後にフラッシュされ、0.5m 付近にシフトした。0.5m 付近にシフトされたのは、水深の上昇に伴い遡上点も上昇し、バームの位置の砂粒子が運ばれたからだと考えられる。その後、水深 40cm まで低下すると 0.5m 付近のバームはその形状を残し成長した。水深 35cm に低下後もバームの形状はそのまま残った。

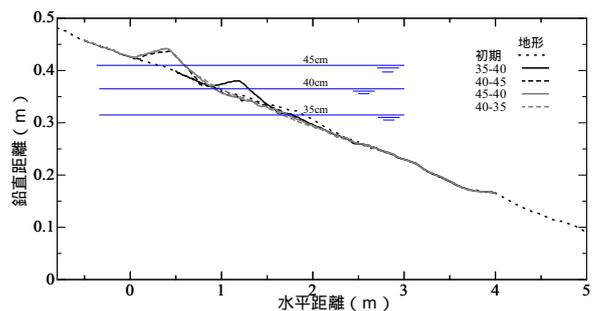


図-5 斜面形状の変化(堆積型の波を作用)

5.1.2 表面の粒径の変化 図-6 に堆積型の波を作用させた場合の表面の粒径分布の変化を示す。2m より沖側では表面の粒径にあまり変化がなかった。水深 35-40cm の時に形成された 1m 付近のバームの前後には、大きい粒径が見られ、頂上には小さい粒径が見られた。水深が 45cm まで上昇した後、1m 付近の粒径は小さく

なり、50cm 付近に形成されたバームの前後には大きい粒径が見られ、頂上には小さい粒径が見られた。これらの結果よりバームの前後では粒径が大きくなり、頂上では粒径が小さくなるということが明らかとなった。

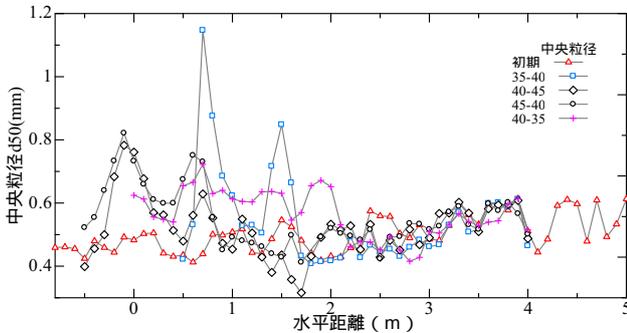


図-6 表面の粒径分布の変化(堆積型の波を作用)

5.1.3 鉛直分布 図-7 に堆積型の波を作用させた時の最終地形と 0.5m 地点の中央粒径の鉛直分布を示す。バームの厚さは約 50 mm である。そこで深さ 50 mm のところまでに注目した。表面を除き、そこから深さ約 10mm のところまでは中央粒径 0.35 mm 前後で淘汰係数が 1.1 程度の層が見られる。深さ 30 mm 地点では中央粒径 0.6mm 前後の層が見られ、ほかの地点では中央粒径 0.4 mm から 0.5mm 前後の層が見られる。以上のことから、バームの表層付近には均一性が高く小さい粒径の層が形成されていることがわかる。

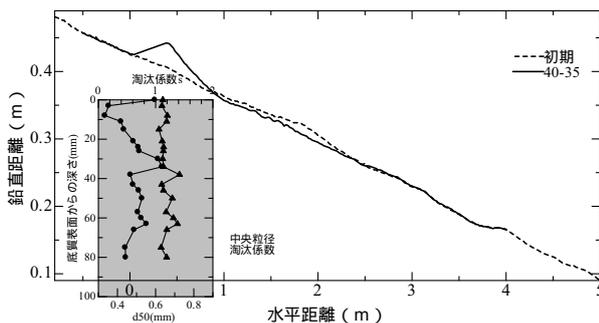


図-7 最終地形とバームの位置の粒径の鉛直分布 (堆積型の波を作用)

## 5.2 中間型の波を作用させた場合

5.2.1 斜面形状の変化 図-8 に中間型の波を作用させた時の斜面形状の変化を示す。水深 35-40cm に上昇させた時に 2.5m~3m に渡って形成されたステップは、水深が 45cm まで上昇するとフラッシュされ、岸方

向に約 50cm シフトされた。その後、水深 40cm に低下するとステップは大きく発達した。さらに水深 35cm まで低下するとステップは沖方向にシフトされ、水深 35-40cm の時に形成されたステップの位置よりも約 1m 沖方向に留まった。岸沖方向にステップがシフトするのは、水位の変化とともに碎波帯も移動するからである。また、水位が低下する際に、斜面中の地下水位が遅れて低下するため、沖向き流れが上昇時に比べて大きくなる。そのため、底質の流動が大きくなり、水深 40-35cm まで低下した時に形成されるステップの位置の方が水深 35-40cm に上昇したときに形成されたステップの位置より沖側に形成され则认为される。

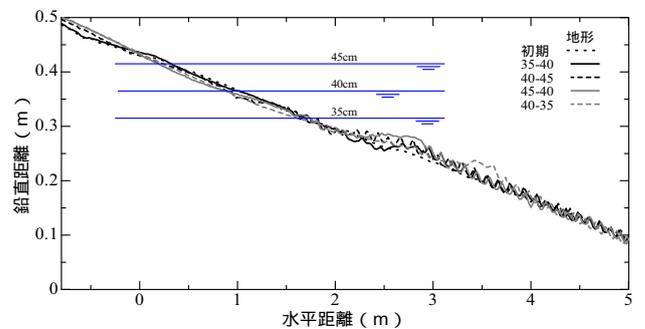


図-8 斜面形状の変化(中間型の波を作用)

5.2.2 表面の粒径の変化 図-9 に中間型の波を作用させた時の表面の粒径分布の変化を示す。0m 付近では、波を作用させてから水深の変化とともに粒径が粗くなるという結果となった。4m 付近では表面の粒径の変化があまり見られない。水深が 35cm の時の汀線付近では、波を作用させてから、粒径が 0.6 mm 付近で安定してあまり変化をしなくなった。

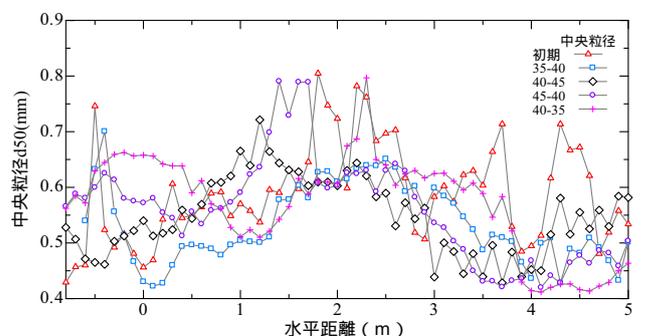


図-9 表面の粒径分布の変化(中間型の波を作用)

5.2.3 鉛直分布 図-10 に中間型の波を作用させた

時の最終地形と 3.6m 地点の中央粒径の鉛直分布を示す。ステップの厚さは約 50 mm である。そこで深さ 50 mm まで注目した。深さ 30 mm ~ 50 mm の間には中央粒径 0.5 mm 程度の層が見られる。深さ 50 mm までは中央粒径が 0.5 mm ~ 0.6 mm で、深さ 35 mm まで淘汰係数は約 1.2 で構成されており、均一性が高くなっている。これは、水位変化によってステップの位置が最大で約 1m 移動しているのが要因となり、粒径の細かい砂粒子は他の場所に運ばれてステップの位置では均一性が高くなったのではないかと考えられる。

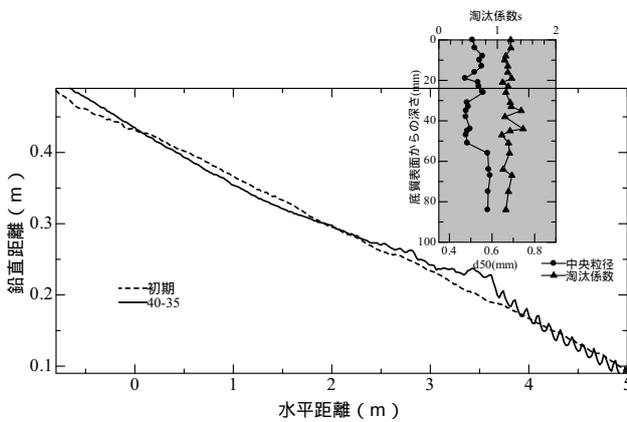


図-10 最終地形とステップの位置の粒径の鉛直分布 (中間型の波を作用)

### 5.3 侵食型の波を作用させた場合

5.3.1 斜面形状の変化 図-11に侵食型の波を作用させた時の斜面形状の変化を示す。水深 35-40cm に上昇させた時に形成されたバーは、その後水深 40-45cm に上昇させるとフラッシュされ岸方向にシフトされた。その後、水深 45-40cm に低下させるとバーは沖方向にシフトされた。水深 40-35cm に低下するとバーは 4m 付近までシフトされ、水深 35-40cm の時に形成されたバーの位置よりも約 1m 沖方向に留まった。岸沖方向にバーがシフトするのは、中間型の波を作用させた時のステップの移動と同様に、水位の変化とともに碎波帯も移動するからである。

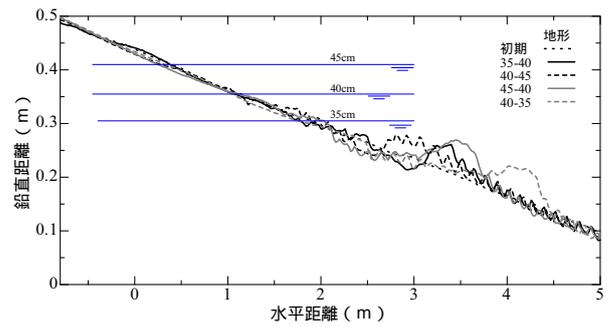


図-11 斜面形状の変化(侵食型の波を作用)

5.3.2 表面の粒径の変化 図-12に侵食型の波を作用させた時の表面の粒径分布の変化を示し、図-13に漂砂量の変化を示す。図-12より、0m 付近では波を与え始めてから水深の変化とともに粒径が粗くなるという結果となった。形成されたバーの前後では粒径が粗くなり、頂上では細くなるという結果となった。また、2m から 4.5m の区間では表面の粒径の変動が大きくなった。図-13より、2m から 4.5m の区間では、漂砂量が大きくなっている。以上より、漂砂量が大きくなる箇所では、地形変化が頻繁に起こるために表面の粒径の変動も大きくなったと考えられる。

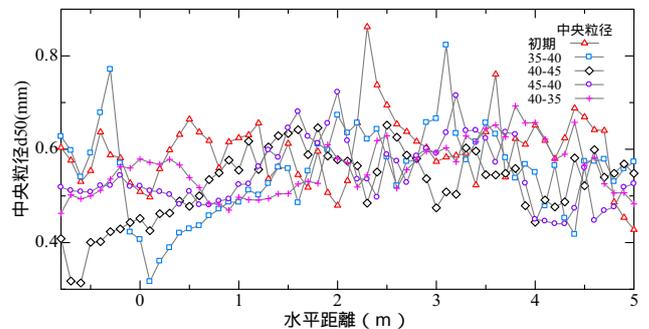


図-12 表面の粒径分布の変化(侵食型の波を作用)

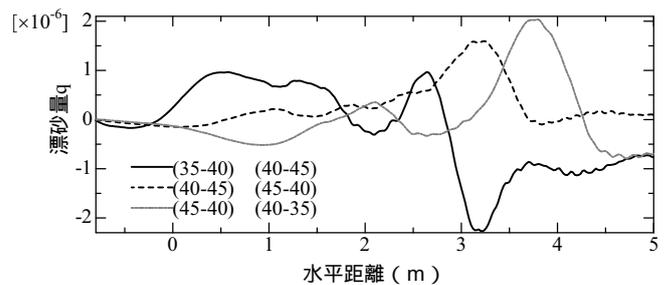


図-13 漂砂量(侵食型の波を作用)

5.3.3 鉛直分布 図-14に侵食型の波を作用させた時の最終地形と4.2m地点の中央粒径の鉛直分布を示す。バーの厚さは約80mmである。そこで深さ80mmまで注目した。表面を除くと、深さ80mmまで淘汰係数が約1.2で粒径は0.5mm~0.6mmで構成されており均一性が高くなっている。これは、水位変化によってバーの位置が最大で約1m移動しているのが要因となり、粒径の細かい砂粒子は他の場所に運ばれてバーの位置では均一性が高くなったのではないかと考えられる。

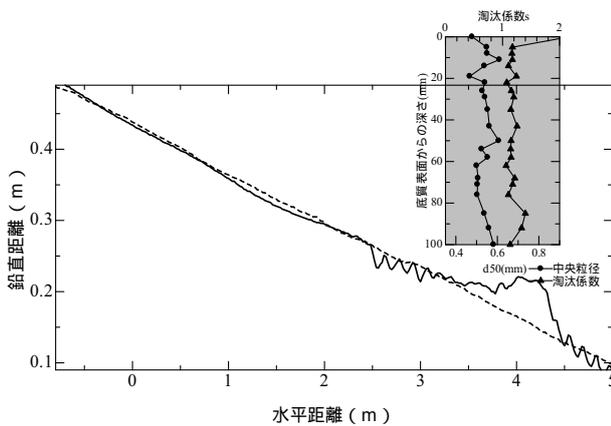


図-14 最終地形とバーの位置の粒径の鉛直分布  
(侵食型の波を作用)

## 6. 結論

本研究から以下のことが明らかとなった。

### (1) 現地のデータ

- ・現地の平均潮位と満潮潮位の間ではあまり表面の粒径の変化がない。平均潮位と干潮潮位の間では、干潮潮位に近づくほど粒径が大きくなるという傾向がある。
- ・堆積した箇所では小さい粒径の層が見られる。

### (2) 堆積型の波を作用させた場合

- ・水位の上昇に伴い、砕波帯が岸側に移動し、結果としてバームが陸側に移動して形成される。水位が低下する時には新たにバームは形成されない。
- ・バームの前後では粒径が大きくなり、頂上では粒径が小さくなる。
- ・バームには均一性の高い小さい粒径の層が形成される。このことは、現地で観測された結果と同様な傾向になっている。

### (3) 中間型と侵食型の波を作用させた場合

- ・水位の上昇に伴い、砕波帯が岸側に移動し、結果としてステップやバーが陸側に移動して形成される。
- ・水位の低下に伴い、上昇時と同様に砕波帯は沖側に移動するが、水位の低下に伴う沖向き流れが、上昇時に比べて大きくなるために、ステップやバーの形成場所が、より深い地点に移動している。
- ・移動にともない微細粒子がより沖側に運ばれることにより、ステップやバーの地点における底質はより均一性が高くなっている。

## 謝辞

実験や調査についてご指導を頂いた柿木哲哉先生、宇野宏司先生に感謝の意を表します。また、調査の実施及び分析にあたり、本科5年生の甲斐田秀樹さん、浜口繭子さんには大変お世話になりました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- (1)財団法人 土木研究センター:実務者のための養浜マニュアル、pp.2-pp18,2005.
- (2)辻本剛三、山田文彦、柿木哲哉:砂粒子画像を用いた底質粒径の計測法の妥当性に関する研究,海洋開発論文集,第24巻、pp.1207-1212,2008.
- (3)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 コロナ社、pp.80-82,pp.125-128,2003.

# 超高速鉄道における車内定常加速度

橋本 渉一\*

## Stable Acceleration of Rollingstock Inside in Ultra High-speed Railway

Shoichi HASHIMOTO\*

### ABSTRACT

In Tsuru City, Yamanashi Pref. Magnet levitation system has been carried running-tests. This Ultra high speed railway system is planed to construct between Tokyo and Nagoya in 2025. For Ultra high speed rollingstocks, riding quality is important at circular curve and transition curve section. Especially at overlap section, horizontal curve and vertical curve, the inside acceleration of rollingstock needs to estimated. In this report, acceleration parallel to rollingstock's floor , acceleration right angles to the floor, rolling angle velocity, rolling angle acceleration are calculated and compared with those of the present Shinkansen rollingstocks.

*keywords*: high-speed, railway, maglev, riding quality, guideway alignment,

### 1. はじめに

1872年に我が国における営業運転が開始された後、鉄道は旅客・貨物の陸上輸送の大部分を担い、国民生活、経済の発展を支える公共輸送機関として全国にその路線網が形成された。第二次世界大戦後の経済発展に伴う在来線の輸送需要の逼迫により新たに建設された東海道新幹線では世界初の200km/h運転が行われ、これを先駆けとして欧米の高速鉄道の時代が始まった。

次世代の超高速鉄道としての超電導磁気浮上式鉄道<sup>1)</sup>は、永年の技術開発期間を経て実用化に向け山梨リニア実験線<sup>2)</sup>が建設され1997年より現在まで試験走行が行われている。(写真1)

本研究は、将来営業運転が計画されている超電導磁気浮上式鉄道において、乗客への乗り心地<sup>2) 3)</sup>に関係する、平面および縦曲線が競合する場合の車内の定常加速度、緩和曲線区間を高速走行する際の車内床面平行加速度およびローリング角(床面回転角)の変化について在来新幹線における高速走行時の条件と比較し、評価することを目的とする。

### 2. 世界の高速鉄道の線形基準

世界の高速鉄道の設計最高速度と最小曲線半径<sup>3)</sup>

を図1に示す。近年の設計最高速度は300~350km/hで計画され、最小曲線半径は8,000m領域の規格が採用されている。乗客に作用する定常加速度を考慮し曲線半径には大きい値を採用することになるが、その反面ルート選定時の拘束は多くなる。

500km/h超の高速領域を計画している超電導磁気浮上式鉄道の場合には、この延長上で検討すると10,000m領域より大きい曲線半径を採用することも考えられるが、ルート選定上の自由度を大きくすることを念頭に、より小さい曲線半径を採用するため



写真1 浮上車とガイドウェイ  
(鉄道総合技術研究所 提供)

\* 都市工学科 教授

の検討が行われ、線路建設時の基準となる平面曲線、最大カント、緩和曲線長、縦曲線等の基本的諸元<sup>4)</sup>や乗り心地管理に関わる許容狂い等の基準値が定められた。<sup>5)</sup>

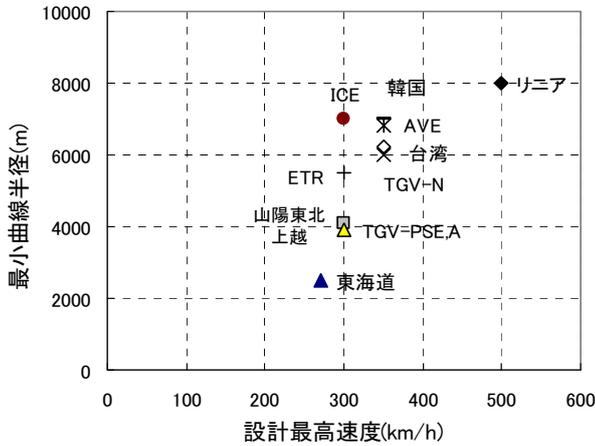


図1 設計最高速度と最小曲線半径<sup>3)</sup>

### 3. 曲線走行時の車内定常加速度

#### 3.1 平面曲線走行時の加速度

平面曲線走行時の車内で乗客の受ける床面平行および直角加速度は、式(1)(2)で表される。<sup>4)</sup>

$$\alpha_{hu} = \frac{v^2}{gR_h} \cos(\theta - \phi) - \sin(\theta - \phi) \quad \dots (1)$$

$$\alpha_{hv} = \frac{v^2}{gR_h} \sin(\theta - \phi) + \cos(\theta - \phi) \quad \dots (2)$$

- ここに
- $\alpha_{hu}$ ・・・平面曲線時の床面平行加速度 (g)
  - $\alpha_{hv}$ ・・・平面曲線時の床面直角加速度 (g)
  - $R_h$ ・・・平面曲線半径
  - $v$ ・・・走行速度
  - $g$ ・・・重力の加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>)
  - $\theta$ ・・・ガイドウェイのカント角
  - $\phi$ ・・・ガイドウェイに対する車体回転角

#### 3.2 縦曲線走行時の加速度

縦曲線走行時の走行速度、車内で乗客の受ける床面平行および直角加速度は、式(3)(4)で表される。

$$\alpha_{vu} = \frac{v^2}{gR_v} \cos(\theta - \phi) \quad \dots (3)$$

$$\alpha_{vv} = \frac{v^2}{gR_v} \sin(\theta - \phi) \quad \dots (4)$$

- ここに
- $\alpha_{vu}$ ・・・縦曲線時の床面平行加速度 (g)
  - $\alpha_{vv}$ ・・・縦曲線時の床面直角加速度 (g)
  - $R_v$ ・・・縦曲線半径

### 3.3 曲線競合時の加速度

地形、地質、沿線地域の条件を考慮しルート選定を行う場合、一般的に平面曲線および縦曲線の競合が避けられない場合も多い。

このような場合に車内定常加速度を緩和させることを目的とし、両曲線が競合することを積極的に利用することも過去に提案<sup>6)</sup>されている。

両曲線が競合する場合の車内定常加速度は、平面あるいは縦曲線が単独で存在する場合の定常加速度の和で求められ、式(5)(6)で表される。

$$\alpha_u = \alpha_{hu} + \alpha_{vu} \quad \dots (5)$$

$$\alpha_v = \alpha_{hv} + \alpha_{vv} \quad \dots (6)$$

- ここに
- $\alpha_u$ ・・・曲線競合時の床面平行加速度 (g)
  - $\alpha_v$ ・・・曲線競合時の床面直角加速度 (g)

### 4. 曲線走行中定常加速度の算出

#### 4.1 超高速鉄道および新幹線の線形

定常加速度を算出するための条件として、超電導磁気浮上式鉄道は山梨リニア実験線の諸元を用いる。また東海道新幹線では N700 系車両の 270 km/h 走行時の軌道面に対する車体姿勢制御+1° の場合、山陽新幹線では 500 系車両の 300 km/h 走行時の条件を用いる。これら線路諸元を表 1 に示す。

表1 浮上式および在来新幹線の線路諸元

|     | 速度(km/h) | 平面(m) | 縦(m)  | カント    |
|-----|----------|-------|-------|--------|
| 浮上式 | 500      | 8000  | 40000 | 10°    |
| 東海道 | 270      | 2500  | 10000 | 200 mm |
| 山陽  | 300      | 4000  | 15000 | 155 mm |

#### 4.2 床面平行および直角加速度

車体の台車に対するロール変位がなく床面はガイドウェイ・軌道面と平行で走行すると仮定した場合の、凹形縦曲線と平面曲線が競合時の、車内乗客が受ける床面平行加速度を図2に、床面直角の定常加速度を図3に示す。これらから得られる合成ベクトルの加速度を図4に示す。

縦曲線 40000m、平面曲線 8000mの山梨リニア実験線の線路諸元条件では、床面平行加速度 0.06 g、床面直角加速度 0.076 g と単独の加速度値としては許容範囲内にあると考えられるが、合成した加速度値は 0.097 g となっており、小さくはない。

凸形縦曲線と平面曲線が競合時の、車内乗客が受ける床面平行加速度を図5に、床面直角の定常加速度を図6に示す。これらから得られる合成ベクトルの加速度を図7に示す。

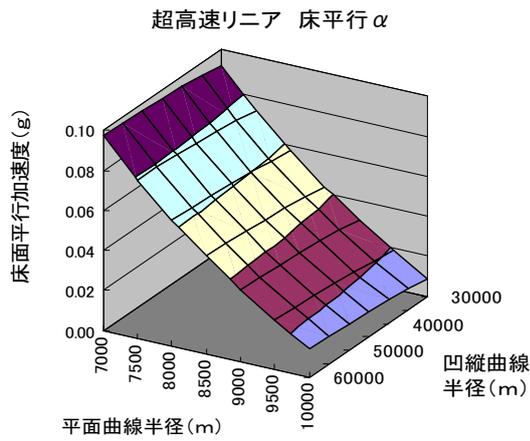


図2 凹縦・平面曲線競合：床面平行加速度

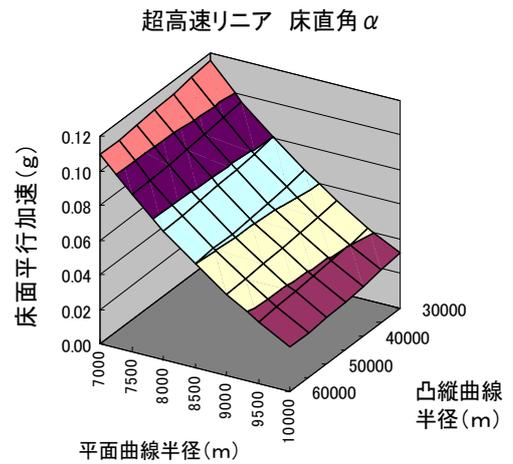


図5 凸縦・平面曲線競合：床面平行加速度

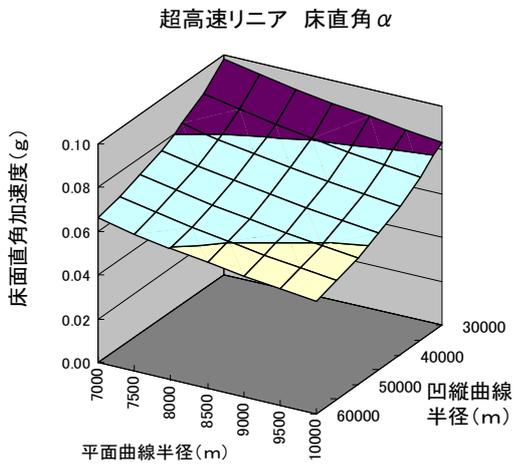


図3 凹縦・平面曲線競合：床面直角加速度

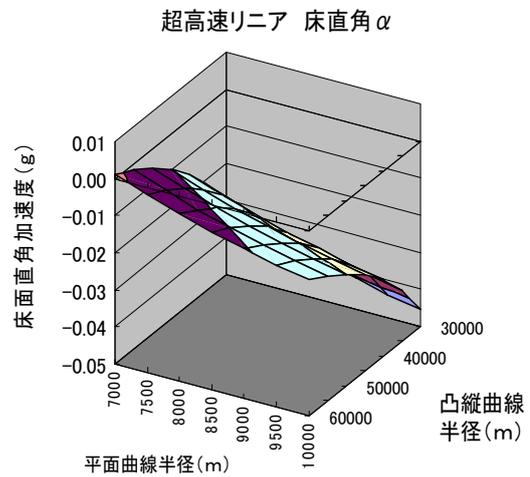


図6 凸縦・平面曲線競合：床面直角加速度

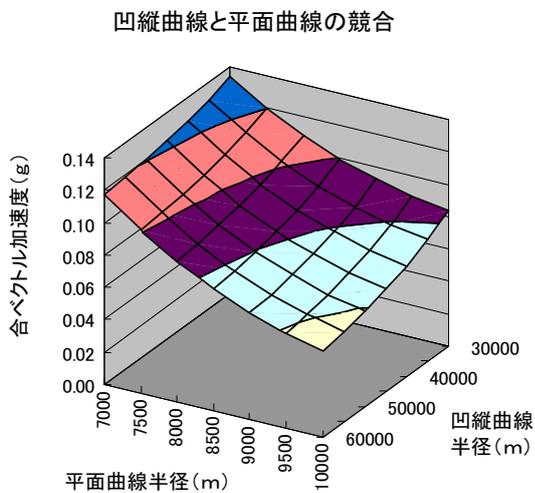


図4 凹縦・平面曲線競合：合ベクトル加速度

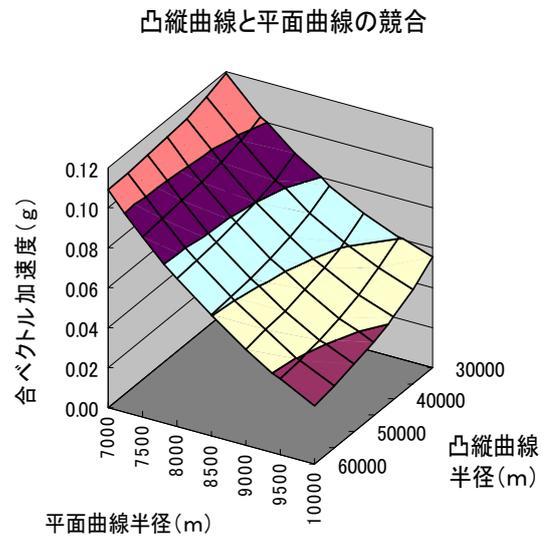


図7 凸縦・平面曲線競合：合ベクトル加速度

縦曲線 4000m, 平面曲線 8000mの山梨リニア実験線の線路諸元の条件では, 床面平行加速度 0.077 g となるが, 床面直角加速度は上向きに 0.021 g が作用する結果として, 合成した加速度値は緩和され 0.08 g に収まっている。

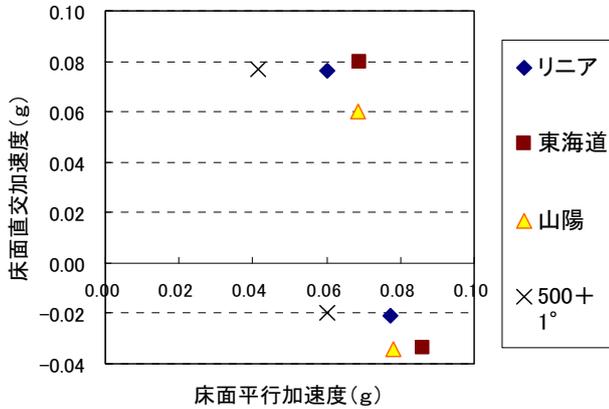


図8 曲線競合時の床面平行・直交加速度

前記の平面曲線および縦曲線が競合した場合の, 車内乗客が受ける床面平行および直角の定常加速度と, 500km/h 走行時にガイドウェイ面に対し +1° の姿勢制御を行った場合, 現行の東海道・山陽新幹線車両と比較した結果を図8に示す。正の加速度値は凹縦曲線走行時, 負の加速度値は凸縦曲線走行時を表している。

500km/h 走行時の姿勢制御なしでも, 現行の東海道・山陽新幹線車両内で受ける加速度より小さい値となり良好な状態を示しており, さらに +1° の姿勢制御を行った場合には, 床面平行加速度は縦凹曲線区間で30%以上, 縦凸曲線区間で20%以上の通減効果が見られる。

#### 4.3 550 km/h 領域の検討<sup>7)</sup>

超電導磁気浮上式鉄道のシステム設計は 500 km/h 領域の超高速走行を基準としているが, +50km/h の速度向上時を想定し, その場合に +2° の姿勢制御を行った場合を追加し 4.2 節と同様の検討を行った結果を図9に示す。

550m/h 走行時のガイドウェイ面 +1° の制御時の車内加速度は, 凹縦曲線および凸縦曲線走行時ともに現行の東海道新幹線より +30%以上の値を示すが, +2° の制御を行った場合には東海道新幹線に近い値を示すことができる。

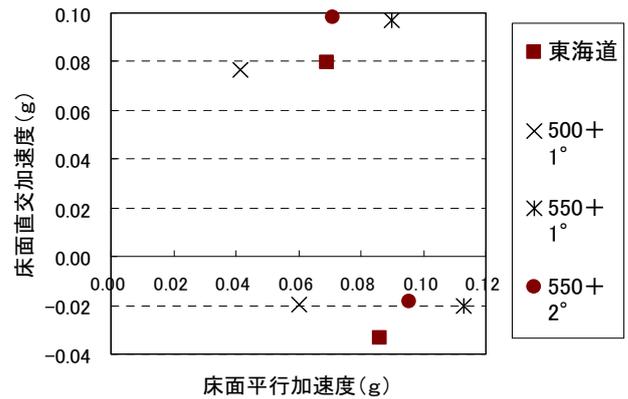


図9 曲線競合時の床面平行・直交加速度

#### 5. 緩和曲線の加速度変化率・ローリング角速度

直線から曲線区間および曲線から直線区間へ進入する場合に, 新幹線および浮上式鉄道の緩和曲線において曲率およびカントはサイン半波長で逓減され, その平面線形は x-y 座標軸において式(5)で表される。

また加速度の変化率(Jerk)は式(6), ローリング角速度は式(7), ローリング角加速度は式(8)で表される。<sup>4)</sup>

$$y = \frac{x^2}{4R} + \frac{L^2}{2\pi^2 R} (-1 + \cos \frac{\pi}{L} x) \quad \dots (5)$$

$$\frac{d^3 y}{dt^3} = \frac{\pi v}{2L(t)} \alpha_u \sin(\pi v t / L) \quad \dots (6)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\pi v}{2L(t)} \Phi \sin(\pi v t / L) \quad \dots (7)$$

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} = \frac{\pi^2 v^2}{2L^2(t)} \Phi \cos(\pi v t / L) \quad \dots (8)$$

- ここに
- y . . . 平面曲線 (m)
  - x . . . 進行方向距離 (m)
  - R . . . 平面曲線半径 (m)
  - v . . . 走行速度 (m/sec)
  - L . . . 緩和曲線長 (m)
  - $\alpha_u$  . . . 床面平行加速度 (m/s<sup>2</sup>)
  - $\Phi$  . . . 車体回転角 (°)
  - $\phi$  . . . ガイドウェイに対する車体回転角
  - t . . . 走行時間 (sec)

進行方向の距離軸 (m) に対する加速度の変化率 (Jerk) は図10に示す通り Sin 曲線で表され, 最大値は緩和曲線中央で現れる。同様にローリング角加速度を図11に示す通り Cos 曲線で表され, 最大値は緩

和曲線の始点および終点に現れ、サイン半波長逓減の場合にはその前後区間とは不連続となる。

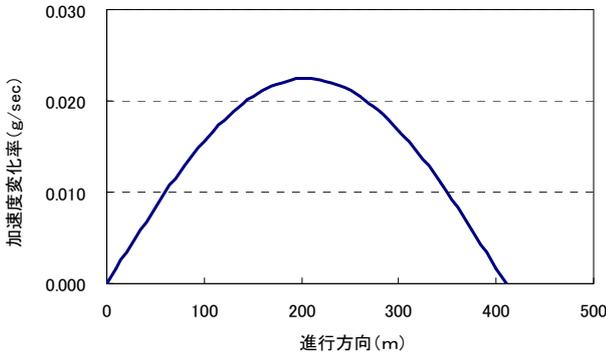


図 10 床面平行加速度の変化

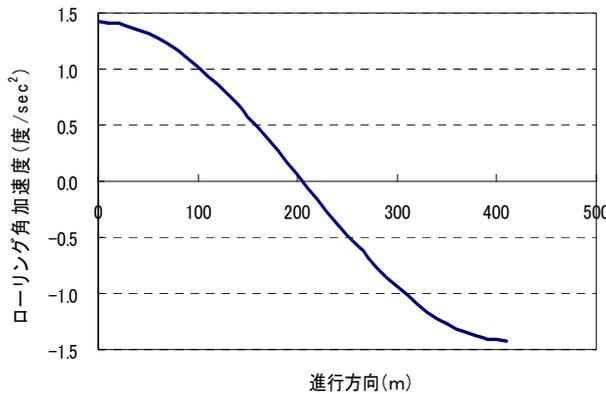


図 11 ローリング角加速度の変化

### 6.2 床面平行加速度と同変化率

表 2 に示す線路諸元の緩和曲線区間を高速走行した場合の、床面平行加速度および加速度変化率の最大値を図 12 に示す。

在来新幹線では床面平行加速度および加速度変化率とともに、東海道新幹線においてN700系車両で1°の車体姿勢制御を行い 270km/h 走行した場合が大きく、続いて山陽・東北・上越新幹線、制御なし車両の東海道新幹線、整備新幹線の順に小さくなっていく。

超電導磁気浮上車両が 500km/h 走行した場合には、整備新幹線における値とほぼ同等で小さい収まっている。1.5°の車体姿勢制御を行い 550km/h の速度向上を行った場合には、床面平行加速度は約 0.09 g まで増加し、同様に加速度変化率も増加する。

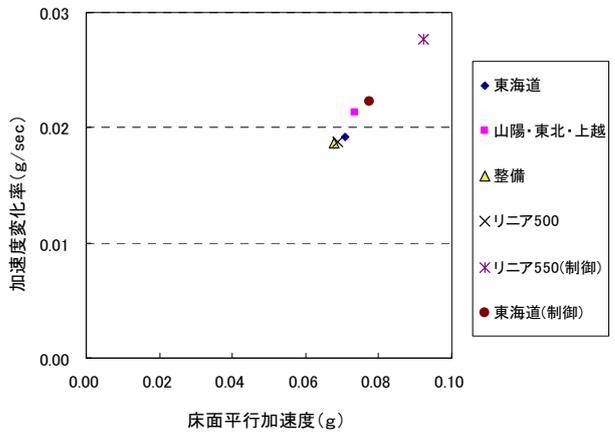


図 12 床面平行加速度の変化

## 6. 床面平行加速度・ローリング角速度および同変化率の算出

### 6.1 走行速度および曲線諸元

緩和曲線中の床面平行加速度の変化率・ローリング角速度を算出するための条件として、超電導磁気浮上式鉄道は山梨リニア実験線の諸元を用いる。東海道新幹線ではN700の軌道面に対する車体姿勢制御+1°時の270 km/h 走行、山陽新幹線は500系車両の300 km/h 走行時の条件を用いる。これら線路諸元を表 2 に示す。

表 2 浮上式および在来新幹線の線路諸元

|            | 速度<br>(km/h) | R半径<br>(m) | カント<br>mm 度 | 緩和曲線長<br>(m) |
|------------|--------------|------------|-------------|--------------|
| 東海道        | 255          | 2500       | 200mm       | 410          |
| 東海道(制御)    | 270          | 2500       | 200mm+1°    | 410          |
| 山陽・東北・上越   | 300          | 4000       | 155mm       | 450          |
| 整備         | 320          | 4000       | 200mm       | 505          |
| リニア500     | 500          | 8000       | 10°         | 800          |
| リニア550(制御) | 550          | 8000       | 10° +1.5°   | 800          |

### 6.3 ローリング角速度と同変化率

表 2 に示す線路諸元の緩和曲線区間を高速走行した場合の、ローリング角速度およびローリング角加速度の最大値を図 13 に示す。

ローリング角速度およびローリング角加速度とともに、東海道新幹線においてN700系車両で1°の車体姿勢制御を行い 270km/h 走行した場合が大きく、続いて整備新幹線、制御なし車両の東海道新幹線、山陽・東北・上越新幹線の順に小さくなっていく。

超電導磁気浮上車両が 500km/h 走行した場合には、東海道新幹線の制御付き車両より若干大きい値を示している。

1.5°の車体姿勢制御を行い 550km/h の速度向上を行った場合には、ローリング角速度は約 3.5°/sec まで増加し、同角加速度も 2.0°/sec<sup>2</sup>と増加している。

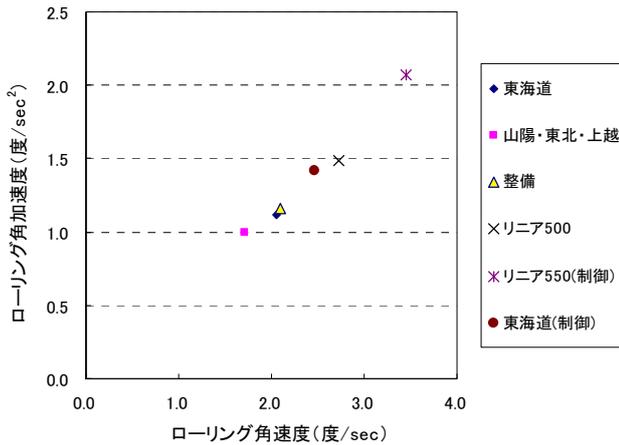


図 13 ローリング角速度の変化

- 3) 高井秀之：「高速鉄道の線形基準に関する調査」鉄道総研報告, Vol. 9, No. 12, pp. 61-66, 1995. 12
- 4) 橋本渉一：「超高速鉄道の線形基準」神戸高専研究紀要, No. 39, pp. 97-102, 2001. 3
- 5) 松浦章夫, 橋本渉一, 古川敦：「超電導浮上式鉄道ガイドウェイの施工精度と乗り心地レベル」, 土木学会論文集, No. 482/IV-22, pp. 67-76, 1994. 1
- 6) 八十島義之助「高速鉄道の曲線設計について」土木学会年次学術講演会概要集, IV-110, pp. 271-274, 1971. 10
- 7) 橋本渉一「超高速鉄道における平面・縦曲線競合区間走行時の車内加速度評価」土木学会関西支部年次学術講演会概要集, IV-27, 2009. 5
- 8) 橋本渉一「高速走行時の緩和曲線における車内加速度・ローリング角速度の変化」土木学会全国大会年次学術講演会概要集, IV-237, 2009. 9

## 7. まとめ

平面曲線および縦曲線が競合する区間において走行車両内の床面平行加速度および床面直角加速度, また緩和曲線区間の床面平行加速度と同変化率, 床面のローリング角速度と同角加速度に対し, 500km/hの超高速領域で走行する超電導磁気浮上式鉄道と在来新幹線の比較検討を行った結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 500km/h 走行時現行の東海道・山陽新幹線と比較するとより小さい値を示し,  $+1^\circ$  の姿勢制御を行った場合には, より良好な状態となる。
- (2) 550km/h 走行 $+1^\circ$  姿勢制御時の床面平行加速度および床面直角加速度は, 現行の東海道・山陽新幹線と比較して $+30\%$ 以上大きくなり $+2^\circ$  姿勢制御を行った場合には, 現行新幹線とほぼ同等の値を示す。
- (3) 500km/h 走行時の浮上式鉄道の床面平行加速度およびその変化率は, 現行新幹線と同等の値を示す。550km/h 走行時には現行新幹線より $+20\%$ の値を示す。
- (4) 500km/h 走行時の浮上式鉄道の床面ローリング角速度および角加速度は現行各新幹線より僅かに大きい値を示す。550km/h 走行時には現行新幹線より約 $+30\%$ の値を示す。

## 【参考文献】

- 1) 宮田尚彦, 松浦章夫, 高木肇：「超電導磁気浮上式鉄道」土木学会論文集, No. 415/VI-12, pp. 17-25, 1990. 3
- 2) 橋本渉一：「浮上式鉄道ガイドウェイの研究と技術開発」, 土木学会論文集, No. 619/ I -47, pp. 1-12, 1999. 4

# 高専におけるクラブ指導の実践と課題 ーバスケットボール部の活動を通してー

春名 桂\*

## Practice and Challenges of Coaching the Basketball Club at Technical College ーThrough the Activities of Basketball Clubー

Katsura HARUNA\*

### ABSTRACT

In the Technical College having a study period of five years, the club activities are considered to be one of important extracurricular activities to bring up students' human nature. Since five consecutive years without turning points cause slumps and burnouts to the students, many coaches are troubled about these problems.

However, by making the best use of the indispensable consistency and continuance to coaching the basketball club, by making the senior students role models, and by communicating with the junior students politely, I have considered that I could take advantage of five years effectively.

*Keywords:* coaching, basketball, technical college

### 1. はじめに

高等専門学校（以下、高専）は、5年間の就業年限を有し、同じ年齢層が所属する高等学校、大学のそれとは異なっている。その在学期間の差異が、高専教育の独自性（5年間一貫教育）を生む大きな要因であるとともに、卒業時に若く活力のあるエンジニアとして、世界へ羽ばたく源泉となっている。

高専も高校、大学と同様に、課外活動としてのクラブ活動が存在し、神戸市立工業高等専門学校（以下、本校）においても、活発な活動がなされている。

それは、本校の教育方針の一つである、人間性豊かな教育、すなわち、「心身の調和のとれた、たくましい感受性豊かな人間形成をめざして、教養教育の充実を図るとともにスポーツ・文化クラブ等の課外活動の振興につとめます<sup>(1)</sup>。」を具現化しているともいえる。

しかし、節目のない5年間という時間は、時に中だるみやバーンアウト（燃え尽き）、マナーリ化を生む危険性をはらみ、クラブを指導する上においては、多くの指導者が頭を悩ませる問題となっている。

一方では、平成19年に徳山工業高等専門学校（以下、徳山高専）が実施した専攻科修了生・本科卒業生・企

業対象アンケートにおいて、高専に対する社会の要望の中に、「基本的生活習慣」「礼儀」「あいさつ」といった、クラブ活動を通して醸成されるキーワードから、人間性を育むクラブ活動の重要性を、再認識することができる<sup>(2)</sup>。

本研究は、本校バスケットボール部の活動を参考に、5年間の継続をいかにサポートしていくかについて、考察する。

### 2. バスケットボール部の概要

#### 2.1 現在の部員数

平成21年5月現在、部員数は66名であり、本校にある運動部の中で、硬式野球部に次いで2番目の規模である。部員数の学年別・男女別内訳を表1に示している。

表1 部員数の学年別・男女別内訳人数

|    | 5年 | 4年 | 3年 | 2年 | 1年 | 合計 |
|----|----|----|----|----|----|----|
| 男子 | 4  | 7  | 11 | 11 | 11 | 44 |
| 女子 | 4  | 4* | 3  | 1* | 10 | 22 |
| 計  | 8  | 11 | 14 | 12 | 21 | 66 |

(\* 男子部の女子マネージャー1名を含む)

\*一般科（保健体育） 准教授

## 2.2 部員数の変遷

過去5年間における部員数を、毎年5月で集計した場合、図1に示す通り、増加から横ばい傾向で推移している。

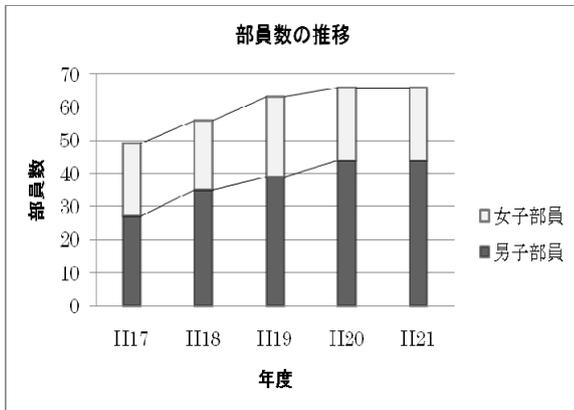


図1 部員数の年度推移

## 2.3 年間の活動計画

年間の活動計画を表2に示している。

下記大会以外に、市内の中・高校、大学と合同練習並びに練習試合を行っている。

表2 年間の活動計画

| 月   | 参加大会名及びクラブ行事   |
|-----|--|
| 4月  | 春の打ち上げ*<br>神戸市民体育大会**                                    |
| 5月  | 兵庫県高等学校総合体育大会**  |
| 6月  | 兵庫県高等学校総合体育大会**  |
| 7月  | 学園都市交流戦*<br>近畿高専体育大会*<br>兵庫県高等学校選抜優勝大会神戸地区予選**           |
| 8月  | 全国高専体育大会*  |
| 9月  | シーズン・アワード*<br>神戸市総合体育大会西区予選会**                           |
| 10月 | 明石高専定期戦*<br>神戸市総合体育大会**                                  |
| 11月 | 神戸市秋季大会**  |
| 12月 | 兵庫県高校新人選抜優勝大会神戸地区予選**<br>年末強化練習試合*<br>体育館の大掃除*           |
| 1月  | 兵庫県高校新人選抜優勝大会神戸地区予選**<br>神戸市立高校大会**                      |
| 2月  | 兵庫県高校新人選抜優勝大会**  |
| 3月  | 保護者情報交換会<br>OBOG会*<br>5年生送別会*<br>近畿地区高専春季交流大会*<br>F1カップ* |

(\* 5学年全体での参加、\*\* 3年生(2年生)以下の参加)

## 2.4 練習日

現在は、男子部、女子部がそれぞれ独立して活動している。学期中は男女とも週休2日、長期休業(夏季・冬季・学年末)中は、おおよそ3日間練習し、1日オフを設けるペースで練習を行っている。

学期中の練習日について、以下の表3に示している。

表3 学期中における週間練習計画

|    | 月   | 火   | 水  | 木   | 金   | 土日 |
|----|-----|-----|----|-----|-----|----|
| 男子 | 練習  | Off | 練習 | 練習  | Off | 練習 |
| 女子 | Off | 練習  | 練習 | Off | 練習  | 練習 |

## 2.5 チームの形態

毎年4月から8月までの間は、チーム内に最大5学年が存在し、同じコートで練習を行っている。そのため、年間計画に組み込まれている大会やテーマに向けて、適宜グルーピングを変え、練習の効率化を図っている。

まず、チーム全員に共通するファンダメンタル(基礎的な技術)や戦術を浸透させたい場合は、共通の練習を分け隔てなく、全員で行っている。

また、練習の主眼を高校大会においたときは、上級生対下級生というスクリメージ(紅白試合)を行っている。その際、上級生には、指導的視点を持たせることによって、下級生の技術の引き上げを図っている。さらに、下級生への指導を通して、上級生が自らの持つ技術を再確認させている。これにより、対外的に練習試合を求めずとも、チーム内のスクリメージを通して、下級生の力を伸ばすことができている。

一方、最大の目標である高専大会や、3月に行われているF1カップ(高専強化交歓大会)に向けての練習においては、学年に関わらないAチーム(代表候補)、Bチームを編成し、練習をしている。

この編成は流動的なものとし、適宜、入れ替えを行うことによって、選手のモチベーションを保っている。

以上の点についてまとめたものを、以下の表4に示している。

表4 練習テーマに即したチームの形態

| チーム形態     | ねらい                                    |
|-----------|--|
| 一律(混合)    | チーム全員に共通理解させる                          |
| 上級生&下級生   | 学年別に編成 上級生の指導により下級生をレベルアップさせる          |
| Aチーム&Bチーム | 学年に関わらず編成 Aチームは最終メンバーへ、BチームはAチーム入りを目指す |

### 3 バスケットボール部の取り組み

#### 3.1 活動方針の共有

バスケットボール部は、学校教育の一環としてのクラブ活動として存在し、また、バスケットボールを愛する同好かつ任意の集団であると位置づけている。

活動においては、大好きなバスケットボールを行うために、活動にかかる私的時間を共有できるという者の集まりであるという共通の理念を持たせている。

また、部には3つの大きな柱があり、シーズン当初のミーティングで、部員に周知させている。

〈3つのコンセプト〉

- 1 全国高専大会優勝を最大の目標とする
- 2 バスケットボールを通じて、地域に貢献する
- 3 学業とクラブの両立を大切にす

バスケットボール部におけるすべての活動が、全国高専大会優勝を目指したものであり、5学年すべての部員が共有するものである。

また、バスケットボールに競技者として関わるだけでなく、競技を側面からサポートする機会を設け、バスケットボールを通して得た知識や経験を還元している。

さらに、学生競技者として、バスケットボール偏重にならないように、学業とのバランスを求めている。

#### 3.2 新入部員へのアプローチ

毎年4月に新入生が入学し、多くの入部希望者が存在している。入部者の中には、バスケットボール経験年数に差異があるとともに、クラブに対して望んでいる思いが揃っていないのが現状である。

そこで、新入生がクラブを見学し、入部を決めかかる4月後半に、毎年新入部員オリエンテーションを実施している。

ここでは、クラブにおける指導方針や活動方針、チーム・コンセプト、年間スケジュール、活動にかかる費用等について説明し、現在の所属部員と活動に対する共通理解を図っている。

また、新入生の多くは、中学時代と生活環境が大きく異なるため、4月当初は学校生活に対する順化を最優先している。中には、中学校でクラブを引退してから、長い間、バスケットボールをすることに、待ち焦がれていた学生も存在するが、本校学生主事室の方針通り、一律に活動時間を18:00までとしている。

#### 3.3 勉学に対する不安を取り除く働きかけ

学生にとって最も大きなストレスといえる試験については、準備期間に差異を設けている。(2年生以上は試験7日前活動休止、新入生は約10日前活動休止)

一方、学力に不安を抱える2年生以上の学生に対しても、同様の措置を認めている。

また、学業に不安を抱え、休部を申し出る部員に対しては、面談をするとともに、休部期間を明示させて

いる。

#### 3.4 練習開始時における出欠確認

部内では、無断での欠席は認めていない。多くの学生が携帯電話を所有するようになり、電話やメールを通じて、必ず部員やマネージャーに連絡することを共通の約束としている。

練習の始まりには、全員で集合し、学年ごとに欠席報告をさせている。

このことは、チームに対して、各自がしっかりと責任を持つという自覚をもたせるとともに、横(学年間)のつながりを持たせる狙いもある。

#### 3.5 5年間で最高のプレイヤーに育てる指導方針

多くの方々のご尽力により、現在は高校の各種大会にすべて参加することができている。

ただ、下級生部員にとっては、他の高校には中学時代の同級生が多く存在し、高校生に負けたくないという思いが、非常に強い。

しかし、本校の場合、新チームの結成が8月末になり、高校生と比べて2カ月近く遅いという現状がある。そのため、目先の結果を求めて、一部の選手を起用するにとどまってしまうことは、選手のモチベーション低下の原因となりうる。

また、過度に、この世代を指導するあまり、3年生後半のバーンアウトや、4年生以降の伸びしろをなくすことにつながると考えている。

高校大会に臨むにあたっては、高校生に胸を借り、そこで培った力を、高専大会へつなげるといったスタンスを強調し、指導を行っている。

さらに、5年間というスパンで部員の成長をとらえ、高校世代終了後も、次の目標を設定することが大切である。

#### 3.6 新チームの結成

全国高専大会は、毎年8月に開催されるため、新チームの結成、つまり、シーズンの始まりを9月としている。

この場合、シーズン途中の4月に新入生加入による戦力の変更が生じるが、チームのゴールが全国高専大会であることを意識させるため、このようにシーズン設定をしている。

また、多くの5年生がこの大会で、チームから去ることを踏まえれば、新チームの立ち上げは、ここ数年この時期が望ましい状況である。

#### 3.7 上級生との対話を通したクラブ運営

高専クラブにおける最大のメリットは、16~20歳という異年齢の集団による交流と、上級生を主とした自治力であるといえる。

平日に顧問が会議等で付き添えない場合は、主将を中心に練習の打ち合わせを事前に行い、運営している。

また、メンバーの決定については、学生から原案を提示させ、顧問と相談の上、最終決定している。

### 3.8 最大目標は全国高専大会制覇

先に述べた全国高専大会優勝が、チーム・コンセプトであり、最大の目標である。

高専というカテゴリーにおいて、最高の目標を目指す過程こそが、教育方針である人間性の豊かさを育成するために、最もふさわしいと考えられる。

### 3.9 シーズン・アワード

シーズンを通して、お互いに高めあい、また、認め合う機会として、シーズン・アワードを設けている。

これは、表5に示す5部門について、部員が相互投票を行い、最多得票者を表彰するものである(写真1)。

なお、部門1については、年間の決められた試合の統計によるものであり、自動的に決定される。



写真1 シーズン・アワードの様子

表5 シーズン・アワードの表彰部門

| 表彰部門 |                          |
|------|--------------------------|
| 1    | フリースロー王 (年間最高成功率)        |
| 2    | 新人王 (1年時に最も活躍した2年生)      |
| 3    | ディフェンス王 (守備でチームに貢献した者)   |
| 4    | MVP (チームに最も貢献した者)        |
| 5    | MIP (学生競技者として部員の模範となった者) |
| 6    | 特別表彰                     |

また、部門6については、M.K. (2007年電子工学科卒) が受賞している。本校入学後にバスケットボールを始め、5年間で1度もユニホームを着ることはなかったが、最後の全国高専大会に向けて、練習に励んだ。下級生からの信望は厚く、今後もこのような学生が現れてほしいという思いで選出した。

### 3.10 上級生の地域貢献

3年生後半になると、参加できる大会が減り、大きくモチベーションが低下する傾向がある。

そこで、バスケットボールに選手として関わる立場から、選手以外の関わり方を経験することによって、バスケットボールに対する視野を広げることに取り組んでいる。

その一環として、毎年2月に開催される神戸市少年団バスケットボール大会には、大会の審判員として、3

年生以上の部員が参加している。多くの部員にとって、審判員という立場で、バスケットボールに関わることは初めての経験であり、小学生の懸命なプレイから元気をもらうとともに、自身が選手という立場に戻った時に、よりバスケットボールを深めることにつながっている。

また、毎年10月に開催される全日本女子車椅子バスケットボール大会には、競技補助役員として、試合運営に関わっている。

### 3.11 5年生の送別会

新入部員オリエンテーションが、クラブへの入学式とすれば、送別会は、クラブの卒業式である。

かつては、部員が集まって、食事をする形式で行っていた。平成19年度より、5年間継続した者への敬意をこめて、参加部員を全員正装とし、ホテルの宴会場を借りて、送別会を行っている(写真2)。



写真2 送別会で謝辞を述べる5年生

## 4 クラブ運営上の問題点と課題

### 4-1 退部した学生数と退部理由

多くの学生が志高く、4月に入部してくるが、様々な理由によって、退部している。退部を希望するすべての部員は、顧問、上級生、同級生により留意されるが、最終的には本人の意思を尊重している。

平成16年度から5年間で、入部から3年以内に退部した人数を表6に示している。

表6 年度別・男女別退部者数

|           | 男子部   |    | 女子部   |    |
|-----------|-------|----|-------|----|
|           | 入部    | 退部 | 入部    | 退部 |
| 平成16年度入学生 | 8     | 4  | 10    | 4  |
| 平成17年度入学生 | 7     | 3  | 5     | 1  |
| 平成18年度入学生 | 12    | 3  | 5     | 1  |
| 平成19年度入学生 | 13    | 4  | 5     | 2  |
| 平成20年度入学生 | 12    | 1  | 2     | 2  |
| 合計        | 52    | 15 | 27    | 10 |
| 退部率       | 28.8% |    | 37.0% |    |

入部から3年以内(3年次修了を含む)に退部する学生は、年度によってのばらつきがあるものの、男子

部で約4人に1人、女子部で3人に1人という割合である。

また、退部理由の内訳を以下の表7に示している。

表7 退部理由の内訳

| 退部理由           | 男子部 | 女子部 |
|----------------|-----|-----|
| 学業不振により勉学を優先   | 5   | 1   |
| アルバイトを優先       | 2   | 1   |
| 掛持ちクラブを優先（学生会） | 0   | 3   |
| 進路変更（3年次修了を含む） | 2   | 1   |
| 趣味を優先          | 1   | 2   |
| 家庭環境の変化        | 2   | 1   |
| モチベーションの低下     | 2   | 0   |
| その他            | 1   | 1   |
| 合計             | 15  | 10  |

入部の際には、経験の有無や家庭環境、通学時間等を考慮していないが、学校生活を送るなかで、様々な問題が生じていることが伺える。

特に、3年生以下では、高校大会も多く、クラブと学業の両立が難しくなっていることが伺える。

#### 4.2 引率及び練習の付き添いの問題

高校大会の時期になると、男子部及び女子部の高校チームと、本校で行う男子部・女子部の上級生の練習があり、4つのチームに分かれて活動せざるを得ない。

そのため、学外への引率や練習付き添い等、複数の顧問への依頼が必要となる。

幸いに、バスケットボール部には、5名の顧問がおり、快く、試合引率並びに練習の付き添いを引き受けて頂いている。

表8は平成20年7月26日（土）における顧問動静の一例である。

表8 顧問動静の一例（平成20年7月26日分）

| 顧問 | 部類     | 練習及び試合             |
|----|--------|--------------------|
| 1  | 男子部下級生 | 選抜地区予選（於；北須磨高校）    |
| 2  | 男子部上級生 | 本校で練習（13：00～17：00） |
| 3  | 女子部下級生 | 選抜地区予選（於；北須磨高校）    |
| 4  | 女子部上級生 | 本校で練習（9：00～13：00）  |

## 5 考察

### 5.1 高専教育におけるメリット

高専教育のクラブ指導においては、5年間という時間が最大のメリットである。それは、「一貫性」と「継続性」という人間教育に欠かせないエッセンスを十分に活用できるからである。

16～20歳の異年齢集団が、共通の目標を有して、年間を通じて活動していく中で、社会で必要とされる様々な人間力の醸成を最大に引き出せる活動であると

考えられる。

### 5.2 ロールモデルとしての上級生

5年間の活動のなかで、高校大会を終えた上級生が、常にモチベーションを高く保ち、また、学校生活において、それぞれのゴールに向かって邁進していく姿が、下級生にとって何よりのロールモデルとなりうる。

確かに、就職試験や進学準備等で、不十分な活動しかできない期間も存在するが、クラブとの両立を念頭に置き、時間をやりくりしながら参加する姿勢こそが、本来の学生競技者の在り方であり、また、本校教育理念である、「心身の調和のとれた、たくましい感受性豊かな人間形成」をサポートすると考える。

また、それらを実現した上級生に、普段から間近で接している下級生が、「自分たちもできるんだ」という自信を持つことも、クラブにおいては非常に有効な手段であり、クラブを活性化させると考えられる。

### 5.3 下級生へのコミュニケーション

3年生以下における退部の留意については、本人へのコミュニケーションを始め、学級担任や教科担当とのコミュニケーションが不可欠であると考えられる。

学年末における進級認定だけでなく、日頃のトラブルや家庭環境の変化など、可能な限り早くから、情報を入手し、対処しておく必要性を感じている。

また、日頃から、同級生同士のコミュニケーションの存在や、グループ作りなどを、把握することも大切であると考えられる。

### 5.4 5年間計画の確立

これらの実現を可能にするために、指導する側が、5年という時間軸を持ち、特徴的に発生するモチベーション低下の時期を予見し、回避していく術を持つことが大切である。

言い換えれば、この時期に最も大切にすべきことは何かという明確な指導方針を持たなければならない。また、クラブ活動を含め、それ以外の日々の生活場面で、この指導方針を具現化する学生とのコミュニケーションが肝要であるといえる。

## 参考文献

- (1) 平成21年度 神戸市立工業高等専門学校 学生便覧
- (2) 平成19年度 徳山工業高等専門学校 「専攻科修了生・本科卒業生・企業対象アンケート」



# 可能性と蓋然性—ヴォルフとカントの差異

手代木 陽\*

## Möglichkeit und Wahrscheinlichkeit—Der Unterschied zwischen Wolff und Kant

Yo TESHIROGI\*

### ABSTRACT

Logik der Wahrscheinlichkeit, deren Konzept Leibniz als erster im 17. Jahrhundert erdacht hatte, ist die Logik, mit der aufgrund des Beweises der Grad der Wahrhaftigkeit der Hypothese mathematisch erwogen wird. Leibniz begreift die Wahrscheinlichkeit ontologisch als den Grad der Daseinsmöglichkeit der Sache, der nach dem Grad der Vollkommenheit der Sache bestimmt wird. Nichtsdestotrotz werden Bedenken gegen den Determinismus in seinen Gedanken gehegt, denn dieser Grad ist nach der Kompatibilität der Sachen bestimmbar, die aufgrund des Prinzip des Widerspruchs bestimmt ist. Wolff begreift die Daseinsmöglichkeit als die Möglichkeit in dieser Welt, deren Grad in der Kausalbeziehung auf die wirkliche Ursache bestimmt ist. Weil die Wirklichkeit dieser Welt aber sich auf deren Vollkommenheit gründet, ist es wahrscheinlich, daß der Grad der Daseinsmöglichkeit nach Wolff auch aufgrund des Prinzip des Widerspruchs bestimmt ist. Kant verneint die Logik der Wahrscheinlichkeit in der kritischen Periode seiner Philosophie und begrenzt die Beurteilungsmöglichkeit der Wahrscheinlichkeit auf die Mathematik. Er begreift sie als den Grad der Daseinsmöglichkeit der Sache wie Leibniz, aber bestimmt diesen Grad nicht aufgrund des Satzes des Widerspruchs, sondern aufgrund des Grundsatzes der Möglichkeit der Erfahrung. Dies vermindert die Bedenken gegen den Determinismus bei Leibniz und Wolff.

*Keywords:* Wahrscheinlichkeit, Grad der Möglichkeit, *possibilitas extrinseca*, *necessitas hypothetica*, hypothetische Möglichkeit

### 1. はじめに

一般に 17-18 世紀のドイツの理性主義哲学においては、もっぱら認識の確実性が志向され、「蓋然性」(Wahrscheinlichkeit, *probabilitas*) は低次元の認識の特徴と見なされたと考えられている。しかしこうした蓋然性を合理的に基礎づける試みは、すでにこの時期の理性主義哲学の内部において行われていた。蓋然性には様々な解釈があるが、本稿では「可能性の度合い」としての蓋然性に着目し、まずライプニッツの「蓋然性の論理学」の構想とその哲学的基礎を考察した上で、ヴォルフとカントにおける蓋然性の基礎について考察する。

### 2. ライプニッツにおける「蓋然性の論理学」の構想

古代・中世において「蓋然性」は知識から区別された「通念」(*endoxa*) に属していた。知識が必然的な論証から得られるのに対して、通念は権威ある書物や人の証言によってその確からしさが是認されるに過ぎず、知識

\*一般科 教授

よりも劣るものと考えられていた。17 世紀になると蓋然性は、パスカルらによって「確率」として見いだされ、数学の主要な分野の一つとして展開されるようになる。その哲学的基礎づけを最初に試みたのがライプニッツである。彼は 1678 年の小論『不確実性の算定について』の中で、公平な賭けの計算における期待の正当化の問題に取り組んでいる<sup>1</sup>。彼は蓋然性を「可能性の度合い」あるいは「平等に可能な場合の総数に対する好適な場合の割合」と捉え、その基礎が「相互に独立した事象の起こる可能性の等しさ」にあると考えた。たとえば 1 つの骰子を振って 3 が出る確率が 6 分の 1 であることは、6 つの目の出る可能性が等しいことを前提としている。しかし彼は蓋然性をたんに数学においてのみならず、論理学においても展開しようとしていた。それがいわゆる「蓋然性の論理学」(*Logica probabilium*) の構想である。

ライプニッツは確率の理論を学ぶ以前に、法律問題における「仮説」と「証拠」の関係の問題に取り組んでいた。そこで彼は蓋然性を、仮説が証拠によって支持され

る度合いと考えていた。「蓋然性の論理学」の構想は、この2つの蓋然性の意味を結合し、数学的な確率の定理に基づいて、仮説が証拠によって支持される度合いを推理計算するというものであった<sup>2</sup>。すなわちわれわれは一方において、ある事象が一定の頻度で生じる傾向性を統計的に把握している。他方われわれはこの傾向性に基づいて、次の試行でその事象が生じる可能性の度合いを推理する。たとえばデータ  $r$  が、繰り返される試行において結果  $E$  が一定の頻度  $f$  で生じる傾向性を示すとする。すると「次の試行で  $E$  が生じる」という仮説の蓋然性は、 $r$  という証拠によれば  $f$  となる。このようにしてわれわれが複数の仮説の蓋然性を比較し、そこから最も高い蓋然性を持つ仮説を選択できるならば、われわれにとってきわめて有益であるだろう。I. ハッキングによれば、「蓋然性の論理学」の最も優れた哲学的基礎づけはライプニッツの形而上学にある<sup>3</sup>。次にこの解釈を検討する。

### 3. 「蓋然性の論理学」の哲学的基礎—I. ハッキングの解釈とその批判

われわれが数学的な確率の定理に基づいて、次の試行である事象が生じる仮説を立てる場合、その事象が生じる「可能性の度合い」を考慮する。問題はこの可能性の度合いがいかなる根拠に基づいて規定されるか、という点にある。ハッキングはその根拠をライプニッツの「可能的なものは現実存在を要求する」という思想に求める。ライプニッツは『普通学・記号法』で次のように述べる。

…われわれが、A、B、C、Dが本質に関しては等しく完全に、現実存在に関しては等しく要求に応じて、等しく存在すると見なすならば、そしてDはAともBとも両立できないが、AはDを除いてどれとも両立可能であり、BはCと両立可能であると見なすならば、Dを除いたA、B、Cという結合が結果として現実に存在する。Dが現実に存在することを要求するならば、Cのみが共在可能であろう。したがって、CDの結合はABCの結合よりは不完全に現実に存在するであろう。したがって、物が最大完全性の度合いに従って現実に存在することは明らかである<sup>4</sup>。

ここではA、B、C、Dという、それぞれ独立には等しく起こりうる可能性を持っている要素が、「両立可能性」という性質に従って、その可能性に優劣が生じることが説明されている。これらの要素が存在する可能性を決定しているのは「完全性の度合い」である。つまり各要素間の両立可能性の程度が高いほど、個々の要素の完全性の度合いが高まり、最大の完全性を有するものが現実に存在しうるのである。ライプニッツはこの完全性の度合いを「本質ないしは実在性の量」と見なしている<sup>5</sup>。この

思想は『弁神論』においても展開されている。すなわち神は無数の「可能的諸世界」の中から「最善の世界」を選び現実化した、それは完全性の度合いにおいて最大である世界こそが最善の世界であったからである<sup>6</sup>。

このようなライプニッツの思想が「蓋然性の論理学」の哲学的基礎を与えようというハッキングの解釈は、事象の可能性の度合いがその現実化以前に規定可能であることを説明できるという利点を持っていると思われる。たとえば2つの骰子を1度投げた時に出る目の合計が9になる可能性は7になる可能性の3分の2であることは、実際に骰子を振る以前に出る目の組合せによって予め決まっているとも言える。しかしこの思想には事象の完全性の度合いが可能性の度合いのみならず、現実化までも決定しているという疑いがある。もし神が自らの自由な意志で最善の世界を選んで現実化したとすれば、あらゆる可能的諸世界は等しい程度に可能でなければならなかったはずである。確かに先の両立可能性の例においては、独立した個々の要素は等しく存在する可能性を持っていた。しかしこうした要素の相互関係によって、予めその可能性に優劣が生じるとすれば、神の意志もそのメカニズムに必然的に従わざるをえないのではないだろうか。

このような疑問に対しては、ライプニッツは次のように考えている。神が最善の世界を選択する必然性は、「その反対が矛盾を含む」という意味での論理的・絶対的必然性ではなく、「その反対が矛盾を含まない」という意味での仮定的・道徳的必然性である<sup>7</sup>。すなわち神には完全性において劣った世界を選択する自由があったのである。さらにこの選択はしかるべき理由に促されているが、それは「傾かせるだけで強いることはない」理由であり、神は強いられたのではなく、自発的に最善の世界を選択したのである<sup>8</sup>。

確かにライプニッツは複数の可能的諸世界の存在を認めている点で、スピノザの宿命論を緩和しているとも言える。しかし現実に存在しうるのは唯一最善の世界のみである。すなわち完全性において劣った世界は、「存在する可能性が低い」のではなく、「その可能性を持たない」のである<sup>9</sup>。しかも各要素間の両立可能性を決定しているのは「無矛盾性」の原理である<sup>10</sup>。したがって完全性の度合いも、各要素がどこまで矛盾なく共在しうるかによって決定される。神が自発的に最善の世界を選択したとしても、その根拠が無矛盾性に基づくとすれば、その選択の必然性は限りなく論理的・絶対的必然性に近づくであろう。蓋然性が「その反対が矛盾を含まない」という仮定的・道徳的必然性を含意する概念であるとすれば、ハッキングの解釈は困難であると言わざるをえないであろう。ではかかる「蓋然性の論理学」の構想とその哲学的基礎について、ヴォルフはどのように考えていたであろうか。

## 4. ヴォルフにおける可能性と蓋然性

### 4. 1. ヴォルフにおける「蓋然性」の意味

L. C. マドンナによればヴォルフの蓋然性にはまず「主観的」な蓋然性と「客観的」な蓋然性の区別がある<sup>11</sup>。前者が個人的な認識の制約性に由来するのに対し、後者は物そのものの性質に由来するが、ヴォルフにおいては人間の知性一般に課せられた制約によるものであると考えられている。ヴォルフの関心はこの客観的蓋然性に向けられる。客観的蓋然性にはさらに二つの意味の区別がある。ひとつは賭け事の結果の考察において注目されるような、ある特定の出来事の物理的条件を問題とする「賭博的」(aleatorisch)な側面。ライプニッツにおいてはこの側面は「等可能性」の原理によって説明されたが、ヴォルフにおいては「十分な根拠」に対する「不十分な根拠」の関係によって説明される<sup>12</sup>。後に見るようにこの見解はカントにも継承される。もうひとつは仮説とこれを確証する証拠との関係という「認識論的」な側面<sup>13</sup>。これらは先に述べたライプニッツの「蓋然性の論理学」の二つの要素に相当する。しかしヴォルフはこの二つの意味を明確に区別する。

われわれはつねに蓋然性のみを持つ諸命題を、仮説や恣意的な諸命題と混同してはならない。というのも、前者は蓋然性(確率)の法則にしたがって、他の根拠から導出されるのに対して、後者はたんに、それが真として確定される場合に、経験が教えることがいかに生じるかが、そこから説明されるのを見いだすがゆえに、想定されるからである(括弧内は論者が補った)<sup>14</sup>。

ヴォルフは後者をア・ポステリオリな帰納推理に限定し、不十分に証明された「蓋然的意見」(opinio probabilis)として前者から区別するのである<sup>15</sup>。このことはヴォルフがライプニッツと比較して、「蓋然性の論理学」やこれと密接に関係している「記号結合法」(ars characteristica combinatoria)の構想において懐疑的である、という評価に対応すると思われる<sup>16</sup>。その一方でヴォルフにおいても「蓋然性の論理学」についてしばしばその「有用性」が指摘されており<sup>17</sup>、さらにこうした蓋然性を正当に評価するためには、論理学のみならず、「存在論や他の哲学の原理に依存する特殊な原理が必要」<sup>18</sup>であるとも述べられている。しかしヴォルフは蓋然性の評価がこうした原理に依存している側面を必ずしも明らかにしてはいない<sup>19</sup>。そこでわれわれはハッキングが取り上げた「可能的なものは現実存在を要求する」というライプニッツの思想がヴォルフの哲学にあるかどうか、またあるとすればそれはどう解釈されているかを考察し、ヴォルフにおける蓋然性の哲学的基礎について検討したい。

### 4. 2. 「内的可能性」と「外的可能性」の区別

ヴォルフの主要公刊著作を見る限り、ライプニッツのような、「可能的なものが、現実存在する以前に、現実存在を要求する」という思想そのものは見いだされない。その代わり「可能的なものが「現実性にも至る」という記述が見いだされる。ヴォルフによれば、「可能的であるもの」の広義の定義は「いかなる矛盾をも含まないもの」であるが、狭義の定義は「現実性にも至るもの」であり、「この世界において可能的なもの」である。また前者はその可能性の根拠をそれ自身のうちに見出すがゆえに「内的に可能なもの」(possibile internum sive intrinsecum)とも称され、後者はそれ自身では現実性に至ることはできず、外からの原因によって現実性に至るがゆえに「外的に可能なもの」(possibile externum sive extrinsecum)とも称される<sup>20</sup>。確かにヴォルフは、事象の「存在が規定されること」を、その事象の可能性に「対立(矛盾)しない」という「内的なこと」とも見なしている<sup>21</sup>。しかしヴォルフの哲学において諸事象が存在する可能性の度合いに差異が認められるのは、「この世界」における現実的原因との関係によって規定される「外的可能性」についてである<sup>22</sup>。

ヴォルフによれば、ある事象が「外的に可能」である度合いはその内的な本質によってではなく、「この世界」における他の「可能的存在者」(ens potentiale)や「現実的存在者」(ens actuale)との因果関係において決定される。その存在の十分な根拠を現実的存在者において持つ可能的存在者は、存在に「最も近い可能性」(potentia proxima)のうちにあると言われ、可能的存在者において持つ存在者は「隔たった可能性」(potentia remota)のうちにあると言われる。「隔たった可能性」のうちにある存在者は相互に系列をなし、ある存在者は「数的な度合いにおいて」他の存在者よりも現実存在に近いと言われる<sup>23</sup>。たとえば「人類が石油を消費する」ことが原因で「地球温暖化」が生じ、「地球温暖化」が原因で「極地の氷が溶け、海面が上昇する」とする。「地球温暖化」は「人類が石油を消費する」ことを直接の原因として起こるが、「極地の氷が溶け、海面が上昇する」ことは「地球温暖化」という現象を介さなければ起こりえない。そこで前者は後者よりも「隔たった可能性」のうちにあると言えるだろう。では蓋然性をこの「外的可能性の度合い」として解釈することは可能であろうか。次にヴォルフにおける外的可能性と必然性の関係について考察してみよう。

### 4. 3. 「仮定的必然性」と外的可能性

「可能的なものが現実存在を要求する」というライプニッツの思想においては、事象の可能性が完全性の度合いによって規定され、その度合いが無矛盾性に基いて規定される点に決定論的な難点があった。ヴォルフは「内的に可能なもの」は「いかなる矛盾をも含まぬもの」<sup>24</sup>で

あり、したがって「絶対的に必然的」なものであるのに対し、「外的に可能なもの」は他の事象がその原因として存在する、という条件の下でのみ可能なものであり、したがってその必然性は「仮定的必然性」(*necessitas hypothetica*)であるとする。すなわち、

外的な可能性はまさしく仮定的な必然性を含んでいる。外的に可能であるものは、可視的世界にそれ自身の定められた原因が置かれるがゆえに存在する。しかしある存在の必然性は物の本質から生じるのではなく、同じ物の系列の中にある他のものの現実性から生じるから、外的な可能性には仮定的な必然性だけが伴うことは、論証によって必然的に帰結できる<sup>25</sup>。

先の例で言えば「地球温暖化」は「人類が石油を消費する」事を原因とするが、「石油を消費する」ことは人類の本質に属することではなく、もし人類が石油よりも先に他のエネルギー源を発見していれば、「地球温暖化」も必ずしも起こらなかつたであろうし、「極地の氷が溶け、海面が上昇する」こともまた然りであろう。ヴォルフ自身宿命論に対して、外的可能性を内的可能性から区別することの重要性を指摘している<sup>26</sup>。

ところで外的可能性がこの可視的世界における因果系列上に位置を占めるという条件の下での可能性を意味するとすれば、それが仮定的必然性を含意するのは、この世界以外の「可能的諸世界」を前提しているからである。ヴォルフは「内的に可能なもの」がこの世界で現実態を伴わない場合でも、別の世界で現実態を伴うと考えている。すなわち「他の可能的諸世界が存在していて、ここでは現在の世界において現実態を伴うことのない諸々の可能的なものが現実態に至る」<sup>27</sup>のである。ではなぜ他の世界ではなくこの世界が現実存在するのであるのか。これに対するヴォルフの解答はライブニッツのそれとまったく一致している。すなわちこの現実的世界があらゆる世界の中で最善の世界であるからであり、「そこにおいて最大の完全性が見出される」<sup>28</sup>世界であるからこそ、神は自らの意志でこの世界を選択したのである。とすればヴォルフにおいてもライブニッツ同様の困難があると言わざるをえないのではないだろうか。確かに外的可能性を内的可能性から区別することは、両者を区別しないスピノザの宿命論に対しては有効である<sup>29</sup>。しかしライブニッツの決定論はこうした区別を認めた上でもなお成立しうるのである。ヴォルフによれば世界の完全性はあらゆるものが「相互に一致する」ことにおいて、各々の特殊な根拠が「絶えず一様に普遍的な根拠へと解消される」ことにおいて成立する<sup>30</sup>。そして世界の完全性の度合いはこの一致の度合いによって決定されるのである。したがってヴォルフにおいても世界の完全性の度合いは

やはり無矛盾性に基づいて規定されていると言えるのではないだろうか。その限り神の選択の必然性は限りなく絶対的必然性に近づくであろうし、この世界の外的可能性に伴う必然性もまた然りであろう。以上の考察から、ヴォルフの思想において蓋然性を「外的可能性の度合い」と解釈することには困難があることが明らかになった。ヴォルフ自身「蓋然性の論理学」の構想について懐疑的であったのは、こうした存在論的な基礎づけの困難さを自覚していたことに拠るものであると言える<sup>31</sup>。ではこのような蓋然性とその哲学的基礎についてカントはどのように考えているであろうか。

## 5. カントにおける可能性と蓋然性

### 5. 1. 『論理学』(1800年)における「蓋然性の論理学」の否定

1800年のイエツシェ編集の『論理学』では、蓋然性とは「十分な根拠に対して、反対する根拠がもつよりも一層大なる関係をもっているような、不十分な根拠に基づく信憑」(IX, S.81)であるというカントの見解が示されている<sup>32</sup>。論理学の講義のテキストであるマイアーの『論理学綱要』では、「ある不確実な認識を採用する根拠が拒否する根拠よりも、より多くより強い」場合にその認識は蓋然的であるとし、十分な根拠との関係が問題とされていない<sup>33</sup>。これに対してカントは、十分な根拠との関係の有無によって蓋然性を「仮象性」(*Scheinbarkeit, verisimilitudo*)から区別する。すなわち蓋然性の場合には「いつでも尺度が現にあって、それによって蓋然性を評価することができなければならない」(IX, S.82)。その尺度とは「確実性」である。蓋然性は十分な根拠に基づく確実性と比較されることによるのみ評価されるのであり、それによって「どれほどのことが確実性には必要であるか」を知ることができるのである。これに対して仮象性にはこうした尺度が存在しない。仮象性においては不十分な根拠を十分な根拠とではなく、反対する(不十分な)根拠と比較できるのみである。したがって信憑の根拠は、蓋然性においては「客観的に妥当」するが、仮象性においては「主観的に妥当する」だけである(*ebd.*)。

さらにカントはこうした蓋然性の評価を数学に限定する。すなわち数学的認識においては蓋然性の要素が「同種」であるが故に、その関係を「数値化する」ことが可能であるが、哲学的認識においては要素が「異種」であるため、その関係は数値化されず、たんに「重みを量る」ことができるのみである。したがって数学者は不十分な根拠が十分な根拠に対してもつ関係を規定できるが、哲学者は「たんに主観的で実践的に十分であるような信憑」すなわち仮象性で満足しなければならない。従来「蓋然性の論理学」として探究された論理学は実はこうした「仮象の論理学」に過ぎないのである。すなわち「ひとは蓋然性の論理学について多くを語ってきた。だ

がそうした論理学は可能ではない。というのも、不十分な根拠が十分な根拠に対して持つ関係を数学的に考量できない場合には、すべての規則が役立つからである」(ebd.)。このように批判期のカントは「蓋然性の論理学」に対して否定的な見解を展開した。しかしその一方でカントは『純粹理性批判』超越論的弁証論の序論において、蓋然性の学説を「仮象の論理学」である弁証論から区別し、「論理学の分析的部門」から「分離されてはならない」ものとも見なしている (A293=B349)。ではそれは分析論のどこに位置づけられるのであろうか。

## 5. 2. 「可能性の度合い」としての蓋然性の規定

カントは「蓋然性の論理学」の可能性を否定したものの、蓋然性を数学的に測定する可能性については認めていた。すなわちカントにとって蓋然性の学説とは「蓋然性の数学」に他ならない。カントは1783年の『プロレゴメナ』において、「…算術における蓋然性の計算に関して言えば、それは与えられた同種的な諸条件の下で、あることが起こる可能性の度合いについての、蓋然的ではなく、まったく確実な判断を含んでおり、この諸条件はあらゆる起こりうる場合の総数においてまったく間違いなく規則に適合していなければならない…」(IV, S.369)と述べている。ここでカントは蓋然性を、ライプニッツ同様にあることが起こる「可能性の度合い」と見なしており、その計算は「まったく確実な判断」を含んでいると考えている。この「可能性の度合い」については、1790年代初頭の講義録と見なされている『形而上学講義 L<sub>2</sub>』において次のように述べられている。

内的可能性はいかなる度合いも持たない。なぜならわれわれはそれをただ矛盾律に従ってのみ認識できるからである。しかし仮定的可能性は度合いを持っている。なぜなら各々の仮説は根拠であり、各々の根拠は大きさを持つからである。各々の根拠は度合いを持つ。他方帰結は外延的にも内包的にも考察されうる。(XXVIII-2.1, S.562)

ここでカントは、講義のテキストであるバウムガルテンの『形而上学』の区分に従って、可能性を「内的可能性」と「仮定的可能性」に区分する<sup>34</sup>。内的可能性は無矛盾性を意味し、カントはこれをたんなる論理的可能性と見なしている。そこでは矛盾律との一致、不一致により判断が下されるのみで、いかなる度合いも存在しない。これに対して仮定的可能性は、ある事象とその根拠との一致もしくは適合性を意味する。この可能性はヴォルフの「外的可能性」に由来するものであり、根拠の量に応じて「より大きい」、「より小さい」、最大、最小といった度合いを有する。カントも基本的にはこの考え方を継承し、「十分な根拠」との一致が「最大の適合性」であると見なして

いる (ebd.)。しかしその一方で「最小の適合性」を想定しておらず、仮定的可能性を「無限に減らされてゆくことができる」がゆえに、「消滅に向かってゆくもの」であると考えている (ebd.)。このことからカントは、仮定的可能性の度合いを「連続量」と見なしていると言える。

では連続量としての仮定的可能性の度合いはどのように規定されるのであろうか。カントは根拠の量を基本的には「内包量」と見なしている。しかしその一方で、帰結は「外延的にも」考察されうる。たとえば多数の帰結を有する根拠は「多産的な根拠」と称される (ebd.)。根拠の量が帰結から見て「外延量」として規定されうるとすれば、仮定的可能性の度合いも外延量として規定されうる。仮定的可能性の度合いが外延量として規定されうるとすれば、それは「数」によって規定されうることを意味する。カントは外延量や内包量といった「規定される量」(Quantum) から区別して、数を「規定する量」(Quantität) と見なしている。具体的には単一性、数多性、総体性という純粋悟性のカテゴリーによって、空間・時間の感性的直観に与えられる量を規定する。その過程が展開されるのが、超越論的原則論における「直観の公理」の原則においてである。「直観の公理」とは「すべての直観は外延量である」(B202) という原則である。ここで外延量とは「部分の表象が全体の表象を可能にする量」(A162=B203) のことであり、部分の複合体を意味する。一方、数はそれ自体は悟性概念であるが、直観の多様を綜合する悟性の作用において図式化する。すなわち数は量のカテゴリーの図式であり、時間における同種的なものの「一から一への継時的加算を総括する表象」(A142=B182) に他ならない。カントが数に主として外延量を規定する機能を認めているのは、部分の複合体としての外延量と、諸部分を順次付加することで全体を構成する数の機能との間にパラレルな関係を認めているからである。このように仮定的可能性の度合いを外延量として数値化することができれば、蓋然性を分数として規定することができるであろう。カントは蓋然性を「あらゆる可能な場合の数を分母、当該事象が起こる場合の数を分子とする分数」(XXIV-2, S.880) と見なしているのである。したがってカントが蓋然性の学説を「論理学の分析的部門」から分離されてはならないものとして位置づけているのは、「直観の公理」の原則に基づいて蓋然性の計算においても確実な判断が可能であると考えたからであろう。

ところでヴォルフは外的可能性には「仮定的必然性」が含まれると述べていた。カントも蓋然性についての判断が「まったく間違いなく規則に適合していなければならない」(IV, S.369) と考えている。ではカントは仮定的可能性の度合いとしての蓋然性の規定がいかなる必然性を有すると考えているのであろうか。

### 5. 3. 蓋然性についての判断の「仮定的必然性」

ヴォルフにおいて外的可能性が仮定的必然性を含意するのは、この現実的世界以外の「可能的諸世界」が前提とされているからであった。カントも仮定的可能性を内的可能性から区別しており、その度合いの規定が無矛盾性に基づかない限り、その必然性は仮定的であるとも言える。しかしカントはヴォルフのような可能的諸世界の存在を想定していない。蓋然性についての判断が仮定的可能性の度合いの規定であるとすれば、この判断の仮定的必然性はどのように確保されているのであろうか。

蓋然性についての判断が他の数学的判断と同様に確実な判断であるとすれば、その必然性は様相の原則によって規定されていると見るべきであろう。カントは「経験的思惟一般の要請」の原則において、現実存在との連関が「経験の一般的制約に従って」規定されているものが必然的に存在すると述べている(A218=B266)。すなわち悟性の規則に従って他の現実存在との関係において存在するものが必然的なのである。たとえばカントは「生起するすべてのものは仮定的に必然的である」(A228=B280)と言う。この場合「仮定的」とは原因—結果という前提条件を必要とする二項関係の必然性について述べられている。この意味に関する限りカントの言う仮定的必然性はヴォルフのそれと変わりはない。ヴォルフとの相違点はそうした前提条件が与えられる仕方にある。

ヴォルフの場合可能的諸世界の中からこの世界の因果系列が現実化したのは、究極的には神の自由意志によるものであり、端的にア・プリオリな神の決定によるものであった。しかしながらヴォルフは神が他の世界ではなくこの世界を選んだ根拠を、ライプニッツ同様に事象の「完全性の度合い」に求めた。したがってヴォルフの場合にもライプニッツと同様に、現実的世界の選択の根拠が無矛盾性に基づくという困難が認められたのである。これに対してカントは、事物の現実存在が端的にはなく、「或る点に従って(secundum quid)ア・プリオリに認識される」(XXVIII-2.1, S.557)場合の必然性を仮定的であると称する。或る事物を「或る点に従ってア・プリオリに」認識するというのは、その事物の根拠を端的にア・プリオリに、たんに概念のみに基づいて認識するのではなく、「その根拠を経験に基づいて認識する場合」(ebd.)である。たとえば「三角形は3つの角を持つ」という幾何学の命題は「3つの角が端的に必然的である」ことを指示しているのではなく、「三角形が現にある(与えられている)」という制約の下で、3つの角も(三角形において)必然的な仕方で見えることを指示しているのである(A594=B622)。確かに幾何学的命題の対象である三角形は純粹直観においてア・プリオリに構成されるが、その根拠が経験に基づいて認識される限り、3つの角の必然性は仮定的であり、カントはこれを「制約された必然

性」(A593=B621)、あるいは盲目的必然性に対置して「理解できる必然性」(A228=B280)とも称している。したがってカントはヴォルフとは異なる仕方では仮定的必然性を確保していると言えるであろう。

同様に蓋然性についての判断も、端的にア・プリオリな必然性を含意していない。すなわちわれわれは仮定的可能性の度合いを純粹直観において与えられる量として数によって規定するが、その根拠はこれに相当する数の事物(たとえば骰子の目)が外的直観に与えられることによってはじめて認識されるのである。確かにカントにおいて蓋然性についての判断が可能なのは、骰子のように総数が既知の有限個の場合のみである<sup>35</sup>。また等可能性の原理そのものの経験的妥当性も問題視されていない<sup>36</sup>。しかし少なくともライプニッツやヴォルフに見出される決定論的な困難は回避されていると言えるのではないだろうか。

## 6. 結論

カントはライプニッツの「蓋然性の論理学」の構想について否定的に評価したが、「蓋然性の数学」の可能性を認め、仮定的可能性の度合いとしての蓋然性を独自の超越論の原則によって基礎づけたと言える。そしてその判断の必然性は経験に基づく仮定的必然性であり、この点においてカントの認識論的な基礎は、ライプニッツやヴォルフの存在論的基礎に固有の決定論的な困難を回避したと言えるのではないだろうか。極めて限定された範囲内であるとはいえ、カントは古典的確率論を人間知性の立場から基礎づけたと見ることができるであろう。

[付記] 本稿は「平成21年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C))による研究成果の一部」である。

## 註

- 1 Gottfried Wilhelm Leibniz, De incerti aestimatione, Septembr. 1678. In : Louis Couturat, *Opuscules et fragments inédits de Leibniz*, Paris 1903 ; 2. Nachdruck Hildesheim 1988, S.569-571.
- 2 G. W. Leibniz, *Nouveaux Essais sur l'entendement humain*, Buch IV, Kap.16, § 9, *Die philosophischen Schriften von G. W. Leibniz*, hrsg.v. C. I. Gerhardt, Berlin 1875-1890; Nachdruck Hildesheim 1961 (以下GPと略す。), Bd. V, S.447-448.なおライプニッツの著作のうち、邦訳のあるものについては下村寅太郎他監修『ライプニッツ著作集』(全10巻、工作舎、1988—1999年)を参照した。
- 3 Ian Hacking, *The Emergence of Probability. A Philosophical Study of Early Ideas about Probability, Induction and Statistical Inference*, Cambridge, 1975, First paperback edition 1984, P.137ff.
- 4 G. W. Leibniz, *Scientia Generalis. Characteristica, X III*, GP, Bd. VII, S.194.

- <sup>5</sup> G. W. Leibniz, *De rerum originatione radicali*, 23 Novembr. 1697, GP, Bd.VII, S.303.
- <sup>6</sup> G. W. Leibniz, *Essais de Théodicée sur la Bonté de Dieu, la Liberté de l'Homme et l'Origine du Mal*. 1710, troisième partie, 414-417, GP, Bd.VI, S.362-365.
- <sup>7</sup> G. W. Leibniz, *ibid.*, Appendices. Abrégé de la Controverse réduite à des Argumens en forme, VIII.Objection, GP, Bd.VI, S.385-387.
- <sup>8</sup> G. W. Leibniz, *ibid.*, première partie, Des Essais de la Justice de Dieu, et de la liberté de l'Homme, dans l'Origine du Mal, 43, GP, Bd.VI, S.126-127.
- <sup>9</sup> Margaret D. Wilson, Possibility, Propensity, and Chance: Some Doubts about the Hacking Thesis, In: *The Journal of Philosophy*, 68(1971), P.615.
- <sup>10</sup> Ingetrud Pape, *Tradition und Transformation der Modalität*, erster Bd., Möglichkeit-Unmöglichkeit, Hamburg, 1966, S.132.
- <sup>11</sup> Luigi Cataldi Madonna, Wahrscheinlichkeit und wahrscheinliches Wissen in der Philosophie von Christian Wolff, In: *Studia Leibnitiana. Zeitschrift für Geschichte der Philosophie und der Wissenschaften*, Bd. XIX, 1987, S.14.
- <sup>12</sup> Christian Wolff, *Vernünfftige Gedancken von Gott, der Welt und der Seele des Menschen, auch allen Dingen überhaupt* (以下 *Deutsche Metaphysik* と略す。), Halle 1751(11), 1720(1), § 399, In: *Christian Wolff Gesammelte Werke*, hrsg.u. bearb.v. Jean École, Joseph Ehrenfried Hofmann, Marcel Thomann, Hans Werner Arndt, Hildesheim 1962ff. (以下 WW と略す。), I Abt., Bd.2, S.243-244.
- <sup>13</sup> L. C. Madonna, *ibid.*, S.18, S.29 Anm.. ヴォルフは二つの意味を認めた上で両者を区別する点で、「蓋然性」の数学的な意味を認めなかったトマジウスやリュディガーらの反ヴォルフ学派とは異なる。マドンナによれば、後にヒュームがこの区別を採用するまで、同時代において二つの意味を明確に区別しているのはヴォルフだけである。Vgl. David Hume, *A Treatise of Human Nature*, Book I, PART III, SECT. XI, XII, In: *DAVID HUME The Philosophical Works*, ed. By Thomas Hill Green & Thomas Hodge Grose, Second reprint of the new edition London 1886, Darmstadt 1992, Vol.1, P.423-439.
- <sup>14</sup> C. Wolff, *Von dem Nutzen der Erkenntnis der Natur, in der Erkenntnis Gottes und der Herrschaft über die Creaturen. Gesammelte kleine philosophische Schriften III*, 1737, WW I Abt., Bd. 21.3, S.330-331.
- <sup>15</sup> C. Wolff, *Philosophia rationalis sive Logica, methodo scientifica pertractata et ad usum scientiarum atque vitae aptata. Praemittitur Discursus praeliminaris de philosophia in genere*, Frankfurt u. Leipzig 1740(3), 1728(1), Pars II, § 606-610, WW II Abt., Bd.1.2, S.447-450. ただし「蓋然的意見」は真理の要件としての現象によって根拠づけられている、という点において、「通念」からは明確に区別される。なお、『ラテン語論理学』の訳語に関しては以下の文献を参照した。山本道雄「クリスティアン・ヴォルフの論理学思想について—『ラテン語論理学』の概念論、判断論、真理論を中心に—」、『文化學年報』第14号、神戸大学大学院文化学研究科編、1995年所収。
- <sup>16</sup> R. C. Madonna, *ibid.*, S.28. Hans Werner Arndt, *Methodo scientifica pertractatum. Mos geometricus und Kalkülbegriff in der philosophischen Theorienbildung des 17. und 18. Jahrhunderts*, Berlin-New York 1971, S.145.
- <sup>17</sup> C. Wolff, *ibid.*, Pars II, § 593, WW II Abt., Bd.1.2, S.443. ders., *Deutsche Metaphysik*, § 402, WW I Abt., Bd.2, S.245.
- <sup>18</sup> C. Wolff, *Philosophia rationalis sive Logica*, Pars II, § 593, WW II Abt., Bd.1.2, S.443.
- <sup>19</sup> 経験心理学との関係に関しては、『ドイツ語形而上学』で、「蓋然性」を評価する術を確立するためには「機知」(Witz)と「悟性」(Verstand)が必要であると言われる。前者は「類似性を容易に知覚する能力」であり、後者は「可能的なものを判明に表象する能力」である。Vgl. C. Wolff, *Deutsche Metaphysik*, § 402, WW I Abt., Bd.2, S.245-246.
- <sup>20</sup> C. Wolff, *Der Vernünfftigen Gedancken von Gott, der Welt und der Seele des Menschen, auch allen Dingen überhaupt, Anderer Theil, bestehend in ausführlichen Anmerkungen, und zu besserem Verstande und bequemerem Gebrauche derselben*(以下 *Anmerkungen zur deutschen Metaphysik* と略す。), Frankfurt am Main 1740(4), 1724(1), 1760(6), § 6, WW I Abt., Bd.3, S.12-13. ders., *Cosmologia generalis, methodo scientifica pertractata, qua ad solidam, inprimis Dei atque Naturae, cognitionem via sternitur*, Frankfurt u. Leipzig 1737(2), 1731(1), § 111, WW II Abt., Bd.4, S.99.
- <sup>21</sup> C. Wolff, *Philosophia prima sive Ontologia, methodo scientifica pertractata, qua omnis cognitionis humanae principia continentur*, Frankfurt u. Leipzig 1736(2), 1730(1), § 133, WW II Abt., Bd.3, S.115.
- <sup>22</sup> 「内的な可能性」において「可能性の度合い」に差異が認められるという解釈については以下の文献を参照。Hans-Werner Arndt, *Der Möglichkeitsbegriff bei Christian Wolff und Johann Heinrich Lambert*, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Philosophischen Fakultät der Georg-August-Universität zu Göttingen, Göttingen, 1959, S.179ff. アルントはヴォルフの「存在するものあるいは現実的なものはいかなるものであれ、全的に規定されている」(C. Wolff, *ibid.*, § 226, WW II Abt., Bd.3, S.187.) という命題を取り上げ、「全的に規定されているもの」と「まだ未規定であるもの」との間には「存在する可能性の度合い」において差異がある、という解釈を提示する。

確かに両者の間には「完全性の度合い」において差異があり、「全的に規定されること」が存在の可能性の条件であることには間違いないが、「まだ未規定であるもの」が「存在する可能性の度が低いもの」ではなく、「まだ存在する可能性を持たないもの」であれば、そこに「存在する可能性の度合い」の差異を読み取るのは困難である。この点は本稿ですでにライプニッツについて言及した通りである。

- <sup>23</sup> C. Wolff, *ibid.*, § 176-177, WW II Abt., Bd.3, S.144-146.
- <sup>24</sup> C. Wolff, *ibid.*, § 153, WW II Abt., Bd.3, S.127.
- <sup>25</sup> C. Wolff, *Cosmologia generalis*, § 114, WW II Abt., Bd.4, S.101. Vgl., ders., *Philosophia prima sive Ontologia*, § 302, 316-320, WW II Abt., Bd.3, S.241, 248-252.
- <sup>26</sup> C. Wolff, *Anmerkungen zur deutschen Metaphysik*, § 6, WW I Abt., Bd.3, S.13.
- <sup>27</sup> C. Wolff, *Cosmologia generalis*, § 101, WW II Abt., Bd.4, S.92.
- <sup>28</sup> C. Wolff, *Deutsche Metaphysik*, § 981-982, WW I Abt., Bd.2, S.604-605.
- <sup>29</sup> I. Pape, *ibid.*, S.187.
- <sup>30</sup> C. Wolff, *ibid.*, § 701, WW I Abt., Bd.2, S.436-437.
- <sup>31</sup> R. C. Madonna, *ibid.*, S.27.
- <sup>32</sup> *Immanuel Kant's Logik, Ein Handbuch zu Vorlesungen*, Hrsg.v.G.B.Jäsche, 1800. 『純粋理性批判』以外のカントの著作からの引用は<アカデミー版カント全集> (*Kant's gesammelte Schriften*, Hrsg.v.d. Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften und ihren Nachfolgern, 1900ff.) の巻数と頁数を本文中に記す。『純粋理性批判』からの引用は、第一版(1781年)をA、第二版(1787年)をBとし、頁数を付して本文中に記す。
- <sup>33</sup> Georg Friedrich Meier, *Auszug aus der Vernunftlehre*, § 171, Halle, 1752, S.47. 蓋然性が不十分な根拠の十分な根拠へ関係によって決定されるというカントの解釈は、マイアーの解釈よりもむしろヴォルフの解釈を継承している。ヴォルフは『ラテン語論理学』において、「あらゆる真理のための要件あるいは十分な根拠を知っている人が、…与えられた個別の場合において蓋然性を評価できる」と述べている。C. Wolff, *Philosophia rationalis sive Logica*, Pars III, § 1160, WW II Abt., Bd.1.3, S.813.
- <sup>34</sup> Alexander Gottlieb Baumgarten, *Metaphysica*, § 15-16, 1779(7), 1739(1); Nachdruckauflage der Ausgabe Halle 1779(Editio VII), Hildesheim, 1982, S.5-6.
- <sup>35</sup> L.C. Madonna, Kant und der Probabilismus der Aufklärung, In: *Aufklärung* 7/1(1992), S.34.なおこの論文でマドonnaは、カントが批判哲学の展開に従って漸次「蓋然性の論理学」を否定するに至ったことを解明しているが、超越論哲学そのものにおける「蓋然性」の概念の位置づけについては触れていない。本稿の意図はこの点を解明することにある。

<sup>36</sup> たとえば合格点が60点の試験の合格率を推理する場合、ある人は「可も不可も等可能的である」と考えて50%と推理するかもしれないが、別の人は0点から100点までを10等分し、学生の得点が「どの得点間隔に入る可能性も等しい」と考えて40%と推理するかもしれない。つまり等可能性の原理がいかなる経験的事実に適用されるかによって異なった結果が導出されるのである。ヴォルフはこの原理の経験的妥当性を疑っている。C. Wolff, *Philosophia rationalis sive Logica*, Pars II, § 578, WW II Abt., Bd.1.2, S.437.

# 高専1年生からの母平均の区間推定

大多喜 重明\* 長井 清香\*\*

## Teaching Methods of Interval Estimation of Population Mean Value to First-year Students in KCCT

Shigeaki OHTAKI\* Kiyoko NAGAI\*\*

### ABSTRACT

We think that understanding the mean value correctly at early stage deepen understanding when students study science special subjects in KCCT(Kobe City College of Technology). When we taught interval estimation of population mean value immediately after college of technology entrance, the student of 100% could round out the report about it, the student of 50% passed the test about it. According to the results of the questionnaire, the students seem to know expert take on data with new-found excitement though learning interval estimation of population mean value. But it was clarified that this results is not applied on graduation research. It is necessary to promote the ability to make full use of their basic knowledge.

*Keywords:* interval estimation of population mean value, early education, college of technology

### 1. はじめに

理系の人材の早期教育の一環として、一年生の物理の授業で、母平均の区間推定<sup>(1)</sup>を平成10年度から教えてきた。普通科とは異なり、高専では、専門科目の実験実習が一年生からあり、平均値を求めることが多い。そうでなくても、平均値は多くの学生にとって身近なものである。

様々な誤りによって生じる誤差ではなく、誤りが全く無くとも生じる真の平均値との差がある。この差を誤差と区別し、公差と呼んだ（現在は確率誤差ということが多い）。しかし工学系では、公差を別の意味で使うので、「公差」という言葉は直接には使えない。そこで、新入生にわかりやすいよう、「母平均の区間推定（公差）」を「平均値の求め方」として教えてきた。

一般に、測定値の中心値を平均値として小学校で習う。大学や高専の学生実験<sup>(2),(3)</sup>の誤差論で、種々の誤差とともに平均値の確率誤差として、母平均の区間推定を学ぶ。系統誤差や偶然誤差などの様々な誤差とともに、わずかな時間で教授され、消化できずにいる学生もいるようである。消化しないまま大学院へ進学しているため、研究発表会でエラーバーの無いグラフが時々見られるのではないかと思う。グラフにエラーバーが無いのは、それが不要だからではなく、誤差論が十分理解できていないからだと思われる。これでは、大学院生の研究レベルにも影響しているはずである。

工学系は、理学系とは目的が異なり、物創りを目的としている。極論すると、世界一優れている物が生産できれば良い。しかし、神戸高専の飛躍を図るとき、プレゼンテーションでエラーバーを用いる程度の能力は必要と考える。なぜなら、近年の技術は高度化しており、それに伴い、技術者も高い能力が求められる

---

\* 一般科 教授

\*\* KS laboratory 博士（理学）

ようになった。また、大学や企業で行われるような最先端の研究に、すぐに入れる基礎を教えることも必要である。

この論文では、神戸高専の1年生に教えてきた「平均値の求め方(母平均の区間推定)」の授業内容について説明し、その試験結果と授業内容に対するアンケート結果を示す。また、卒業研究で実を結ばせるには、科目間連携が必要であることも分かったので、これらについて報告する。

## 2. 「平均値の求め方」の授業内容

「母平均の区間推定(公差)」を「平均値の求め方」として、系統誤差や偶然誤差などの誤差の指導時期と切り離して教える。「平均値の求め方」を教える時期は入学後の最初の授業時間にし、指導時間は約40分間である。指導方法を次に示す。

### 平均値の求め方



平均値を求めるとき、正確な値が求められる場合と求められない場合があります。入学試験の平均点は、どんなに受験者が多くとも、全員の点数が分かるので、正確に求められます。しかし、左の円の直径を何万回測定しても、すべての直径を測定できないので、平均値は正確には求められません。(たとえ無限回測定しても、すべてを測定しない限り、求められません。)

ここでは、数学(確率統計論)で、「母平均の区間推定」と言われる方法を紹介し、直径をN回測定し、測定値がR<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>、・・・、R<sub>N</sub>だったとします。区間推定の手順は以下です。

1. 区間の中心値を求めます。

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N}{N}$$

2. 区間の幅を求めます。

$$\Delta R = k \sqrt{\frac{(R_1 - \bar{R})^2 + (R_2 - \bar{R})^2 + (R_3 - \bar{R})^2 + \dots + (R_N - \bar{R})^2}{N(N-1)}}$$

注) kの値はt分布表のN-1行目の値から選びます。通常、実験では、0.50列の値を用い、その値を用いて得られた幅を公差と言います。

3. 区間を表記します。

$$R = \bar{R} \pm \Delta R \text{ [単位]}$$

\*. 表記例と意味

$$R = (1.234 \pm 0.005) \times 10^{-2} \text{ [m]}$$

直径の平均値は1.229×10<sup>-2</sup>[m]と1.239×10<sup>-2</sup>[m]の間にある可能性があり、その確率は、区間の幅を求めるときに用いたkの値が0.50列の値ならば50%、0.10列の値ならば90%、0.01列の値ならば99%です。

## 2.1 導入

- ①. 入試の話題で、生徒の関心を試験の点数に向け、「英語90点、数学80点、国語70点の人の平均点は？」と尋ねる。
- ②. 生徒全員が正解するので、黒板に丸を描く。
- ③. 丸の直径を3回測定し、値を書き、「この円の直径の平均値はいくらか？」と尋ねる。
- ④. 生徒の応答によって、対応が異なるが、クラス平均と比較させる。「全員の点数の合計を人数で割れば、真のクラス平均が求められる。クラスの3人の平均点とクラス全員の平均点とは、恐らく異なる。直径は無限個あり、すべての値を測定することは出来ないので、黒板の円の直径の真の平均値は求められない。」ことを説明する。

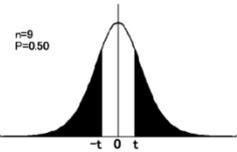
## 2.2 展開

平均値の求め方の説明書(図1)と白紙を配布し、白紙に円を描き、その直径の平均値を測定させる。

### t分布表

自由度n、確率pのときのtの値を表にしました。

以下のエクセルの関数で、tの値が得られます。  
TINV(確率pの値、自由度nの値)



[余談]  
nの値を変えると山の形が変わります。ガンマ関数が式に出てきて、1,2年生には少し難しいですが、挑戦するのも良いと思います。  
(nを小さくすると、山の高さ比べ、裾野が広がります。)

| tの値 | 確率P (黒塗り部分の面積/山全体の面積) |       |       |        |        |        |        |         |
|-----|-----------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
|     | 0.500                 | 0.250 | 0.100 | 0.050  | 0.025  | 0.020  | 0.010  | 0.005   |
| 1   | 1.000                 | 2.414 | 6.314 | 12.706 | 25.452 | 31.821 | 63.656 | 127.321 |
| 2   | 0.816                 | 1.604 | 2.920 | 4.303  | 6.205  | 6.965  | 9.925  | 14.089  |
| 3   | 0.765                 | 1.423 | 2.353 | 3.182  | 4.177  | 4.541  | 5.841  | 7.453   |
| 4   | 0.741                 | 1.344 | 2.132 | 2.776  | 3.495  | 3.747  | 4.604  | 5.598   |
| 5   | 0.727                 | 1.301 | 2.015 | 2.571  | 3.163  | 3.365  | 4.032  | 4.773   |
| 6   | 0.718                 | 1.273 | 1.943 | 2.447  | 2.969  | 3.143  | 3.707  | 4.317   |
| 7   | 0.711                 | 1.254 | 1.895 | 2.365  | 2.841  | 2.998  | 3.499  | 4.029   |
| 8   | 0.706                 | 1.240 | 1.860 | 2.306  | 2.752  | 2.896  | 3.355  | 3.833   |
| 9   | 0.703                 | 1.230 | 1.833 | 2.262  | 2.685  | 2.821  | 3.250  | 3.690   |
| 20  | 0.687                 | 1.185 | 1.725 | 2.086  | 2.423  | 2.528  | 2.845  | 3.153   |
| 60  | 0.679                 | 1.162 | 1.671 | 2.000  | 2.299  | 2.390  | 2.660  | 2.915   |
| 120 | 0.677                 | 1.156 | 1.658 | 1.980  | 2.270  | 2.358  | 2.617  | 2.860   |
| ∞   | 0.674                 | 1.150 | 1.645 | 1.960  | 2.241  | 2.326  | 2.576  | 2.807   |

図1 平均値の求め方の説明書

## 2.3 まとめ

昨年度の例(今年度からWebにも公開)を解説し、再度、以下の2点について簡単に説明し、まとめる。

- ①真の平均値が求められる場合とそれが求められない場合がある。

- ②求められない場合は「母平均の区間推定(公差)」を行う。

3. 授業結果

図2は平成21年度と平成18年度の神戸高専1年生が提出したレポートの例である。説明書の計算方法に従って、ほぼ全員が母平均の区間推定を行うことができた。どの年度も、大きな違いはなかった。

図3は「高専生の能力調査（創造的人材育成における高専の役割）」という題目で、平成14年度の関西工業教育協会高専部会の夏期研修会で使用した高専2年生の実験誤差についての考察の例である。大学1回生の考察と遜色がない。どの年度も、クラスに2~3人ではあるが、同程度の考察をする者がいる。



図3 誤差の考察の例

表1は、神戸高専の1年生に、前期中間試験の翌週に行った平成21年度のアンケート結果である。回答者数は236名で、真の平均値が求められる場合と求められない場合があることを初めて知った者が9割近く(85.7%)いた。母平均の区間推定の計算ができると思う者が8割近く(78.8%)いた。他教科の実験で応用した者は231名中6名(2.6%)であったが、今回のアンケートをきっかけに、この人数はこれから増えると予想している。

表1 平成21年度のアンケート項目と結果

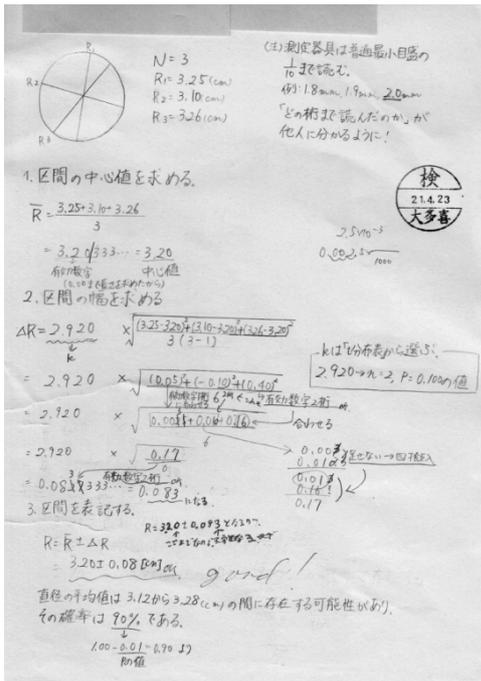
- 項目1. 真の平均値が求められる場合と求められない場合があることを、いつごろから知っていましたか。
- ①この授業ではじめて知った。
  - ②以前から知っていた。
  - ③わからない。
- 項目2. 真の平均値が求められない場合の平均値の計算(推定)はできるようになりましたか。
- ①t分布表があればできる。
  - ②説明書がないとできない。
  - ③わからない。
- 項目3. 他教科の実験や実習で、物理で習った平均値の計算を応用したことがありますか。
- ①ある。
  - ②ない。
  - ③わからない。

| 回答率 (%) | 回答番号 |      |     |
|---------|------|------|-----|
|         | ①    | ②    | ③   |
| 項目番号 1  | 85.7 | 7.8  | 6.5 |
| 項目番号 2  | 78.8 | 16.5 | 4.8 |
| 項目番号 3  | 2.6  | 89.6 | 7.8 |

回答者数 231名

数年に一度、「平均値の求め方(母平均の区間推定)」についての問題を前期に行われる定期試験に出題した。図4は平成21年度前期中間試験問題、表2はその正答率である。中心値の正答率が低いのは「2.30」と答えるべきところを「2.3」と解答した答案が24.0%あった為である。神戸高専生の50%が母平均の区間

A)



B)

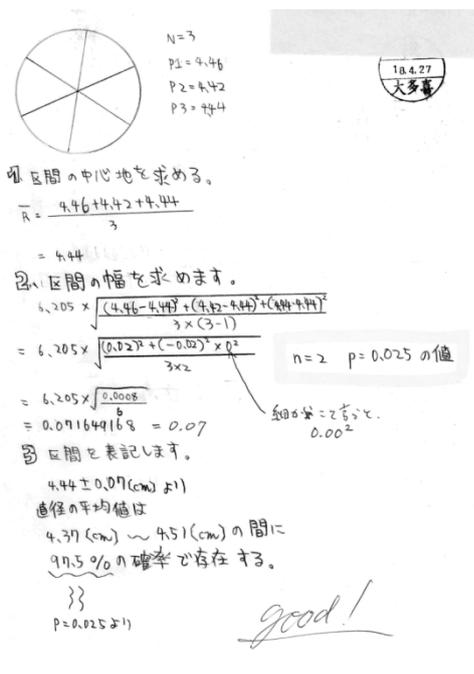


図2 提出物の例(A:平成21年度、B:平成18年度)

推定の計算が出来たといえる。

V. 丸い棒の直径を測定した。測定値は 2.30[cm]、2.33[cm]、2.27[cm]であった。直径の平均値を 50%の信頼度で推定すると、 $\bar{x} \pm i$ [cm]である。(Aは中心値、iは区間幅、それぞれの値を記入のこと。)

| t 分布表            |   | 確率 P  |       |        |        |
|------------------|---|-------|-------|--------|--------|
|                  |   | 0.500 | 0.100 | 0.050  | 0.010  |
| C<br>植<br>田<br>皿 | 1 | 1.000 | 6.314 | 12.706 | 63.656 |
|                  | 2 | 0.816 | 2.920 | 4.303  | 9.925  |
|                  | 3 | 0.765 | 2.353 | 3.182  | 5.841  |
|                  | 4 | 0.741 | 2.132 | 2.776  | 4.604  |
|                  | 5 | 0.727 | 2.015 | 2.571  | 4.032  |
|                  | ∞ | 0.674 | 1.645 | 1.960  | 2.576  |

図4 前期中間試験問題 (平成 21 年度)

表2 図4の問題の正答率

|        | 中心値(VA) | 区間幅(VI) |
|--------|---------|---------|
| 正答率(%) | 76.0    | 50.0    |

受験者数 242名

図5はアンケートの感想等の例である。「式がややこしい」、「むずかしい」などの専門的な内容に戸惑う感想も多かったが、真の平均値が求められない場合があることに驚きを感じる感想も多かった。

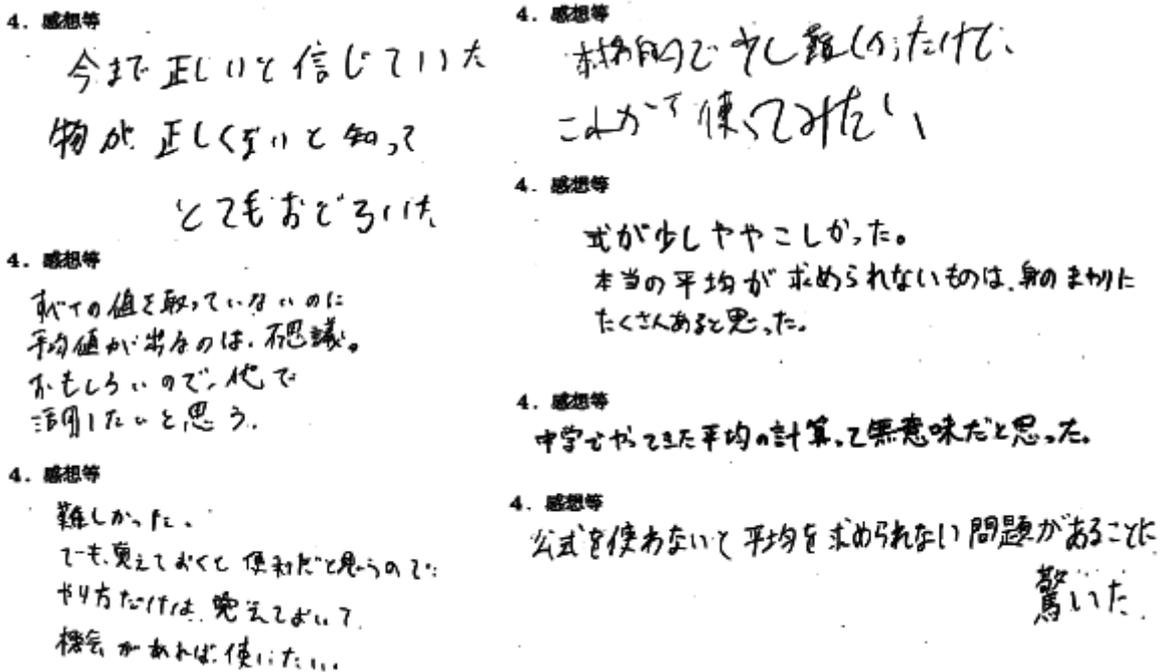


図5 感想の例

#### 4. まとめ

神戸高専の新入生は誤差よりも「母平均の区間推定」の方が受け入れやすいことに気が付き、翌年の平成 11 年度から「平均値の求め方」としてそれを教えてきた。どの年度も、1 年生のレポートではほぼ 100%、試験では 50%程度の学生が母平均の区間推定の計算ができていた。2 年生の実験レポートでも、直接測定量について、50%程度の学生は母平均の区間推定を行っていた。

しかしながら、神戸高専の卒研発表会ではエラーバーが付いたグラフが全く見られなかった。低学年で行っていた測定値の評価が卒研で活かされていないのは、一般教養の物理と専門科目との科目間連携が不足しているためと思われる。

神戸高専の学習・教育目標 A1 と A2 に「問題が解けること」とあるが、それは基礎を活用する能力であると考えられる。解法を記憶するだけでも問題は解けるが、応用が利かず、実用性に欠ける。基礎を活用する能力の向上を図り、新た

な事からの発見力や創造力を養うことが大事である。

学習教育・目標 A1 と A2 の表現を「活用」と改め、習ったことを様々な場面で使う練習を授業や実習に盛り込んでいく必要がある。シラバスだけでなく、講義ノート of 学内 Web 公開や神戸高専紀要などで、具体的な教授内容を紹介し、講義内容について教員同士で議論を深めていくことが、今後必要である。

#### 参考文献

- (1) 高遠節夫, その他:「新訂 確率統計」, 大日本図書, 第 4 章, 2006.
- (2) 蛭名邦禎, 国友正和, 原俊雄, その他:「基礎物理学実験 改訂版 第 5 刷」, 神戸大学物理学教科集団, pp. 197-203, 1998.
- (3) 塩見堯, 宮野敏男:「高専の物理学実験ノート」, オーム, pp. 9-10, 1991.

# 学習指導要領の改訂(数学)について

八木善彦\*

New National Curriculum Standards for Secondary School

Yoshihiko YAGI\*

## ABSTRACT

The revision of the New Courses of Study for secondary school will affect the link between junior high school and technical college in terms of the contents of math lessons, and will also affect the mathematics in the entrance examination for technical college. This paper introduces the main revised points.

The New Courses of Study aim to root the rudiments and basics and cultivate the ability to learn independently so that the basic of lifelong learning is established.

*Keywords:* National Curriculum Standards, secondary school, MEXT

## 1. はじめに

平成20年3月28日に小学校学習指導要領・中学校学習指導要領は公示された。平成21年3月9日に高等学校学習指導要領、特別支援学校学習指導要領は公示された。小学校では平成23年度、中学校では平成24年度から完全実施される。

内容の一部については小中学校が平成21年度、高等学校が平成24年度から先行実施される。この移行措置期間中に、教科書の編集・検定・採択を行う。

現学習指導要領は、学力低下批判を受けて平成15年12月26日に一部改正され、指導要領の位置付けを「最低基準」と変更し、指導要領の範囲を超える発展的内容を教えることを可能にした。平成19年10月30日、中教審が「審議のまとめ」(中間報告)を発表し「ゆとり教育」の反省点に初めて触れ、「基礎・基本の習得」の強調がなされた。「総合的な学習の時間」(総合学習)や中学の選択授業が削減される一方、国語、算数・数学、英語など主要教科の授業時間は「小学校で約10%、中学で約12%増やす」とした。

この流れをうけ新しい学習指導要領は現行学習指導要領の理念である「生きる力」をはぐくむことを引き継ぎ、具体的な手立てを確立する観点から改訂された。したがって、増加した時間は、繰り返し学習、実験や観察とそれらを言語活動にまとめることに配分される。

今回、学習指導要領の改訂が中学から高専への数学授業内容の接続および高専の数学入学試験に及ぼす影

響を調査する機会を得たので主たる変更点を紹介する。

## 2. 中学校学習指導要領の変更内容

中学校数学の授業時数は140, 105, 140時間(順に第1学年, 第2学年, 第3学年)となり(表1), 中学第1学年で授業時数が週3時間から4時間に、中学第3学年で授業時数が週3時間から4時間に増加した。完全実施は平成24年度からであるが、平成21年度には中学第1学年で、平成22年度には中学第3学年で先行実施される<sup>(1)</sup>。

中学校学習指導要領の第2章、各教科、第3節 数学の目標に、「表現する」、「考えたり判断しようとする」の文言が加えられ言語活動にまとめることが強調された。また「目的に応じて資料を収集して整理し、その資料の傾向を読み取る能力を培う。」という「資料の活用」が増やされ説明する能力に必要な統計的な扱いが追加された。「数量関係」は「関数」という呼び名に戻され高校学習への接続に配慮した。

中学校の各学年の目標及び内容をみていくと、

第1学年では「簡単な一元一次方程式を解く」が「一元一次方程式を用いる」となるなど、内容の充実、活用力の養成に重点が移された。図形の内容で球の表面積と体積を求める項目が追加された。資料の活用でヒストグラムや代表値を用いて資料の傾向をとらえ説明することが要請された。

第2学年では資料の活用と関連づけた数学的活動に取り組む機会を設けることが要請された。確率では「余

\*一般科 教授

事象は扱わない」が削除された。

第3学年では実数解をもつ二次方程式を取り扱うものとし解の公式が復活した。円周角の定理の逆も取り扱うことになった。

表 1: 各教科等の授業時数

学校教育法施行規則別表第2(第73条関係)

| 区分             | 第1学年 | 第2学年 | 第3学年 |
|----------------|------|------|------|
| 各教科の授業時数       |      |      |      |
| 国語             | 140  | 140  | 105  |
| 社会             | 105  | 105  | 140  |
| 数学             | 140  | 105  | 140  |
| 理科             | 105  | 140  | 140  |
| 音楽             | 45   | 35   | 35   |
| 美術             | 45   | 35   | 35   |
| 保健体育           | 105  | 105  | 105  |
| 技術・家庭          | 70   | 70   | 35   |
| 外国語            | 140  | 140  | 140  |
| 道徳の授業時数        | 35   | 35   | 35   |
| 総合的な学習の時間の授業時数 | 50   | 70   | 70   |
| 特別活動の授業時数      | 35   | 35   | 35   |
| 総授業時数          | 1015 | 1015 | 1015 |

現行中学校学習指導要領(平成10年)<sup>(2)</sup>

学校教育法施行規則別表第2(第54条関係)

| 区分             | 第1学年   | 第2学年   | 第3学年    |
|----------------|--------|--------|---------|
| 各教科の授業時数       |        |        |         |
| 国語             | 140    | 105    | 105     |
| 社会             | 105    | 105    | 85      |
| 数学             | 105    | 105    | 105     |
| 理科             | 105    | 105    | 80      |
| 音楽             | 45     | 35     | 35      |
| 美術             | 45     | 35     | 35      |
| 保健体育           | 90     | 90     | 90      |
| 技術・家庭          | 70     | 70     | 35      |
| 外国語            | 105    | 105    | 105     |
| 道徳の授業時数        | 35     | 35     | 35      |
| 特別活動の授業時数      | 35     | 35     | 35      |
| 選択教科等に充てる授業時数  | 0~30   | 50~85  | 105~165 |
| 総合的な学習の時間の授業時数 | 70~100 | 70~105 | 70~130  |
| 総授業時数          | 980    | 980    | 980     |

全体として、新たな内容を指導する際には、既に指導した関連する内容を意図的に再度取り上げ、学び直しの機会を設定することに配慮する適切な反復による学習指導の推進、各領域の内容を総合したり日常の事象や他教科等での学習に関連付けたりするなどして見いだした課題を解決するなど、数学を活用して考えたり判断したり説明しようとすることを重視した指導要領となった。

今回の数学科改訂において、小・中・高等学校間で移行された内容、中学校において学年間で移行された内容及び中学校において新たに指導することになった内容は次の通りである<sup>(3)</sup>。

第1学年

数の集合と四則計算の可能性 高等学校「数学Ⅰ」から  
大小関係を不等式を用いて表すこと 高等学校「数学Ⅰ」から(一部)

簡単な比例式を解くこと

平行移動、対称移動及び回転移動

投影図

球の表面積と体積 高等学校「数学Ⅰ」から

関数関係の意味 中学校第2学年から

資料の散らばりと代表値 高等学校「数学基礎」, 「数学B」から

図形の対称性(線対称, 点対称) 小学校第6学年へ

角柱や円柱の体積 小学校第6学年へ

第2学年

円周角と中心角の関係 中学校第3学年へ

起こり得る場合を順序よく整理すること 小学校第6学年へ

第3学年

有理数と無理数 高等学校「数学Ⅰ」から

二次方程式の解の公式 高等学校「数学Ⅰ」から

相似な図形の面積比と体積比 高等学校「数学Ⅰ」から

円周角と中心角の関係 中学校第2学年から(一部, 高等学校「数学A」から)

いろいろな事象と関数 高等学校「数学Ⅰ」から

標本調査 高等学校「数学基礎」, 「数学C」から

注意: ...高等学校から中学校に移行する内容,

...中学校の学年間で移行する内容,

...中学校で新規に指導する内容,

...中学校から小学校へ移行する内容

新規の内容は、A 数と式では、数の集合と四則、不等式を用いた表現、比例式、有理数・無理数、解の公式を用いて二次方程式をとくことであり、B 図形では、図形の移動、投影図、球の表面積・体積、相似な図形の相似比と面積比及び体積比の関係、円周角の定理の逆、C 関数ではいろいろな事象と関数、D 資料の活用では、資料の散らばりと代表値、誤差や近似値  $a \times 10^n$  の形の表現、ヒストグラムや代表値の必要性和意味、ヒストグラムや代表値を用いること、標本調査、標本調査の必要性和意味、標本調査を行うことである。

資料の活用が新たに導入され資料の傾向を読み取る力、資料の傾向をとらえ説明する力を養うことに重点がおかれている。特に数学的活動として、数学的な表現を用いて、根拠を明らかにし筋道立てて説明し伝え合う活動に重きがおかれ、言葉や数、式、図、表、グラフなどを適切に用いて、数量や図形などに関する事実や手続き、思考の過程や判断の根拠などを的確に表現したり、考えたことや工夫したことなどを数学的な表現を

用いて伝え合い共有したり、見いだしたことや思考の過程、判断の根拠などを数学的に説明したりする活動が強調されている。

### 3. おわりに

平成20年1月に中央教育審議会は「幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善について<sup>(4)</sup>」の答申を行った。その中で「生きる力」という理念のもと、基礎的・基本的な知識・技能の習得を重視し、読み・書き・計算などの基礎的・基本的な知識・技能は、例えば、小学校低・中学年では体験的な理解や繰り返し学習を重視するなど、発達の段階に応じて徹底して習得させ、学習の基盤を構築していくことが大切との提言がなされた。この答申においては、上記のような児童生徒の課題を踏まえ、

- ① 改正教育基本法等を踏まえた学習指導要領改訂
- ② 「生きる力」という理念の共有
- ③ 基礎的・基本的な知識・技能の習得
- ④ 思考力・判断力・表現力等の育成
- ⑤ 確かな学力を確立するために必要な授業時数の確保
- ⑥ 学習意欲の向上や学習習慣の確立
- ⑦ 豊かな心や健やかな体の育成のための指導の充実

を基本的な考え方として、各学校段階や各教科等にわたる学習指導要領の改善の方向性が示された。この基盤の上に、④の思考力・判断力・表現力等をはぐくむために、観察・実験、レポートの作成、論述など知識・技能の活用を図る学習活動を発達の段階に応じて充実させるとともに、これらの学習活動の基盤となる言語に関する能力の育成のために、小学校低・中学年の国語科において音読・暗唱、漢字の読み書きなど基本的な力を定着させた上で、各教科等において、記録、要約、説明、論述といった学習活動に取り組む必要があると指摘した。また、⑦の豊かな心や健やかな体の育成のための指導の充実については、徳育や体育の充実のほか、国語をはじめとする言語に関する能力の重視や体験活動の充実により、他者、社会、自然・環境とかがかわる中で、これらとともに生きる自分への自信を持たせる必要があるとの提言がなされた。

新しい学習指導要領は、数学的活動の楽しさや数学のよさを実感することができるようにすること、事象を数理的に考察し表現する能力を高めること、それらを活用して考えたり判断したりしようとする態度を育てることを目標に、生涯にわたり学習する基盤が培わ

れるよう、基礎的な知識及び技能を習得させるとともに、これらを活用して課題を解決するために必要な思考力、判断力、表現力その他の能力をはぐくみ、主体的に学習に取り組む態度を養うことに主眼がおかれている。

### 参考文献

- (1) 文部科学省教育課程課：「中学校学習指導要領」，東山書房，2008。
- (2) 国立印刷局：「中学校学習指導要領 改訂版」，独立行政法人国立印刷局，2004。
- (3) 文部科学省教育課程課：「中学校学習指導要領解説 数学編」，教育出版，2008。
- (4) 中央教育審議会：「幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善について（答申）」，<http://www.mext.go.jp/>，2008。



# 高専数学の学習と数式処理

八木善彦\*

## Learning with Computer Algebra Systems in the Technical College Mathematics

Yoshihiko YAGI\*

### ABSTRACT

In order to promote the use of the computer algebra system in learning mathematics, a survey was conducted on the assumption that student using the computer algebra software “ Mathematica ” to assist them in solving problems from the technical college mathematics textbook will achieve better results.

The results show that Mathematica contributes as a learning aid in solving the technical college mathematics textbook problems for the lower grades with few difficulties. Moreover, the majority of the textbook problems can be solved with the use of basic function from Mathematica.

*Keywords:* Mathematica, mathematics education, computer algebra system

### 1. はじめに

近年、コンピュータやインターネットなどのインフラ面、学校教育用コンテンツの開発やソフト面の整備が急速に進展し、数学教育の情報化に必要な環境が整いつつある。

このようなテクノロジーを利用した教育や学習を促進するために、本校では、Mathematica を総合情報センターに導入して学生の利用を図っている。今回、数学の学習に数式処理システムが、どのような役割をになっていけるかを調査する一環として、数式処理ソフト Mathematica で、高専数学教科書<sup>(1)(2)(3)</sup>の問題を解く場面を想定した調査を行った。

### 2. 高専の数学

高専や高校で習う教科書の複雑な微分や積分の例題を Mathematica は解くことができる。大学や大学院入試の問題も Mathematica は解くことができる<sup>(4)</sup>。高専の学生が、高専の数学の教科書や問題集を解答する場合 Mathematica で何ができ、何が問題となるであろうか。1年から3年までの教科書を利用して調査する。

Mathematica を使用するためには基本的なチュートリアルが必要である。しかし Mathematica のチュートリアルを解説<sup>(5)</sup>した後は、ソフト自体が解説やヘルプをもっているため、使用関数のヒントを与えるだけ

で使えるようになる。積極的な利用を促す為には日本語版が必須である。古いバージョンの Mathematica では不等式の解法はできないが、現在のバージョンでは、問題なく動作する。

#### 2.1 1年の数学

1年の数学の数学は、数と式、2次の関数・方程式・不等式、命題・等式・関数、指数関数・対数関数、三角関数、平面上の図形、個数の処理にわかれ、学習の補助として Mathematica を利用してもなんら問題はなかった。

表 1: 数と式の分野

| 分野     | コマンド  | 備考                           |
|--------|---|------------------------------|
| 式の計算   | $+$ , $-$ , $*$ , $/$ , <i>Expand</i>                     | 問題なし                         |
| 因数分解   | <i>Factor</i>   | 問題なし                         |
| 除法     | <i>PolynomialQuotient</i> ,<br><i>PolynomialRemainder</i> | 問題なし                         |
| 約数, 倍数 | <i>PolynomialLCM</i> ,<br><i>PolynomialGCD</i>            | 文章題立式必要                      |
| 数の種類   | <i>IntegerQ</i> , <i>Simplify</i> ,<br><i>Head</i>        | 集合, 複素数の知識                   |
| 不等式証明  | <i>Reduce</i> , <i>Reals</i>                              | ver.4 × ver.5<br>必要十分条件なので厳密 |
| の計算    | <i>Sqrt</i>   | 小数は分数に直す必要あり                 |
| 有理化    | <i>ExpandNumerator</i> ,<br><i>ExpandDenominator</i>      | 有理化の操作                       |
| 繁分数    | <i>Simplify</i>   | 問題なし                         |

\*一般科 教授

### 2.1.1 数と式

数と式の分野には加減乗除のほか、展開 (Expand)、因数分解 (Factor)、部分分数分解 (Apart)、かわったところでは整式の割り算での商と余りを求める関数、整式の最大公約数、最小公倍数を求める関数が使用できる。数の種類の判定には、内容に応じた知識と計算方法の理解がないと求める結果は得られない。複素数の虚数部が厳密なゼロか有限精度のゼロかを区別することは理屈っぽいだけで実的な意味がないように思われる。しかし、区別することは重要で複素数を使ったベキと根の解釈でこの違いは大きな意味をもつ<sup>(6, p.705)</sup>。分数の有理化では、計算方法を指示し解答を得ることになる(表1)。

### 2.1.2 2次の関数・方程式・不等式

2次の関数・方程式・不等式の分野ではグラフを描く (Plot)、解く (Solve) を中心として使用することになる(表2)。解と係数の関係や判別式の計算では、公式を理解したうえで代入計算をすることになる。最大値や最小値を求める問題では、グラフを見ながら考えることが必要になる。共有点や共有点の個数では、実数のオプションを使う等、Mathematica の深い部分が必要となるが、問題解答の補助として使用するのであればそこまでこだわる必要はない。

表 2: 2次の関数・方程式・不等式の分野

| 分野       | コマンド                                       | 備考            |
|----------|--|---------------|
| 2次関数のグラフ | Plot                                       | 問題なし          |
| 頂点       | PolynomialQuotient,<br>PolynomialRemainder | 式組み合わせ必要      |
| 最大値, 最小値 | Plot                                       | 思考と操作         |
| 2次方程式    | Solve                                      | 問題なし          |
| 複素数の計算   | +, -, *, /,<br>Expand                      | 有理化指示要        |
| 解と係数の関係  | $\ /.x- > a$                               | 代入計算のみ        |
| 判別式      | $\ /.x- > a$                               | 代入計算のみ        |
| 共有点      | Solve                                      | 問題なし          |
| 共有点の個数   | Solve, Reals                               | 問題なし          |
| 接点       | 公式代入                                       | 判別式代入計算       |
| 不等式      | Solve, Reals                               | ver.4 × ver.5 |
| 絶対値不等式   | Solve, Reals                               | ver.4 × ver.5 |

### 2.1.3 命題・等式・関数

命題・等式・関数の分野では、証明問題を解答させる部分では Mathematica には無理がある(表3)。命題計算などは、Mathematica で可能であるが、わざわざそのための定義と計算規則を遂行するのは、教科書の問題を解くには大げさである。証明過程での式変形や

結果の確認がおもな利用法となる。不等式の解を求めるには、Ver.5 以降を使用する。

表 3: 命題・等式・関数の分野

| 分野             | コマンド                           | 備考            |
|----------------|--------------------------------|---------------|
| 集合             | $\cap, \cup, \subset, \supset$ | 無限集合, リスト     |
| 命題, 必要条件, 十分条件 | 証明不可                           | 命題計算可能        |
| 背理法, 数学的帰納法    | 証明不可                           | 式変形可能         |
| 恒等式            | Solve, ほか                      | 式変形           |
| 剰余の定理, 因数整理    | $\ /.x- > a$                   | 代入計算          |
| 高次不等式          | Solve, Reduce                  | ver.4 × ver.5 |
| 等式・不等式の証明      | Solve, Reduce                  | ver.4 × ver.5 |
| 関数とグラフ         | Plot                           | 問題なし          |
| 偶関数・奇関数        | $\ /.x- > -x$                  | 代入計算          |
| 分数関数           | Plot                           | 問題なし          |
| 無理関数           | Plot                           | 問題なし          |
| 無理方程式          | Solve                          | 問題なし          |
| 逆関数            | Solve                          | 問題なし          |

### 2.1.4 指数関数・対数関数

指数関数・対数関数の分野では、計算が中心であり、Mathematica で十分対応できる(表4)。

表 4: 指数関数・対数関数の分野

| 分野    | コマンド        | 備考            |
|-------|-------------|---------------|
| 累乗根   | +, -, *, /, | 問題なし          |
| 指数関数  | Plot, Solve | 問題なし          |
| 対数関数  | 書き換え        | 意味を理解         |
| 対数不等式 | Solve       | ver.4 × ver.5 |
| 大小比較  | -           | 差を調べる         |

### 2.1.5 三角関数

三角関数の分野では、計算が中心であり、Mathematica で十分対応できる(表5)。証明は(左辺)-(右辺)=0で計算できるが、式変形の経過は確認できない。 $^{\circ}$ (Degree) は定数であり、積として弧度法へと変換され、あたかも度の単位で計算したような効果がある。

### 2.1.6 平面上の図形

平面上の図形の計算では、基本的に公式に代入する形が多い。状況に応じて式変形をする。領域に色をつけたい場合は FilledPlot(標準ライブラリ<sup>(7)</sup>の読み込みが必要)など特殊な機能が必要になる(表6)。平方完成の関数は Mathematica の組み込み関数にはない。式をみながら手作業で変形をする必要がある。

表 5: 三角関数の分野

| 分野      | コマンド                              | 備考            |
|---------|-----------------------------------|---------------|
| 三角関数の値  | <i>Sin, Cos, Tan, Degree</i>      | 一般角, 弧度法      |
| 等式の証明   | <i>Simplify, Plot, TrigReduce</i> | 問題なし          |
| 三角関数の合成 | $\sqrt{x} > a$                    | 代入計算          |
| 三角方程式   | <i>Solve</i>                      | 問題なし          |
| 三角不等式   | <i>Solve</i>                      | ver.4 × ver.5 |
| 三角形の解法  | <i>Factor, Simplify</i>           | 代入            |
| ヘロンの公式  | $\sqrt{x} > a$                    | 代入計算          |

表 6: 平面上の図形の分野

| 分野         | コマンド                      | 備考      |
|------------|---------------------------|---------|
| 内分点外分点     | $\sqrt{x} > a$            | 代入計算    |
| 距離         | $\sqrt{x} > a$            | 代入計算    |
| 直線の方程式     | $\sqrt{x} > a$            | 代入計算    |
| 2直線の関係     | $\sqrt{x} > a$            | 代入計算    |
| 軌跡         | $\sqrt{x} > a$            | 代入, 式変形 |
| 円の方程式      | $\sqrt{x} > a$            | 平方完成    |
| アポロニウスの円   | $\sqrt{x} > a$            | 代入, 式変形 |
| 2次曲線       | $\sqrt{x} > a$            | 代入計算    |
| 不等式と領域     | <i>Reduce, FilledPlot</i> | ライブラリ   |
| 領域における最大最小 | <i>Plot</i>               | 解の参考程度  |

### 2.1.7 個数の処理

個数の処理の分野では、順列の組み込み関数はもたない。階乗 (!) を使って計算することになる (表 7)。組み合わせは Binomial が使用できる。規則的な書き出しと数え上げは Mathematica の得意な計算であるが効果的な式を作り上げるには Mathematica を深く知っておく必要があり、学生が答え合わせに使用するには大がかりすぎる。計算を Mathematica に指示し電卓のかわりに使う。

表 7: 個数の処理の分野

| 分野   | コマンド        | 備考   |
|------|-------------|------|
| 場合の数 | !           | 問題なし |
| 二項定理 | !, Binomial | 問題なし |

## 2.2 2年の数学

2年の数学は大きくわけて、微分積分と線形代数である。分野は数列、微分法、積分法、ベクトルと図形、行列と行列式からなる。

### 2.2.1 数列

等差数列, 等比数列では、公式に代入することにより一般項や和を求める。初項や公差などの数を求めるには連立方程式を解けばよい (表 8)。Mathematica は、総和 (Sum) や極限 (Limit) も組み込み関数としてもち、計算には困らない。

表 8: 数列の分野

| 分野         | コマンド                           | 備考      |
|------------|--------------------------------|---------|
| 等差数列, 等比数列 | $\sqrt{x} > a$<br><i>Solve</i> | 公式に代入   |
| 和,         | <i>Sum</i>                     | 問題なし    |
| 数学的帰納法     | $\sqrt{x} > a$                 | 代入, 式変形 |
| 無限数列, 極限   | <i>Limit</i>                   | 問題なし    |

### 2.2.2 微分法

ほとんどの問題が Mathematica の組み込み関数で処理できる (表 9)。増減表をかく機能はないが、グラフ描画 (Plot) を使用することで代用できる。不等式の証明においても増減表の代わりはグラフ描画で対応できる。

表 9: 微分法の分野

| 分野                 | コマンド                          | 備考     |
|--------------------|-------------------------------|--------|
| 導関数                | <i>Diff</i>                   | 問題なし   |
| 接線, 速度             | $\sqrt{x} > a$                | 公式に代入  |
| 関数の増減              | <i>Plot</i>                   | グラフで確認 |
| 極値                 | <i>Diff, Solve</i>            | 問題なし   |
| 関数の最大値最小値          | <i>Plot</i>                   | 問題なし   |
| 関数の極限              | <i>Limit</i>                  | 問題なし   |
| 関数の連続性, 中間値の定理     | <i>Limit, \sqrt{x} &gt; a</i> | 問題なし   |
| 対数関数・指数関数・三角関数の導関数 | <i>Diff</i>                   | 問題なし   |
| 導関数の応用             | <i>Diff, Plot</i>             | 問題なし   |
| 実数解の個数             | <i>Solve, Plot</i>            | 問題なし   |
| 不等式の証明             | <i>Plot</i>                   | 問題なし   |
| 接線・法線と近似式, 速度加速度   | $\sqrt{x} > a$                | 公式に代入  |

### 2.2.3 積分法

積分に対しては組み込み関数の積分 (Integrate) で対応できる (表 10)。三角関数や対数関数などで結果が複雑な形になるものはさらに式変形が必要となる。

表 10: 積分法の分野

| 分野                 | コマンド                       | 備考           |
|--------------------|----------------------------|--------------|
| 不定積分               | <i>Integrate, Simplify</i> | 三角対数関数は式変形必要 |
| 定積分                | <i>Integrate</i>           | 問題なし         |
| 囲まれた面積, 体積, 回転体の体積 | <i>Integrate</i>           | 公式代入         |

### 2.2.4 ベクトルと図形

ベクトルはそのまま Mathematica で計算でき代入なども問題ない(表 11). 図形に関しては公式への代入計算やグラフ描画など補助的な役割を果たす. 問題によっては代入計算を実行するまえに立式が必要なものもある.

表 11: ベクトルと図形の分野

| 分野            | コマンド                    | 備考         |
|---------------|-------------------------|------------|
| ベクトル          | <code>/.x-&gt;a</code>  | 立式必要       |
| 直線, 法線, 距離, 円 | <code>/.x-&gt;a</code>  | 立式必要, 公式代入 |
| 空間ベクトル        | <code>+, -, *, /</code> | 問題なし       |
| 直線, 平面, 球     | <code>+, -, *, /</code> | 公式代入       |

### 2.2.5 行列と行列式

行列と行列式はそのまま Mathematica で計算でき代入なども問題ない(表 12).  $n$  乗に関しては  $M^n$  ではなく行列の  $n$  乗 (MatrixPower) を使用する. 行列の積はピリオド (.) を使用する. 教科書などの記号と異なるので注意が必要である. 逆行列 (Inverse), 転置 (Transpose), 行列式 (Det), 固有値 (Eigenvalues), 固有ベクトル (Eigenvectors), ガウスの消去法 (RowReduce) などの関数名は覚えておく必要がある. 行列式の展開は組み込み関数がなく手操作またはプログラムの必要があり, 補助的な使用にとどまる. 掃き出し法も途中の変形を確認したければ手操作またはプログラムの必要がある. 階数 (MatrixRank) はバージョンを確認し使用する.

表 12: 行列と行列式の分野

| 分野      | コマンド   | 備考            |
|---------|--|---------------|
| 行列      | <code>+, -, *, /, ...</code><br><code>MatrixPower</code> | $M^n$ は意味が異なる |
| 逆行列     | <code>Inverse</code>                                     | 問題なし          |
| 1 次変換   | <code>Transpose, .</code>                                | 問題なし          |
| 行列式, 展開 | <code>Det</code>   | 手操作           |
| 掃き出し法   | <code>RowReduce, [[]]</code>                             | 手操作           |
| 固有値と対角化 | <code>Det, Solve,</code><br><code>EigenSystem</code>     | 問題なし          |
| 行列の階数   | <code>MatrixRank</code>                                  | ver.4 × ver.5 |

## 2.3 3 年の数学

3 年の数学は微分法, 積分法, 偏微分と重積分, 微分方程式と複素数の 5 分野からなる.

### 2.3.1 微分法

3 年の微分法は高次導関数や逆関数の微分法, ロピタルの定理, ベキ級数などである. 計算は Mathematica の組み込み関数で処理でき, 学生の問題演習の補助と

して使用して問題ない(表 13). 曲線の凹凸や変曲点については, 増減表の代わりにグラフで対応する. 収束半径などは公式に代入し極限計算を行う. 収束を判定するための基礎的な知識は理解していなければならない.

表 13: 微分法の分野

| 分野              | コマンド                      | 備考    |
|-----------------|---------------------------|-------|
| 第 2 次導関数と凹凸     | <code>Diff, Plot</code>   | 問題なし  |
| 逆関数             | <code>Solve</code>        | 問題なし  |
| 媒介変数            | <code>Plot</code>         | 問題なし  |
| 速度加速度           | <code>Diff</code>         | 公式に代入 |
| 極座標と曲線          | <code>PolarPlot</code>    | 問題なし  |
| 平均値の定理, ロピタルの定理 | <code>Limit</code>        | 問題なし  |
| テイラーの定理         | <code>Series, Diff</code> | 公式に代入 |

### 2.3.2 積分法

積分は組み込み関数で処理できる(表 14). 誤差関数については基本的な知識が必要である. 積分  $\int_0^{\infty} e^{-x^2} dx$  の値は警告がでるが Integrate 関数で計算結果は問題なく得られる. 三角関数や対数関数などで結果が複雑な形になるものはさらに式変形が必要となる. Mathematica の組み込み関数で区分求積法を自動的に積分に変換してくれる関数はない. 学生が自力で変換しなければならない.

表 14: 積分法の分野

| 分野    | コマンド                    | 備考           |
|-------|-------------------------|--------------|
| 積分法   | <code>Integrate</code>  | 三角対数関数は式変形必要 |
| 定積分   | <code>Integrate</code>  | 問題なし         |
| 区分求積法 | <code>Limit, Sum</code> | 積分置換え不可      |
| 極座標   | <code>Integrate</code>  | 問題なし         |
| 曲線の長さ | <code>Integrate</code>  | 公式に代入        |
| 広義積分  | <code>Erf</code>        | erf 関数       |

### 2.3.3 偏微分と重積分

偏微分と重積分の分野でも微分 (Diff) と積分 (Integrate) で対応できる(表 15). Mathematica は多変数関数の極値を求めるための連立方程式も解ける. 全ての解をもらって見つけてくれるので, 学生が自分の計算した答えを検証するのに適する. ラグランジュの乗数法を計算する場合なども便利に使える. 2 変数関数であればグラフ描画 (Plot3D) で極値の様子などを見ることが出来る. グラフでは, 連続かどうかの確認などもでき, 重宝する.

表 15: 偏微分と重積分の分野

| 分野                        | コマンド                   | 備考                |
|---------------------------|------------------------|-------------------|
| 偏微分, 連続,<br>平均値の定理, 全微分   | <i>Diff</i>            | 問題なし              |
| 極値, 陰関数定理,<br>接線, 法線, 解異点 | <i>Diff, Solve</i>     | 問題なし              |
| ラグランジュの乗数法                | <i>Diff, Solve, 代入</i> | 問題なし              |
| 重積分                       | <i>Integrate</i>       | 順序変更は別<br>自動変更は不可 |
| 極座標による重積分                 | <i>Integrate</i>       | 問題なし              |

### 2.3.4 微分方程式

微分方程式は微分方程式の解析解 (Dsolve) で求めることができる (表 16). 初期値問題や境界値問題も Dsolve で解ける. Dsolve は学生が微分方程式を解けなくても解を求めてしまうため, 解法の練習としては役立たない. 検算として利用することになる. 全微分方程式や特殊な形の微分方程式では, あらかじめ行っておくべき変形などの知識も必要になる. Mathematica の組み込み関数では包絡線や特異解などは自動的に求めてくれない. 手順に従って計算する必要がある.

表 16: 微分方程式の分野

| 分野     | コマンド          | 備考     |
|--------|---------------|--------|
| 微分方程式  | <i>Dsolve</i> | 問題なし   |
| 全微分方程式 | <i>Dsolve</i> | 基礎知識必要 |

### 2.3.5 複素数

3年の複素数は加減乗除とド・モアブルの定理で本校では1年または2年で講義される. 計算に関しては Mathematica の組み込み関数で問題なく計算できる (表 17). 複素方程式で与えられた図形がどんな図形かは学生が式変形を行い自ら判断する必要がある.

表 17: 複素数の分野

| 分野        | コマンド               | 備考     |
|-----------|--------------------|--------|
| 複素数と演算    | $+, -, *, /$       | 問題なし   |
| 複素平面      | <i>ListPlot</i>    | 問題なし   |
| ド・モアブルの定理 | 公式代入               | 問題なし   |
| $n$ 乗根    | <i>Solve</i>       | 問題なし   |
| 図形への応用    | <i>Abs, Im, Re</i> | 図形判断不可 |

## 3. まとめ

高専の1年から3年の教科書を通して問題を解いてみることで, ほとんどの問題が Mathematica の基本関

数で解けることがわかった. 計算途中の論理的過不足も判明し, 問題の途中で漠然としていた点も違った視点から眺め直すことによりはつきりする. そういった意味で, 学生に早くから数式処理ソフトのリテラシー教育を行うことは重要である. 学生は数式処理ソフトの使用法を体得すると同時に, いろいろな使い方を知ることになる. 数式処理ソフトは本来, 論文作成時の計算の検証に使用されてきたものであり, 技術者の基礎的な能力を向上させるために有用である. また, 情報をわかりやすく計画提案する能力も数式処理ソフトのリテラシーで向上するものと期待できる.

## 4. おわりに

最も商業的に成功しているといわれている数式処理ソフトは Mathematica であり, 現在の最新 Mathematica のバージョンは7である. 総合情報センターに導入されている Mathematica はバージョンが4.2であり不等式を解いたり, 行列の階数を関数1つで計算するにはいたらない, 今回の調査で判明したように Mathematica は学生が問題を解くに当たっての補助機器として学生を助けることができる. バージョンがあがるにつれ使い易くなっており, web やネットワークの機能も取り込みつつある. また工学分野では, 設計, 開発, 生産の標準的ツールになりつつある.

学生が自ら問題をみつけ探求していくためにコンピュータテクノロジーの効果は圧倒的であり, とくに Mathematica の計算能力とグラフィックの機能だけでも学生の勉学に利益をもたらす.

学生が問題を解いている傍らに数式処理システムがあり, 必要なときに計算を試したりアルゴリズムを確認したりということがすぐにできる環境で勉強できることは技術者の基礎的な能力を向上させ, みずから考えるという能力をはぐくむものと考えられる.

そういった意味で, 数式処理システムをわかりやすく使いこなす数学の授業計画を今後とも提案していきたい.

### 参考文献

- (1) 田代嘉宏, 難波完爾: 「新編 高専の数学 1 (第 2 版)」, 森北出版, 2000.
- (2) 田代嘉宏, 難波完爾: 「新編 高専の数学 2 (第 2 版)」, 森北出版, 2000.
- (3) 田代嘉宏, 難波完爾: 「新編 高専の数学 3 (第 2 版)」, 森北出版, 2000.
- (4) 梶原壤二: 「Mathematica と Theorist での大学院入試への調査園」, 現代数学社, 1994.
- (5) 田村直行: 「神戸大学 Mathematica 入門ページ」, <http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/mma/nyumon/>.
- (6) Stephen Wolfram.: 「The Mathematica Book, 5th ed.」 Wolfram Media , 2003.
- (7) Wolfram Research: 「Guide to Standard Mathematica Packages」, Wolfram Research, Inc.

# 契丹陶磁の「周縁性」に関する検討 - 唾壺と陶枕を例に -

町田 吉隆\*

Examining on the Border Character of the Kitai Pottery in China  
: With the Spit Pots and the Pillows in the Liao Dynasty as examples

Yoshitaka MACHIDA\*

## ABSTRACT

We are able to find out an archaic style in the Kitai(契丹)Pottery. These styles are similar to the pottery in the Tang(唐)Dynasty rather than the pottery in the Northern Song(北宋)Dynasty of the same era(A.D.10-12c). In other words, the style of the Kitai pottery is the border character. This paper will survey one of the characteristics of the Kitai pottery. It seems reasonable to assume that the style of the Kitai pottery in the Liao Dynasty(遼朝) is not archaic but combined. We can see the combined feature in the Spit Pots(唾壺) and the Pillows(陶枕) of some strange shapes.

*Keywords* : pottery, Kitai(契丹), Liao Dynasty(遼朝), China, history

## 1. はじめに

10世紀初めから12世紀初めにかけて北東アジア、華北、内陸アジアにまたがる領域を支配した契丹国(遼朝、以下、「契丹国」と表記)の陶磁器のうち、その領域内で生産された陶磁器を、ここでは「契丹陶磁」と規定する。

契丹国の陶磁器には古風な特徴があることが指摘されている。それは10世紀から12世紀にかけて生産されたものであるにもかかわらず、むしろ唐代の陶磁器に類似しており、同時代の北宋時代の陶磁器とは異なる様式であることを意味する。そして、それはしばしば中心文化が地方へと波及する時差により遅れることを意味する「周縁性」として説明されてきた。この論考では契丹陶磁の有する「周縁性」という言説について検証を行い、その特色の実像と、そのような特徴が形成された要因について考えてみたい。具体的には唾壺(唾や破棄された飲食物を入れる壺)と陶枕(陶器の枕)を例として考察する。

## 2. 契丹陶磁の特色

筆者らは2008年度に中華人民共和国内蒙古自治区南東地域において、2009年度に同地域と遼寧省において契丹陶磁の調査を行った。後述する[図A]の白磁唾壺、[図B]の白磁陶枕は2008年度の調査において実施した写真測量による実測図である。筆者はその調査報告において、契丹陶磁の特色を考える上で7つの研究視点を指摘した。[1]

\*一般科・准教授

遊牧民族的感覚を重視。

西アジア(イスラーム文化圏)との関係を重視。同時代の華北の諸窯(定窯、磁州窯など)との関係を重視。

渤海、五代、北宋などの文化的影響を重視。北朝から唐代へと続いた文化が地方文化としての長く残存したことを重視。

鮮卑など北東アジアの伝統文化とのつながりを重視。

金朝、元朝へと続く非漢民族王朝のさきがけとしての性格を重視。

これらは契丹陶磁の持つ多面的な性格を考える時に重要な研究視点と考えられるが、同時に「契丹陶磁とは何か」という課題を理解し難いものになっているとも言える。

契丹国の陶磁器およびそれを生産していた陶磁器窯に最初に注目し、調査を行ったのは、鳥居龍蔵、黒田源次、田村實造、三上次男、小山富士夫の各氏ら日本人研究者であった。それは20世紀の前半、特に満洲国建国、日中戦争と続くことになる日本がこの地方の侵略を進めた時期に重なる。戦後、それらの調査に基づいた報告が刊行されたが、陶磁器において、最初にまとめた報告を行ったのは、黒田源次氏であった。その見解は「遼の陶磁は遼の地で焼成した特異なもので、中国の影響をうけたとはいえ、その間には素朴な塞外民族の嗜好が強調されて深い興味をそそられるのである。」と、遊牧民族的感覚を重視するものであった。また、「これらの調

査によっていえることは、遼代の陶磁の窯はいわゆる北方系に属する丸窯焼成であって、まったくその影響を華北地方からうけていることである。しかもその系統には定窯・磁州窯系と三彩系(唐三彩の系統)、それに瑠璃瓦系がある。また別に遼陽の缸官屯窯・撫順窯があって、これは民窯として、遼・金時代と後世にまで続いている。これらはその器物の性質上、同一の場所、同一の窯で焼成されない場合が多いことも古窯址の発掘によって証明されている。またその器形が、碗・蓋のごとくほとんど中国内地の製品と相違することのないものと、民族生活を反映した鶏冠壺・長壺等の遼の独特の形体をしたものや、蒙古高原に咲く野花を想わせるような素朴な写生的文様のものもあって、この陶磁に特異性を与えている。」と総括している。〔2〕

また当時の調査環境について、杉村勇造氏は、「遼時代いらいこの地方には独自の文化は発達せず、また漢文化も移入されずに近代にいたったので、草原砂漠の中に遺存するものは石器時代の遺物か遼時代の遺品で、他の時代の文化遺物はほとんど残存せず、荒涼たる広野に土城と孤塔がそびえる風景が存するのみであった。」と記しているが、その文化について、「これらの中で特殊な形式のものには彩釉の鶏冠壺や八稜形長盤などいくつかの種類があり、また白磁の鶏冠壺があってこれらは中国の陶磁にはない形式である。がんに遼王朝を興した契丹民族は草原の騎馬民族系統で、かれらの文化は古来から西域の影響を強く受けている。」と、先の黒田氏の総括に加え、西アジアとの関係を示唆している。〔3〕

戦前期の調査参加者で、かつ戦後もこの地方の文化財に関心を持ち続けた三上次男氏は「遼でははじめ、上流階級の必需品である白磁・青磁・黒磁などの陶磁器を、中国の五代諸国、次いで北宋から大量に輸入したが、輸入陶磁器だけでは需要に追いつけず、(略)自国でも陶磁器の生産をはじめた。(略)上京・中京・東京・南京などの大都市の近くには、窯場が生まれ、いろいろな種類の陶磁器が焼き続けられた。こうした遼の国内で遼人の手によって生産されたものが遼磁である。」と契丹陶磁こそが遼磁と規定している。〔4〕

その特徴は「遼では、隣接する五代諸国や北宋の陶磁器と、器種・器形・釉色・装飾技法・文様・文様構成などの点で、大なり小なり異なった陶磁が造られている。すなわち、器形は一般に大らかであり、また皮囊壺のように他に類をみない形のものでできている。長頸瓶や長壺も一見それとわかる特長がある。こうした器形は独特な文様・文様構成・釉調などともに、そのあるものは西アジアの工芸との類似を感じさせる。」とあって、やはり前代の唐や同時代の宋など中原の中国王朝文化の影響に対して、西

アジア(イスラーム文化圏)からの影響を相対的に大きく見ていることがわかる。〔5〕このような契丹陶磁に関する理解は、日本人研究者に踏襲されていく。佐藤雅彦氏が「それら遼の陶磁の性格をあげると、まず中国の風に近いものといえるだろう。早くから中国陶磁の影響下に生れたのだから、当然のことであろう。しかしそうはいっても、全く中国のおしきせに甘んじているわけではない。形やデザインの面には、中国とはちがう素朴で手強い風格が見られる。それが契丹の民族色なのであろう。更に言えば、遼の陶磁には多色の低火度釉を用いたものが多いが、こういう色釉の頻用は、単に唐三彩や宋三彩の刺激にだけ起因するものではなく、はるかに遠いペルシャやビザンチンの多色釉陶に負うところがあったのではないかと思える。」と述べているのはその例である〔6〕

近年、中国では契丹陶磁に関する研究熱が高まっている。その中でも先駆的な存在であった閻万章氏は「遼代陶磁の職人は、主に漢人や渤海人であった。このことは文献にはっきりとした記載はないが、しかしその他の遼代手工業の職人が同じような傾向であったこと、遼が中原地区の窯場のある州県から漢人を捕まえていること、また渤海地区から出土した陶磁器との類似性などから十分に推察できる。」と契丹陶磁を焼造したのは渤海や華北から移住させられた人々であったと記している〔7〕。また、李紅軍氏は「唐末・五代の中原地区の混乱により華北、特に幽、涿州(現在の河北省)の人々が多く亡命してきた。」と述べる。〔8〕

陶工の移住、技術移転の可能性はあるが、それでは契丹陶磁の特色と、彼らが出身地で焼造していた陶磁器との関連はどのように捉えられるのだろうか。近年の中国における研究は契丹陶磁を中国陶磁史の流れの中に位置づけるものであり、契丹国に影響を与えた存在として、唐(7世紀から10世紀)の陶磁器を重く見ることにつながる。確かに低火度鉛釉陶の「三彩」の系譜を考える場合、唐の影響は大きかったと考えるべきであろう。このベクトルをさらに発展させたのが、唐代の中央文化が地方に波及して、それが地方に定着・変容したと捉える見解である。唐ではすでに失われた器形、文様などが契丹陶磁に残存していると考えられる例は少なくない。

小川裕充氏は契丹国時代の絵画について、「遼と西夏の絵画の特質は、その周縁性にある。」と述べている。そして時間的にずれ文化が波及し受容された結果、「遼の絵画が南北朝・隋唐時代のそれを受容して、逆に五代・北宋の絵画に影響をおよぼすほどの水準にまでいたった」とし、「唐的なより古い伝統を継承しつつ、宋的なより新たな創造を受容

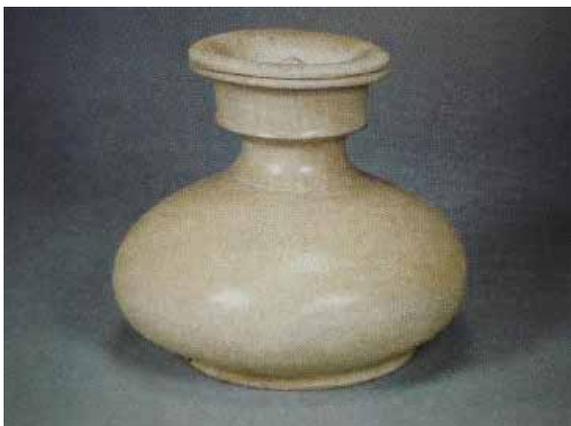
してゆく、遼の絵画のこのような性格」こそ、その「周縁性」の現れであると論じられた。〔9〕

このような考え方は陶磁器にも適用できるだろうか。そこで問題になるのが、個々の陶磁器（片）がどこで、どのように生産されたのかは、必ずしも自明ではないということである。弓場紀知氏は述べる。「遼墓から出土する陶磁器の中には、定窯、耀州窯・磁州窯、さらには南中国の越州窯や景德鎮窯の青磁や白磁が含まれ、厳密に遼独自の陶磁器のあり方をとらえることは、容易ではない。」「遼の国内で生産された陶磁が北宋の陶磁とどう影響関係を持つのかということや、北宋の陶磁がどういう形で遼の国内に入ったのかということもかならずしもはっきりとはしない。」「〔10〕いたづらに影響関係にとらわれない慎重な考察を進めると、「遼の領域の陶磁はその大半が中原、すなわち北宋の陶磁窯で生産された陶磁器によって、その供給はなされたのである。そうした流れの中でいわゆる遼磁は生産されたが、それが遼独自のスタイルと見ることは、かならずしも適当ではない。すなわち、北宋の陶磁の模倣の上に立って生産されたのが、遼磁なのである。」という見解に至る。〔10〕

以上のように、「契丹陶磁とは何か」をめぐる見解は複雑な様相を示している。その根底には契丹陶磁の多面的な要素を、どのように統一的に把握するかという課題がある。ここではまず原点に戻って、個々の器形から考えてみることにしたい。

### 3. 契丹国時代の唾壺（渣斗）

唾壺は現代の日本では用いられなくなった容器である。唾壺とは「扁球形の胴部に漏斗状に大きく開いた口頸部が付属した形状を呈する。中国では、金属器や漆器に漢時代まで遡る事例があり、六朝～唐時代には浙江省の越州窯などで陶磁器の唾壺も盛んに生産されていた。」「〔11〕〔写真 〕は隋から唐代初期にかけて作られたと思われる白磁唾壺である。（『世界陶磁全集 11』小学館 1976,p.30より転載）



〔写真 〕 白磁唾壺 7世紀 H:11.6cm

唾壺（渣斗）は「渣斗は古代の貴族が宴会の際に、唾を吐いたり、魚や肉の骨を入れたことにちなんで名づけられた。また唾盃、唾壺とも言う。」「〔12〕と説明されるように廃棄のための容器であるが、ガラス製、金属器製も含め、高級品として流通・使用されたことは、10世紀末に編纂された宋代の筆記小説にも見えるところである。〔13〕この小説中の「美夫人」薛靈藝が涙を溜めた「玉唾壺」はあるいは白磁、青磁などの陶磁器製であったとも考えられよう。これら青磁の唾壺は日本でも平城京から出土している。〔14〕

日本に将来された唾壺は、おそらくは江南地方で焼成された越州窯系の青磁が多かったのではないかと推測されるが、唾壺の形は10世紀に入ると、大きく変化する。〔写真 〕のような上碗部の口がすぼまった蓋付きのものではなく、上碗部が大きく開き、胴腹部が扁球形の型式が現れる。〔写真 〕はそのような越州窯の唾壺の優品が韓国で伝世された例である。（『世界陶磁全集 12』小学館 1976,pp.50より転載）



〔写真 〕 青磁蓮唐草文唾壺 10世紀後半から11世紀 韓国国立中央博物館所蔵  
H:12.0cm D:20.0cm

路菁氏は「この器は中原では旧式であったが、遼代にはかえて盛んに用いられた。」とされるが、氏が4つの型式に分類している契丹国時代の唾壺は、広く捉えれば皆この型式に属する。〔12〕

つまり10世紀後半に多く現れる契丹陶磁の唾壺は、隋、唐代初期に華北の、おそらくは邢州窯などで生産された〔写真 〕の旧型式ではなく、唐末・五代以降に現れる上碗部が大きく開いた〔写真 〕のような新型式の唾壺だったと考えられる。〔図A〕は後者に属する遼上京博物館所蔵の白磁唾壺（林東・北山で1990年出土、高さ13.0cm、上碗部直径17.0cm）である。〔15〕この型式の唾壺は陳国公主墓の人物壁画の中にも描かれている。〔16〕

唾壺は10世紀の日本にも将来された記録が残る。『仁和寺御室御物実録』の天曆4年（950）の条に、青茶垵提壺壺口、（略）青瓷鉢壺口有輪、（略）

白茶坑唾壺壺口。〔17〕

と見える。「青瓷」はこの場合、「あをし」つまり日本で焼成された緑釉陶器を指すので、この唾壺が平安時代に輸入されたことがわかる。その型式はこの文献史料からは読み取れないが、その参考例は現存する。東大寺正倉院が所蔵する御物にコバルトブルーのガラス製唾壺がある。この唾壺は『東大寺別當次第』治安元年(1021)十月一日の条に「前左衛門尉平致経、紺瑠璃唾壺を施入す。由縁あり。仰ぎて蔵に之を納む。」と記録されているものと同一品と考えられている。正倉院に納められたのが11世紀初め、作成年代は遡っても10世紀後半であろう。この唾壺も上碗部が開き、胴腹部の丸い型式である。

正倉院の紺瑠璃唾壺は西アジアで作られたものと考えられている。これがどのような経緯で日本にもたらされたかはわからないが、北東アジアの唾壺に10世紀から12世紀に同一の型式が見られることが確かめられる。契丹陶磁の唾壺も同時代の中国に対する「周縁性」という枠組みの中だけでは捉えきれないように思われる。

#### 4. 契丹国時代の陶枕

「唐時代の陶枕は小型で、単純な方形のものが多く、北宋時代になるとしだいに大型化し、豆形や如意頭形、あるいは動物をかたどったものなど、多種多様な器形があらわれる。〔18〕と定義されるように、陶枕もその器形が多様な陶磁器である。日本へは三彩の方形枕が奈良時代から平安時代の初めに将来されているが、〔19〕10世紀以降、北宋代の陶枕が輸入された例はほとんど知られていない。

陶枕は唐代においては、後に「邯鄲の夢枕」として知られるようになる呂翁が廬生に枕を貸す話の中に登場する。枕が中空になっており、端部に焼成時の破損を防ぐために孔が二つ穿たれているとの描写は、実際の陶枕そのものである。〔20〕

北宋では夏季の風物として士大夫に愛好されていた。〔21〕その趣味に応えるために詩文が枕面に描か



〔写真〕如意形白地黒水文枕 12世紀  
W:23cm D:31cm H:13.2cm  
磁県都党郷冶子村出土、磁県博物館所蔵

れるものもあつたし、金の時代に入ると辟除のため、虎形に成形された枕もあつた。器形の多様化がこの時代の特色であり、それらの陶枕の多くが、華北の磁州窯系の窯場で生産されていた。

〔写真〕は如意頭形枕の一つである。(張子英編著『磁州窯瓷枕』人民美術出版社 2000,p.49より転載)一方、〔図B〕は遼上京博物館所蔵の白磁陶枕である。長さ20.5cm、最低高8.5cm。彭善国氏によれば、「枕は紀年が明確な墓葬出土例が無いが、同じく副葬された鶏冠壺から、11世紀初期と考えられる。枕の型式はほぼ同一で、枕面は長方形で、枕面の下はややくぼみ、枕面が屋根状を呈する。側面から眺めると逆台形に見える。中原地方で五代宋初に流行した型式であり、連雲港市の五代墓出土品と類似している」と言う。〔22〕〔23〕

確かに内蒙古自治区、遼寧省各地の博物館に収蔵されていた陶枕もこの型式が多く、11世紀初めの北宋における陶枕の多様な型式に比べ、その展開に乏しい。契丹国では実際の生活では使用されず、「尸枕(副葬品)」として用いられたのかもしれない。

いずれにせよ、陶枕に関しては、華北において唐末・五代の10世紀に流行したタイプが契丹陶磁において長期間にわたって好まれていたことがわかる。その点においては遼代絵画に見られる「周縁性」が陶磁器にも適用することができるかもしれない。契丹陶磁が同時代の北宋における陶磁器の器形・型式をそのままは受容していなかった例と言えよう。

#### 5. むすび

契丹陶磁の性格をめぐっては、さまざまな立場から検証が加えられているが、現在のところ、まとまりのある解釈・定説が存在しない状況である。

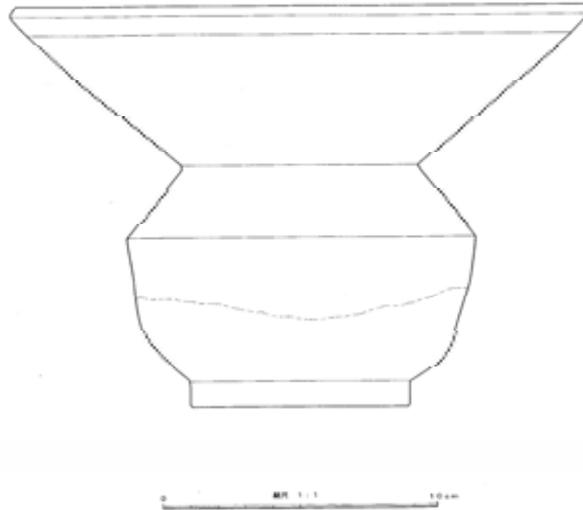
契丹陶磁においては、数量の少ない、稀な器形と言ってもよい唾壺と陶枕であるが、生産された型式から考えると、唾壺は当時、最も流行していた型式を受容し、生産・使用していたと考えられるのに対し、陶枕は保守的なまでに唐代・五代の10世紀以来の型式を用いていた。その使い分けには契丹国の社会に由来する何らかの要因があったと考えられる。今後、その要因とは何かについて考えてゆく必要があるが、その作業には同時代の朝鮮半島や日本を含む周辺諸国での陶磁器の生産と使用との比較が欠かせない。一つの器形についても、大きく言えば、西アジア、内陸アジアから北東アジアにまたがる地域における事例から考えなければ、契丹陶磁の複雑な多様性を見落としてしまうことになる。

契丹陶磁における唾壺と陶枕の例においては、当時の契丹国の社会は同時代の隣国・宋の社会の影響を強く受けながら、意識的にせよ、無意識的にせよ、その文化を取捨しながら受容していたことが窺われ

る。その文化変容の過程、内容を追うことによって、契丹国の特質が見えてくるのではないかと考えている。一つの可能性として、10世紀から12世紀の北東アジアの中で、契丹国が「周縁」にありながら「るつぽ」としての性格を有していたのではないかと

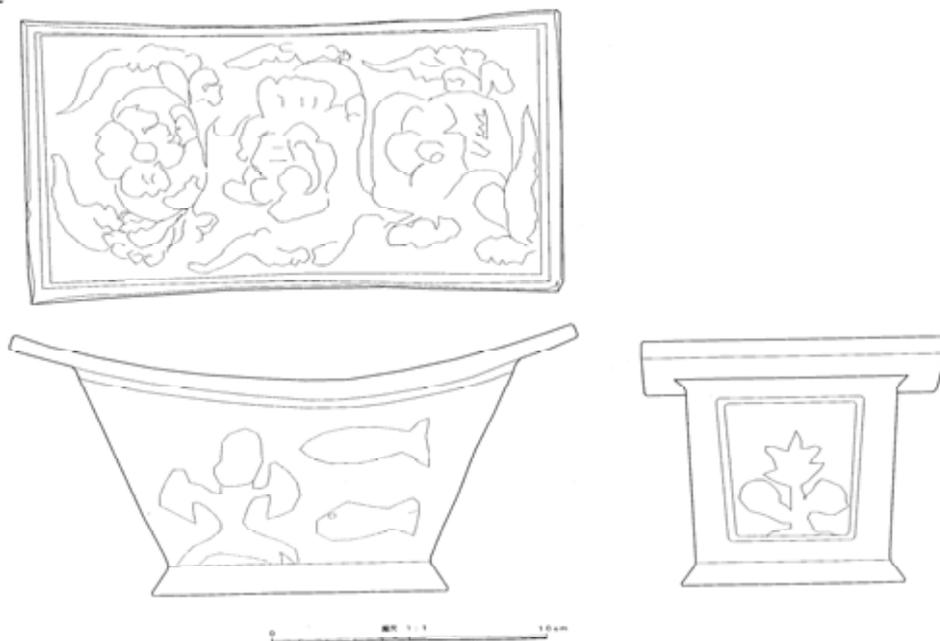
考えている。今後、実証的な例をより多く探すことが求められる。

遼上京 唾壺



[ 図 A ] ステレオ写真による白磁唾壺の立面図（遼上京博物館所蔵） 撮影・図化：株式会社エムズ

遼上京 枕



[ 図 B ] ステレオ写真による白磁陶枕の立面図・平面図・側面図（遼上京博物館所蔵）  
撮影・図化：株式会社エムズ

## [ 謝辞 ]

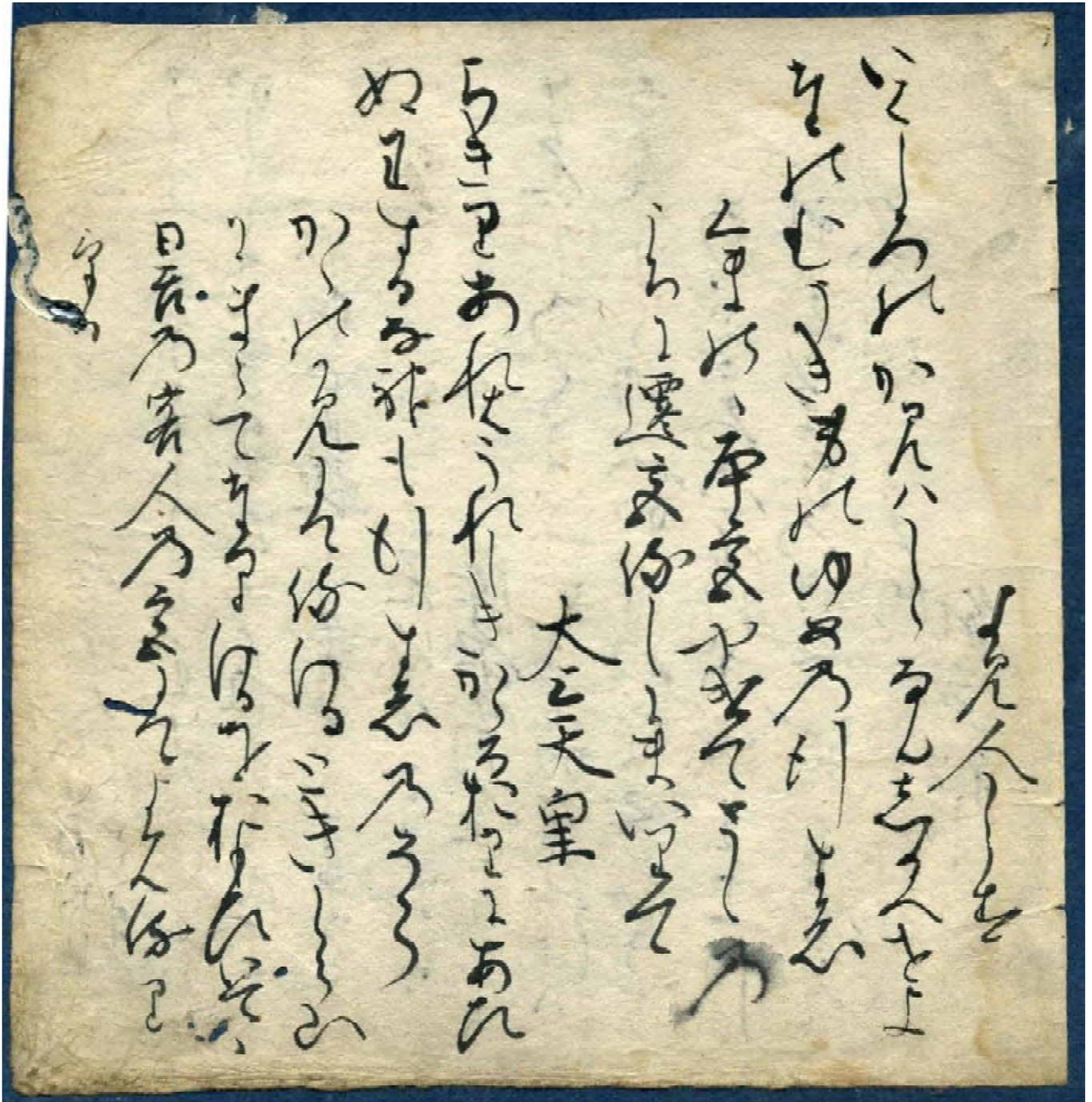
所蔵文化財の撮影を許可いただいた中国・内蒙古自治区赤峰市「遼上京博物館」の王未想館長はじめ、関係各位にお礼申し上げます。

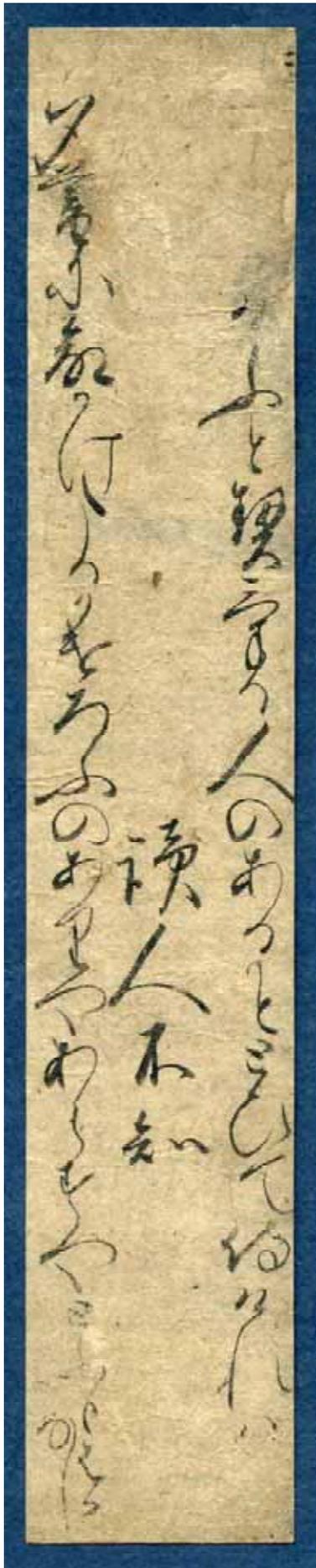
## [ 付記 ]

本稿は公益信託西田記念東洋陶磁史研究基金平成21年度助成金および神戸市立工業高専平成20年度共同研究費(研究助成)奨励研究18「遼・金・元(10-13世紀)の鉛釉陶器生産と瑠璃瓦生産の基礎的考察」による成果の一部である。

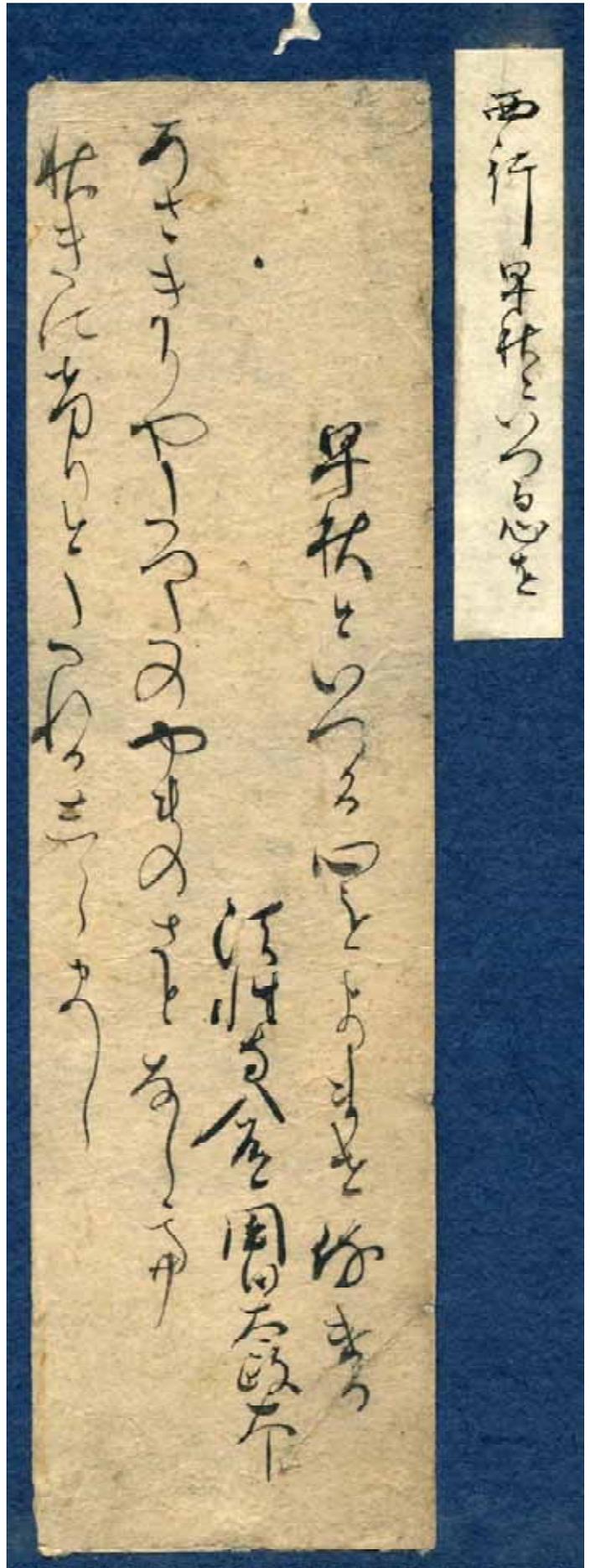
## 註および参考文献

- [ 1 ] 町田吉隆「契丹国(遼朝)の陶磁窯とその特色」町田吉隆編『契丹陶磁 - 遼代陶磁の資料と研究 - 』朋友書店 2008, pp.10-11.
- [ 2 ] 黒田源次、杉村勇造『遼の陶磁』平凡社 1958, p.1, p.7.
- [ 3 ] 杉村勇造『遼の陶磁』平凡社 1974, p.93, p.110.
- [ 4 ] 三上次男「渤海と遼の陶磁」『世界陶磁全集 13』小学館 1981(のち『三上次男著作集 4 中国陶磁史研究』中央公論美術出版社 1989, p.101.)
- [ 5 ] 三上次男「渤海・遼・金・元の陶磁器生産とその歴史的背景」『世界陶磁全集 13』小学館 1981(のち『三上次男著作集 4 中国陶磁史研究』中央公論美術出版社 1989, pp.106-107.)
- [ 6 ] 佐藤雅彦「遼の陶磁」『中国陶瓷全集 17』月報 上海美術出版社 1986
- [ 7 ] 閻万章「遼代陶磁」『中国陶瓷全集 17』上海美術出版社 1986, pp.154-175.
- [ 8 ] 李紅軍『遼代陶瓷 鑑定與鑑賞』江西美術出版社 2003, p.11.
- [ 9 ] 小川裕充「遼・西夏の絵画 総論」『世界美術大全集 東洋編 5 五代・北宋・遼・西夏』1998, p.125.
- [ 10 ] 弓場紀知「陶磁器」『世界美術大全集 東洋編 5 五代・北宋・遼・西夏』1998, p.237, p.242.
- [ 11 ] 尾野善裕「唾壺」『歴史考古学大辞典』吉川弘文館 2007, p.733.
- [ 12 ] 路菁『遼代陶瓷』遼寧画報出版社 2003, pp.114-115.
- [ 13 ] 『太平廣記』卷 272「薛靈藝」  
薛靈藝常山人也。年十五容貌絶世。郡守以千金賈賂聘之。入宮、靈藝泣別父母、以玉唾壺盛淚。及至京師、壺中淚凝如血。
- [ 14 ] 矢部良明「隋・唐の文化と陶磁」『世界陶磁全集 11』小学館 1976, p.189.  
「平城京の調査では、奈良三彩や須恵器などともに、越州窯の青磁が出土している。東一坊の溝から隆平通宝などとともに出土した唾壺はその一例である。薬師寺西僧坊では、奈良三彩、緑釉、灰釉陶とともに、中国製の白磁、青磁や長沙窯の青磁水注が発見されている。平城京の唾壺は、調査関係者は伴出品より九世紀としているが、そのものは八世紀まであげることでもできよう。」
- [ 15 ] ステレオ立体写真による撮影作図を行った。詳細は重森博「ステレオ写真を活用した文化財図化技術とその応用」を参照。町田吉隆編『契丹陶磁 - 遼代陶磁の資料と研究 - 』朋友書店 2008, pp.23-26.
- [ 16 ] 内蒙古自治区文物考古研究所・哲里木盟博物館編『遼陳国公主墓』文物出版社 1993, p.8.
- [ 17 ] 『仁和寺御室御物実録』一卷 尊経閣叢刊本 1931
- [ 18 ] 今井敦「陶枕」『歴史考古学大辞典』吉川弘文館 2007, p.833.
- [ 19 ] 三上次男「中国の陶枕 - 唐より元へ」『楊永徳収蔵・中国陶枕展図録』1984(のち『三上次男著作集 4 中国陶磁史研究』中央公論美術出版社 1989, pp.222-238.)
- [ 20 ] 沈既濟「枕中記」『文苑英華』卷 833  
翁探囊中枕、以授之曰、子枕吾枕當令子適如志。其枕青瓷竅其兩端、生俛首就之見其竅。  
『文苑英華』そのものは宋代初 10 世紀末に編纂された。
- [ 21 ] 張耒「謝黃師是惠碧瓷枕」『柯山集』卷 10 武英殿聚珍版集本  
鞏人作枕堅且青、故人贈我消炎蒸。  
持之入室涼風生、腦寒髮冷泥丸驚。  
夢入瑤都都玉城、仙翁支頤飯未成。  
鶴鳴月高夜三更、報秋不勞桐葉聲。  
我老耽書睡苦輕、邊牀惟有書縱橫。  
不如華堂併玉屏、寶鈿耀斜雲鬢傾。
- [ 22 ] 彭善国『遼代陶瓷の考古学的研究』吉林大学出版社 2003, pp.175-176.
- [ 23 ] 南京博物院等「江蘇連雲港市清理四座五代北宋墓葬」『考古』1987 年第 1 期





図版 2



図版 1

当該断簡 伝為相筆本  
 1910 たのむうき身の ― たのむうき世の  
 1913 はまゝつかえも ― はまゝつかえに

なお、道経歌については、穂久邇文庫蔵本では第五句「かけぬひぞなき」とある。やはり穂久邇文庫蔵本の本文は精査する必要があるようだ。

### 三、おわりに

右の三葉は、管見の範囲ではいずれもツレを見いだせていない。既に述べたように、古筆切は一葉でも多くのツレを集めなければ、書写年代の古さという貴重な特質を生かすことができない。右の三葉を公開することによって新たなツレが見いだされることを期待する。

『新古今和歌集』の古筆切の多くは、未だ整理されることなく各地に残されている。これらを整理し、完本を中心としつつ、古筆切の本文にも着目した伝本系統の再構築を行っていききたいと思う。大方のご教示を御願ひ申し上げます。

### 〈引用参考文献〉

- (1) 舟見一哉：「棄てられた本文 ―伝二条為氏筆新古今和歌集切を端緒として―」、『京都大学國文學論叢』第18号,pp18-49,2007  
 (2) 舟見一哉：「伝二条為氏筆新古今和歌集切 補遺」、『京都大学國文學論叢』第19号,pp25-35,2008  
 (3) 小林強氏：「新古今和歌集古筆切資料集成稿(第一稿)」、『自讃歌注研究会会誌』第7号,pp1-45,1999

### 〈付記〉

本稿は平成二一年度神戸市立工業高等専門学校奨励研究助成「古筆切を用いた勅撰和歌集の文献学的研究」による研究成果の一部である。

\* 『Collection of fragment of Shinkokinwakasyu』: Kazuya Funami

(2)筆者未詳新古今集切(一)

『新古今和歌集』巻第十三・恋歌三・1195

縦24.3×横4.2糎(字高23.0糎)

楮紙打紙

室町時代初期写

〔翻刻〕

けふと契ける人のあるか<sup>(マ)</sup>とひて侍ければ

読人不知

夕暮に命かけたるかけろふのありやあらずや問ふもはかなし

〔図版〕 ↓ 図版2

もとは四半形の冊子本。上下に断ち切られた痕跡は見いだせないで、撰者名注記などは有していなかったと考えられる。極札や裏書などはなく伝承筆者は不明。しかし、筆跡から室町時代初期頃の書写と思われる。『古筆学大成』等の主要文献にツレは見いだせていない。さきの伝為相筆本のあいだに本文の異同はない。

(3)筆者未詳新古今集切(二)

『新古今和歌集』巻第十九・神祇歌・1910～1914

縦15.8×横15.4糎(字高14.8糎)

楮紙

室町時代初期写

〔翻刻〕

よみ人しらす

いはしろのかみはしらなんしるへせよ

たのむうき身のゆめの行すゑ

くまのゝ本宮やけてとしの

うちに遷宮侍しにまいりて

太上天皇

ちきりあれはうれしきかゝるおりにあひ

ぬ忘るな神も行すゑのそら

かゝのかみにて侍れるときしら山

にまうてたりけるをおもひいてゝ

日吉の客人の宮にてよみ侍り

ける

----- (以下裏面) -----

左京大輔(ミセケチ「夫」) 顕輔

としふともこしのしら山わすれすは

かしらの雪をあはれとも見よ

一品聡子内親王すみよしにまう

てゝ人々哥よみ侍けるによめる

藤原道経

すみよしのはまゝつかえもかせふけは

なみのしらゆふかけぬまそなき

あるところの屏風の絵に十一月

神まつる家のまへに馬にのりて

人の行ところを

能宜朝臣

〔図版〕 ↓ 図版3

もとは六半形の冊子本。撰者名注記などは有していなかったと考えられる。こちらも極札等が無く伝承筆者は不明だが、筆跡から室町初期頃の書写であろう。『古筆学大成』等の主要文献にはツレが見あたらない。

伝為相筆本をみると、道経歌と能宜歌のあいだに切り出し歌が一首(津守有基歌)あったことが確認できるが、当該断簡はその一首を切り出した形で書写されている。また、伝為相筆本と比較すると、以下のように若干の異同が見いだせるが、いずれも誤写の範疇であろう。

○他本 第四・五句「あらぬ筋にも罪ぞかなしき」

拙稿 2007 で示した右以外の古筆切の例のなかには、本文異同と呼ぶには細かすぎるものもあり、「よりよい資料に基づいて歌を入集するために行われた、編纂過程における同一歌の差し替え作業があった」という仮説には説得されるところが少ないという意見もある。しかしながら、『新古今和歌集』の成立に極めて近い時期に書写された伝本や古筆切に、和歌二句におよぶ本文異同や詞書の大きな相違があることも事実であるから、その本文異同に撰者が関わるか否かについては再考すべきではあるけれども、現在の第二類本というカテゴリーをいちど解体し、実存の本文に即した伝本の再分類が必要であるという考え方は、やはり有効であると考えている。

## 二、架蔵断簡について

『新古今和歌集』には、成立時期に近い時期に書写された完本が比較的多く残されている。本文に基づく伝本系統の再構築という作業において、これらが主な資料となることはいうまでもないが、同時に、古筆切の存在にも着目する必要があることは拙稿 2007・2008 で示した通りである。

『新古今和歌集』の古筆切は『古今和歌集』に次いで豊富に残されている。『古筆学大成』等の主要文献に収録されていない古筆切についても小林強氏 1999 の集成があり、また、久保木秀夫氏によるデータベースが公開されたことによつて、『新古今和歌集』の古筆切の調査は非常に簡便になった。ただし、古筆切の宿命として、わずか一葉の存在では学問的批判に耐えることができないという致命的欠陥がある。一葉でも多くのツレが紹介され、集成されなければならない。そこで本稿では、本文に基づく伝本系統の再構築という作業の基礎的作業の一環として、架蔵の新古今和歌集切三葉を紹介し、些かの考察を加えたい。

### (1) 伝西行筆切

『新古今和歌集』巻第四・秋歌上・302

縦 18.9 × 横 5.1 糎 (字高 17.5 糎)

楮紙打紙

鎌倉時代末期写

〔翻刻〕

早秋といへる心をよませ侍ける

法性寺入道関白太政大臣

あさきりやたつたのやまのさとならて

秋きにけりとたれかしらまし

〔図版〕 ↓ 図版 1

右端に閉穴の跡があることから、もとは綴葉装の冊子本であったと推定される。閉穴の位置からすると上部は数耗断ち切られたらしい。隠岐本での除去符号や撰者名注記は本来的に有していなかったであろう。付属の極札は古筆家のもではなく、手鑑に仕立てた際に付けられたもの。裏面は白紙であり、そのほかに伝承筆者を伝える記述はない。西行の筆跡とは認めがたく、やや時代が下った鎌倉時代末期頃の書写とみて大過なからう。「多」「万」「志」に筆癖があるほか、詞書を和歌より4糎程度下げて書写する点にも特徴がある。

『古筆学大成』等の主要文献には同一筆跡と思われるツレが見いだせなかった。また、小林強氏 1999 によると、西行を伝承筆者とする新古今集切として、『思文閣古書資料目録』一一七号掲載の「集古美葉」、『古典籍下見展観大入礼会目録』(H7.11) のNo.五一が紹介されているが、いずれも異筆である。

当該断簡の本文は、切継作業完了時の本文を伝えている可能性が高いと稿者が考えている伝冷泉為相筆本(撰者である定家の書写本を親本とする)と同一である。なお、302番歌は隠岐本において除去された歌であるから、当該断簡は隠岐本系統ではない。

当該断簡は本文に特徴があるわけではないが、その書写年代の古さからして注目して良い資料であろう。

## 新古今和歌集古筆切拾穂

### 一、はじめに

『新古今和歌集』の伝本は、集の編纂過程がまず想定され、それに整合させる形で分類されてきた。すなわち、竟宴時の本文を伝える第一類本、切継等の編纂過程の本文を伝える第二類本、切継作業完了時の本文を伝える第三類本、後鳥羽院によって精撰された第四類本（隠岐本）という四つのカテゴリーがまず設けられ、そのいずれに属するのが適当か、という視点から伝本は分類されてきたのである。この分類によると、冷泉家時雨亭文庫蔵隠岐本や六条宮本系隠岐本が第四類本であることを除いて、その他のすべての現存伝本は第二類本に分類せざるをえない。その結果、第二類本というカテゴリーには、様々な本文を有する多様な伝本が混在することになった。

拙稿 2007・2008 では、第二類本とされている穂久邇文庫蔵本と伝冷泉為相筆本（国立歴史民俗博物館蔵）との間に、詞書が大きく異なる箇所があることを指摘し、あわせて、鎌倉期の書写にかかる伝二条為氏筆切などの古筆切には、また別の多様な本文が存することも指摘した。その結果、これらすべてを従来のように第二類本として一括りにするのは適当ではなく、伝為相筆本に代表される伝本と大きく相違する本文をもつものは、撰者による同一歌の差し替え作業といった編纂過程の一端を伝えるものか、あるいは後世に変容を来したものであるかと考えた。拙稿 2007 で挙げた伝本間の相違点のうち最も特徴的な箇所を二つ再掲する。

舟見一哉\*

### (1)

○穂久邇文庫蔵本（一七四五番）

延喜御時、女蔵人内近、馬節會みけるくるまより、くれなゐのきぬをいだしたりけるを、藤原中正左衛門権佐にて侍けるがみて、たゞさむとしければ、中正わらはをよびていひつかはしける

女蔵人内匠

おほぞらにてるひのいろをいさめてもあめのしたにはたれかすむべき  
加階しければたゞさずなりにけり

○伝為相筆本

延喜御時、女蔵人内匠、白馬節會見けるに、くるまよりくれなゐのきぬをいだしたりけるを、檢非違使のたゞさんとしければいひつかはしける

女蔵人内匠

おほぞらにてる日のいろをいさめてもあめのしたにはたれかすむべき  
かくいひければたゞさずなりにけり

### (2)

○伝二条為氏筆切（一七五六番・慈円歌）

うちたへてよにふる身にはあらねともなをとし月をへんそかなしき

\*一般科 助教

# 機械工学科新入生に対する自学自習の調査について

石崎繁利\* 和田明浩\*

## Investigation of Self-Study for First Grade Students in Department of Mechanical Engineering

Shigetoshi ISHIZAKI\* Akihiro WADA\*

### 1. はじめに

本校機械工学科では2008年度から新入生を対象に自学自習に関する調査を実施してきた。自学自習に関する調査のきっかけは、2006年度4学年において約25%の学生が留年および退学をしたことにある。機械工学科では2007年度から学力不振学生に対する学習支援を実施している。その結果、夏休み2週間の学習指導によって参加学生の成績向上が確認されており、詳細は2009年度のFD学習会において報告している。

しかし、学生の学力不振を未然に防ぐことが最も理想的であることは明らかである。そこで入学直後の機械工学科1年生に対して学習習慣を身に付けさせることを目的に自学自習の調査に取り組んでいる<sup>(1)(2)</sup>。筆者らはこれらの調査結果を学生へ知らせることで学生自身が自らの学習時間や学習方法などの改善に役立ててほしいと考えている。

### 2. 自学自習の調査方法

自学自習の調査方法は1週間単位の学習計画および実際の学習内容をA4の指定用紙に記入させるというものである。週間学習記録の用紙配布と回収には機械工学科1年の必修科目である設計製図の時間を利用している。なお、週間学習記録の提出は強制とせず、任意提出とした。そのため、提出した学生は4分の3程度であった。

### 3. 自学自習の習慣に関する事前調査

図1に2009年度に実施した自宅での学習習慣に関する事前調査結果を示す。その結果、「1：日頃から自学自習ができています」と回答した学生は7%、「3：試験前だけ自学自習を実践している」および「5：身につけていない」と答えた学生はともに14%であった。さらに「2：1と3の間である」と答えた学生は28%、「4：3と5の間である」と答えた学生は37%であった。

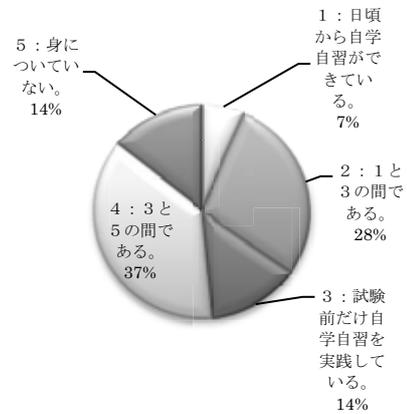


図1 自学自習の習慣について

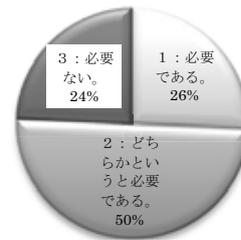


図2 学習指導の必要性について

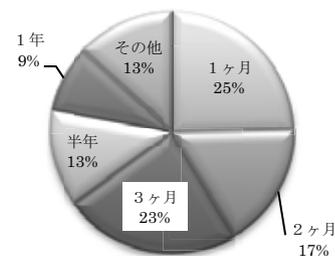


図3 学習指導期間について

\*機械工学科 准教授

る」26%、「2:どちらかという必要である」50%、「3:必要ない」24%であった。これから76%の学生が学習指導について必要性を感じていることがわかる。

図3は学生に学習指導の期間について調査した結果である。学習指導の期間が1ヶ月で良いと回答した学生は25%、2ヶ月17%、3ヶ月23%、半年13%、1年9%、その他13%であった。その他の意見では「人によって学習指導期間を変えるべきである」という意見が大半を占めていた。なお、2008年度は半年間学習指導を実施したが、2009年度は4月から7月までとした。

#### 4. 機械工学科1年生を対象に実施した一日の平均学習時間に関する調査結果

図4は2008年度機械工学科1年生の前期中間試験までの週間学習記録を集計し、提出された学生のみを対象とした1日の平均学習時間を示す。2008年度の前期中間試験期間は6月12日から6月19日までであった。したがって、1日の平均学習時間は1時間40分程度であるが、試験前になると増加していることがわかる。なお、最も勉強している週で一日平均241分の勉強をしていることが確認できる。

図5は同様の調査を2009年度に実施した結果である。なお、5/18-5/31までの2週間は新型インフルエンザの影響で休校のため、正確なデータが取れていない。また、2009年度の前期中間試験期間は6月26日から7月2日ま

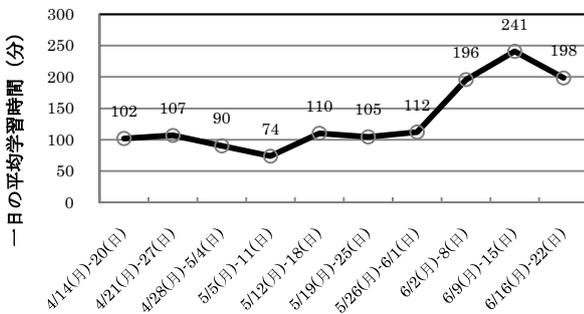


図4 2008年度機械工学科1年生の入学から前期中間試験までの一日の平均学習時間

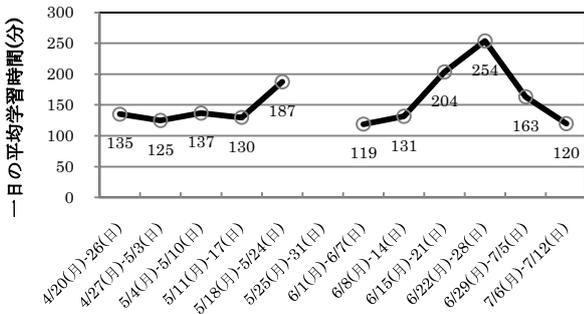


図5 2009年度機械工学科1年生の入学から前期中間試験までの一日の平均学習時間

のであった。一日の平均学習時間は試験のない時で2時間10分程度、試験期間のピークで4時間14分となり、昨年より長くなった。しかし、2008年度および2009年度の調査結果から筆者らは全体的な傾向には大差がないと考えている。

#### 5. 科目別の学習時間に関する調査

2009年度において学習した科目に関する学習時間の割合を調べた結果を図5に示す。全体の学習時間の割合は、一般科目では数Iが22%、英語9%、数II・物理7%に対して専門科目の機械実習23%、製図13%である。そのため、機械工学科1年生は専門科目である機械実習のレポート作成と設計製図の課題図面の作図などにそれぞれ1週間あたり190分、110分程度の学習時間を当てていることがわかる。

一方、図6に示す試験期間では1年生では専門科目の試験がないため、機械実習8%、設計製図7%と低下している。しかし、その他に分類された国語、歴史、地理、化学といった科目に関する勉強時間の割合が38%に増加している。したがって、試験期間の週は1週間に学生は平均約30時間勉強していることから数Iでは約4.7時間、数II・物理約3.5時間、英語約2時間、その他の科目については約11.3時間、一週間あたり勉強していることがわかった。

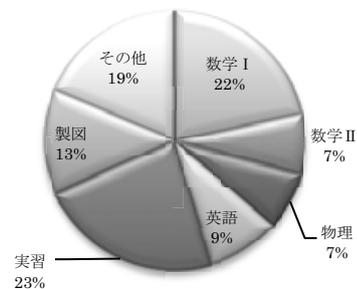


図5 2009年度調査期間における学習時間の割合

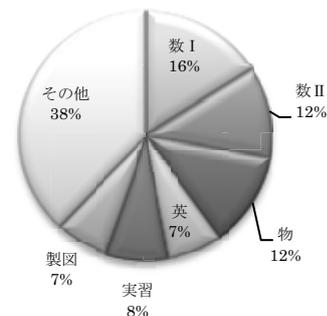


図6 2009年度試験期間における学習時間の割合

### 6. 2009 年度前期中間成績と学習時間の関係

図7は2009年度の前期中間成績について全科目の平均点を80点以上、70点以上80点未満、60点以上70点未満、60点未満の4段階にわけて学生数を表している。前期中間試験の平均点が80点以上の学生は15名、70点以上80点未満が30名、60点以上70点未満が30名、60点未満が6名であった。

次に図8は2009年度前期中間試験の平均点を4段階に分け、前期中間試験までの総学習時間の平均値を表したものである。なお、総学習時間は学生から週間学習記録において報告させた学習時間から算出している。これから80点以上の学生は平均66時間勉強していることがわかる。70点以上80点未満の学生は平均58時間、60点以上70点未満の場合、平均32時間となった。なお、60点未満の学生は平均89時間勉強していた。これから、60点未満の学生について学習時間は長い、勉強方法に問題があることが推測できる。

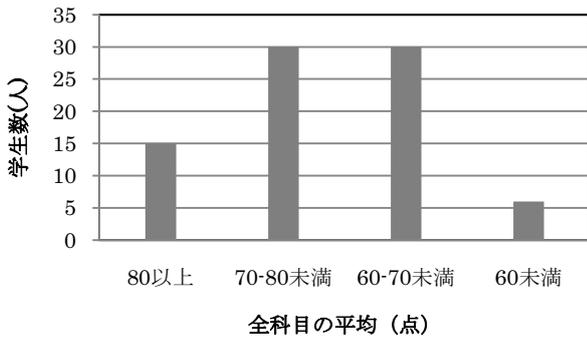


図7 前期中間試験の平均点について

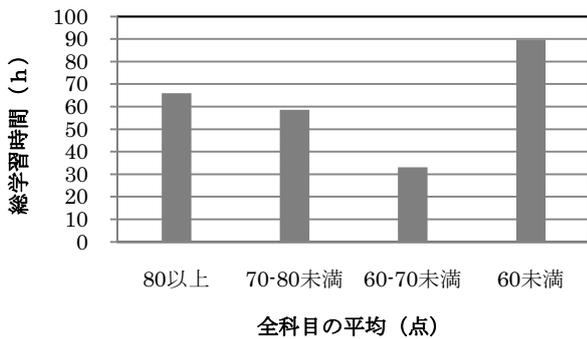
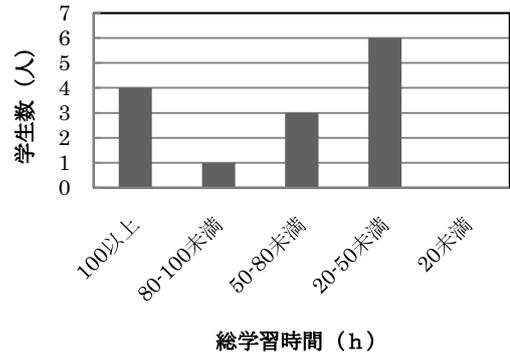
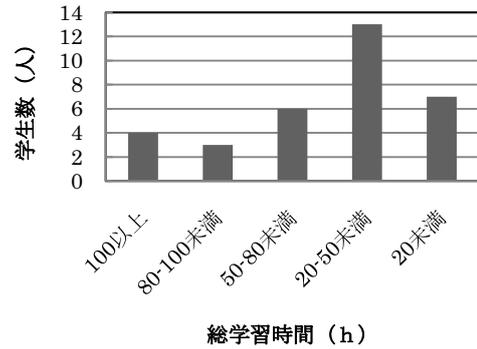


図8 前期中間試験の平均点と総学習時間の関係

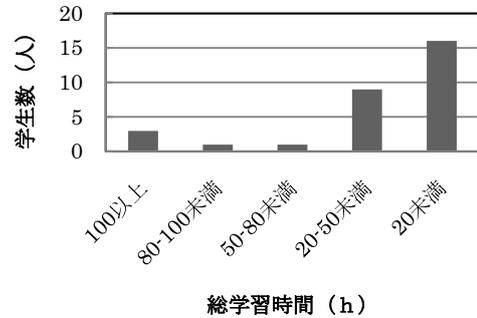
図9は2009年度前期中間試験において前述のとおり科目平均点毎に(a)~(d)の4段階に分類し、それぞれについて総学習時間を100時間以上、80時間以上100時間未満、50時間以上80時間未満、20時間以上50時間未満、20時間未満に分けて学生数を表したものである。すでに



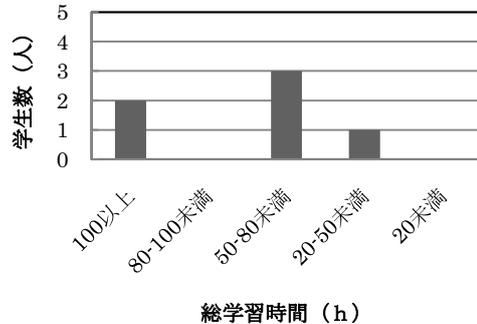
(a) 平均点 80 点以上



(b) 平均点 70 点以上 80 点未満



(c) 平均点 60 点以上 70 点未満



(d) 平均点 60 点未満

図9 前期中間試験平均点別の総学習時間について

記述したとおり、総学習時間は学生から報告された週間学習記録を集計しているため、未提出の学生は0時間である。したがって、前期中間試験までの総学習時間が20時間未満という学生は実際には各教科の課題を提出していることから20時間以上自学自習していると推測できる。また同様の理由で学習記録の提出回数が少ない学生は実際の総学習時間よりも短くなっていると考えられる。

図9(a)は平均点が80点以上である15名の学生について総学習時間別に分類した結果である。総学習時間が100時間以上の学生は4名であった。一方、20時間未満の学生は0名である。しかし、総学習時間が20時間以上50時間未満の学生が6名と最も多くなった。週間学習記録の提出が任意であるためこのような結果になったと考えられる。図9(b)は平均点が70点以上80点未満の30名の学生について総学習時間別に分類したものである。総学習時間が20時間未満の学生が7名、20時間以上50時間未満の学生が13名となっている。図9(c)は平均点が60点以上70点未満の30名の学生を学習時間別に分類している。その結果、総学習時間が20時間未満の学生が16名と半数以上が占めている。次に20時間以上50時間未満の学生が9名であった。

図9(d)は平均点が最も低い60点未満の学生について総学習時間別に分類したものである。図8において平均点が60点未満の学生が総学習時間の平均が89時間と最も長いことを記述した。さらに詳しく調べると総学習時間が20時間未満の学生は0名であり、週間学習記録を提出していない学生がいないことが確認できる。また総学習時間が100時間以上の学生が2名いることから、学習方法に問題があると考えられる。現状ではすべての学生に対してこれらの結果をプリントに印刷したものを配布し、学生自らが対策を講じるように指導している。しかし、この傾向は東京高専においても問題となっていることを2009年度の工学・工業教育研究講演会で知った。学生自らの努力で改善ができないことがわかれば、今後の学習指導について教科担当者が対策を講じる必要がある。したがって今後も継続して調査をしたいと考えている。

図10は2009年度前期中間試験の平均点と学習時間の関係を表したものである。教員側の理想は学習時間が長いほど試験成績が良いことであると考えられるが、現実にはグラフの傾きは高くない。科目によってはグラフの傾きがマイナスの教科もあり、授業内容または試験の出題内容に何らかの問題があると感じている。今回直前まで教科別のグラフ掲載を悩んだが、来年度以降の状況で掲載を判断したい。一方で前期中間試験成績は基本的に各科目の試験成績であるため、最終成績にはこのほかの提出物や小テストの結果が反映されると思われる。そのため、レポート等の提出物や小テスト結果などを加味した成績において総学習時間が100時間を超える学生の成績が改善されると推測している。

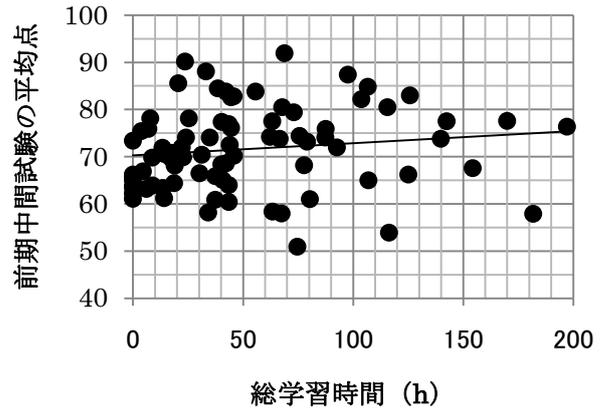


図10 前期中間試験平均点と学習時間の関係

## 7. おわりに

週間学習記録による自学自習の習慣を身に付けさせる試みは2009年度でまだ2年目である。そのため、筆者自身が学習指導の要点を把握できていない。しかし、来年度以降も継続して1年生に対して学習指導を継続し、筆者らが定年を迎える2030年頃までには機械工学科の全学生に自学自習の習慣を身に付けさせる教授法を確立したい。なお、これまでの指導および調査によって以下のことが得られた。

- 1) 2009年度の調査から自学自習の習慣が身に付いていると感じている学生は7%であること。
- 2) 自学自習の習慣を身に付けるための学習指導について76%の学生が必要を感じていること。
- 3) 自学自習の学習指導は半年間未満で良いと考えている学生が78%であること。
- 4) 2008年度の調査において4月から5月末までの一日の平均学習時間は1.2から1.8時間程度であるが、前期中間試験1週間前から増加すること。
- 5) 2009年度の調査において機械工学科1年生は試験期間でない場合、専門科目である機械実習および設計製図に関する学習を週平均5時間勉強していること。
- 6) 2009年度の調査から一般科目の中では数学Iを最も勉強しており、試験期間に関係なく週平均3時間以上自学自習に励んでいること。
- 7) 成績不良の学生について一部の学生は総学習時間が100時間を超えており、このような傾向は本校だけの問題ではないこと。

## 参考文献

- (1) 石崎繁利: 機械工学科1年生を対象にした週間学習記録に関する実践報告, 高等専門学校の教育と研究, 14, 1, pp. 22-23, 2009
- (2) 石崎繁利: 機械工学科新入生に対する学習指導の試み, 工学・工業教育研究講演会講演論文集, pp. 16-17, 2009

# 学生のモチベーションと英語の学力について

上垣 宗明\*

## The Research on the Students' Motivation and Their English Ability

Muneaki UEGAKI\*

*Keywords* : consummatory motivation, intrinsic motivation, English ability

### 1. はじめに

動機づけについて小西（1994）は「社会的・心理的要因としての動機づけは、長年、言語学習の成功に重要な役割を果たすと考えられてきた」<sup>(1)</sup>と述べている。このように、以前から言語学習と動機づけの関係は注目されていた。日本でも、言語学習における動機づけについての研究は盛んになってきている。

しかし、動機づけの研究は、欧米諸国、特にカナダでの研究が発端とされており、日本での第二言語習得とは違う環境のもとでの研究である。この研究で著名な Gardner & MacIntyre (1991)は、“...that both integrated motivation and instrumental motivation can influence second language learning.”<sup>(2)</sup>と述べている。また、同様に彼ら（1991）は、“... both instrumentally motivated and integratively motivated subjects learned better than subjects not so motivated.”<sup>(2)</sup>とも述べている。integrated motivation（統合的動機づけ）と instrumental motivation（道具的動機づけ）の高い学習者は、その低い学習者に比べてよく学習することが分かる。

日本における統合的動機づけと道具的動機づけの違いについては、『応用言語学辞典』に次のような記述がみられる。

Gardner and Lambert(1972)は、仕事や生活上有利なので目標言語を学習するといった実用目的達成のための言語使用願望を道具的動機づけ (instrumental motivation)、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・同化願望を(integrative motivation)と分類した。・・・日本のように外国語として英語学習を行う状況で趣味として学習する場合のように、学習者が外国語習得に満足し意義を感じ

る気持ちを達成的動機づけ (consummatory motivation)とするなど、さまざまな視点からいくつかの分類が提唱されている。<sup>(3)</sup>

先述したように、動機づけに関しては、カナダを中心とする欧米諸国での研究と日本での研究には、言語学習の背景が異なっている。そのため、統合的動機づけと道具的動機づけの2通りに分類するのは、日本の現状にあっていない。それに関連して、小西（1994）の記述が参考になる。

統合的動機づけという時に、この考え方の発祥の地であるカナダでの第二言語の学習環境と、日本での英語学習環境では明らかに、統合 (integrate) という表現に含まれる意味合いが異なっていることに気づかなければならない。・・・一方、日本での英語学習環境で用いられる統合という用語は、例えば、アメリカ文化にあこがれて、アメリカ人の仲間になったような行動がとれるようになりたいといった、どちらかというあまり切迫感のない意味合いで用いられているようである。<sup>(1)</sup>

この記述からも分かるように、日本の言語教育では統合的動機づけという概念はそぐわないように思える。『応用言語学辞典』の記述のように道具的動機づけと、あまり切迫感のない統合的動機づけ、つまり、達成的動機づけと分類する方が適しているように思われる。

動機づけには上記のような分類の仕方以外にも分類方法がある。もう一つの代表的な分類について、『応用言語学辞典』に次のような記述がある。

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

\* 一般科 准教授

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。<sup>(3)</sup>

これらのいくつかの動機づけの分類を見てみると本稿で調査する“動機づけ”とは、達成的動機づけと内的動機づけを調査対象としている。

小西(1994)は、「また、・・・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。」<sup>(1)</sup>とも述べている。日本での動機づけに関する研究や調査は大学生や中高生を対象にした研究がほとんどで、高等専門学校をを対象にした研究はほとんど行われていないのが現状である。高等専門学校という5年間の一貫教育を実践している本校では、高等学校や大学などとは違う環境で学生たちは学習している。当然、英語学習に対しても高専生独自の要素が影響しているのではないと思われる。

高専と高校の違いとして、修業年限の違いをあげることができる。高専は5年間に対し、高校は3年間である。また、高校生の進路は様々であるが、センター試験を筆頭に文系と理系の大学入試では、英語の試験が課せられている。それに対して、高専卒業後の進路も様々だが、大学への編入試等を参考にすれば、高校生に比べると英語に対する比重は軽く、英語よりも専門科目の比重が重く感じる。たとえば、本校の専攻科への入学試験に関しては、英語：数学：専門科目の比重は、1：1.5：2となっており、英語は専門科目の半分の比重である。このようなことから、高専生の英語への動機づけは必然的に低くなり、高校と高専では異なった環境で英語を学習していると言える。

大学と比較した場合は、年齢的な違いを指摘することができる。高専は15歳～20歳だが、大学は18歳～22歳の学生が対象となる。また、大学は様々な学部や学科があり、異なった学部では、異なった英語への動機づけが見られる。大学での調査や研究の場合、英語への動機づけの研究対象となるのは文学部や外国語学部の英語を専門とする学生がほとんどである。本校のような工業高等専門学校と比較可能なのは工学部や理学部の学生であるが、このような学生を対象とした研究はほとんど見られない。

本稿では、高専生の英語に対する動機づけ、特に、内的な達成的動機づけという観点から英語の試験に関する事柄を調査し、分析していく。

本研究での統計処理は、「エクセル統計 2008

(SSRI：社会情報サービス株式会社)」を使用し分析する。

## 2. 調査について

本高専の1年生3クラス(class A 40名,class B 40名,class C 39名 合計119人)を対象に調査を行った。まず、英語の動機づけに関するアンケートを実施した。その結果をもとに、文法性判断テスト、新入生実力試験、前期中間試験や前期定期試験の結果を用い、分析していく。

### 2.1 動機づけの調査

動機づけを調査するための質問紙は14項目からなり、4段階評価(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, まったくそう思う)で回答を求めた。質問紙を作成するにあたり、『外国語教育リサーチマニュアル』<sup>(4)</sup>を参考にし、著者が作成した(Appendix 1)。

#### 2.1.1 実施日時

class A：平成21年4月20日(月)

09:40～09:50

class B：平成21年4月20日(月)

14:35～14:45

class C：平成21年4月16日(木)

09:40～09:50

それぞれ、2回目の英語の授業で実施した。

#### 2.1.2 教示

全クラスに、「このアンケートは成績と全く関係がありません。自分の気持ちにあてはまるところを○で囲んでください。」と教示した。

### 2.2 文法性判断テストについて

入学後最初の英語の授業で文法能力を測定するテストを実施した(分析対象として60問中27問を抽出)(Appendix 2)。

#### 2.2.1 実施日時

class A：平成21年4月17日(金)

11:20～11:50

class B：平成21年4月16日(木)

13:40～14:10

class C：平成21年4月15日(水)

09:35～10:05

#### 2.2.2 教示

「あまり深く考えずに直感的に回答するように」と教示した。

#### 2.2.3 出題形式

例) 1) Which do you like good, tea or coffee ?

解) × good → better

2) Who was late for school ?

解) ○ \_\_\_\_\_ → \_\_\_\_\_

例のように、例文が記述してあり、その例文が文法的

に適切か、不適切かを判断させ、不適切な場合は、適切な語句に書き換えさせる問題を作成した。抽出した問題の文法項目は以下の通りである。

- 1, be 動詞に関する問題 5問
- 2, 3 単現に関する問題 5問
- 3, 進行形に関する問題 4問
- 4, 冠詞に関する問題 4問
- 5, 代名詞の格に関する問題 4問
- 6, 受動態に関する問題 5問

採点は、各問題 2 点配当とした。そのテストに関する結果の概要を以下に示す。

サンプル数：119 平均：39.19 標準偏差 5.60

最高点：51 最低点：26 中央値：39.5

### 2.3 実力試験

平成 21 年 4 月 13 日 (月) 10:15~11:00 実施  
新入生を対象に春休みの課題として課した問題集より大部分を出題した。その結果の概要を下記に示す。

サンプル数：119 平均：82.9 標準偏差 9.25

最高点：100 最低点：59 中央値：84

### 2.4 前期中間試験

平成 21 年 7 月 1 日 (水) 9:00~9:50 実施

サンプル数：119 平均：68.2 標準偏差 12.78

最高点：96 最低点：44 中央値：69

### 2.5 前期定期試験

平成 21 年 9 月 25 日 (金) 9:00~9:50 実施

サンプル数：119 平均：65.5 標準偏差 14.96

最高点：98 最低点：30 中央値：65.5

## 3. 分析結果

学生の英語に関する動機づけのアンケートを分析した。質問紙の 14 項目が同じような概念を測定しているのかを示す指標である内的一貫性についても注意を払った。内的一貫性を測定するためにクロンバック  $\alpha$  係数という値を用いた。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。<sup>(5)</sup>」と述べている。この指摘に沿うように、クロンバック  $\alpha$  係数が 0.8 に近づくように分析を加えた。

まず、14 項目全てに対して、クロンバック  $\alpha$  係数を求めた。その結果、0.607 と数値が低かった。項目 6, 7, 8, 9 がマイナスの数値を示していたために、それぞれの数値を  $5-X$  ( $X$  は素点) で計算した。その結果、クロンバック  $\alpha$  係数は 0.75 となり、0.8 にかなり近づいた。更に、7 と 14 を削除すれば、0.79 となった。この 2 項目を削除した残りの 12 項目で内的一貫性が十分に確保されていると思われる。今後の分析対象として、項目 7, 14 を除いた 12 項目を分析対象とする。その結果の概要を下記に示す。

サンプル数：119 平均値：33.14 標準偏差：5.58  
最大値：45 最小値：18

次に、アンケートの総得点で、上位群、中位群、下位群の 3 群に分け、試験の点数の平均に違いがあるのかを分析した。その結果を下記に示す。

表 1 アンケートの総合点について

|           | 上位群   | 中位群   | 下位群   |
|-----------|-------|-------|-------|
| サンプル数     | 44 名  | 36 名  | 39 名  |
| アンケートの平均値 | 38.75 | 33.42 | 26.79 |
| 標準偏差      | 2.47  | 1.27  | 3.36  |
| 文法テストの平均点 | 39.09 | 40.56 | 38.13 |
| 標準偏差      | 5.64  | 5.88  | 5.21  |
| 実力試験の平均点  | 84.82 | 84.39 | 79.28 |
| 標準偏差      | 8.19  | 8.80  | 9.93  |
| 中間試験の平均点  | 72.82 | 69.75 | 62.21 |
| 標準偏差      | 11.50 | 11.35 | 13.04 |
| 定期試験の平均点  | 70.59 | 67.31 | 58.64 |
| 標準偏差      | 14.47 | 12.71 | 14.97 |

アンケートについては、上位の点数から 3 群に分けたので、明らかに差がみられる。他の試験について有意差があるのかを多重比較検定 (Scheffe 法) で分析した。

文法性判断テストの 3 群の分析結果を表 2 に示す。

表 2 文法性判断テストの分析結果

|     | 平均値   | 差    | 統計量  | p 値   | 判定 |
|-----|-------|------|------|-------|----|
| 上位群 | 39.09 | 1.46 | 0.68 | 0.507 |    |
| 中位群 | 40.56 |      |      |       |    |
| 上位群 | 39.09 | 0.96 | 0.31 | 0.735 |    |
| 下位群 | 38.13 |      |      |       |    |
| 中位群 | 40.56 | 2.43 | 1.77 | 0.174 |    |
| 下位群 | 38.13 |      |      |       |    |

\*\* : 1% 有意 \* : 5% 有意

表 2 から、3 群においては文法性判断テストの点数において有意差は見られなかった。実力試験における 3 群の分析結果を表 3 に示す。

表 3 実力試験の分析結果

|     | 平均値   | 差    | 統計量  | p 値   | 判定 |
|-----|-------|------|------|-------|----|
| 上位群 | 84.82 | 0.43 | 0.02 | 0.978 |    |
| 中位群 | 84.39 |      |      |       |    |
| 上位群 | 84.82 | 5.54 | 3.93 | 0.022 | *  |
| 下位群 | 79.28 |      |      |       |    |
| 中位群 | 84.39 | 5.11 | 3.02 | 0.053 |    |
| 下位群 | 79.28 |      |      |       |    |

\*\*:1%有意 \*:5%有意

表3に示したように、上位群と中位群では平均点にさほど違いがなく、有意差も見られなかった。しかし、上位群と下位群では5%水準で有意差が見られ、中位群と下位群においても、有意差ではないが、有意傾向がみられた。

4月当初に、動機づけに関するアンケートと実力試験を実施したにもかかわらず、動機づけにおける差が試験の点数の差としてあらわれた。中学校時代の英語教育がそのまま影響していると言えるだろう。次に、高専入学の2カ月後に実施した中間試験の分析結果を表4に示す。

表4 中間試験の分析結果

|     | 平均値   | 差   | 統計量  | p値    | 判定 |
|-----|-------|-----|------|-------|----|
| 上位群 | 72.89 | 3.0 | 0.65 | 0.525 |    |
| 中位群 | 69.75 | 7   |      |       |    |
| 上位群 | 72.89 | 10. | 8.10 | 0.001 | ** |
| 下位群 | 62.20 | 61  |      |       |    |
| 中位群 | 69.75 | 3.7 | 3.71 | 0.027 | *  |
| 下位群 | 62.20 | 1   |      |       |    |

\*\*:1%有意 \*:5%有意

同様に、9月下旬の定期試験の分析結果を表5に示す。

表5 定期試験の分析結果

|     | 平均値   | 差    | 統計量  | p値    | 判定 |
|-----|-------|------|------|-------|----|
| 上位群 | 70.59 | 3.29 | 0.53 | 0.587 |    |
| 中位群 | 67.31 | 5    |      |       |    |
| 上位群 | 70.59 | 11.9 | 7.39 | 0.001 | ** |
| 下位群 | 58.64 | 5    |      |       |    |
| 中位群 | 67.31 | 8.66 | 3.52 | 0.033 | *  |
| 下位群 | 58.64 | 5    |      |       |    |

\*\*:1%有意 \*:5%有意

表4、表5より、動機づけの違いによって中間試験と定期試験の点数に同様の違いがみられた。上位群と中位群で5%水準の有意差が、上位群と下位群で1%水準の有意差があった。中間試験と定期試験では動機づけの差がそのまま試験の点数に影響していることが分かった。

次に、動機づけについて、より詳しく分析するために、この12項目の因子分析(バリマックス法)を行い、各因子に対する寄与率の高い5項目を取り上げた。その結果を表6に示す。

表6 因子分析(バリマックス法)の結果

| 項目 | 因子1   | 項目 | 因子2   | 項目 | 因子3   |
|----|-------|----|-------|----|-------|
| 12 | 0.691 | 3  | 0.668 | 6  | 0.606 |
| 11 | 0.610 | 1  | 0.640 | 8  | 0.575 |
| 10 | 0.576 | 2  | 0.587 | 9  | 0.507 |
| 2  | 0.434 | 5  | 0.435 | 5  | 0.478 |
| 4  | 0.410 | 13 | 0.403 | 3  | 0.359 |
| 3  | 0.045 | 12 | 0.068 | 13 | 0.044 |

因子1では、12 外国の文化や習慣を勉強したい、11 世界の出来事に関心がある、10 英語以外の外国語も勉強したい、2 外国人ともっと会話してみたい、4 英語は簡単だと思う、の5つの項目の寄与率が高かった。因子2では、3 英語を話せるようになりたい、1 自分の英語が通じるとうれしい、2 外国人ともっと会話してみたい、5 将来、英語は大切だと思う、13 外国で暮らしてみたい、の5項目である。最後に、因子3では、6 英語を勉強するのは嫌だ、8 高専では英語の勉強は必要ないと思う、9 今後、英語よりも数学のほうが大切だと思う、5 将来、英語は大切だと思う、3 英語を話せるようになりたい、という項目であった。因子1は“外国への関心”、因子2は“英語への関心”、因子3は“英語学習への関心”とまとめることができる。

次に、因子1～3のそれぞれの因子5項目の学生の評価点を合計し、その合計点にもとづいて、上位群、中位群、下位群の3群に分けた。それぞれの群で、各試験の点数に違いがあるのかを検討する。

因子1に関する合計点で分けた3群で各試験の点数を集計した結果を表7に示す。

表7 因子1(外国への関心)

|           | 上位群   | 中位群   | 下位群   |
|-----------|-------|-------|-------|
| サンプル数     | 36名   | 46名   | 37名   |
| 文法テストの平均点 | 39.61 | 38.37 | 39.89 |
| 標準偏差      | 5.39  | 5.68  | 5.76  |
| 実力試験の平均点  | 83.86 | 83.46 | 82.68 |
| 標準偏差      | 8.67  | 9.35  | 9.83  |
| 中間試験の平均点  | 72.67 | 69.87 | 62.46 |
| 標準偏差      | 10.78 | 12.27 | 13.11 |
| 定期試験の平均点  | 69.42 | 66.35 | 61.22 |
| 標準偏差      | 12.89 | 15.84 | 14.80 |

因子1については、このような結果となった。平均点においては、中間試験と定期試験に差がみられる。因子1の結果と同様に、因子2、因子3についても合計点を集計し、3群に分けた。それぞれの結果を表8、表9に示す。

表8 因子2（英語への関心）

|           | 上位群   | 中位群   | 下位群    |
|-----------|-------|-------|--------|
| サンプル数     | 33名   | 47名   | 39名    |
| 文法テストの平均点 | 39.03 | 40.0  | 38.59  |
| 標準偏差      | 5.60  | 5.51  | 5.77   |
| 実力試験の平均点  | 85.25 | 84.02 | 79.72  |
| 標準偏差      | 8.47  | 8.44  | 10.164 |
| 中間試験の平均点  | 75.0  | 68.40 | 62.64  |
| 標準偏差      | 10.3  | 11.46 | 13.43  |
| 定期試験の平均点  | 71.94 | 66.53 | 59.44  |
| 標準偏差      | 13.88 | 14.31 | 14.56  |

表9 因子3（英語学習への関心）

|           | 上位群   | 中位群   | 下位群   |
|-----------|-------|-------|-------|
| サンプル数     | 45名   | 36名   | 38名   |
| 文法テストの平均点 | 39.69 | 40.47 | 37.47 |
| 標準偏差      | 6.10  | 4.39  | 5.75  |
| 実力試験の平均点  | 85.07 | 85.78 | 77.53 |
| 標準偏差      | 7.71  | 8.35  | 9.64  |
| 中間試験の平均点  | 72.36 | 69.03 | 63.16 |
| 標準偏差      | 11.02 | 12.79 | 13.00 |
| 定期試験の平均点  | 70.64 | 66.56 | 58.97 |
| 標準偏差      | 14.24 | 13.59 | 14.74 |

動機づけの総得点を分析した時と同様に、因子1～因子3を多重比較検定（Sceheffe法）で分析した。その結果、有意差があったものだけを取り上げ検討していく。

全ての因子において、文法性判断テストでは有意差や有意傾向は見られなかった。

因子1において、有意差が見られたのは中間試験の上位群と下位群（ $p=0.002$ ,  $p<.01$ ）、中位群と下位群（ $p=0.024$ ,  $p<.03$ ）であった。その他については、5%水準でも有意差はみられなかった。

因子2については、実力試験で上位群と下位群（ $p=0.41$ ,  $p<.05$ ）で5%水準の有意差が見られ、中間試験と定期試験の上位群と下位群（中間  $p=0.0001$ ,  $p<.01$ ；定期  $p=0.001$ ,  $p<.01$ ）で1%水準の有意差が見られた。

因子3については、実力試験を除いて因子2と同じ結果になった。実力試験においては、上位群と下位群（ $p=0.0006$ ,  $p<.01$ ）、中位群と下位群（ $p=0.0003$ ,  $p<.01$ ）で、1%水準の有意差が見られた。

文法性判断テストはどの因子でも有意差は見られなかった。その要因として考えられることは、他の試験は100点満点で評価しているのに対して、このテストは54点満点で評価したことである。そのため学生の点数にあまり差が生じずにこのような結果になった

のだろう。しかし、実力試験は、因子3（英語学習への関心）で特に強い有意差が見られた。これは、中学時代の英語学習への関心そのままの結果としてあらわれ、このような結果になったのだろう。

#### 4. 考察

内的な達成的動機づけという観点から、4つの試験を対象として分析を行った。動機づけの高い学生と低い学生では、高専入学後の日頃の学習態度や意欲に違いが生じていることが推測できる。当然、動機づけが高い学生は前向きに英語学習に取り組んでいる。その結果、特に中間試験と定期試験の点数に顕著な有意差が見られた。動機づけが英語学習に非常に影響していることがわかった。

3つの因子を検出する因子分析の結果、因子1～因子3までの寄与率の高い項目を取り上げ考察した。3つの因子をまとめると、因子1は外国への関心、因子2は英語への関心、因子3は英語学習への関心とまとめることができた。その因子ごとに更に分析した結果、因子1よりも、因子2、因子3のほうが中間試験や定期試験の点数にかなり影響していることが見て取れた。特に、因子3については、文法性判断テスト以外の試験では動機づけの高いか低いかで、試験の点数に違いがあることがわかった。外国への関心という内的動機づけよりも、英語学習への関心という外的な動機づけの要素を含むものが、試験の点数に与える影響が強かった。今後は、内的な動機づけだけでなく、外的な動機づけの調査も必要である。

#### 5. 今後の課題

今回は動機づけについて質問紙を利用し調査した。質問紙に関しては、正確に動機づけが測定できる質問紙を作成できるような研究の必要性を実感した。質問紙だけではなく、より正確な動機づけを測定するためには面接や授業中の態度などを含めさまざまな視点からの調査が必要である。また、今回の調査対象となった内的動機づけだけではなく、試験でよい点数を取りたい、とか、単位を取りたい、といった外的動機づけが与える影響についても、学生の英語能力と動機づけの関係をより客観的に理解するためには調査していくことが必要である。

高専では、他の教育機関とは異なり5年間一貫教育を実践している高専独自の長期的な調査が可能である。1年生の4月と5年生の3月では、動機づけに変化が生じるので、その変化の過程を包括できるような長期的な研究も可能であり、必要である。

今後は、今回のデータだけではなくより多くの場面を利用し、さまざまなデータの収集が必要である。今

回、統計処理に利用した「エクセル統計 2008」は、さまざまな分析ができるので、このソフトを利用し、動機づけと英語学習の関係についてさらに、調査、分析をしていきたい。

最後に、この研究の目標は、動機づけと英語学習に関する関係をより科学的に分析し、その結果、今後の効果的な学生の英語学習だけではなく、効率が期待できる英語教育の実践に結び付けていきたい。

**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) 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.

- (3) 小池生夫 編集主幹:「応用言語学辞典」、研究社、2003.
- (4) ハーバード・W・セリガー、イラーナ・ショハミー著、土屋武久・森田彰・星美季・狩野紀子訳:「外国語教育リサーチマニユアル」、大修館書店、2001.
- (5) ゴルタイ・ドルニェイ著、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.

Appendix 1

|    |                      |
|----|----------------------|
| 1  | 自分の英語が通じるとうれしい       |
| 2  | 外国人ともっと会話してみたい       |
| 3  | 英語を話せるようになりたい        |
| 4  | 英語は簡単だと思う            |
| 5  | 将来、英語は大切だと思う         |
| 6  | 英語を勉強するのは嫌だ          |
| 7  | 文法よりも単語や熟語のほうが大切だと思う |
| 8  | 高専では英語の勉強は必要ないと思う    |
| 9  | 今後、英語よりも数学のほうが大切だと思う |
| 10 | 英語以外の外国語も勉強したい       |
| 11 | 世界の出来事に関心がある         |
| 12 | 外国の文化や習慣を勉強したい       |
| 13 | 外国で暮らしてみたい           |
| 14 | 将来、エンジニアになりたい        |

Appendix 2

|   | 正解者数 |
|---|------|
| 1, Was the letter writing by him?           | 93   |
| 2, French is speaking in this country.      | 100  |
| 3, Tom and Ken is good friends.             | 117  |
| 4, They are play the guitar now.            | 117  |
| 5, These cakes were made yesterday.         | 99   |
| 6, My sisters was out when I came back.     | 90   |
| 7, A longest river in Japan is the Shinano. | 77   |
| 8, You bags are so big.                     | 96   |
| 9, One of our opened the door.              | 16   |

|  |     |
|--|-----|
| 10, Please teach he how to use this computer.                | 90  |
| 11, This is Kumi bag.  | 112 |
| 12, Bill is go to speak Japanese.                            | 106 |
| 13, I am interesting in English.                             | 95  |
| 14, Jane got up early every morning.                         | 67  |
| 15, Those is your pens.                                      | 110 |
| 16, He goes to school every day.                             | 115 |
| 17, We eating apples now.                                    | 99  |
| 18, This is an big apple.                                    | 92  |
| 19, Are that woman Mrs. Smith or Mrs. Obama?                 | 66  |
| 20, The boys are in that room yesterday.                     | 111 |
| 21, Takeo watchs TV every day.                               | 46  |
| 22, Each student study English very hard.                    | 16  |
| 23, The student who won the contest was giving a gold medal. | 32  |
| 24, The sun rises in east.                                   | 4   |
| 25, Johnson have to help his mother.                         | 92  |
| 26, Bill doesn't going to read the book.                     | 106 |
| 27, Ken has a cat. The cat is black.                         | 110 |

## 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、図書館運営委員会がこれを組織する。

### 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、本規定に適用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<br>(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<br>18ポイント       | 明朝体<br>12ポイント   | Times<br>14ポイント | Times<br>12ポイント | 10ポイント<br>・見出しの「 <b>ABSTRACT</b> 」はゴシック<br>・要旨本体はTimes | 明朝体<br>10ポイント   |
| 2. 英文          | ゴシック体<br>18ポイント       | Times<br>12ポイント |                 |                 |  | Times<br>10ポイント |
| 3. 和文（縦書）      | ゴシック体<br>18ポイント       | 明朝体<br>14ポイント   | Times<br>10ポイント | Times<br>10ポイント |  | 明朝体<br>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。本文が英語以外の外国語の場合、本文と同じ外国語を用いても構わない。
- ・ 和文（縦書）、資料に関しては、キーワードは必要としない。

### (f) 本文

上述のキーワードから1行あけて2段組となる本文を書き出すこと。特例を除き、本文は2段組とする。

※ 英語表現、英文要旨、キーワード、および、英文論文など、外国語で記述する文章、単語は、それを読んだ国内外の読者が「正確明快に理解できる」ということに注意して執筆すること。

## <6-3> 本文

本文は、章（チャプタ）、節（セクション）に分け、それぞれに番号と適当な見出しを付け、読者が理解しやすいようにすること。このとき、章や節の見出しのフォントはゴシック体にすること。

### (a) 章（チャプタ）について

本文中の各章の始めには、例えば、「**1. はじめに**」、「**2. 実験操作**」、等々の章番号と適当な見出しを付け、改行してから文章を書くこと。また、各章の区切りは1行あけること。

### (b) 節（セクション）について

一つの章をさらに細かい節（セクション）に分ける場合は、例えば、「**2. 1 分析条件**」や「**3. 2 温度変**

化の追跡」, 等々の節番号と適当な見出しを付けること. 文章は原則として改行せずに見出しから2文字あけて書き始めること. 構成上, 改行したほうが見やすくなる場合は改行しても構わない (例えば, 見出しが長くなり, 文章が若干しか欠けない場合など). セクションの区切りは, 行をあげないこと.

※ 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、「<sup>(1)</sup>」、「<sup>(1),(3)</sup>」、「<sup>(4)-(8)</sup>」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21年3月に改正され、平成21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)

25 mm

(※1行あける)

# 神戸高専の紀要に関するフォーマット (18ポイント,ゴシック体)

(※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 Memories of Kobe City College of Technology (14ポイント)

(※1行あける)

Taro KOBE\* Jiro KOSEN (12ポイント)

(※1行あける)

ABSTRACT (10ポイント,ゴシック体)

(※1行あける)

2文字の余白

150語程度の英文要旨を,10ポイント,Times で書く。  
この時,左右にはそれぞれ2文字程度の余白をとることを忘れないようにする。

2文字の余白

(※1行あける)

Keywords: format, memories, reference, section (※Keywordsのみイタリック,10ポイント)

(※1行あける)

16 mm

### 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。執筆者はフォーマット等十分な注意を払うこと。

### 2. 章(チャプター)の分け方

章と章の区切りには,上記のように改行し,必ず1行あける。また,本文は章の見出しを記述した行から改行して書き始めること。

2.1節(セクションについて) セクションの見出しには,上記のように「.」を用いた節番号をつける。このとき,セクションの本文は,セクションの見出しを記述した行から改行せず,2文字あけて書き始めること。下記のように,見出しでその行のほとんどが埋まる場合は,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執筆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する。

\* 一般科 教授  
\*\*専攻科 応用化学科

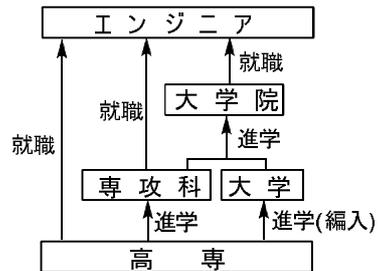


図1 高専卒業からエンジニアまでの経路

表1 投稿紀要のフォーマット

| format            | 段組,文字・行数/1page                 | font size | 制限枚数                |
|-------------------|--------------------------------|-----------|---------------------|
| 1.和文(横書)          | 2段組, 24文字×50行                  | 10 pt     | 原則6ページ以内.           |
| 2.英文              | 2段組, 48文字×50行                  | 10 pt     |                     |
| 3.和文(縦書)          | 2段組, 33文字×32行                  | 10 pt     | 超過は10ページ以内,それ以上は不可. |
| 4.和文,英文<br>(横書特例) | 1段組, 48文字×46行<br>1段組, 96文字×46行 | 10 pt     |                     |

### 4. まとめ

神戸高専研究紀要は WEB での閲覧だけでなく,モノクロ印刷も行うので,執筆者は図表の解像度だけでなく,カラーの図表を用いた場合は印刷時に閲覧者がはっきりと違いが判るように心掛ける。決められた投稿規定には十分配慮した原稿作成を行って頂きたい。

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)研究紀要編集委員:「神戸高専研究紀要 投稿規定」, 神戸高専研究紀要, 第47号, pp8-24, 2009

24 mm

神戸高専研究紀要第 48 号 編集委員

|       |         |       |         |       |         |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 中西 宏  | (図書館長)  | 早稲田一嘉 | (機械工学科) | 森田 二郎 | (電気工学科) |
| 戸崎 哲也 | (電子工学科) | 根本 忠将 | (応用化学科) | 辻本 剛三 | (都市工学科) |
| 高橋 秀実 | (一般科)   | 乾 あさ子 | (図書館)   | 萩庭 恵美 | (図書館)   |

研 究 紀 要 第 48 号 (非売品)

発 行 日 平成 22 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 21 年度 第 335 号 (広報印刷物規格 A-5 類)