

目 次

論 文

タングステン繊維強化チタン複合材料の X 線 3 軸応力評価	西田 真之, 羽子岡 督祥 1
水平放射状噴流拡散水素火炎の燃焼特性と火炎構造	高島 立至, 吉本 隆光 7
水平噴流放射状予混合火炎の火炎挙動と安定に関する基礎的研究	原 裕貴, 吉本 隆光 13
船用ディーゼルエンジンでの吸気条件による燃焼・排ガス特性	天野 航介, 吉本 隆光 19
加熱平板の強制対流過渡熱伝達に関する研究	柴原 誠, 劉 秋生, 福田 勝哉 25
インダクタを二次元に配列させた磁気式触覚センサ	青野 哲典, 武縄 悟 31
水平チャンネル内マイクロバブル流の摩擦圧力損失特性—マイクロバブル水の物理化学的特性—	新海 藍菜, 安田 貴央, 和田 徳幸, 鈴木 隆起, 赤対 秀明 37
画像センサによる三次元位置検出を用いた移動物体の軌道予測手法	竹森 有祐, 小林 洋二 43
変位出力を用いたプロパーな局所コントローラによる大型柔軟宇宙構造物の分散制御	井本 廉, 小林 洋二 49
鼻腔内におけるエアロゾル粒子の沈着特性に関する研究	土屋 健太, 朝倉 義裕, 山本 高久 55
高面圧すべり接触におけるステンレス鋼の摩擦・摩耗特性(1) - 鉱油系潤滑油の効果 -	岸本 広大, 岩坂 明, 中辻 武 61
高面圧すべり接触におけるステンレス鋼の摩擦・摩耗特性(2) - 水溶性潤滑油の効果 -	岩坂 明, 岸本 広大, 中辻 武 67

目 次

工業英語とキャリア教育の融合を目指した授業における Twitter を用いたコミュニケーション利用に関する研究	佐藤 徹哉 71
部分影による出力低下を抑制する太陽電池モジュールの設計	津吉 彰, 濱本 耕平, 徳田 圭佑, 土江 竜生 77
ウェーブレット変換によるギター音色の解析	築地 美由樹, 笠井 正三郎 83
H_{∞} 制御による光ピックアップのサーボ制御	藤田 貴大, 笠井 正三郎 91
想起背景を用いた移動物体抽出に関する研究	神田 嵩臣, 藤本 健司 97
プログラム間の類似性の定量化手法	小田 悠介, 若林 茂 103
粗粒材を用いた岸沖断面地形と粒径分布の特性に関する研究	見垣 亮太, 辻本 剛三, 柿木 哲哉, 宇野 宏司 109
ブラウン管パネルガラス製発泡ガラス材とその混合土の地盤工学的特性	鳥居 宣之, 古宮 雅之, 澁谷 啓 115
P- Δ 効果が1自由度解析モデルの損傷度指標に与える影響	島袋 武, 山下 典彦 125
人口, 土地利用変化からみた震災復興市街地再開発事業に関する研究	橋本 渉一, 大西 千尋 131
大阪湾における水環境変化と水産資源の変遷	木下 歩, 宇野 宏司 137
コウノトリが生息する豊岡盆地の環境変化	瀬崎 瑛, 宇野 宏司 143
東日本大震災における関西広域連合による広域支援活動	宇野 宏司 149

目 次

英語学習に対しての動機づけの変化について	上垣 宗明 155
契丹陶磁の「周縁性」に関する検討（3）－遼代の都城・州県城制度との関連から－	町田 吉隆 161
瞬間冷却剤に使用する無機塩の効果とその回収法 布浦 博之，伊藤 健，水流 賢之郎，栗谷 樹，吉本 隆光，八木 善彦，大多喜 重明，福本 晃造 165	
資 料	
産学官技術フォーラム20年の歩み	大淵 真一，小林 滋，赤対 秀明 171
地理情報で表す神戸高専の50年間の変遷	中尾 幸一 175
仮想陰極発振器を用いた滅菌用大電力マイクロ波発生における発振条件の考察	橋本 好幸 179
数学記号	八木 善彦 183
兵庫県南東部の金環日食北限界線調査 木村 優友，江副 真悠，服部 誠一郎，吉本 隆光，八木 善彦，大多喜 重明，福本 晃造 187	

CONTENTS

PAPERS

- Tri-axial Stress Measurement of Tungsten Fiber Reinforced Titanium Composite by X-ray Diffraction
Masayuki NISHIDA, Masashi HANEOKA 1
- Flame Structure and Combustion Characteristics on Radial Horizontal Jet Diffusion Hydrogen Flame
Ryuji TAKASHIMA, Takamitsu YOSHIMOTO 7
- Flame Behavior and Stability on Radial Horizontal Jet Premixed Flame
Hiroki HARA, Takamitsu YOSHIMOTO 13
- Characteristics of Combustion and Exhaust Gas on Intake Condition in a Marine Diesel Engine on Intake Air Conditions
Kosuke AMANO, Takamitsu YOSHIMOTO 19
- Transient Heat Transfer for Forced Convection over a Heated Plate
Makoto SHIBAHARA, Qiusheng LIU, Katsuya FUKUDA 25
- A Magnetic Type Tactile Sensor with a Two-Dimensional Array of Inductors
Testunori AONO, Satoru TAKENAWA 31
- Frictional Pressure Drop of Microbubble Flow in a Horizontal Channel-Physicochemical Properties of the Microbubble Water-
Aina SHINKAI, Takahiro YASUDA, Noriyuki WADA, Takayuki SUZUKI, Hideaki SHAKUTSUI 37
- A Trajectory Prediction Method of a Moving Object Using Position Detection in 3-D Space by a Vision Sensor
Yusuke TAKEMORI, Yohji KOBAYASHI 43
- Decentralized Control for Large Flexible Space Structures by Local Proper Controllers Using Displacement Output
Ren IMOTO, Yohji KOBAYASHI 49
- Research on Deposition Characteristics of Aerosol Particles in Nasal Cavities
Kenta TSUCHIYA, Yoshihiro ASAKURA, Takahisa YAMAMOTO 55
- Friction and Wear Properties of Stainless Steel under High Pressure in Sliding Contact (1) - The effect of additives in the mineral oil -
Kodai KISHIMOTO, Akira IWASAKA, Takeshi NAKATSUJI 61
- Friction and Wear Properties of Stainless Steel under High Pressure in Sliding Contact (2) - The effect of water solubility lubricants -
Akira IWASAKA, Kodai KISHIMOTO, Takeshi NAKATSUJI 67
- A Study on Twitter Communication Utilization in Engineering English Class Aimed to Be Consolidated with Career Development Education
Tetsuya SATO 71
- The Enhanced Design of Solving the Partial Shading Problem in Photovoltaic Modules
Akira TSUYOSHI, Kohei HAMAMOTO, Keisuke TOKUDA, Tatsuki DOE 77
- Tone Analysis of Guitar using Wavelet Transform
Miyuki TSUKIJI, Shozaburo KASAI 83
- Optical Pickup Servo Control using H_∞ Control Theory
Takahiro FUJITA, Shozaburo KASAI 91
- A Study of Object Extraction Using Recalling Background
Takaomi KANDA, Kenji FUJIMOTO 97

CONTENTS

Method of Similarity Quantification between Program Codes Yusuke ODA, Shigeru WAKABAYASHI	103
A Study on Evolutions of Beach Profiles and Grain Size Distribution using Coarse-grained Sand Particles Ryota MIGAKI, Gozo TSUJIMOTO, Tetsuya KAKINOKI, Koji UNO	109
Geotechnical Properties of Foamed Glass Material Made from CRT Display and its Mixed Soil Nobuyuki TORII, Masayuki FURUMIYA, Satoru SHIBUYA	115
Influence of P- Δ effect on Damage Index of SDOF Model Takeshi SHIMABUKURO, Norihiko YAMASHITA	125
Urban Redevelopment of Earthquake Disaster from Population and Land use's point of view Shoichi HASHIMOTO, Cihiro OHNISHI	131
Temporal Spatial Variation on Water Environment and Fishery Resources in Osaka Bay Ayumi KINOSHITA, Kohji UNO	137
Environment Change of Toyooka Basin as Stork Sanctuary Akira SEZAKI, Kohji UNO	143
Human and Material Support by Union of Kansai Government after the Great East Japan Earthquake Kohji UNO	149
A Longitudinal Research of the Motivational Changes of the Students to English Learning Muneaki UEGAKI	155
Examining on the Border Character of the Kitai Pottery in China (3) : To relate with the City Systems in the Liao Dynasty Yoshitaka MACHIDA	161
Effects and Recycle Methods of Mineral Salts used in a Disposable Coolant Hiroyuki NUNOURA, Takeshi ITO, Kenshiro TSURU, Itsuki KURITANI, Takamitsu YOSHIMOTO, Yoshihiko YAGI, Shigeaki OHTAKI, Kozo FUKUMOTO	165

RESEARCHES AND FINDINGS

The Course of the Technical Forum on the Governmental-Academic-Industrial Collaboration for Twenty Years Shinichi OHFUCHI, Shigeru KOBAYASHI, Hideaki SHAKUTSUI	171
The Transition of Kobe City College of Technology Represent Geographical Information in 50 Years Kouichi NAKAO	175
Some Conditions of High Power Microwave Generation in a Virtual Cathode Oscillator for Sterilization Yoshiyuki HASHIMOTO	179
Mathematical Symbols Yoshihiko YAGI	183
Study of the Northern Limit of Observable Places of an Annular Solar Eclipse in the Southeast of Hyogo Prefecture Yuu KIMURA, Mayu EZOE, Seiichirou HATTORI, Takamitsu YOSHIMOTO, Yoshihiko YAGI, Shigeaki OHTAKI, Kozo FUKUMOTO	187

タングステン繊維強化チタン複合材料のX線3軸応力評価

西田真之* 羽子岡督祥**

Tri-axial Stress Measurement of Tungsten Fiber Reinforced Titanium Composite by X-ray Diffraction

Masayuki NISHIDA* Masashi HANEOKA**

ABSTRACT

The tungsten fiber reinforced titanium composite (W/Ti) was produced by the spot welding method. This manufacturing method used only a simple spot welding system, and it did not need a vacuum chamber and a high temperature furnace such as existing common methods. The arranged tungsten fibers were held between titanium plates (thickness 0.5mm) and fixed by the spot welding. Therefore, this W/Ti composite produced by the spot welding did not joint in the whole position between the tungsten fiber and the titanium matrix because of the partial welding in the spot welding point. The coverage, a rate of welding area to the whole plate area, became in 150% for the sample in this study, because it should make up for the partial welding by this method. Thermal stresses of the W/Ti composite were measured by x-ray stress measurement. Furthermore, the tri-axial stress state in W/Ti composite was measured by the tri-axial x-ray stress measurement technique. These results were discussed from the viewpoint of the thermal expansion coefficient mismatch between fiber and matrix.

Keywords : W/Ti composite, thermal residual stresses, x-ray stress measurement, nitrogen quenching

1. はじめに

繊維強化材料は、近年適応分野の開拓と新素材の開発からその重要性を増している。しかしながら、これらの材料には一般的に繊維と母材間の熱膨張係数の差から熱誘起型の残留応力⁽¹⁾が生じ、性能の低下につながる大きな問題となっている。

本研究では、チタン母材を長繊維のタングステン繊維で強化したタングステン繊維強化チタン複合材料（以下 W/Ti 複合材）のスポット溶接法による製作およびX線応力測定法による3軸応力解析を行った。

チタンは耐熱性、耐食性、耐細菌性、比強度の大きさなどで優れた材料であり、その利用分野は強度部材としての機械、自動車などの分野はもとより、医療、航空、宇宙開発など広範囲となっている。

一方、チタンの繊維強化材はその製造方法の難しさおよびチタンが工業用材料として用いられた歴史が短

いことから、製造技術と信頼性の両面からの研究が今後重要である。

チタンの成型は鍛造が主流であるが、繊維強化材の場合は繊維の断線を避けるために、鋳造法もしくはHIPなどが用いられる。鋳造の場合、チタンは高温での酸化が激しいことから、大型の真空チャンバー内部に高温炉を設置して鋳型に流し込むことが多い。さらに、チタンは融点が純チタンで1668℃と高い上に熔融状態での活性が極めて高いことから、強化繊維として挿入される金属中に拡散または化合して繊維そのもの消失させてしまう場合が多い。一方HIPなどの方法で製作する場合は、複合材料の大きさが限られたものとなる点が問題である。

本研究では、これらの問題点を克服するために、一般的に用いられる電気抵抗式スポット溶接機（以下、スポット溶接）を用いてW/Ti複合材を製作した。この手法により大型のチャンバーや高温炉を用いずにW/Ti複合材料の製作が可能となった。その後、製作したW/Ti複合材料の残留応力をX線応力測定法を用い

* 機械工学科 教授

** 専攻科 機械システム工学専攻

て3軸応力状態を評価した。

2. W/Ti 複合材料の製作

今回、スポット溶接を用いてW/Ti複合材料の製作を行った。この繊維強化材料は繊維に純度99.99%のタングステン繊維を使用し、母材には板厚0.5mmの工業用純チタンを使用している。Table.1に本研究で使用したチタン材の成分を示す。

Table 1 Contents of titanium plate.

	C	H	O	N	Fe
Chemical composition in %	0.0	0.003	0.06	0.0	0.06

今回用いたタングステン繊維の直径は $100\mu\text{m}$ であり、通常このような細い繊維を溶融したチタンに入れると、タングステン繊維はチタンとの拡散反応によって簡単に消失してしまう。そのため、チタンの溶融を伴わないスポット溶接を用いた製作方法が有効である。

Fig. 1(a), (b)にスポット溶接を用いたW/Ti複合材の製作手順を示し、その際の溶接条件をTable 2に示す。本研究では厚さ0.5mmのチタン板にタングステン繊維を均等に巻き付け、両側から同じ厚さのチタン板材で挟んだ状態でスポット溶接を行った。

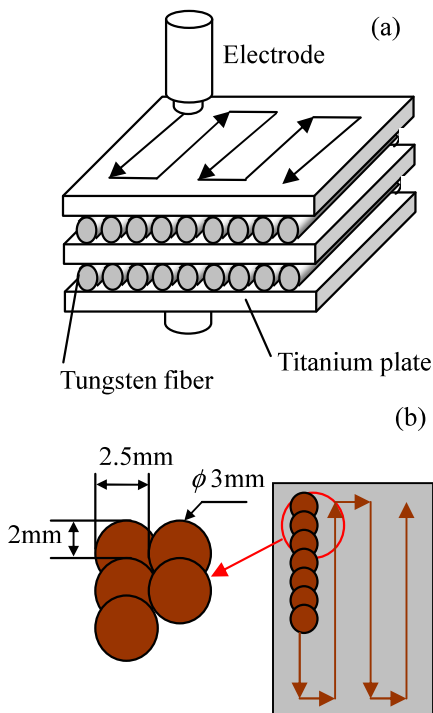


Fig. 1 Schematic diagram of: (a) the manufacturing procedure by the spot welding method, (b) the spot welding positions which define the coverage for W/Ti composite.

Table 2 Conditions of spot welding.

Welding voltage & current	200V, 7.8A
Welding pressure	1.9kN
Holding time	200msec.
Diameter of electrode	11mm

スポット溶接は局所的な溶接であり、広い面積を均一に溶接接合するには不向きである。そのため、試料の全面を埋め尽くす形でスポット溶接を繰り返しおこない、試料全面の溶接を行った。Fig.1(b)はスポット溶接による溶接位置を示している。直径約3mmの溶接痕となるスポット溶接をFig.1(b)に示す重なりを繰り返しながら全面に施した。この際のカバレッジ(試料表面に対する総溶接面積)は約150%となった。試料作成後、X線応力測定用に試料を切り出し、一方の面を繊維が露出するまでエメリー研磨を行った。最終的には1500番のエメリー紙で仕上げ、測定面とした。X線応力測定に用いた試料の最終寸法は $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 、厚さ 1.2mm となった。また、最終的に試料全体に対するタングステン繊維の体積割合は約5%となった。

3. X線3軸応力測定

Fig.2に今回測定したサンプルの座標系および角度 ϕ , ψ を示す。繊維長手方向を x_1 軸方向と定義し、Fig.2に示す x_2 , x_3 軸を定義する。 x_3 軸は試料表面法線方向と一致する。試料表面および内部の応力状態はほぼ繊維方向に沿った主応力状態であることが既に報告されていることから⁽²⁾、せん断応力はゼロと仮定し応力測定は繊維長手方向と繊維直交方向の測定を行った。

弾性論を用いて角度 ϕ , ψ で定義される任意方向OPのひずみ $\epsilon_{\phi\psi}$ を現すと次式となる。

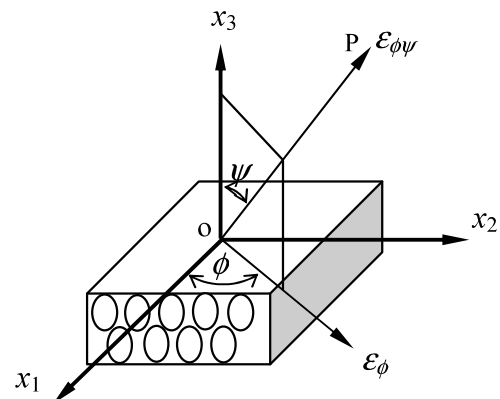


Fig. 2 Coordinate system and definition of the ψ and ϕ angles.

$$\begin{aligned} \epsilon_{\phi\psi} = & \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi \\ & + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \\ & + \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{23} \sin \phi + \sigma_{31} \cos \phi) \sin 2\psi, \end{aligned} \quad (1)$$

ここで E はヤング率, ν はポアソン比である.

通常, X 線応力測定の場合は, X 線の侵入深さが小さいことから, 平面応力状態が仮定される. しかしながら, 繊維強化材料において繊維相が表面に露出している場合には試料法線方向応力 σ_{33} が無視できなくなる場合がある.

式(1)において ψ の正と負の傾き角に対する平均ひずみは $\sin^2 \psi$ に対して線形に分布する. また, 本研究における繊維強化材の場合は前述の通り, せん断応力がほとんど存在しないことが知られているので, せん断応力をゼロと仮定してもよい. ここで, 応力方向が $\phi = 0^\circ$ および $\phi = 90^\circ$ の場合, 式(1)は次式となる.

$$\begin{aligned} \phi = 0^\circ: \\ \varepsilon_{\phi=0,\psi} = \frac{1+\nu}{E}(\sigma_{11} - \sigma_{33})\sin^2 \psi + \frac{1}{E}\sigma_{33} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \phi = 90^\circ: \\ \varepsilon_{\phi=90,\psi} = \frac{1+\nu}{E}(\sigma_{11} - \sigma_{22})\sin^2 \psi + \frac{1}{E}\sigma_{33} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22}). \end{aligned}$$

これらの式より, 試料法線方向応力 σ_{33} が存在する場合には $\sin^2 \psi$ 法⁽³⁾, つまり $\sin^2 \psi$ 線図の傾きから得られる応力値は $\sigma_{11} - \sigma_{33}$ および $\sigma_{22} - \sigma_{33}$ の応力差となる. これらの応力差で得られる値をそれぞれの応力成分に分離するために, 試料表面の法線方向からの傾き角度が $\psi = 0^\circ$ の場合を考える. この場合, 面内の方位 ϕ の影響がなくなり添字 ϕ を省略して次式となる.

$$\varepsilon_{\psi=0} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{33} - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_{33}). \quad (3)$$

この式における試料表面法線方向のひずみ $\varepsilon_{\psi=0}$ を正確に測定すれば式(2)より $\sin^2 \psi$ 線図の傾きから得られた応力値と連立に解くことでそれぞれの応力成分を分離することができる.

次式で示されるひずみ $\varepsilon_{\psi=0}$ は試料表面からの傾きが $\psi = 0^\circ$ の格子面間隔 $d_{\psi=0}$, 無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 を用いて求めることができ, また, X 線の回折角度 2θ を用いて求めることもできる.

$$\varepsilon_{\psi=0} = \frac{d_{\psi=0} - d_0}{d_0} = -(\theta_{\psi=0} - \theta_0) \cot \theta_0 \cdot \frac{\pi}{180}. \quad (4)$$

また, これらの式で用いられる E および ν は X 線応力測定の場合, 回折面に依存することからタングステンの場合は Kroener モデルの計算から, また, チタンの場合は実験的に求めた X 線の弾性定数を使用した.

無ひずみの格子面間隔 d_0 の測定にはタングステンの場合, 純度99.99%, 粒子径1 μm のタングステン粉末を用いて測

定し, チタンの場合は繊維強化材に使用したのと同じ工業用純チタン板材から細目の金属用やすりで粉末を削り出し, そのチタン粉末を真空炉中で650 $^\circ\text{C}$ 2時間の焼きなまし処理および炉中冷却を行った試料を用いて測定した.

4. 熱処理と X 線応力測定条件

Fig.3に本研究で行った一連の熱処理の流れを示す. 本研究における応力測定はエメリー研磨した表面に対して行い, 電解研磨などの表面処理行っていない. そのため, 初期状態ではエメリー研磨の際に発生した加工残留応力が存在する. これらの初期残留応力を除去するために, 真空炉中で600 $^\circ\text{C}$, 2時間のひずみ取り焼鈍を行い, エメリー研磨による残留応力を除去した. この試料のチタン母材およびタングステン繊維についてそれぞれX線3軸応力解析を行った. その後, 試料を液体窒素に10分間浸して冷却による残留応力の変化を調べた.

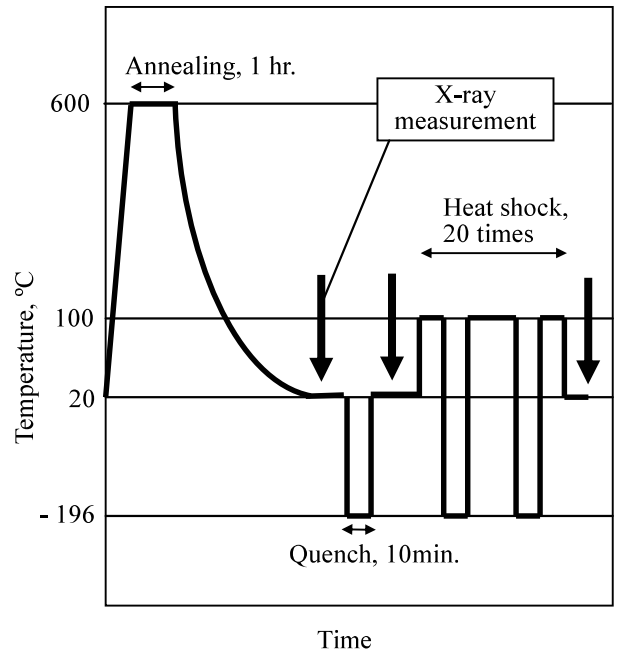


Fig.3 Temperature programs of the treatment of annealing, quench and heat shock in W/Ti composite.

さらに試料を100 $^\circ\text{C}$ の沸騰水と液体窒素に交互に浸し, 約300 $^\circ\text{C}$ の温度差における熱衝撃を20回繰り返し加えた後に同様の応力評価を行った. なお, Fig.3の矢印部分はX線応力測定を行った箇所である.

また, 一連の熱処理による試料表面の酸化は焼鈍時に表面の変色が変わらずに肉眼で観察できる程度に発生した. 測定には特に支障がないことから酸化膜の除去は行わずに測定を行った. さらに, 液体窒素による急冷や熱衝撃では試料表面の酸化は進行しなかった.

X 線応力測定は $\text{CuK}\alpha$ 特性 X 線を用いて並傾法で行った. タングステン繊維の応力測定には $2\theta = 131.1^\circ$ に出現する W 321 回折線を, また, チタン母材には $2\theta = 139.3^\circ$ に出

現する Ti 213 回折線を用いた。

チタン応力測定の場合、回折線ピークにはチタンからの蛍光 X 線が含まれるためにバックグラウンドが非常に高くなる。そのため、測定精度を維持するためにステップスキャンの保持時間を長く取ることによってカウント数を増やし測定した。その結果、タングステンの場合 1 ステップ 30sec, チタン母材の場合は 60sec とした。Table 3 に X 線応力測定の条件を示す。

Table 3 conditions of stress measurement.

Characteristic x-rays	CuK α
Method	Ω -diffractometer method
X-ray optics	Parallel beam
Tube voltage	40 kV
Tube current	25 mA
$\sin^2 \psi$	0 ~ 0.5, 6 points
hkl plane & Diffraction angle	W 321, $2\theta=131.1^\circ$ Ti 213, $2\theta=139.3^\circ$
2θ step angle & fixed time	W: 0.1° , 30sec. Ti: 0.1° , 60sec.
Filter	Nikkel
Irradiated area	10 $\times$ 5 mm
Peak deciding method	FWHM method

5. 結果と考察

5.1 W/Ti 複合材の断面観察 Fig.4(a)にスポット溶接した試料表面の様子を示す。スポット溶接により表面が荒れていることが分かる。また、溶接時に発生するジュール熱による熱膨張で試料は若干湾曲するが、この湾曲はバイスで固定することで防いだ。Fig.4(b)は繊維長手方向に垂直な断面で切断した表面の光学顕微鏡による観察結果である。タングステン繊維がチタン板材の板厚0.5mmを保って配列していることが確認できる。しかし、同じ並びにおいて繊維配列は当初0.3mm間隔で巻きつけられていたが、溶接後は均等ではない。これは、溶接時にタングステン繊維が若干動いたためと考えられる。Fig.4(c)はエメリー研磨した表面の顕微鏡写真である。この表面をX線を用いて応力測定を行うが、この時点で既にエメリー研磨による残留応力が存在していることになる。

また、タングステン繊維とチタン母材の間には隙間や境界上の凹凸などは確認されなかった、さらに、電子顕微鏡観察の結果からもタングステン繊維とチタン母材の接合界面での剥離などは確認されなかったことから、両者は隙間なく十分な強度で接合されていることが推察できる。本論文では紙面の関係上示すことができなかったが、W/Ti 複合材の引張り試験の結果からも繊維と母材の良好な接合が確認されている⁽⁴⁾。

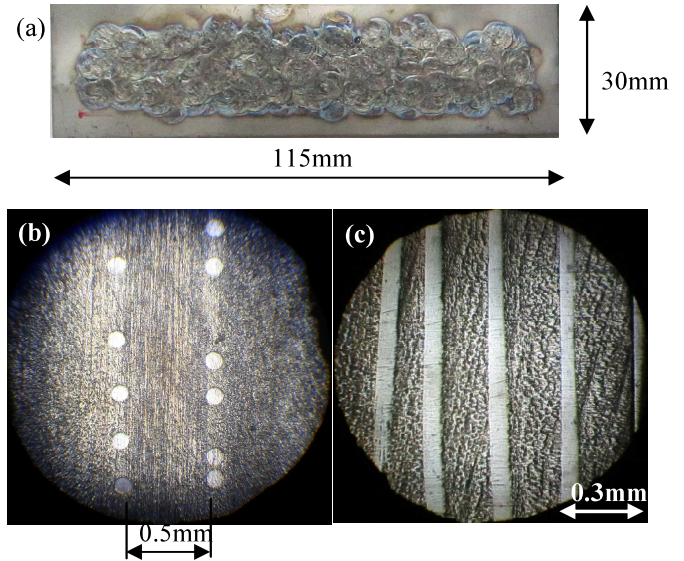


Fig. 4 Photographs of the W/Ti composite; (a) a lot of indentations by the spot welding were observed on the sample surface, (b) a microphotograph of the cross section of W/Ti composite, (c) the specimen surface polished by #1500 emery paper.

5.2 W/Ti 複合材の X 線 3 軸応力測定 Fig.5(a), (b) はチタン母材およびタングステン繊維における、エメリー研磨をおこなった初期の状態と応力除去焼鈍を行った後の応力測定結果を 2θ - $\sin^2 \psi$ 線図で示したものである。図中の黒塗りマークはエメリー研磨後の初期状態、中抜きマークは応力除去焼鈍後の結果を示し、さらに繊維長手方向の測定結果を L で、繊維直交方向の結果を P で表している。また、Table 4 に Fig.5(a), (b)の 2θ - $\sin^2 \psi$ 線図より求めた残留応力値を示す。Table 4 には式(2), (3), (4)より計算した応力値を $L(\sigma_{11})$, $P(\sigma_{22})$ および σ_{33} で示している。

Fig.5(a), (b)の双方において 2θ - $\sin^2 \psi$ 線図は良好な直線性を示すことから、測定精度には問題ないと考えられる。Fig.5(a)のチタン母材において初期状態は、繊維長手方向および繊維直交方向においてほぼ同じ圧縮の応力値を示し、試料表面法線方向応力 σ_{33} は引張の残留応力で 31MPa となった。 σ_{33} の応力値は繊維長手方向応力の約 20%程度の大きさとなっている。

応力除去焼鈍後には繊維長手方向は引張の残留応力状態となり、繊維直交方向は圧縮残留応力となる。残留応力の値は繊維長手方向の引張応力は約 25MPa の小さな引張残留応力であることに対して、繊維直交方向は約 100MPa の大きな圧縮残留応力となっている。なお σ_{33} は 3MPa となりほぼゼロの応力値となった。

一方、タングステン繊維において初期状態は繊維長手方向と繊維直交方向でそれぞれ -894MPa および -553MPa で共に大きな圧縮応力となっており、繊維長手方向の応力値が大きくなっている。応力除去焼鈍後は長手方向と直

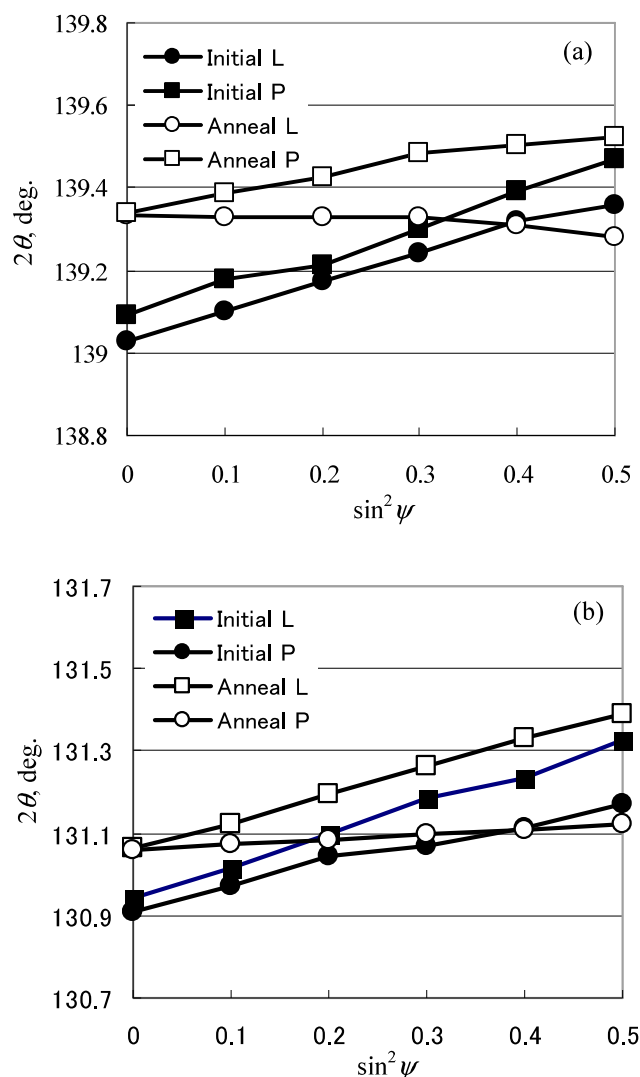


Fig.5 $2\theta - \sin^2\psi$ diagram of the initial state by emery polishing and the after annealing treatment; (a) titanium matrix, (b) tungsten fiber. The symbol L means longitudinal fiber direction, The P is perpendicular to the fiber direction.

Table 4 Results of X-ray stress measurement for the emery polishing and the stress relief annealing in W/Ti composite.

Material & Direction	Residual stresses, MPa	
	Initial by emery polishing	After annealing
Titanium, $L(\sigma_{11})$	-155	28
Titanium, $P(\sigma_{22})$	-174	-102
Titanium, σ_{33}	31	3
Tungsten, $L(\sigma_{11})$	-894	-829
Tungsten, $P(\sigma_{22})$	-553	-124
Tungsten, σ_{33}	93	35

交方向の応力はそれぞれ、 -829MPa および -124MPa となり繊維直交方向の応力が約 1/4 程度に減少している。 σ_{33} は 93MPa から 35MPa へと減少した。初期の σ_{33} は長手方向応力の約 10%程度の大きさであることから、チタン母材と比較してもほぼ同じオーダーの試料表面法線方向の残留応力が存在し、応力除去焼鈍後はほぼゼロに近い値となる傾向も同じである。

Table 5 に応力除去焼鈍し、液体窒素に浸した急冷処理および液体窒素と 100°C の沸騰水の間で行った熱衝撃試験による応力変化を示す。この表には比較のため、Table 4 に示した応力除去焼鈍後の応力値を示している。

これらの結果より、液体窒素による急冷および熱衝撃試験において W/Ti 繊維材の残留応力はチタン母相およびタングステン繊維相において大きな変化が発生しないことが確認できる。これは冷却過程でチタン母材側に塑性変形が発生しないことを示唆しており、W/Al 繊維材や W/Cu 繊維材には見られない現象である⁽²⁾。

Table 5 Results of X-ray stress measurement for the cooling quench in liquid nitrogen and the heat shock treatment between boiling water and liquid nitrogen in W/Ti composite.

Material & Direction	Residual stresses, MPa		
	After annealing	Cooling quench	Heat shock
Ti, $L(\sigma_{11})$	28	55	36
Ti, $P(\sigma_{22})$	-102	-47	-64
Ti, σ_{33}	-3	26	2
W, $L(\sigma_{11})$	-829	-876	-777
W, $P(\sigma_{22})$	-124	-171	-153
W, σ_{33}	35	-12	20

Fig.6 は温度変化により発生する母材相の繊維長手方向応力の変化を表現したモデルである。繊維強化材中の熱応力は主に繊維と母材間の熱膨張係数の違いから発生し、このモデルの場合簡略化のために繊維は降伏せずに母材だけが降伏するとしている。

まず①の初期応力状態にあった試料が加熱され、降伏点の A 点まで応力が上昇する、A 点で降伏が発生し、応力値は横ばいとなる。その後、冷却過程で応力は圧縮方向に転じ、初期温度まで低下すると①の点よりも圧縮側にシフトした②の応力値となる。さらに冷却すると圧縮側の降伏点である B 点まで応力は低下し、その後横ばいとなる。この時点で温度が上昇し、初期温度まで達すると残留応力は③の引張側にシフトすることになる。しかしながら、母材側に降伏が発生しない場合、応力は温度と共に図の破線上を動き、加熱および冷却後も応力値は①の値へ戻ってくる。このような考察から、本研究で使用した W/Ti 複合

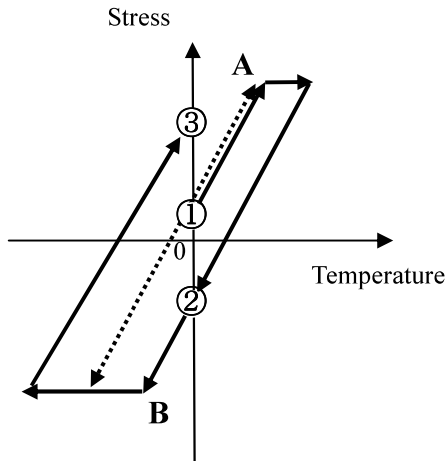


Fig.6 Schematic diagram of the stress alteration by temperature changes.

材料は液体窒素の -196°C から 100°C までの温度変化では Ti 母材中に塑性変形を生じないことが推測される。

次に、繊維と母材の熱膨張係数差による熱誘起型の残留応力は繊維長手方向が主応力方向となり、最大値を示すと考えられる。本研究における W/Ti 複合材料の場合はチタンとタングステンの熱膨張係数の関係から、チタン母材に大きな引張の残留応力が発生するはずである。しかしながら、本研究の測定結果においては繊維長手方向の引張応力は $28\text{MPa}\sim 55\text{MPa}$ と小さい。また、繊維直交方向の応力はチタン母材およびタングステン繊維共に大きな圧縮応力を示しており、チタン母材とタングステン繊維の残留応力は相互にバランスしていないことになる。これらの原因として Fig.7 に示すモデルを考察する。

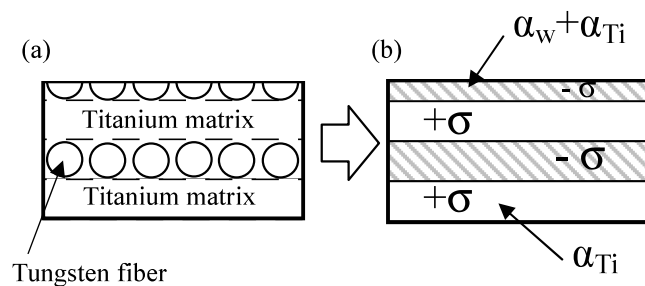


Fig.7 Schematic diagram of stress distribution of W/Ti composite; (a) tungsten fibers are arranged in neat rows, (b) thermal residual stresses are generated from the difference of the average thermal expansion coefficient.

本研究における W/Ti 複合材料は製作方法の特性からタングステン繊維がチタン母材内部において、Fig.7(a)に示されるような配列で整然と並んでいる。ここで、チタンが配列された部分においてはタングステンとチタンの体積割合に比例した平均的な熱膨張係数を持つ一つの層として働き、残留応力を発生させる。その際の残留応力はチタンだけで構成されたチタン母材部分とタングステンが配列さ

れた“チタンとタングステンの混合層”との間で応力がバランスすると考えられる。その結果、チタンだけの母材層が引張残留応力を分担し、チタンとタングステンの混合層は圧縮の残留応力を分担する。さらに、圧縮残留応力を分担したチタンとタングステンの混合層内部でさらにチタン相およびタングステン繊維相で応力が再分配されることになる。つまり、X 線による応力測定はこの表面に露出した“チタンとタングステンの混合層”の応力を測定していることになり、全体的に圧縮側にシフトした応力値を示したと考えられる。

6. 結論

- 1) スポット溶接を用いたタングステン繊維強化チタン複合材料の製作に成功した。
- 2) W/Ti 複合材において、エメリー研磨した初期状態の表面層には、タングステン繊維およびチタン母材ともに圧縮の残留応力が発生していた。
- 3) 応力除去焼鈍により初期応力は変化し、タングステン繊維は圧縮残留応力に、チタン母材は引張残留応力に変化した。
- 4) 液体窒素による急冷熱処理では残留応力の変化はほとんど確認できなかった。

参考文献

- (1) Y. Ikeuchi, T. Matsue and T. Hanabusa, Proc. 5th Int. Conf. on Residual Stresses, Vol. 2(1997), pp. 958-963.
- (2) Y. Ikeuchi, K. Iga and T. Hanabusa, J. Soc. Mat. Sci., Japan, 1994, 43: pp. 792-798.
- (3) The Society of Materials Science Japan ed. *Standard Method for X-Ray Stress Measurement*, (2005), ISBN 4-901381-27-X, The Society of Materials Science Japan.
- (4) Masashi Haneoka, Masayuki Nishida, Ryoji Hirai, Proc. The 12th World Conference on Titanium, (2011), pp.1095-1099.

本研究は平成 22 年度、23 年度、24 年度科学研究費補助金（基盤研究（C）課題番号 22560096）の助成を受け行われたものである。

水平放射状噴流拡散水素火炎の燃焼特性と火炎構造

高島立至* 吉本隆光**

Flame Structure and Combustion Characteristics on Radial Horizontal Jet Diffusion Hydrogen Flame

Ryuji TAKASHIMA* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

When the quantity of petroleum fuel resources is decreasing, substitutes for conventional petroleum fuel are needed. Therefore, there are various species of renewable fuel such as residual fuel of emission from the fuel cell and biomass gas. Now, there are assignments that the low-calorie fuel and the biomass gas are utilized for renewable energy. Various species of renewable fuel such as biomass gas which includes mainly methane, hydrogen and CO, are widely used for substitute fuel. Holding the flame is an important pole in the burning technique for taking out the energy effectively. It is found that the parameters for holding the diffusion flame are fuel velocity, co-flowing velocity, nozzle diameter (curvature), type of burner nozzle and condense of the fuel. The radial horizontal jet diffusion flame is formed by using slit type of nozzle. The object of the present study is to make clear of the flame structure and characteristic the stability limit of the horizontal jet radial diffusion flame, when the fuel is hydrogen and diluted hydrogen with nitrogen. The obtained result is as follows. (1)The flame length is shorter when dilute ratio increases. (2)The circulation occurs when the radius of the flame curvature is larger at the bottom of flame. (3)Flame configuration depends on the fuel velocity. (4)When the fuel is diluted, NO_x decreases. (5)The flame configuration according to time does not vary to depend on the interaction in the surrounding air.

Keywords: Radial Horizontal Jet Flame, Hydrogen, Flame Structure, Combustion Characteristics

1. 緒言

現在、燃焼技術の利用は環境問題やエネルギー問題が懸念され、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する研究が重要課題となっている。気体燃料の燃焼方法であるバーナ燃焼は、拡散燃焼、予混合燃焼、部分予混合燃焼に分けられる。その中でも、拡散燃焼は火炎の安定範囲が広い、操作が容易、逆火の心配がないなどの利点がある。拡散火炎を安定に保つ燃焼形態は、燃焼技術において重要な要素である。拡散火炎の安定性の要因として、火炎が形成される根元の火炎基部の要素が大きく影響⁽¹⁾しているが、その火炎基部の構造において不明な点も多い。そこで、安定な拡散火炎の挙動を観察するとともに、その火炎の構造⁽²⁾や火炎形状⁽³⁾などが調べられてきた。

本研究では水素ガスを用いて、ノズルのスリット部から半径方向に燃料を放射状に噴出させ拡散火炎を形成し、水平放射状噴流拡散火炎の燃焼特性と安定性に関する基礎的研究を行った。パラメーターとして、燃料速度や周囲流速度を変化させた場合の火炎基部や形状を直接写真やシュリーレン写真を用いて調査し、浮き上がり・吹き飛び現象にいたる過程

や水平方向拡散火炎の火炎挙動や特性、また、燃料を鉛直に燃料を噴出させ形成する鉛直方向噴流火炎との違いを比較して火炎構造、火炎挙動の要因を明らかにする。得られた結果として、火炎の形状はスリット幅・ノズル上部・ノズル内部の影響はほとんどなく流速に依存する。火炎は水平方向より鉛直方向に燃料を噴出するほうが安定する。水平噴流燃焼では拡散燃焼でも火炎の中に酸素が存在し、一部予混合燃焼となっている。燃料を希釈すると NO_x の生成量は、低減する。周囲流により時間的、周期的形状変化の一連のサイクルはなくなる。

2. 実験装置

2.1 フロー図 図1に使用ノズルを示す。ノズルスリット幅は1.0mm(直径3.66mmに相当), 0.75mm(直径3.12mmに相当), 0.5mm(直径2.58mmに相当), を用意した。また、ノズルのスリット上部の長さを5mmと15mmになるように変化させたものも用意した。ポンペより圧力調整器で圧力を減圧した燃料をフロート式流量計により、流量を調整する。図2にフロー図を示す。燃料を燃料噴出ノズルから水平方向に噴出させ、水平噴流放射状拡散火炎を形成する。

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

また火炎挙動，形状は直接写真とシュリーレン写真により観察する．

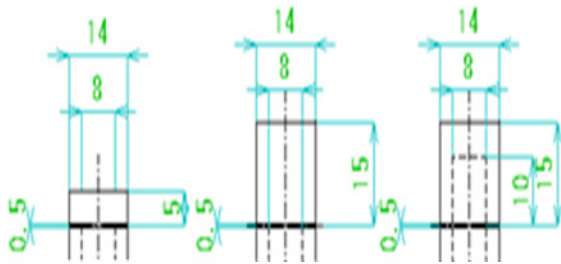


図1 製作ノズル設計図

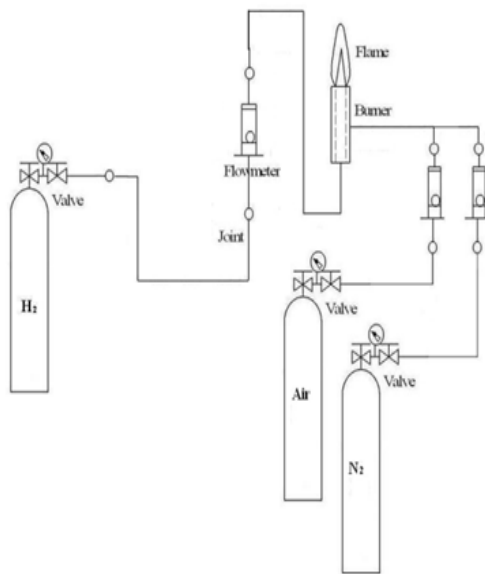


図2 フロー図

2.2 火炎内温度分布測定器 火炎の温度測定には素線径 0.1mm のR型熱電対(Pt-PtRh13%)を用いる．熱電対を2本の円筒状絶縁材に通し，熱接点を直線にのばした温度測定器である．なお，測定値に輻射損失等補正は行っていない．

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

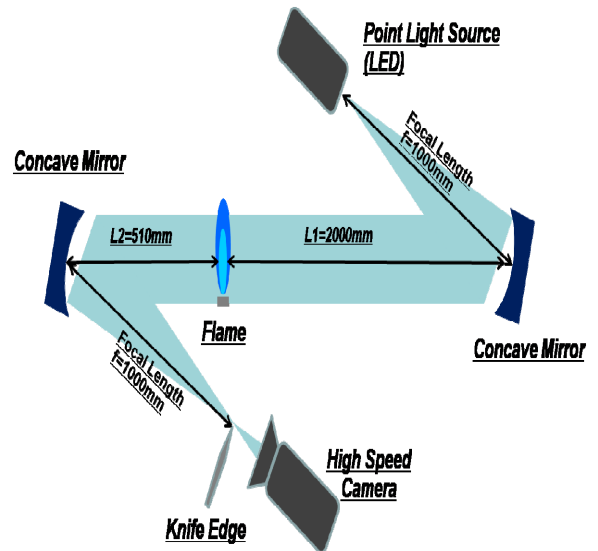


図3 シュリーレン撮影の装置概念図

ナイフエッジで収斂させられた光線の焦点を遮断する原理図を図4に示す．図3でのナイフエッジ付近を真上から見た状態である．測定対象での屈折率により曲げられた光線は，ナイフエッジに近づくか(図4A部)，遠ざかる(図4B部)ことで切断される光の量が変化する．測定対象部分で屈折が起こり，ナイフエッジから遠ざかるように光線が屈折すると，ナイフエッジで遮られる部分が少なくなるので，その部分はスクリーン上で明るくなる．また，ナイフエッジへ近づくように光線が屈折した場合では，ナイフエッジで遮られる部分が多くなり，その部分はスクリーン上で暗くなる．これらにより測定対象の密度分布が明暗のコントラストとして観察することができる．

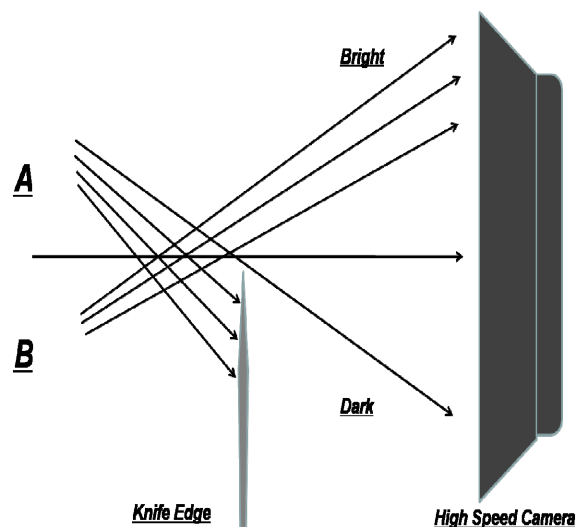


図4 ナイフエッジ付近の光の挙動

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

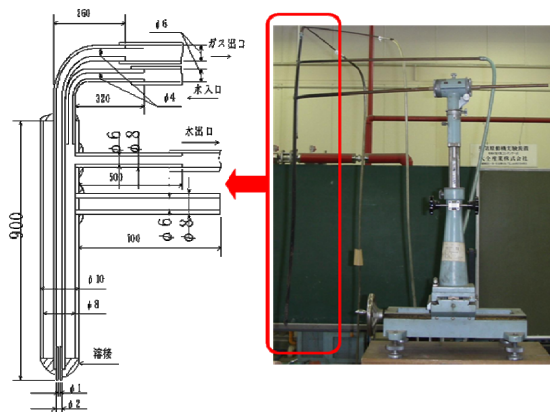


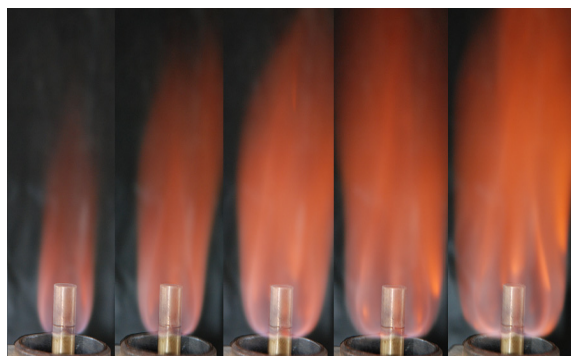
図5 サンプリングプローブ

3. 実験結果

3.1 噴出速度の増加に伴う火炎形状変化

図6はSW(スリット幅)=0.5mmの各流量における火炎形状を直接写真で示す。使用した燃料はどちらも純水素である。

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

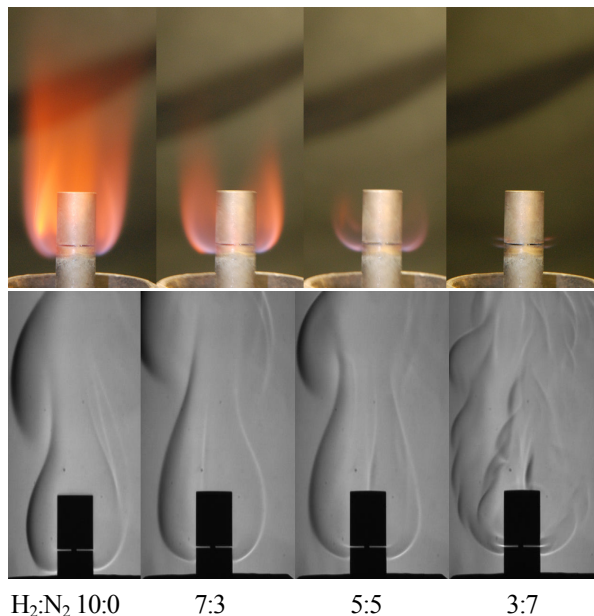


(L/min)	3	6	9	12	15
(m/s)	3.40	6.80	10.2	13.6	17.0

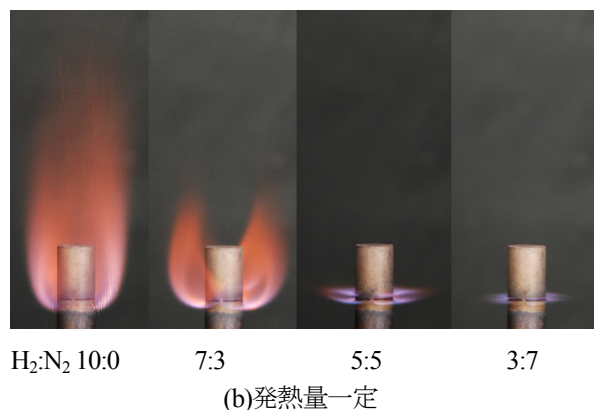
図6 燃料噴出速度増加に伴う火炎形状の変化 (SW=0.5)

3.2 希釈割合による影響 図7に希釈割合の変化に伴う火炎形状の遷移を示す。ノズルスリット幅0.35mmのものを使用し、燃料には水素、燃料速度1.62m/s(燃料流量 $Q=3\text{l/min}$)と一定にした時の火炎の様子を図7(a)に示す。窒素割合の増加に伴う様子を上段の直接写真、下段のシュリーレン写真で示す。水素混合割合の減少の伴い火炎長は短くなり、燃え切りも早くなる。図7(b)に発熱量を一定としたものを示す。水素の噴出速度1.62m/s ($Q=3\text{l/min}$)として窒

素により希釈する。(a)と(b)を比較することで、火炎の形状は希釈の割合に依存することがわかる。



(a) 燃料噴出速度一定



(b) 発熱量一定

図7 希釈割合の変化に伴う火炎形状の遷移

3.3 ノズル形状の変化による火炎形状の比較

スリット上部の長さを5mm、15mmと変化させ火炎形状の変化を観察した。燃料には水素を用いた。図8に燃料の噴出速度を1.42m/sとし直接写真により比較した直接写真を示す。上部の長さにより火炎形状に大きな変化は見られなかった。

また、図9に周囲流を0m/s～1.52m/s流し、ノズル上部の変化における火炎形状を比較した直接写真を示す。水素と窒素を5:5の割合の希釈した燃料を用いた。燃料の噴出速度を3.79m/sとし直接写真により比較した。上段がスリット上部の高さが5mm、下段がスリット上部の高さが15mmである。周囲流速度 V_s を上昇させたとき火炎はノズル壁面に近づいたが火炎基部に浮き上がりは見られなかった。またノズル上部のスリットからの長さにより火炎形状に大きな変化は見られなかった。

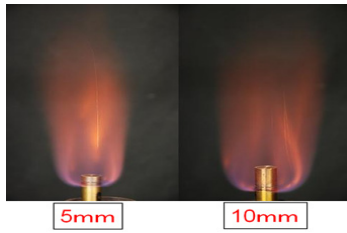
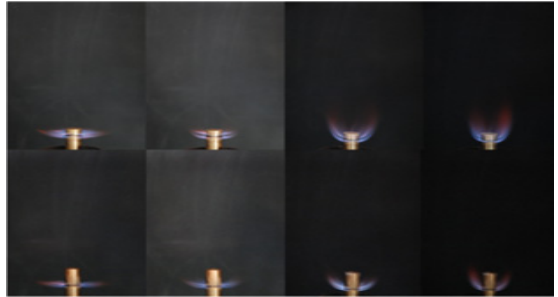
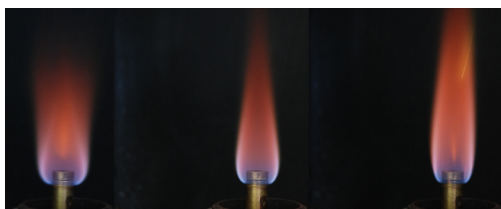


図8 スリット上部の長さにおける比較

図9 希釈燃料における周囲流の影響
Vs 0.0 ←→ 1.523 m/s

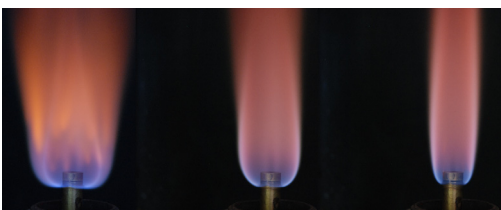
3.4 周囲速度の上昇による影響 図 10(a)(b)(c)に周囲流を 0m/s～0.846m/s 流し、燃料噴出速度を (a)1.14m/s (b)1.89m/s (c)3.79m/s とした時の直接写真を示す。燃料は純水素とする。周囲流速度が上昇すると火炎はノズル壁面に近づき細くなる。周囲流の上昇に伴い火炎の基部および火炎面はスリットの近づく。



(a) 1.14m/s



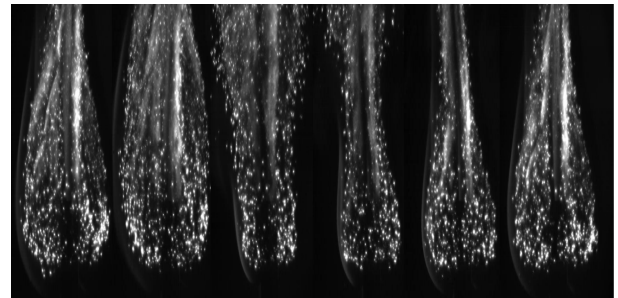
(b) 1.89m/s



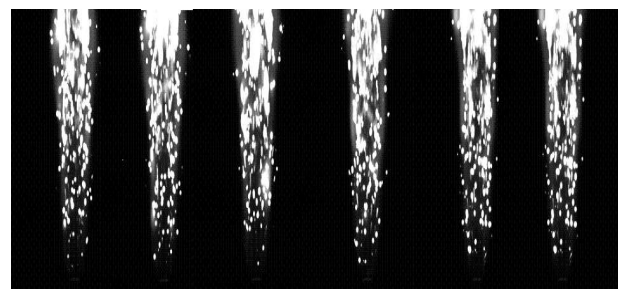
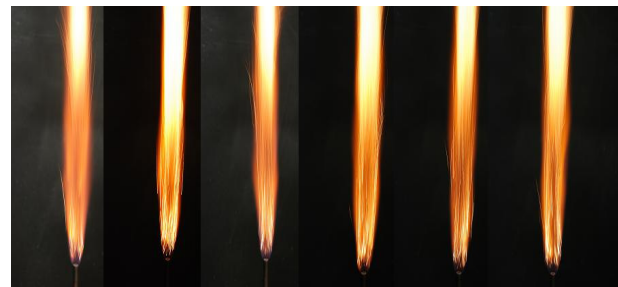
(c) 3.79m/s

図10 周囲流速度の上昇による火炎形状の変化
Vs 0.0 0.423 0.846 m/s

3.5 火炎面内の可視化 火炎内の挙動を可視化するため黒鉛の粉末（直径約 40 μ m）を純水素中に混合した。シャッター開放中の黒鉛の燃焼が流線として観測される。燃料に水素、ノズルスリット幅 0.5mm を用い、噴出速度 11.9m/s の乱流状態とし可視化を行った。図 11 (a) は水平放射状噴流拡散で火炎上段が直接写真、下段がシュリーレン写真である。さらに図 11(b) に鉛直噴流火炎を示す。上段が直接写真、下段がシュリーレン写真である。



(a) 水平噴流火炎



(b)鉛直噴流火炎

図11 黒鉛により可視化した火炎形状

図 11(a) より水平噴流火炎の火炎形状は定常状態ではなく、周期的形状変化が見られ、この一連のサイクルを繰り返す。火炎基部に注目すると火炎下部よりも変化は少ないことがわかる。このことから

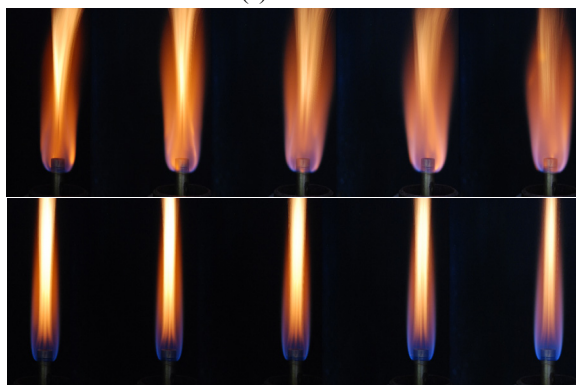
火炎の周期的形状変化は周囲の空気が温められ、下流部の空気が膨張し火炎が広がり火炎の上流部から空気が供給されることによって起こりうるのではないかと考える。

図 11(b)より鉛直噴流火炎の火炎形状は水平噴流火炎の火炎形状に比べ比較的定常状態である。これらより周期的形状変化の一連のサイクルは、鉛直方向の拡散火炎には見られない。

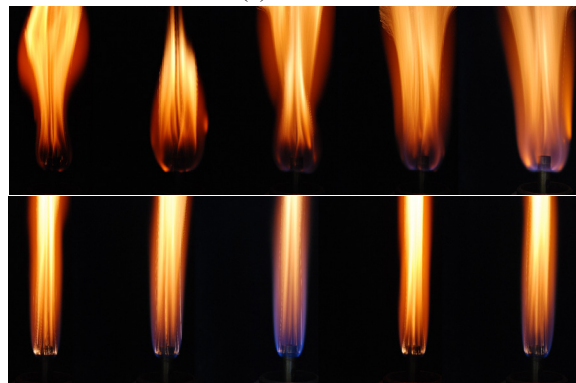
また、図 12 に周囲流速の上昇させたときの火炎の直接写真を示す。燃料は純水素、燃料噴出速度は (a)1.14m/s (b)1.89m/s (c)3.79m/s とする。直接写真の上段が周囲流速 0m/s、下段が周囲流速 0.846m/s である。



(a)1.14m/s



(b)1.89m/s



(c)3.79m/s

図 12 周囲流速上昇による時間的变化

周囲流速が上昇すると火炎基部は青くなってい

る。黒鉛の流線は、周囲流を流さないとき火炎の下流部で広がりがある。しかし周囲流速を上げるとほとんど時間的、周期的形状変化の一連のサイクルが見られなくなった。周囲の空気の影響が時間的、周期的形状変化の一連のサイクルに大きな変化を与えることがわかる。

3.6 数値計算における火炎形状 熱流体解析ソフト(PHOENICS)を用い計算させた。ノズルスリット幅 0.5mm、燃料に水素と窒素の混合燃料を用いた。希釈割合は 5 : 5 とし、低カロリーエネルギーを想定し数値計算を行った。図 13 に燃料の噴出速度 3.0m/s と一定で噴出させたときの火炎内部の温度分布を示す。周囲流を 5.0m/s と 2.0m/s に変化させたものである。周囲流速が 2.0m/s の時、火炎は基部から離れていないことが確認できる。しかし周囲流速が 5.0m/s の時火炎は基部から離れていることが確認できる。このことから燃焼速度が速く安定的に燃焼する水素でも希釈し、周囲流速を 5.0m/s まで上昇させると浮き上がる可能性があることが分かった。

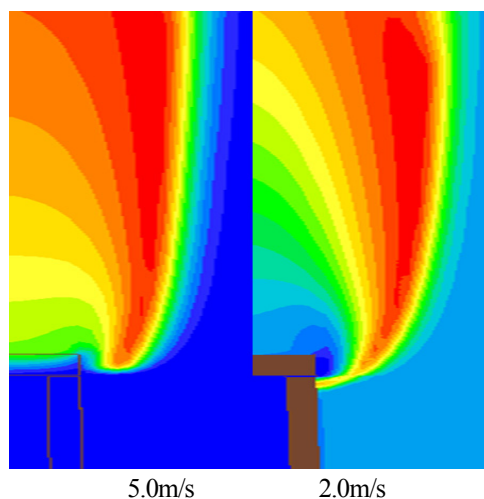
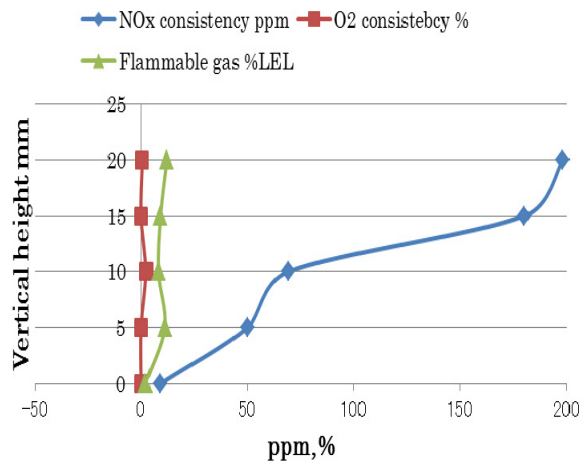


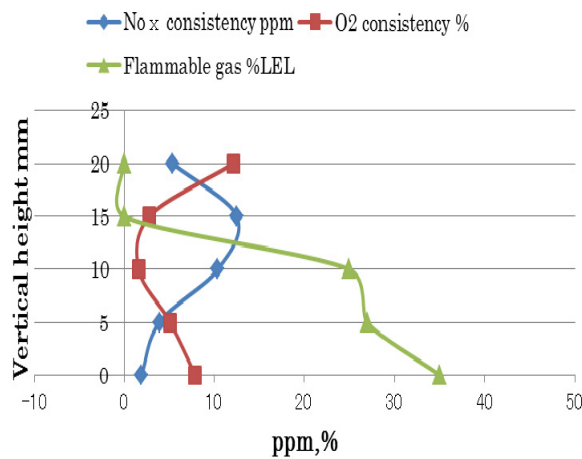
図 13 数値計算による温度分布

3.7 火炎内の化学種成分

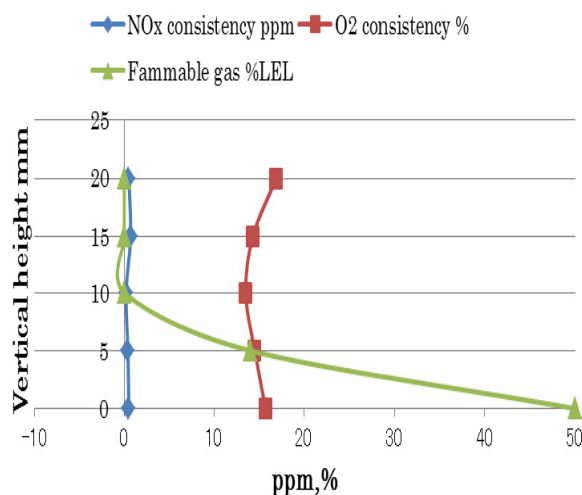
化学成分の測定では、ノズルスリット幅 0.5mm、燃料に水素を使用し、窒素を用いて希釈し低カロリー燃料を想定した。図 14 は燃料の噴出速度を 2.40m/s と一定で噴出させたときの火炎内部の化学成分を示したものである。なお、周囲流は流していない。図 14(a)は燃料の割合を水素:窒素=10:0 とし、半径方向は 0mm の点で高さ方向に 0mm~20mm までを測定したものである。図 14(b)は噴出速度やプロット点を変化させずに燃料の割合を水素:窒素=5:5 とした場合であり、また図 14(c)は燃料の割合を水素:窒素=3:7 とした時の化学成分の測定結果である。半径方向を 0mm と一定にし、ノズル側面に沿って各点をプロットした。図 15 は測定した点を示している。



(a) 水素:窒素=10:0



(b) 水素:窒素=5:5



(c) 水素:窒素=3:7

図 14 火炎内部の化学種成分

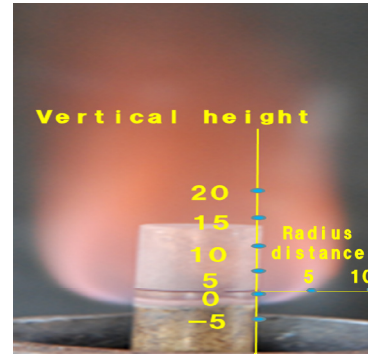


図 15 化学種成分の測定点

図 14(a)(b)(c)より火炎面内にもかかわらず酸素が存在していることがわかる.このことから予混合燃焼状態となっているのではないかと考えられる. また希釈割合が増え低カロリー燃料になるほど大幅にNOx が低減することがわかる. ノズルの上部のほうでNOx の値が大きくなっている.

4 結言

- (1) 燃料の噴出速度を上げると火炎は半径方向に広がる
- (2) 火炎の形状はスリット幅・ノズル上部・ノズル内部の影響はほとんどなく流速に依存している
- (3) 火炎は水平方向より鉛直方向に燃料を噴出するほうが安定する.
- (4) 拡散火炎は燃料を希釈することで短炎になることから,燃え切りが早くなっていることがわかる. また,希釈割合の増加に伴い火炎は不安定になりやすい.
- (5) 水平噴流燃焼では拡散燃焼でも火炎の中に酸素が存在し,一部予混合燃焼となっている.
- (6) 燃料を希釈するとNOx の生成量は, 低減する.
- (7) 周囲流により時間的, 周期的形状変化の一連のサイクルはなくなる.

参考文献

- (1) 吉本・影山・中嶋・谷川・芦田, 高温学会誌, 36-1, pp.13-17,2010.
- (2) Ryuji Takashima, The 6th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, pp3-5,2011.
- (3) 高島・出口・谷川・吉本・高城, 日本機械学会, 第16回動力・エネルギー技術シンポジウム, pp129-2, 6/2011.

水平噴流放射状予混合火炎の火炎挙動と安定に関する基礎的研究

原裕貴* 吉本隆光**

Flame Behavior and Stability on Radial Horizontal Jet Premixed Flame

Hiroki HARA* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

Recently, effective utilization of the biomass gas is required as a part of the efficient utilization of energy. However, it is difficult to stabilize the flame of the biomass gas, when the heat release is low calorie. Therefore, the erection of the technique that maintains a steady state flame is needed, when the biomass gas is burned. The purpose of this research is the investigation of the flame behavior and the stability limit when the vertical and horizontal jet flame are formed. Moreover, the flame configuration depends on the nozzle shape. The temperature and chemical composition in the flame are measured and the flame behavior is observed by the schlieren photography. The results are showed as follows: (1)The flame is stabilized more when the slit width is narrow and the length from top portion to slit is shorter. (2)The flame length is shorter when equivalence ratio decreases. (3) There are two flame sheets which are formed on upper part and lower part from the nozzle, when the horizontal jet fame is formed.

Keywords: horizontal premixed flame, equivalence ratio, NO_x

1. はじめに

現在、石油などの化石燃料に替わるエネルギーとしてバイオマスガスなど低カロリー燃料の利用が注目され、その安定な燃焼形態の保持は重要な課題である。

気体燃料の燃焼方法の一つであるバーナ燃焼は拡散燃焼、予混合燃焼、部分予混合燃焼に分けられる。その中でも予混合燃焼には燃焼負荷率を大きくとれる、サーマル NO_x の発生を抑制できるといった利点があると言われている⁽¹⁾。これまで垂直方向の噴流予混合火炎が検討され、火炎の浮き上がり・吹き飛び・安定・挙動などが研究されてきた。本報では水平方向に燃料と空気の混合気体を放射状に噴出し、水平噴流予混合火炎を形成した場合について、燃焼ノズル形状、当量比が火炎の安定に与える影響、また火炎内成分を測定する。合わせて鉛直予混合火炎との比較を行うことにより水平燃焼、予混合燃焼の有用性について調査する。

2. 実験装置

2.1 フロー図 Fig.1 に実験装置の構成を示す。ボンベより圧力調整器で減圧した燃料（メタン）、空気それぞれをフロート式流量計で流量調整する。これらをノズル手前で混合、ノズル先端のスリットより噴出させ

水平噴流予混合火炎を形成する。

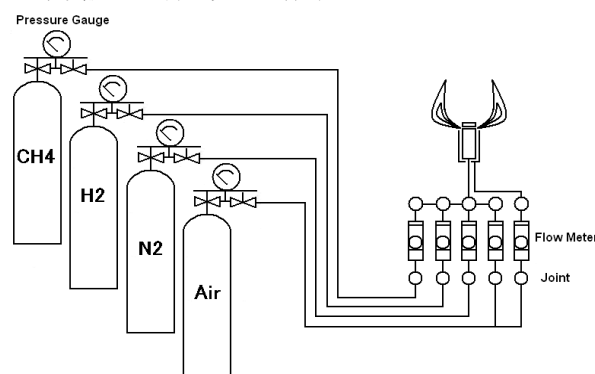


Fig.1 Flow diagram

火炎を形成するための燃料噴出ノズルは、スリット幅 1.0, 0.5mm, 0.35mm の 3 種類を用意した。またスリットからノズル最上部までの長さが火炎の安定に与える影響を調べるため、スリット上部の長さが 5 mm のものと 15 mm のものを用意した。Fig.2 に各ノズルの詳細を示す。

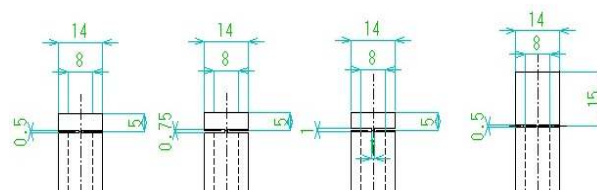


Fig.2 Type of nozzle

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

2.2 火炎内温度分布測定器 火炎内の温度測定には0.1mmのR型熱電対(Pt-PtRh13%)を用いる。熱電対を2本の円筒状絶縁材に通し熱接点を直線にのばした簡易温度測定器である。なお、測定値に輻射等の補正は行わず温度分布の状態に重点をおいて行う。

2.3 サンプリングプローブ 中心に直径1mmのステンレス管を用い、その周囲を銅パイプで覆い間に水を流すことによってプローブを冷却する。ガスはダイヤフラムポンプによって吸引されサンプリングバッグに溜められる。

2.4 シュリーレン撮影装置 シュリーレン撮影法の原理は、透明体中で温度、圧力などにより密度が変化して、屈折率の場として与えられているとき、ここを通る光が曲げられ、それにより光の明暗として観察される。Fig.3に概要を示す。

本研究では、火炎が形成され始める火炎基部が安定性に重要であると考え、その部分の挙動及び形状を詳細に観察、測定している。その中で、水素やメタン予混合火炎の挙動において、裸眼では観察できない状態を調べている。Fig.3にシュリーレン撮影法の原理図を示す。点光源から凹面鏡M1に光が入射すると、反射光は平行光線となる。その光が測定対象を透過した後、凹面鏡M2に入射して、その反射光は収斂する。収斂した光の焦点をナイフエッジで切断し、その光を後方の高速度ビデオカメラで撮影する。

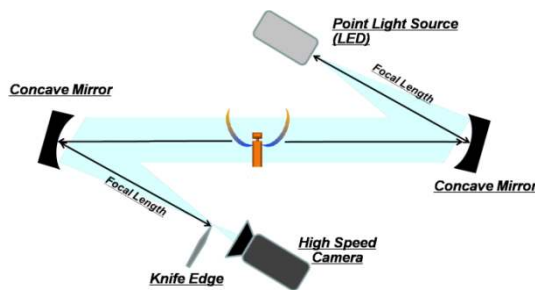


Fig.3 schlieren photography

2.5 計測装置 以下に計測装置の一覧を記す。

- (1) 流量計：KOFLOC 製、面積式（フロート式）流量計
- (2) 圧力計：NISSIN 製、測定範囲 0～0.6MPa
- (3) 酸素測定装置：理研計器製、OX-631A
- (4) 可燃性ガス測定装置：理研計器製、GP-631A
- (5) NO_x 測定装置：島津製作所製、NOA-7000

3. 算出方法

3.1 当量比 当量比とは理論空燃比（＝完全燃焼する燃料と空気の比(F/A)_i）に対する実際の燃空比（＝実際に混合されている燃料と空気の比:(F/A)）の割合で、一般にφで表される。また当量比の逆数は空気比と呼ばれ、一般にλで表す。式(1)に当量比φの一般式、式

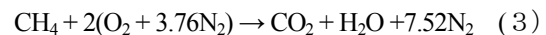
(2)に空気比λの一般式を示す。

$$\phi = \frac{(F/A)}{(F/A)_i} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1}{\phi} \quad (2)$$

上式から分かるように拡散火炎では空気を混合していないので当量比φ＝∞となる。

次に当量比φ＝1、つまり完全燃焼時のメタンと空気の化学反応式を式(3)示す。



式(3)からメタンが燃焼する際の当量比φを求める式を示す。流量をそのまま mol 数と置き換えると

$$\phi \text{ CH}_4 + 2(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2) \quad (4)$$

となるため、

メタン流量：空気流量＝φ：2(O₂＋3.76N₂)＝φ：9.52
となり、

$$\phi = \frac{\text{メタン流量} \times 9.52}{\text{空気流量}} \quad (5)$$

となる。

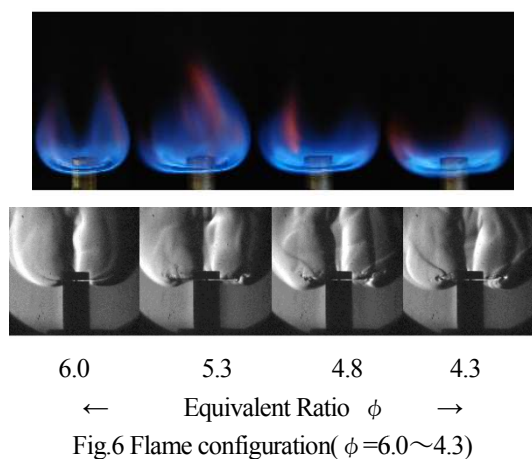
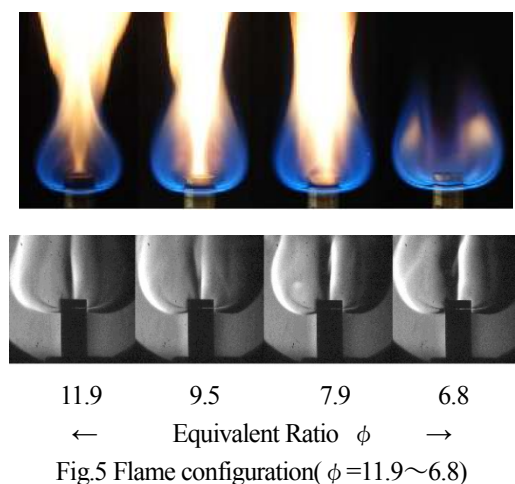
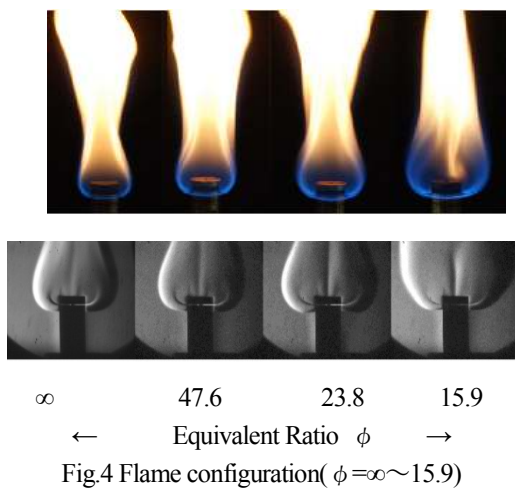
4. 実験結果

4.1 火炎形状 Fig.4～7にスリット幅0.5mmのノズルを使用し、燃料流量を固定し空気流量を増加させたときの火炎形状の変遷を示す。上が直接写真で、下がシュリーレン写真である。Fig.7はノズル周囲にニクロム線を巻き加熱することにより保炎している。使用燃料はメタンで、メタン流量2(l/min)固定、空気流量は0(l/min)から4.4(l/min)まで増加させた。尚、写真下部にそれぞれの場合の当量比を示している。

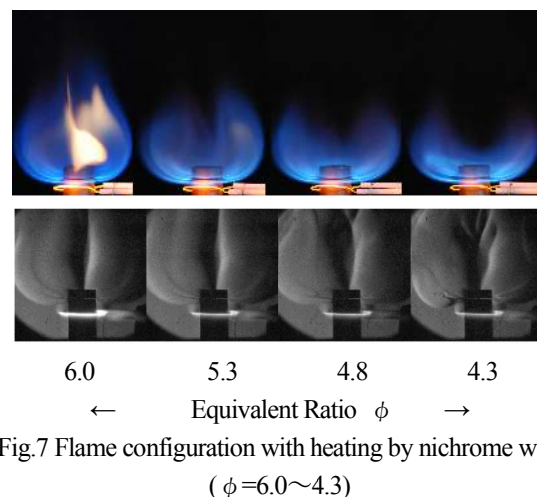
Fig.4～6より当量比が小さくなるほど火炎形状は高さ方向に短くなり、半径方向に広がる傾向が見られた。火炎高さに関しては、当量比が大きい場合は火炎下流部にオレンジ色の光が見られ、これが火炎長を大きくしていた⁽²⁾。当量比が小さくなるにつれて下流部のオレンジ色の火炎が見られなくなり、火炎長が短くなった。このオレンジ色の火炎は不完全燃焼により生じた煤が燃焼しているものと考えられるので、当量比が小さい程燃料の燃えきりが早くなることが分かる。また、当量比が小さくなっていくとスリットから噴出される混合気の下に火炎面が形成される様子が観察された。これより、火炎内部にも酸素が供給され燃焼が起きているものと考えられる。

直接写真より、当量比が小さくなると火炎基部がノズルから断続的に離れる現象が観られる。更に当量比

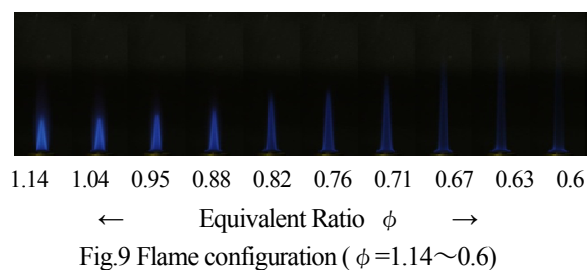
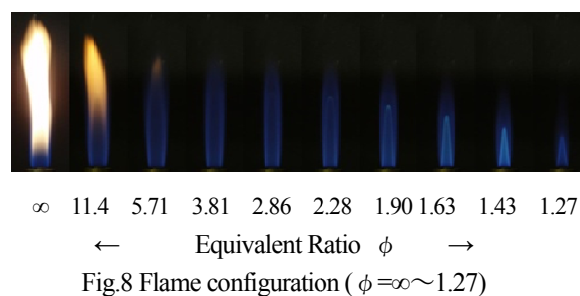
が下がると火炎基部が完全にノズルから浮き上がり、ノズルから離れた位置で火炎が形成される。これをシュリーレン写真と比較すると、この火炎においては火炎が浮き上がる時に燃料噴流下流に激しい乱れが生じておりこの部分で燃焼していることが分かる。また、火炎の浮き上がりとは燃料噴流の乱れは同時に生じる。加えて、火炎浮き上がり時に轟音が聞こえるが、この音は燃料流量が大きくなる程高音となる。



次いで、保炎のためにノズル周囲にニクロム線を巻いて実験を行った。ニクロム線に電圧をかけスリット付近の温度を上昇させると火炎の浮き上がりが低減できた。シュリーレン写真をみると、保炎がない場合と比較して燃料噴流の乱れが抑制されていた。また、火炎長はニクロム線を使用しない時と比較すると火炎高さが高くなる傾向がみられた。



水平火炎との比較として、Fig.8,9に鉛直火炎において空気流量を一定にし、空気流量を一定にした場合の火炎の変遷を示す⁽³⁾。鉛直火炎では空気量を増加させていくと火炎長さは短くなっていくが、さらに空気量を増加させると、当量比 1.0 付近を境に再び火炎長さは伸びていく。また、空気量を増加させるほど火炎は細くなる傾向がみられる。水平火炎と鉛直火炎を比較すると、鉛直火炎は当量比が 1 以下でも保炎により火炎が形成できるが、水平火炎では保炎を行っても当量比が 1 以下になる前に火炎が浮き上がり吹き飛びに至る。



4.2 スリット幅と燃料噴流の流れ Fig.10 にスリット幅 0.5mm, 1.0mm において、同一の当量比と燃料・空気混合気の流速で浮き上がり火炎を形成したとき、Fig.11 にスリット幅 0.5mm の時に同一の当量比で燃料噴出流速を 4.1m/s と 8.2m/s とした時のシュリーレン写真を示す。

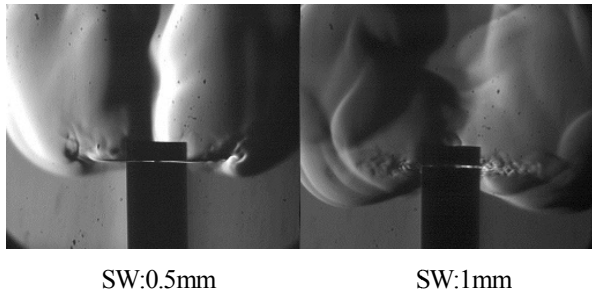


Fig.10 Schlieren photograph ($v=4.1\text{m/s}$, $\phi=5.6$)

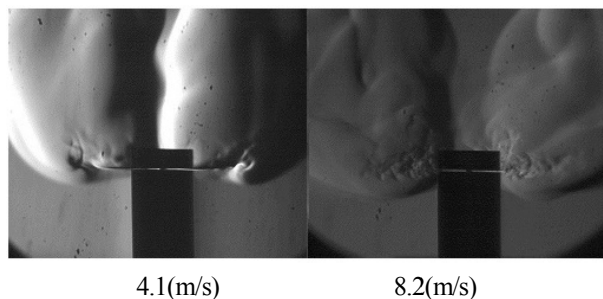


Fig.11 Schlieren photograph (SW:0.5mm, $\phi=5.6$)

Fig.10 より流速が一定の場合、SW:0.5mm では、スリットから噴出されたガスはノズル近傍では層流で進み、ノズルから離れた位置で燃焼による乱れが発生していることがわかる。それに対して SW:1mm では噴出されたガスはスリットを出てすぐに上下に拡散する様子が見られ、ノズル近傍において既に乱流である。これらを直接写真と比較すると、SW:0.5mm では流れが乱れているところで燃焼が起きているのに対し、SW:1mm では燃焼していないところでも流れが乱れていることが分かる。

次に Fig.11 より、流速が大きくなるとガスの流れはスリットを出てすぐに乱れる。この時流れの乱れは、噴出されたガスの上部で主に観察され、下部ではあまり見られなかった。また、SW:1mm の場合ではガスの噴出向きが上下に変化していたが、SW:0.5mm では噴出向きの変化は比較的少なかった。

4.3 当量比と火炎の安定限界 Fig.12 のグラフにスリット幅が火炎の安定限界に与える影響を示す。スリット幅は 1mm, 0.75mm, 0.5mm のものを用意した。ついで Fig.13 のグラフにスリットからノズル上端までの長さが火炎の安定に与える影響を示す。

Fig.12 よりスリット幅が小さくなるほど高い流速で

も浮き上がりにくくなる。また、流速が 4m/s 以上では同一流速ならばスリット幅が小さい方が浮き上がり時の当量比が小さい。よってスリット幅が小さい程火炎を安定に燃焼させる領域が広いと言える。

Fig.13 より燃料流速が約 5.1 m/s 以下であれば、スリットからノズル最上部までの距離による浮き上がり時の当量比の差はほとんど見られない。流速が 5.7~6.2 にかけてはスリットからノズル最上部までの距離が 15mm のほうが浮き上がり時の当量比が小さく安定である傾向を示す。そして、双方とも混合気流速 6.8m/s が浮き上がりのない火炎を形成できる最大の流速であったが、この時、スリットからノズル最上部までの距離が 5mm のほうが浮き上がり時の当量比が小さかった。

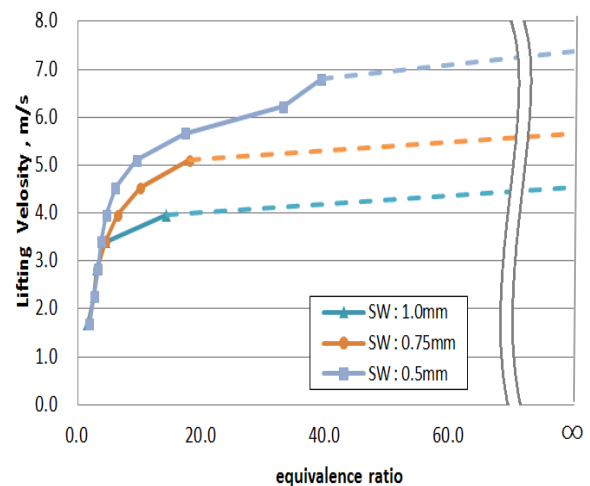


Fig.12 Lifting velocity for the slit width

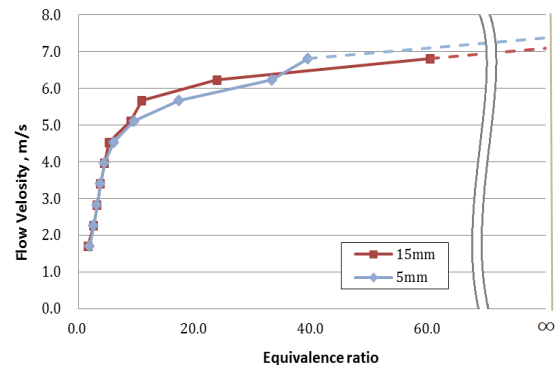


Fig.13 Lifting velocity for length from top portion to slit

4.4 火炎内温度分布 測定は鉛直方向高さを $H[\text{mm}]$ 、噴出口からの半径方向距離を $R[\text{mm}]$ とする。 H は噴出口の下部を $0[\text{mm}]$ とし、 R はノズル管外周面を $0[\text{mm}]$ とし、ノズル中央部を $-7[\text{mm}]$ とする。

Fig.14 にメタン流量 3l/min の水平拡散火炎 ($\phi=\infty$) の温度分布、Fig.15 にメタン流量 3l/min、空気流量 1l/min の水平予混合火炎 ($\phi=28.6$)、Fig.16 にメタン流量 3l/min、空気流量 2l/min の水平予混合火炎 ($\phi=14.3$) の温度分布

を示す。測定はスリットからの高さ 0mm, 5mm, 10 mmで半径方向に行った。次いで、Fig.18 にメタン流量 2(l/min)の時の拡散火炎と予混合火炎($\phi=19.0$)のノズル上部での温度分布を示す。測定はスリットからの高さ 8mm で半径方向に行った。

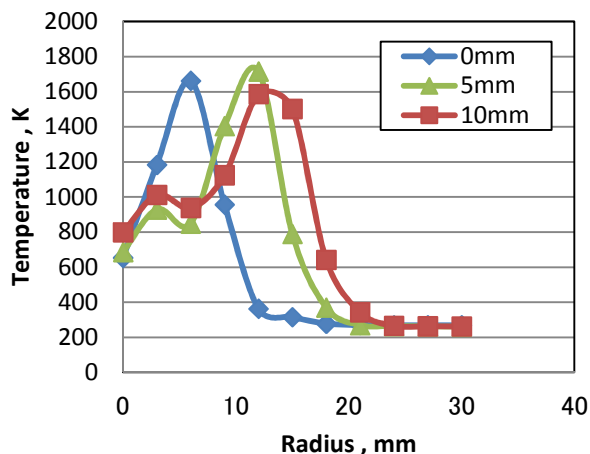


Fig.14 temperature distribution of diffusion flame($\phi=\infty$)

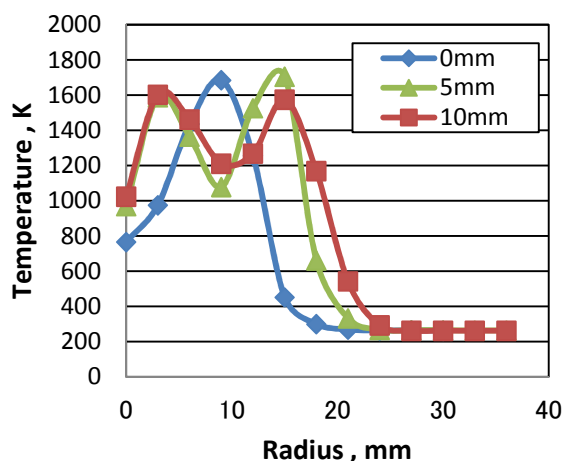


Fig.15 temperature distribution of premixed flame($\phi=28.6$)

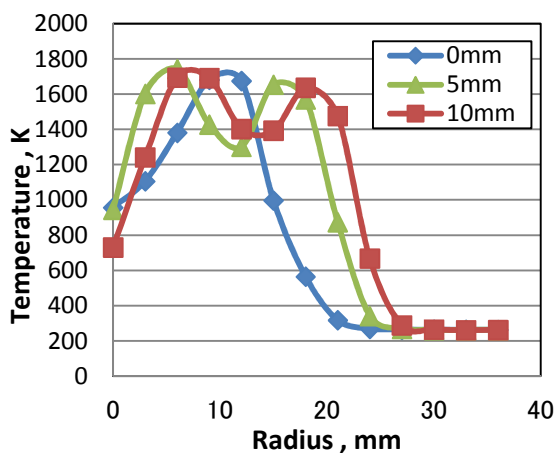


Fig.16 temperature distribution of premixed flame ($\phi=14.3$)

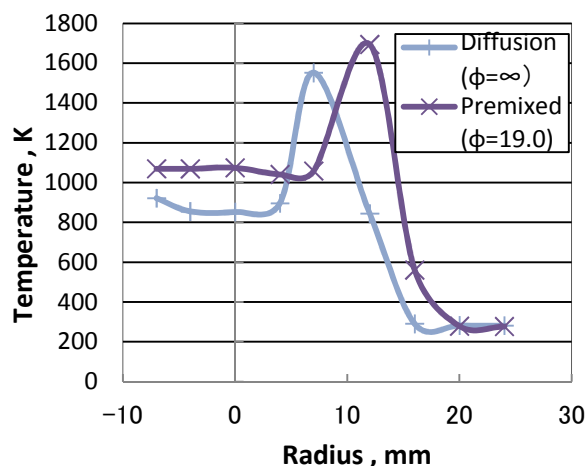


Fig.17 temperature distribution of diffusion and premixed flame

Fig.14～16 より全ての火炎においてスリットからの高さが上がるほど温度ピークは半径方向に広がる。また、スリットからの高さが 0mmの場合以外では温度ピークが二つ出る。これはスリットから噴出される燃料の上下に火炎面が出来ているためと考えられる。拡散火炎では直接写真ではスリット上部の火炎は確認できないが、温度分布より拡散火炎においても噴出燃料の上下に火炎面が出来ている可能性がある。

各火炎の高さごとの最高温度を平均すると拡散火炎で 1654K, $\phi=28.6$ の予混合火炎で 1664K, $\phi=14.3$ の予混合火炎では 1706K と当量比が小さくなるほど火炎の最高温度は高くなった。また、最高温度はいずれもスリットからの高さが 5mm の時に測定された。

拡散火炎では二つの温度ピークを比較すると外側のピークの方で温度が高い。これは内側では酸素量が十分でないため、燃料が燃焼しきれていないためと考えられる。これに対して $\phi=14.3$ の予混合火炎では内側のピークの方で温度が高い。

Fig.17 よりノズル上部では拡散火炎に比べて予混合火炎の方で 200K 程温度が高い。これは加熱された空気が周囲から巻き込まれている可能性が考えられる⁽⁴⁾。

4.5 火炎内化学種成分 Fig.18 にメタン流量 3l/min の水平拡散火炎($\phi=\infty$)の NO_x 濃度と酸素濃度, Fig.19 にメタン流量 3l/min, 空気流量 1l/min の水平予混合火炎($\phi=28.6$), Fig.20 にメタン流量 3l/min, 空気流量 2l/min の水平予混合火炎($\phi=14.3$)の NO_x 濃度と酸素濃度を示す。 NO_x 濃度の単位を ppm, 酸素濃度の単位を%とする。

Fig.18～20 どの火炎においても NO_x の最高値は火炎中心から離れたところでみられる。実際にはこれらのポイントは火炎面から離れた位置にあり、 NO_x が生成されるとは考えにくい。火炎から離れた場所に存在す

る NO_x は火炎上流で生成されたものが、下流に行くにつれ半径方向に拡散したものである。また、 $\phi=\infty$ 、 $\phi=14.3$ ではどの高さにおいてもノズル近傍で O_2 が測定されたが、 $\phi=28.6$ ではスリットからの高さ 5mm と 10mm では測定されなかった。

NO_x のピークは外側の火炎面のさらに外側に出る。内側の火炎面付近でもピークがでる場合があるが外側と比較するとその値はわずかである。今回の測定範囲では NO_x 濃度の最高値は当量比が一番小さい $\phi=14.3$ が最も小さかった。

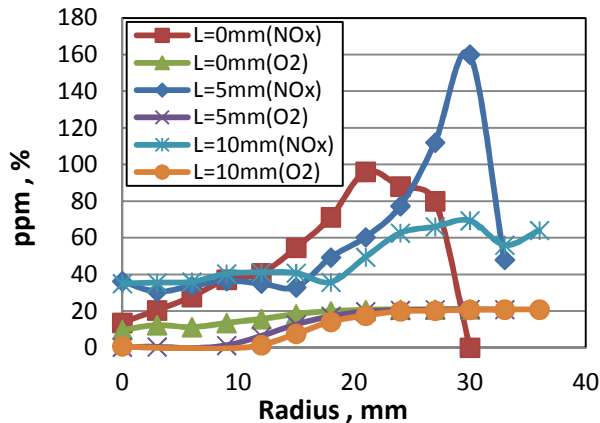


Fig.18 Chemical composition with diffusion flame

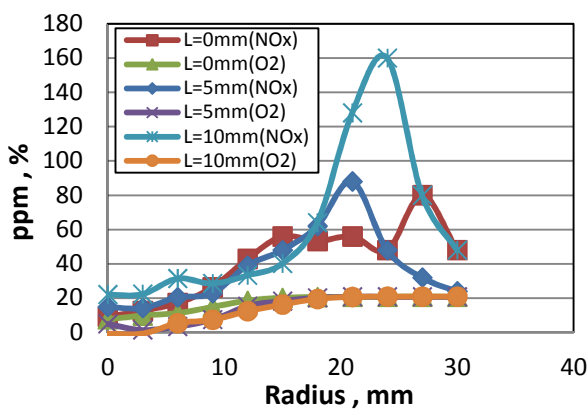


Fig.19 Chemical composition with premixed flame($\phi=28.6$)

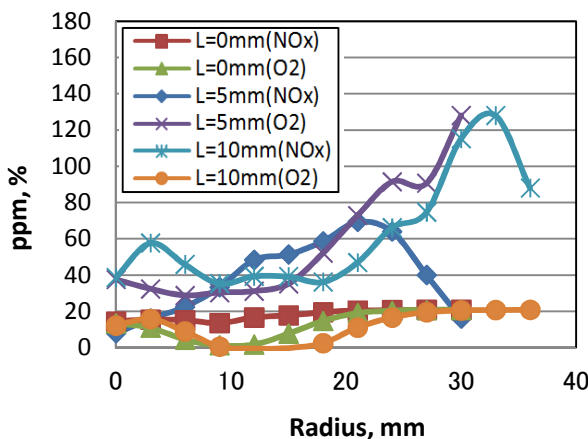


Fig.20 Chemical composition with premixed flame($\phi=14.3$)

5. まとめ

これらの実験を通して以下の結論を得た。

- (1) 当量比が低くなるにつれ火炎長は短くなり、燃え切りが早くなる。これは燃料割合が減少したのに対して供給酸素量が多くなり燃焼を早く終えたためであると考えられる。
- (2) 水平噴流予混合火炎においてはスリットの幅が小さいほど、また、スリットからノズル上面までの距離が短いほど火炎は安定する傾向が見られた。しかし、燃料流量が比較的低い場合ではこれらの要因は火炎の安定にさほど影響を与えない。
- (3) 火炎の浮き上がりとは燃料噴流の乱れは同時に生じる。また、流速が比較的低い場合、火炎が浮き上がる位置と燃料噴流が乱れる位置は近い。
- (4) 水平噴流火炎においてはスリットから噴出する燃料の上下に火炎面が形成される。燃料流量が小さいときは二つの火炎面のうちノズルに近いほうの火炎面での温度はあまり高くないが、燃料流量が大きくなるとノズルからの距離が遠い火炎面と同程度まで火炎温度は上昇する。
- (5) NO_x のピークは完全に火炎の外側でみられる。これは火炎で生成された NO_x が下流にいくにつれ半径方向に拡散したためと考えられる。

参考文献

- (1) 水谷幸夫：「燃焼工学」，森北出版株式会社，2008
- (2) 溝渕泰寛，竹野忠夫，その他：「水素空気過濃予混合火炎の曲率が火炎構造に与える影響」，日本燃焼学会誌，第 54 巻，pp.41-48，2012
- (3) 正司悠介：「メタン・水素予混合燃焼における火炎構造と安定限界に関する研究」，第 84 回定時総会講演会講演論文集，No.094-1，pp.12-6，2009
- (4) Hara, H. :“Flame Behavior and Stability Limit on Radial horizontal Jet Premixed Flame of Low Calorie Biomass Gas” , Proceedings of ISME-Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (SPEC 2011), Summary or Paper-ISME520, 2011

船用ディーゼルエンジンでの吸気条件による燃焼・排ガス特性

天野航介* 吉本隆光**

Characteristics of Combustion and Exhaust Gas on Intake Condition in a Marine Diesel Engine on Intake Air Conditions

Kosuke AMANO* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

The diesel engine has the high thermal efficiency and can be powered by the various species of fuels. However, the contents of exhaust gas from diesel engine such as NO_x , SO_x , CO_2 and other substances cause to the air pollution. Also, sulfur-rich fuels such as C-heavy fuel are used mainly on a marine diesel engine. The objective of this study is to investigate experimentally the influence on combustion in a diesel engine by mixing N_2 , CO_2 , CH_4 , N_2+CH_4 , CO_2+CH_4 to utilize renewable bio-mass fuels and by changing temperature of combustion air which come close to EGR system. And the corona discharge to intake air inperformed with positive corona or negative corona is produced and the intake air is activated as a part of intake air is ionized. (1)When mixing CH_4 with N_2 or CO_2 with intake air, concentrations of NO_x and SO_2 are decreased. And CO_2 concentration is higher because combustion is improved by mixing CH_4 . (2)When engine load is higher and negative discharge to intake air is performed, it is the most effective method such as NO_x concentration and SO_2 concentration are reduced.

KeyWords: NO_x , SO_x , EGR, Corona discharge

1.はじめに

環境問題への取り組みが高まる中、各種内燃機関の排出ガスによる大気汚染は地球規模の課題であり、陸上だけでなく海洋においても大きな問題となっている。さらに、石油自体の枯渇問題が深刻となっており、再生可能エネルギーとして新しい燃料の有効利用が重要視されている。

ところで、ディーゼルエンジンは熱効率がよく、低回転から安定したトルクが得ることから船舶や大型自動車等様々な分野で使用されている。しかし、ディーゼルエンジンの排ガス中には窒素酸化物、硫黄酸化物、二酸化炭素など環境に有害な成分が含まれており、大気汚染の主な原因になっている。特に、海洋では陸上に比べ、比較的低質な硫黄含有量が高い燃料が多く使用されているため、窒素酸化物だけではなく、硫黄酸化物の排出も問題視されており、排ガス対策が求められてきている。

そこで本研究では船用ディーゼルエンジンを用いて、海洋で多く使用されている低質燃料を使用し、吸気条件を変えた場合にて、エンジンの性能や排ガス成分にどのような変化が見られるかを検討した⁽¹⁾。

強制的に空気を供給する強制送気状態をもとに、再生可能エネルギーである低カロリーバイオ燃料を想定したメタンの有効利用として、メタンを吸気ラインに混合した。また、EGR（排気再循環）による低 NO_x 燃焼を想定した窒素や二酸化炭素を混ぜた状態において、吸気量の変化によるエンジン性能（燃料消費量、燃焼室内の圧力）ならびに排ガス濃度（ NO_x 濃度、 SO_2 濃度、 CO_2 濃度、 O_2 濃度）の測定を行い、燃焼特性や排ガス特性への影響について調べた⁽²⁾⁽³⁾。

また NO_x 、PMの新たな抑制法の一つとして非熱平衡プラズマを用いた研究⁽⁴⁾が行われている。そこで本研究では吸気空気にコロナ放電を行い、正針コロナならびに負針コロナを発生させ、吸気空気の一部イオン化を行い吸気空気の活性化による排ガス特性への影響について調べる。

2.実験装置と方法

2.1 使用機関 予燃焼室式ディーゼル機関（ヤンマーディーゼル製 1600cc 4 ストローク 2 気筒エンジン 13. 2[kW]/1800[rpm]）を使用する。表 1 にエンジンの主要諸元を示す。

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

* 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

Table 1 Specification of diesel engine

Form	Yanmer2TL
Bore×stroke[mm]	95×115
Cylinder	2
Compression ratio	18.6
Max power[kW/rpm]	13.2/1800
The length of connecting rod[mm]	230
The length of crank arm[mm]	57.5
Fuel jet timing	10～12°before TDC
Fuel jet pressure[MPa]	16
Valve lift in no compression[mm]	1.1

燃焼用空気を送気するために高風圧熱風発生機（HAP3050，吐出気体温度範囲常温+15～300[°C]，風量調整範囲 1.7～3.5[m³/min]，総容量 6.9[kW]：八光電機製作所製）が電動送風機（U75-3-R313，最大風量 6.0[m³/min]，最大静圧 4.30[kPa]，回転数 3450[rpm]：昭和電機製）を介してディーゼルエンジンの吸気ラインに接続されている。

排ガス中の成分（NO_x，SO₂，CO₂，O₂）を測定するために燃焼排ガス分析計（testo340：テストー製）を使用する。燃焼室の圧力を測定するためにエンジン指圧変換器（PE-200KP，定格容量 20[MPa]：共和電業製），ひずみゲージ式変換器（PCD-300B：共和電業製），データ収録ソフトウェア（PCD-100A：共和電業製）を使用する。

2.2 実験方法及び実験条件 強制送気状態をもとにして，混合ガスとして N₂，CO₂，CH₄，N₂+CH₄，CO₂+CH₄ を燃焼用空気に混入した。燃焼用空気の流量は 500[l/min]，吸気温度は常温と 70[°C]の条件で実験を行い，高風圧熱風発生機で温度を調整した。高風圧熱風発生機からの空気に流量計を介して流量調整を行った。各種ガスを混合した後，エンジンに吸気し燃焼を行った。排ガス中の各種成分の濃度は，エンジンの燃焼室出口にて燃焼排ガス分析計を用いて計測した。

燃料は海洋で主に使用されている C 重油を想定し，A 重油に硫黄分を添加したものを使用した。表 2 に A 重油の物性値を示す。

Table 2 Fuel properties

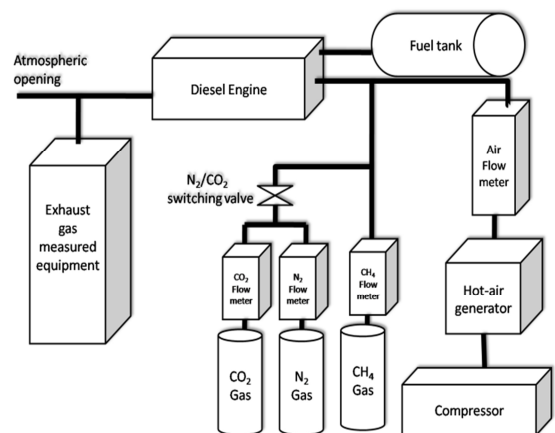
Fuel	A heavy oil
Sulfur content [%]	Less than 0.09
Carbon content [%]	Less than 86.0
Nitrogen content [%]	Less than 0.020
Specific gravity 15/4°C	0.85
Lower calorific value [kJ/kg] (kcal/kg)	42700 (10200)

また，コロナ放電は正電圧放電による正針コロナ，ならびに負電圧放電による負針コロナの 2 種類を発生させ，負荷率 25%，50%の条件で実験を行った。図 1 にそれぞれの装置の概要を示す。

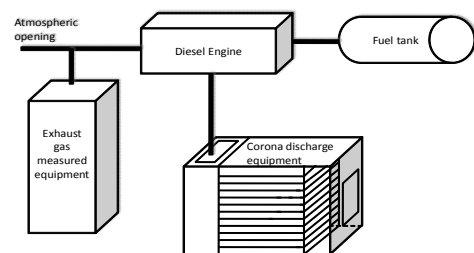
ディーゼルエンジンの実験条件を表 3 に示す。

Table 3 Intake Condition

Fuel	A heavy oil + S 1.5%
Revolution	1000[rpm]
Quantity of forced supply air	500[L/min]
Air temperature	20 and 70[°C]
Species of gas added into the combustion air	N ₂ ，CO ₂ N ₂ or CO ₂ + CH ₄
Flow rate of inert gas (N ₂ or CO ₂) mixed into air	From 5 to 50 [L/min]
Quantity of methane mixed into air	From 5 to 15 [L/min]
Measured components of exhaust gas	NO _x ，SO ₂ ，CO ₂ and O ₂



(a) Simulated EGR

(b) Corona discharged
Fig.1 Flow diagram

3. 実験結果

3.1 熱効率 図2に吸気温度が常温, 図3に吸気温度70℃におけるガス混合割合に対する熱効率を示す。

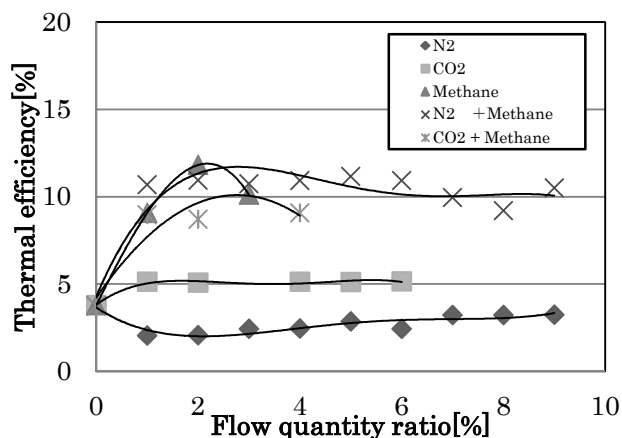


Fig.2 Thermal efficiency

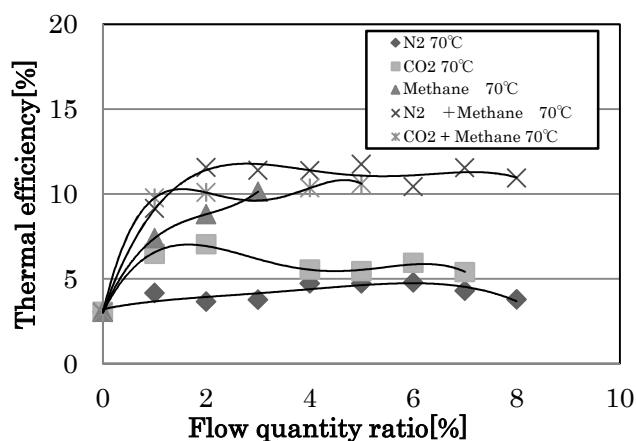


Fig.3 Thermal efficiency 70℃

吸気温度が常温及び70℃の両条件について、N₂およびCO₂にCH₄を混合すると正味熱効率が高くなった。CH₄を混合することにより、燃焼性が良くなり正味熱効率が高くなったためであると考えられる。

3.2 NO_x 濃度 図4に吸気温度が常温, 図5に吸気温度70℃におけるガス混合割合に対するNO_x濃度⁽⁵⁾⁽⁶⁾を示す。

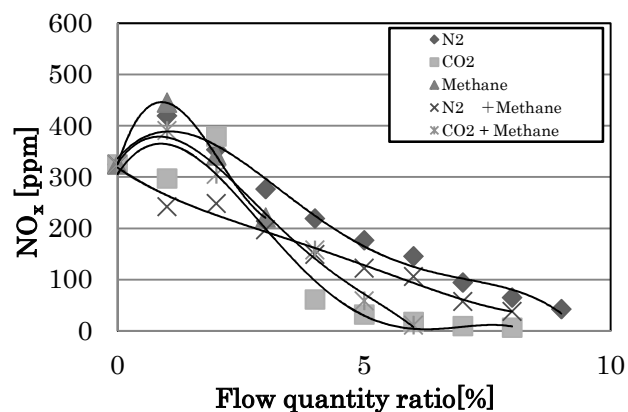


Fig.4 NO_x concentration

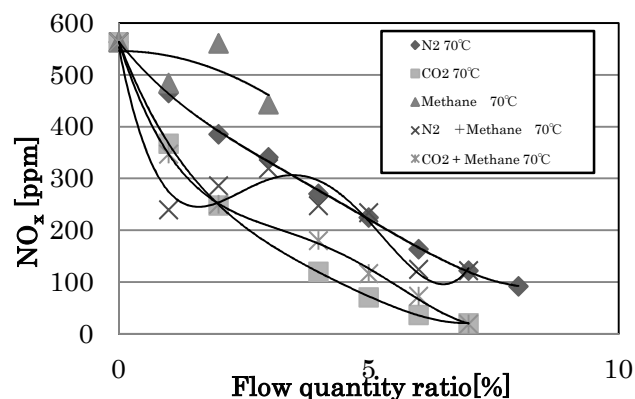


Fig.5 NO_x concentration 70℃

図4より不活性ガスであるN₂、CO₂を混合することでEGR効果によりNO_x濃度が低くなった。またN₂にCH₄に混合することで更にNO_x濃度が低減した。図5より不活性ガスであるN₂、CO₂を混合することでEGR効果によりNO_x濃度が低くなった。N₂またはCO₂にCH₄を混合することでNO_x濃度が低減した。また吸気温度を高くすることで燃焼温度が高くなりNO_x濃度は高くなった。

3.3 SO₂ 濃度 図6に吸気温度が常温, 図7に吸気温度70℃におけるガス混合割合に対するSO₂濃度⁽⁵⁾⁽⁶⁾を示す。

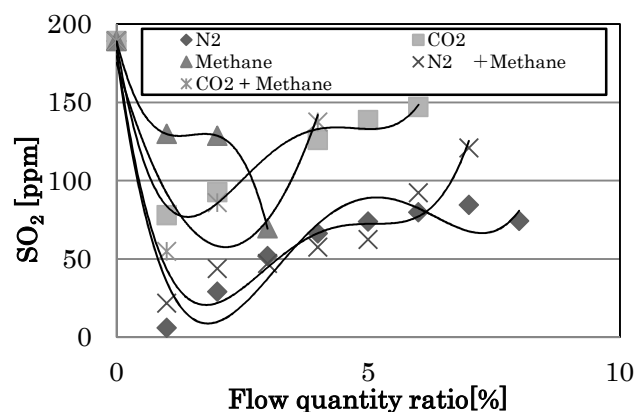


Fig.6 SO₂ concentration

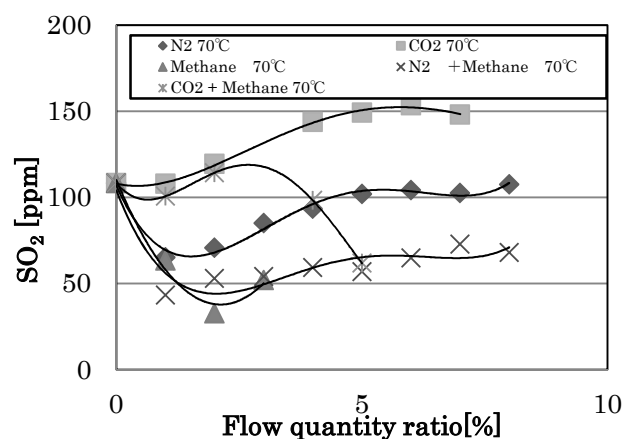


Fig.7 SO₂ concentration 70℃

図 6 より, N_2 混合, CO_2 混合の両条件で, SO_2 低減効果があった. N_2 及び CO_2 に CH_4 を混合すると, CH_4 混合による SO_2 濃度への大きな影響は得られなかった. 吸気温度 $70^\circ C$ について, 図 7 より N_2 混合, N_2+CH_4 混合の場合は強制送気状態に比べ SO_2 濃度は低くなった. CO_2 混合の場合は SO_2 濃度が高くなったが, CO_2 に CH_4 を混合することで SO_2 濃度低減効果が得られた.

3.4 CO_2 濃度 図 8 に吸気温度が常温, 図 9 に吸気温度 $70^\circ C$ におけるガス混合割合に対する CO_2 濃度を示す.

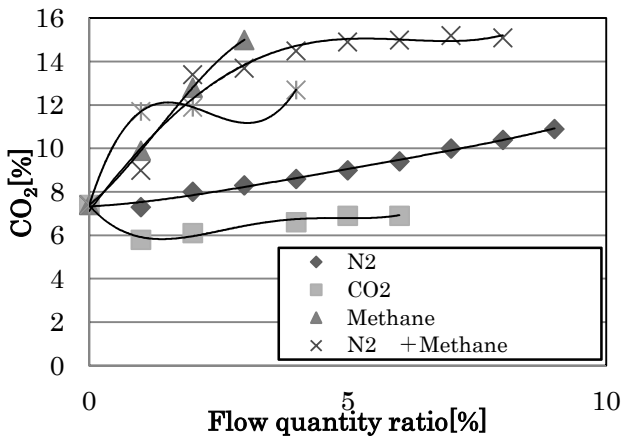


Fig.8 CO_2 concentration

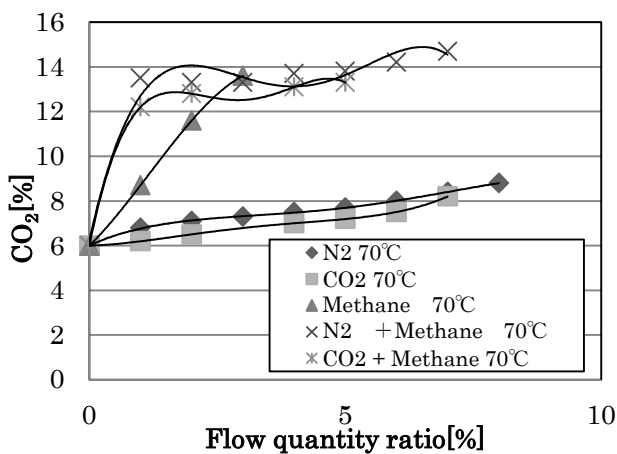


Fig.9 CO_2 concentration $70^\circ C$

図 8 より, N_2 , CO_2 に CH_4 を混合することで燃焼性が良くなり CO_2 濃度が高くなった. 図 9 より, 吸気温度が $70^\circ C$ の場合でも N_2 , CO_2 に CH_4 を混合することで燃焼性が良くなり CO_2 濃度が高くなった.

3.5 P- θ 線図 図 10 から図 13 に吸気温度が常温での N_2 混合, N_2+CH_4 混合, CO_2 混合, N_2+CH_4 混合の条件での P- θ 線図を示す.

図 10 より N_2 の混合量を増加させていくと着火遅れが長くなり, N_2 45[l/min] 混合の条件で燃焼が行われなくなった. 図 11 より N_2 に CH_4 を混合することで更に着火遅れが長くなった. 図 10 に示す N_2 混合と図 11 に示す N_2+CH_4 混合を比較することで, CH_4 の混合により着火性が悪くなり, 着火遅れが長くなった. さらに, 燃焼が止まるタイミングが早くなるという結果が得ら

れた.

図 12 より CO_2 混合の場合も同様に, CO_2 の混合量を増加させると着火遅れが長くなり, CO_2 35[l/min] 混合の条件で燃焼が行われなくなった. 図 13 も同様に CO_2 に CH_4 を混合することで更に着火遅れが長くなった.

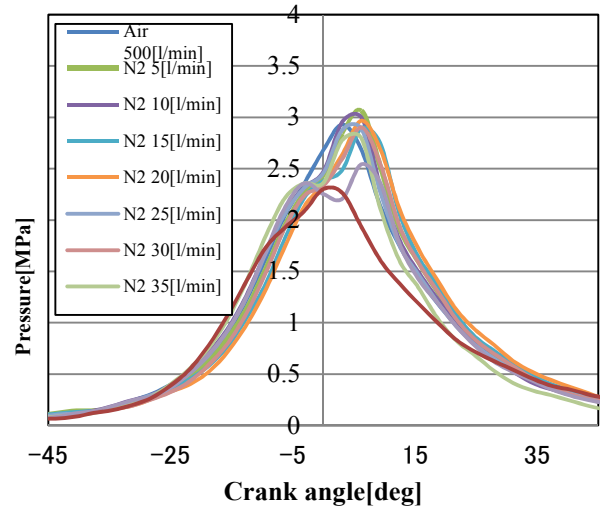


Fig.10 P- θ diagram N_2

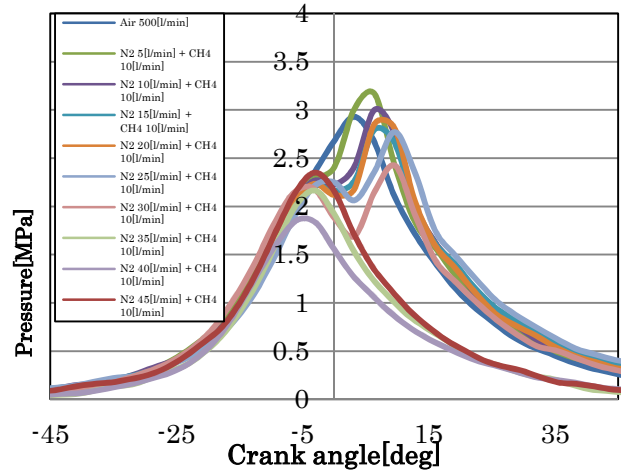


Fig.11 P- θ diagram N_2+CH_4

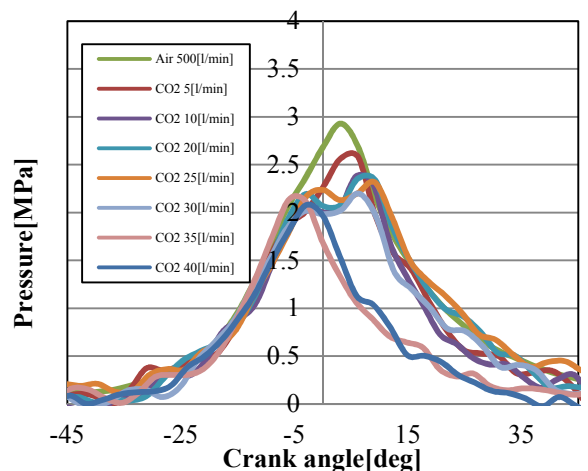
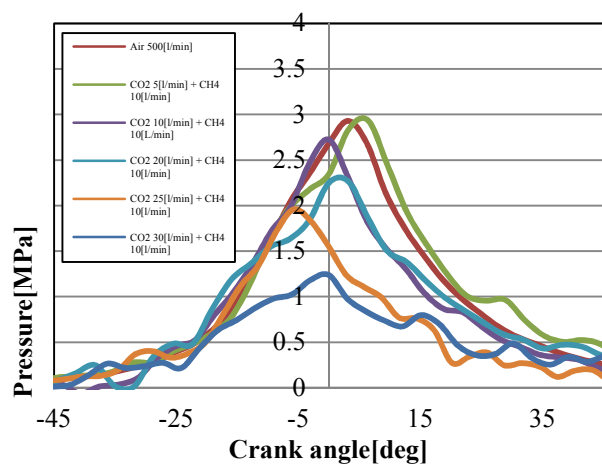
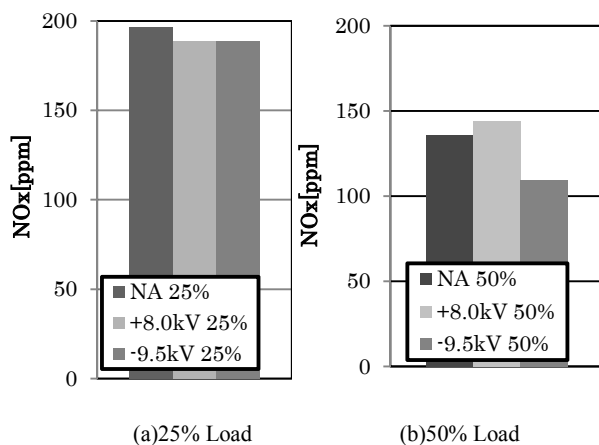
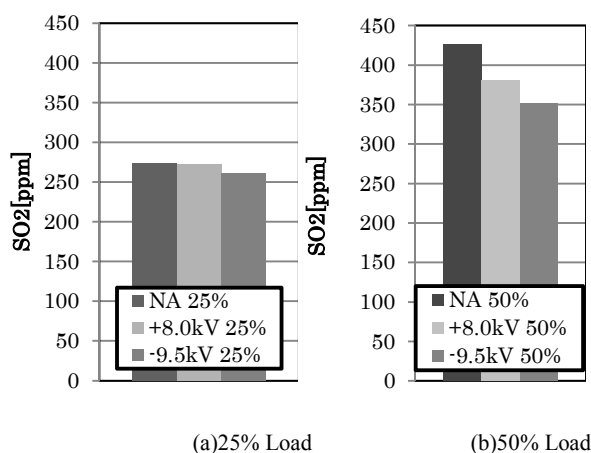


Fig.12 P- θ diagram CO_2

Fig.13 P-θ diagram CO₂+CH₄

3.6 吸気ガス活性化による排ガス特性 図 14 にエンジン負荷率 25%, 50% の条件での NA (自然吸気), 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気の NO_x 濃度の比較を示す. 図 15 にエンジン負荷率 25%, 50% の条件での NA, 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気の SO₂ 濃度の比較を示す. 図 16 にエンジン負荷率 25%, 50% の条件での NA, 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気の CO₂ 濃度の比較を示す.

Fig.14 NO_x concentration with corona discharge

(a)25% Load

(b)50% Load

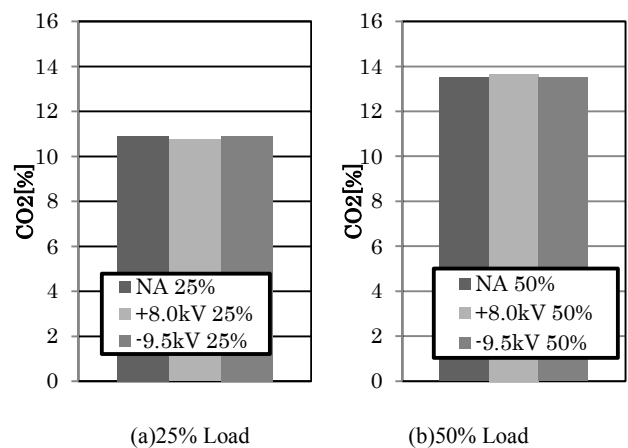
Fig.15 SO₂ concentration with corona dischargeFig.16 CO₂ concentration with corona discharge

図 14 よりエンジン負荷率 25% の場合では正針コロナ, 負針コロナとも約 4.0% の NO_x 濃度低減が見られる. 一方, エンジン負荷率 50% の場合は負針コロナ吸気の際のみ約 19.3% の NO_x 濃度低減が得られた.

図 15 よりエンジン負荷率 25% の場合では正針コロナでは約 0.6%, 負針コロナでは約 4.6% の SO₂ 濃度低減が見られる. 一方, エンジン負荷率 50% の場合は正針コロナでは約 10.7%, 負針コロナでは約 17.7% の SO₂ 濃度低減が得られた.

図 16 より負荷率 25%, 50% の両条件において, 変化は僅かであるが正針コロナでは CO₂ 濃度が低減し, 負針コロナでは CO₂ 濃度が高くなった. このことより, 負針コロナでは筒内での燃焼性が向上していると推測される⁽⁸⁾.

3.7 吸気ガス活性化による P-θ 線図・熱発生率 図 17 にエンジン負荷率 25% での NA, 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気における P-θ 線図, 熱発生率を示す. 図 18 にエンジン負荷率 50% での NA, 正針コロナ吸気, 負針コロナ吸気における P-θ 線図, 熱発生率を示す.

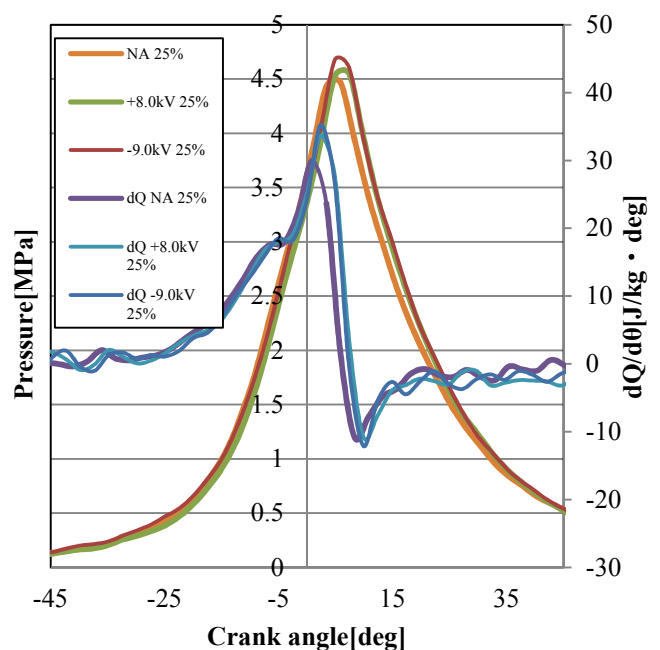


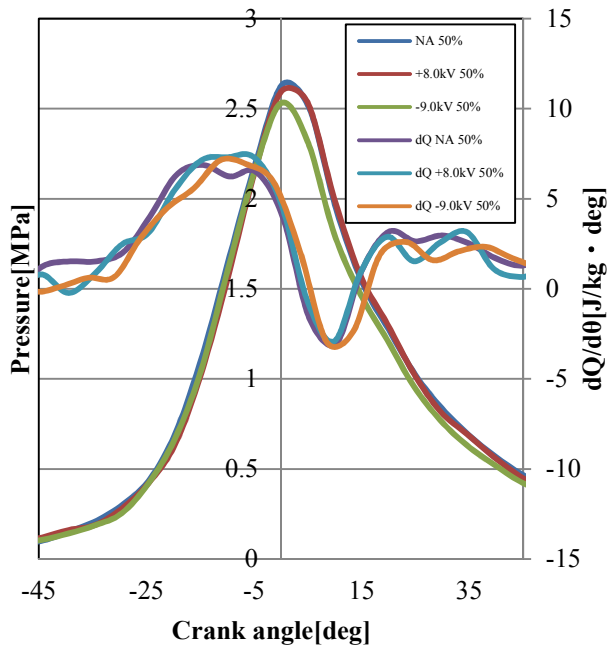
Fig.17 P- θ and dQ/d θ diagram 25%Fig.18 P- θ and dQ/d θ diagram 50%

図 17 よりエンジン負荷率 25%の場合、正針コロナ吸気、負針コロナ吸気の両条件で空気活性化により筒内最高圧力が高くなった。更に、熱発生率も高くなり、燃焼終わりが遅れ、燃焼時間が長くなった。その効果は負針コロナ吸気の方が大きい結果が得られた。

図 18 よりエンジン負荷率 50%の場合は正針コロナ吸気、負針コロナ吸気の両条件で筒内最高圧力が低くなり、燃焼終わりが早くなるという結果が得られた⁽⁹⁾。

4.まとめ

模擬 EGR, かつ低カロリーバイオマスガスの有効利用としてのメタン吸気, 正電圧放電による正針コロナ, 負電圧放電による負針コロナで活性化した空気の吸気を行った場合のまとめを以下に示す。

- (1) 模擬 EGR による N_2 , CO_2 混合によりは NO_x 低減が行え, SO_2 低減に効果があった。吸気温度を高くした場合は SO_2 濃度に大きな効果が得られなかった。
- (2) 模擬 EGR とメタンの吸気を組み合わせることで NO_x , SO_2 の同時低減ができた。その反面, 燃焼性が改善され, 熱効率が向上して CO_2 濃度が高くなった。
- (3) エンジン負荷率 25%の場合は正針コロナ, 負針コロナの両条件で僅かであるが NO_x , SO_2 低減できた。そのときの筒内最高圧力は正針コロナ, 負針コロナの両条件で高くなり, 熱発生率も高くなり, 燃焼時間が長くなった。負針コロナは正針コロナに比べその効果は大きいという知見が得られた。
- (4) エンジン負荷率 50%では負針コロナの条件で NO_x 濃度を約 19.3%低減, SO_2 濃度を約 17.7%低減した。そのときの正針コロナ, 負針コロナの両条件で筒内最高圧力が低くなり, 燃焼終わりが早くなるという結果が得られた。
- (5) エンジン負荷率が高い場合にコロナ放電による空

気活性化の効果は大きく, かつ負電圧放電による負針コロナの方がより効果が大きい結果になった。

参考文献

- (1) 天野航介, 中嶋聡, 吉本隆光, 藤田浩嗣:「船用ディーゼルにおける燃焼と $NO_x \cdot SO_2$ に関する実験的研究」, マリンエンジニアリング学術講演会, 第 81 回, pp.67-68, 2011.
- (2) 天野航介, 中嶋聡, 吉本隆光, 鮫島良二:「船用ディーゼルでの吸気条件による燃焼・排ガス特性に関する研究」, 第 16 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp.125-126, 2011.
- (3) Kosuke AMANO, Satoshi NAKAZIMA, Takamitsu YOSHIMOTO, Hirotsugu FUJITA:「Characteristics of Combustion and Exhaust Gas in Diesel Engine by Mixing Various Gasous Fuel」, Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (ISME), 9th, C3-2, 2011.
- (4) 小原考介, 藤井富朗:「コロナ放電リアクタによる燃焼排ガス中のダクト及び NO_x 処理」, 神戸高専研究紀要, 第 45 号, pp.37-42, 2007.
- (5) 天野航介, 鋳尾真典, 竹垣颯, 吉本隆光, 藤田浩嗣:「船用ディーゼルでの吸気条件による燃焼・排ガス特性」, 関西支部第 87 期定時総会講演会論文集, pp.2-21, 2012.
- (6) 天野航介, 吉本隆光, 藤田浩嗣:「筒内燃焼における $NO_x \cdot SO_x$ 等排ガス特性」, 日本機械学会 2012 年度年次大会, G090011, 2012.
- (7) 天野航介, 那脇慶彦, 坂本健太郎, 吉本隆光, 藤井富朗, 藤田浩嗣:「船用ディーゼル機関の吸気活性化における燃焼及び排ガス特性への影響」, 第 82 回 マリンエンジニアリング学術講演会, pp.111-112, 2012.
- (8) Kohsuke AMANO, Yoshihiko NAWAKI, Takamitsu YOSHIMOTO, Hirotsugu FUJITA:「Characteristics of Combustion and Exhaust Gas in Marine Diesel Engine by Mixing Various Species of Gas」, Proceedings of the 3rd International Forum on Heat Transfer (IFHT), 138, 2012.
- (9) 天野航介, 高寺健太郎, 那脇慶彦, 吉本隆光, 赤松浩, 藤井富朗, 高城敏美:「大気圧プラズマ支援燃焼による排ガス特性への影響」, 第 50 回燃焼シンポジウム, 2012.

加熱平板の強制対流過渡熱伝達に関する研究

柴原 誠* 劉秋生** 福田勝哉**

Transient Heat Transfer for Forced Convection over a Heated Plate

Makoto Shibahara* Qiusheng LIU ** Katsuya FUKUDA **

ABSTRACT

In this research, forced convection transient heat transfer for helium gas with exponential increase of heat inputs ($Q_0 \exp(t/\tau)$) to a horizontal plate has been both experimentally and theoretically investigated. The values of numerical solutions for surface temperature and heat flux were compared and discussed with the experimental result. It was obtained that the surface temperature difference and heat flux increase exponentially as the heat generation rate increases with the exponential function. Then the temperature within the boundary layer also increases with the increase of the surface temperature.

Keywords : Thermal hydraulics, Forced Convection, Transient Heat Transfer, CFD

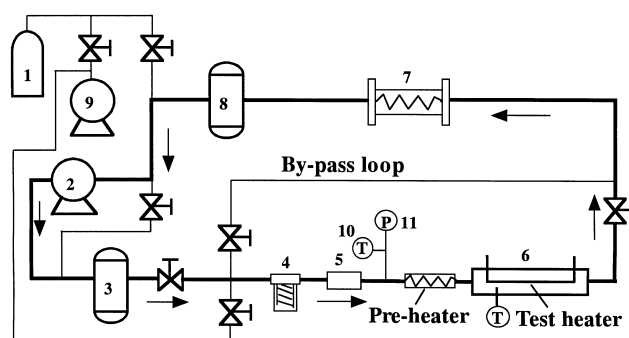
1. はじめに

ガスを作動流体とする伝熱機器の温度及び流れなどの過渡的な変動に伴う熱流動特性を調べるためには、過渡熱伝達過程の理解が重要である。例えば、高温ガス炉の燃料温度が変化する場合⁽¹⁾やガスタービンなどの負荷変動時に発生する排ガス温度の変化⁽²⁾など、過渡的な熱流動はシステム全体の熱効率に大きく影響を及ぼす。本研究では、このような過渡熱伝達過程の解明を目的に、発熱体の発熱率を制御した非定常強制対流熱伝達実験を実施し、気流中の加熱平板の強制対流過渡熱伝達に関する数値シミュレーションを行っている。本報では、発熱率の時間変化が熱伝達率に及ぼす影響について実験的に調べ、数値解析により解析モデルの妥当性を評価した。

2. 強制対流過渡熱伝達実験

2.1 実験装置概要

実験装置は、Fig. 1に示すように、圧縮機、タービン流量計、試験部、サージタンク、冷却器で構成されたガス循環装置である。また、試験部には熱入力制御・計測システム⁽³⁾が接続されており、試験発熱体の発熱率制御及び表面温度の計測に使用される。



1. Gas cylinder 2. Compressor 3. Delivery surge tank 4. Filter
5. Turbine flow meter 6. Test section 7. Cooler 8. Suction surge tank
9. Vacuum pump 10. Thermocouple 11. Pressure indicator

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 試験部及び試験発熱体

Fig. 2 は試験部の垂直断面図を示している。試験部はステンレス製(内径 20 mm)の円形流路であり、縦置き試験発熱体を流路中心部に流れに平行に設置した。試験発熱体は、厚さが 0.1 mm、長さが 50 mm、幅が 4 mm の白金平板を用い、白金平板両端に厚さ 0.7 mm の銅板を銀ろう付けしたものである。また、計測に用いる発熱体中央部の白金線有効長さは 40 mm である。

* 機械工学科 助教

** 神戸大学大学院 海事科学研究科

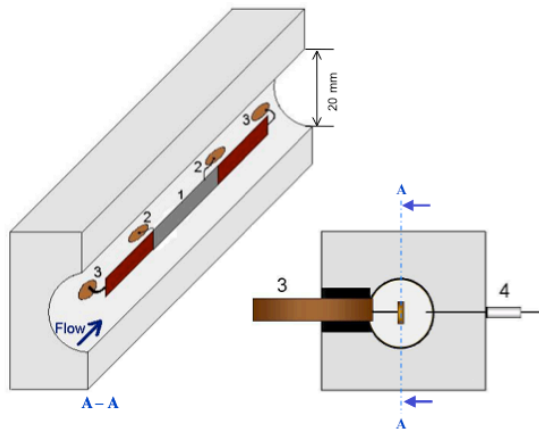


Fig.2 Detail of test heater.

2.3 実験方法

実験では、まず真空ポンプにより循環内を真空にし、ガスを充填させた。その後、ガスの流速および温度を予熱器とバルブの調整し、定常状態に達したところで試験部の発熱体にジュール加熱した。なお、発熱体には、次式で定義した指数関数状の発熱率与えた。

$$\dot{Q} = Q_0 \exp(t/\tau) \quad (1)$$

ここで、 $\dot{Q}$ [W/m³], Q_0 [W/m³], τ [s], t [s]はそれぞれ発熱率、

初期発熱率、発熱率が e 倍に増大するために必要な時間 (e-fold 時間) 及び時間である。その後、熱入力制御・計測システム⁽³⁾により時間経過に伴う発熱率 [W/m³]を計測し、熱流束を次式により求めた。

$$q = \frac{\delta}{2} (\dot{Q} - \rho_h c_h \frac{dT_a}{dt}) \quad (2)$$

ここで、 ρ_h [kg/m³], c_h [J/kgK], δ [m]及び T_a [K]は、

それぞれ試験発熱体の密度、比熱、発熱体の厚さ及び

平均温度である。なお、 q [W/m²]及び T_a [K]は、発熱体

を一辺としたダブルブリッジ電気回路を用いて計測し、あらかじめ恒温槽で校正しておいた抵抗と温度の関係から算出した（電気抵抗法）。

2.4 実験条件

強制対流熱伝達実験は、Table 1 に示す実験条件下で実施した。発熱率は上述の(1)式に示すように時間とともに指数関数上に上昇する熱入力を与え、e-fold 時間(τ)で制御している。e-fold 時間とは、上述で示した発熱率が e 倍に増加するために必要な時間であり、例えば e-fold 時間が 700ms の場合、発熱率が初期発熱率の e^2 になる実時間が約 1.4 秒となる。また、試験流体には高温ガス炉の冷却材である熱伝導率の高いヘリウムガスを用い、熱流束および発熱体の平均温度を計測した。また、発熱体の表面温度は熱伝導方程式を解

くことで算出する⁽³⁾。

Table 1 Experimental conditions.

試験流体	ヘリウムガス
系圧力	500kPa
白金試験発熱体	長さ 50.0mm
	幅 4.0mm
	厚さ 0.1mm
e-fold 時間	46ms~17s
主流部ガス温度	313K~353K,
流速	4~10 m/s

3. 実験結果

Fig. 3 はガス温度が 313K, ガス流速が 10m/s, 発熱率の e-fold 時間が 445ms における発熱率の時間変化を示している。図に示すように時間経過とともに発熱率が指数関数状に上昇していることがわかる。また、発熱率の上昇に従い、熱流束および発熱体代表温度差($\Delta T = T_s - T_b$)が指数関数状に上昇していることがわかる。このように各 e-fold 時間、流速及びガス温度において実験データを整理し、次式から熱伝達率を求めることで、熱伝達率に及ぼす影響因子を抽出した。

$$h = q / \Delta T \quad (3)$$

ここで、 h [W/m²K]は熱伝達率を示し、 q 及び ΔT は上述の熱流束と代表温度差である。Fig. 4 は熱伝達率の時間変化を示している。図に示すように、熱伝達率は時間経過とともに一定の値に漸近していることがわかった。一方、e-fold 時間を変化させた場合の熱伝達率を比較すると、e-fold 時間が短い 100ms の熱伝達率は 10s の熱伝達率に比べ約 30%高くなることが判明した。

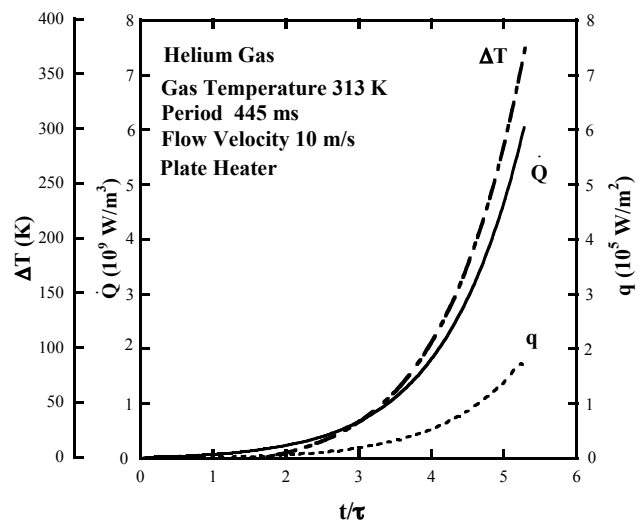


Fig.3 The relation of heat generation rate, heat flux, and temperature difference.

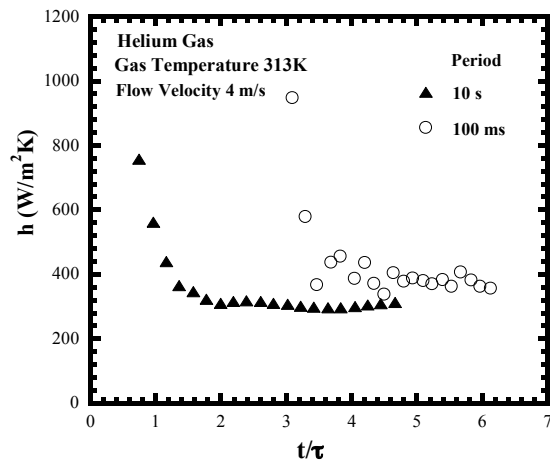


Fig.4 Heat transfer coefficients with the increase of time at period of 10s and 100ms.

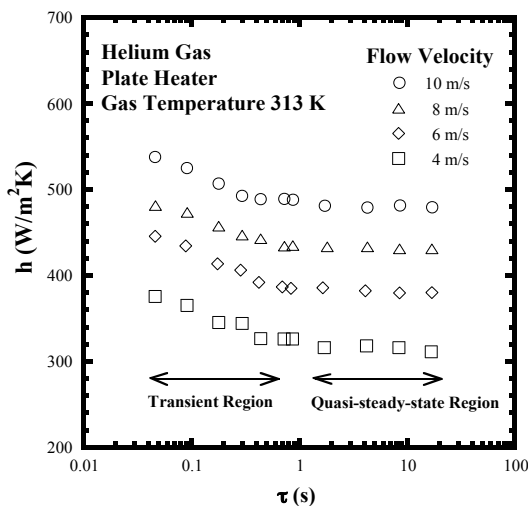


Fig.5 Transient and quasi-steady-state heat transfer characteristics at various velocities.

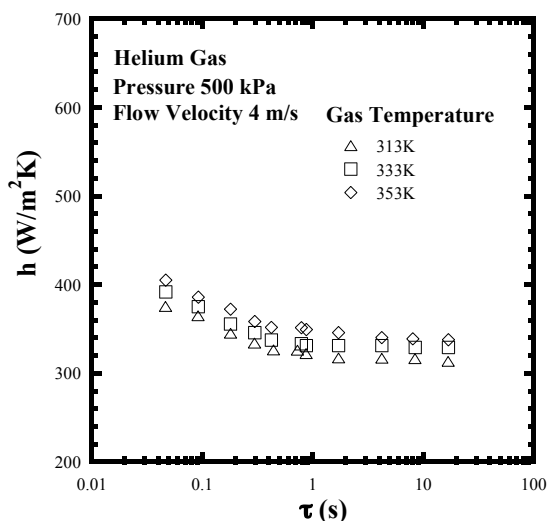


Fig.6 Heat transfer coefficients at various gas temperatures.

次に熱伝達率と e-fold 時間の相関関係について調べるために、各 e-fold 時間において熱伝達率の漸近値を Fig.5 で整理した。同図が示すように、熱伝達率は e-fold 時間 (τ) が約 1 秒を境に各流速とも増加する傾向を示し、熱伝達過程が準定常熱伝達領域から過渡熱伝達領域に移行していることがわかった。これは、発熱体近傍で発達する温度境界層が薄く、熱伝導が支配的であるためと考えられる。一方、e-fold 時間が長くなるにつれ熱伝達率は漸近し、一定値に向かう準定常熱伝達になることが明らかとなった。また、ガス流速が増加するにつれ、いずれの e-fold 時間においても熱伝達率が増加することが判明した。次に、ガス温度が過渡熱伝達過程に及ぼす影響を調べるために、ガス流速が 4m/s におけるガス温度 313K~353K の実験を実施し、Fig.6 にその結果を示す。同図より、熱伝達率はガス温度が 333K 及び 353K においても熱伝達領域に移行する傾向は同じであるが、熱伝達率の変化は 313K の場合と比べても約 7% 程度であり、実験範囲内においてはガス温度が熱伝達率に及ぼす影響は小さいことがわかった。つまり 313K~353K では発熱率が熱伝達率に及ぼす影響が大きく、発熱体近傍の熱流動に影響を及ぼしていると考えられる。しかしながら、流体側の温度分布は計測困難であるため、次章では数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)を用いた熱流動解析を実施し、流体側の温度分布について調べた結果を報告する。

4. 数値解析

4.1 解析モデル

Fig.7 は、実験体系を模擬した数値解析の物理モデルを示している。流路内には平板発熱体を設置し、流体と発熱体はそれぞれヘリウムガスと白金とした。発熱体の発熱率は、実験と同様に(1)式を与え、熱移動を伴った 2 次元 CFD 解析を実施した。解析コードは、米国 Adaptive Research 社の CFD2000⁽⁴⁾を用いた。本解析コードは有限体積法により基礎方程式を離散化され、圧力-速度連成には PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators) アルゴリズムが採用されている。本解析では、対流項に二次風上法、拡散項に対しては算術平均法を用いた非定常解析を実施した。また、境界条件には流体圧力が 500 kPa、ガス温度が 313K~353K、流速 4 m/s~10 m/s を与え、実験結果を評価するためにソース項に発熱率の(1)式を解析コードに組み込み、解析コードを高度化した。また、円管内のレイノルズ数は 3000~7500 の乱流領域であるため、乱流モデルには標準 k- ϵ モデルを採用した。壁近傍のモデル化については、壁面近傍では壁関数を用い、境界層内は後述する指数間隔格子により細分化し、壁面に接続した。

Fig.8 に解析モデルの計算範囲を示す。I2J2 領域は

発熱体, I1J2 及び I3J2 は銅板, それ以外は流体領域である. 各領域の寸法は実験と同様である. I 方向の I1 及び I3 の寸法は 45 mm, J 方向の J1, J3 の寸法は, 10 mm である. また, 境界面に密集した指数間隔格子を採用し, 係数は 1.4 とした. 格子数は Table 2 に示すように, J 方向の J1, J3 がそれぞれ 60, J2 が 3, I 方向の I1, I2, I3 の格子数は, それぞれ 10, 60, 10 である.

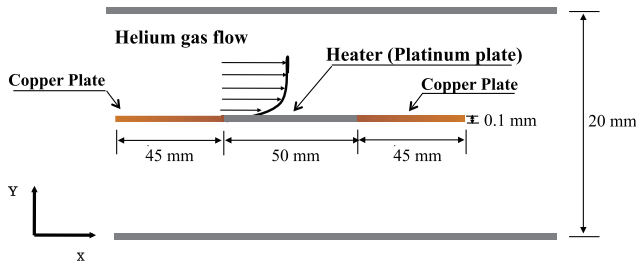


Fig.7 Physical model for Numerical simulation.

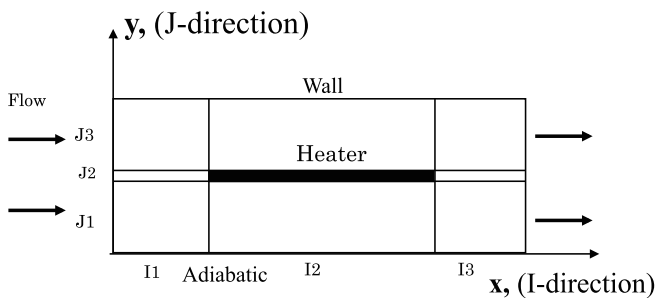


Fig.8 Computational domain.

Table 2 Mesh arrangement at the computational domain.

I1	I2	I3	J1,J3	J2
10	60	10	60	3

4.2 解析結果

Fig. 9 は, ガス流速 4m/s における解析結果の温度分布である. 発熱率の e-fold 時間が 180ms と短い時間であるため, 発熱体の温度は約 1 秒後に 750K となっており, 急速加熱されていることを数値解析により確認した. また, 図中に示すコンターは温度であるため, 温度境界層の発達形状がわかる. ヘリウムガスは, 図中左側から右側に流れているため, 発熱体先端で暖められたヘリウムガスが後流に押し流された強制対流になっており, 温度境界層は後方に向かうにつれ発達していることがわかる.

次に, 発熱体中央部 (25mm) における温度分布の時間変化を Fig.10 に示す. Fig.10 は, 横軸に温度を示し, 縦軸は発熱体からの垂直方向 (y 方向) の距離である. 本解析結果より, 発熱体表面温度は時間経過とともに増加し, 875ms では 463K となり温度差が 150K となって

いることがわかった. また, 流体側の温度分布は, 発熱体表面温度が上昇するにつれ拡大する傾向を示した. ここで, 発熱体表面温度から主流温度 (313K) に至までの y 方向の距離を温度境界層厚さと定義すると, その厚さは約 4mm であることがわかる. これは温度境界層が 875ms に至までに約 4mm 発達することを示し, CFD 解析により温度境界層が定量化されたことになる. 一方, ガス流速に着目してみると, Fig.10 ではガス流速が 6m/s であるため, Fig. 9 の解析結果 (流速 4m/s) に比べ発熱体表面の温度上昇が遅いことがわかる. 一般的に, 強制対流中では発熱体近傍で暖められたガスは後方に輸送される. この輸送速度 (ガス流速) が増加すると, 壁面近傍におけるガスの滞留時間が短くなり, 温度上昇が遅くなる. 熱伝達率は熱流束が同じ場合, 代表温度差により決定されるため, 流速が増加するにつれ熱伝達率は増加する傾向を示す. この傾向は Fig. 5 の実験結果からも明らかであり, 熱伝達率は発熱率に加え, 流速の影響を受けていることがわかる.

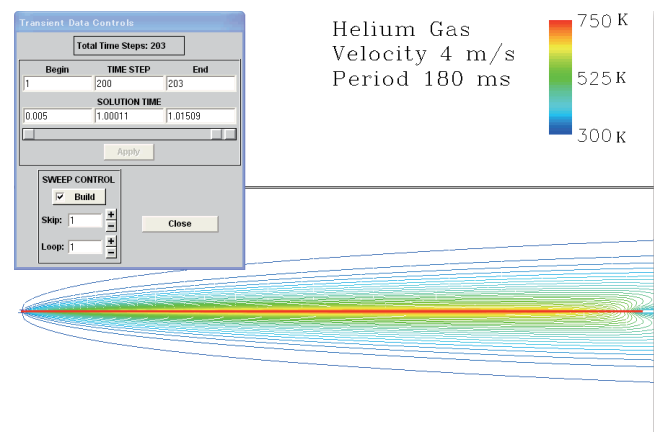


Fig.9 Visualization of thermal boundary layer at the velocity of 4m/s for the period of 180ms.

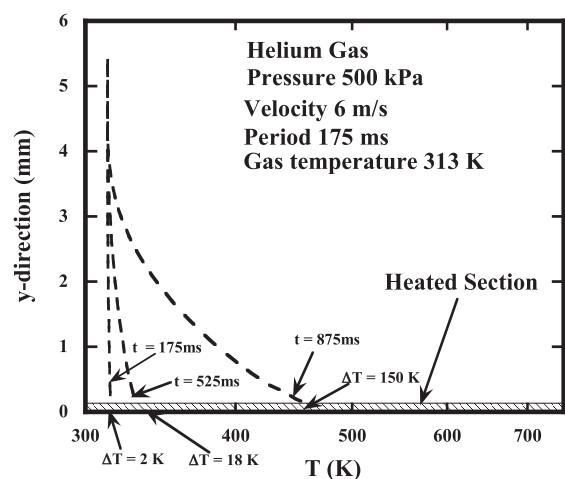


Fig.10 Temperature distribution at the period of 175ms for the gas temperature of 313K.

Fig. 11 はガス流速 6m/s, 発熱率上昇速度の e-fold 時間が 175ms における実験結果及び解析結果を示している。図中では実験結果を記号で示し、解析結果を実線及び破線で示している。数値解析では、ソース項である発熱率を実験結果から与えているため、発熱率は指数関数上の曲線となった。それに伴い熱流束及び代表温度差も指数関数上に上昇しており、実験結果と一致していることから解析モデルの妥当性が確認できる。また、Fig. 11 はガス流速 6m/s, e-fold 時間が 90ms におけるガス温度 313K 及び 353K の解析結果を示す。同図より、313K 及び 353K の代表温度差に大きな違いは見られず、ガス温度が熱伝達率に及ぼす影響は小さいことが確認できた。

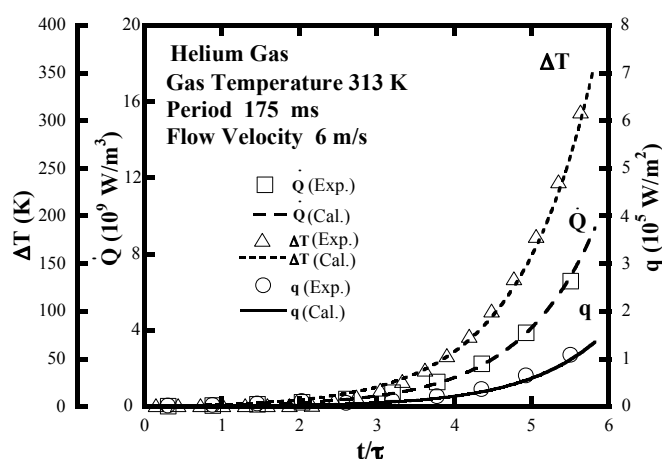


Fig.11 Comparisons between numerical analysis and experimental data.

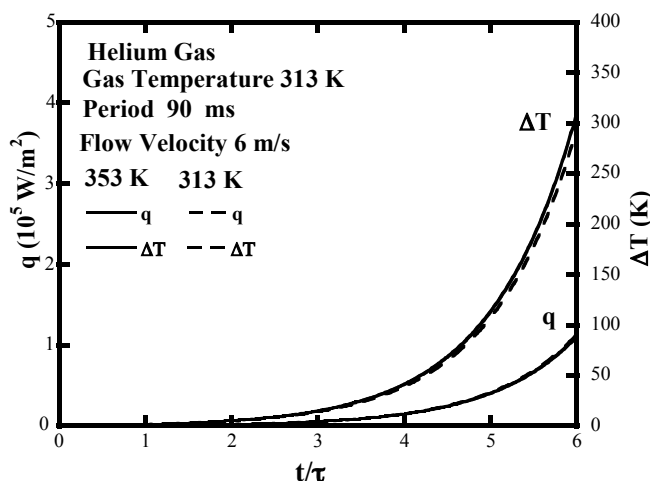


Fig.12 Numerical results for the gas temperature of 353K and 313K at the velocity of 6m/s.

5. まとめ

発熱体の発熱率を制御した非定常強制対流熱伝達実験を実施し、加熱平板の強制対流過渡熱伝達に関する数値解析を行った。

非定常強制対流熱伝達実験より、熱伝達率は発熱率及びガス流速に影響を受けることが判明した。さらに、発熱率上昇速度の e-fold 時間が短くなるにつれ熱伝達率は増加する傾向を示し、準定常熱伝達過程から過渡熱伝達過程へ移行していることが判明した。

また、実験体系を模擬した熱移動を伴う CFD 解析を実施し、温度境界層の発達過程を定量化した。発熱体近傍の温度分布は時間変化とともに上昇し、温度境界層は流速が 6m/s の場合、約 4mm であることが明らかとなった。また、解析結果を実験結果と比較すると、解析結果の熱流束及び代表温度差は概ね一致し、解析モデルの妥当性が確認された。

謝辞

本研究の一部は、本学の研究奨励研究助成を受け進められました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) Takamatsu, K., Nakagawa, S., Takeda, T.: “Core Dynamics Analysis of Control Rod Withdrawal Test and Nuclear Characteristics in HTTR”, Transaction of the Atomic Energy Society of Japan, Vol.5, No.2, pp.81-95, 2006.
- (2) 宮地宏:「スーパーマリンガスタービンの研究開発, 日本マリンエンジニアリング学会誌」, Vol. 36 No.9, pp.91-97, 2001.
- (3) Liu, Q.S., Fukuda, K., “Transient Heat Transfer for Forced Convection Flow of Helium Gas,” JSME International Journal, Series B, Vol.45-3, pp.559-564, 2002.
- (4) STORM/CFD2000, Theoretical Background, Adaptive Research, Alhambra, California, pp.59, 2003.

インダクタを二次元に配列させた磁気式触覚センサ

青野哲典* 武縄悟**

A Magnetic Type Tactile Sensor with a Two-Dimensional Array of Inductors

Tetsunori AONO* Satoru TAKENAWA**

ABSTRACT

In this paper, a novel tactile sensor is developed and evaluated with a two-fingered hand. One of the features of the developed sensor is that it can not only extract force vectors but also detect the onset of slippage simultaneously. The sensor structure is simple, and the sensor, which is essentially a displacement gauge, consists of two-dimensional array of inductors and elastic body in which a permanent magnet is inserted. In our experiment, a high induction voltage is observed at the onset of slip between the sensor surface and a grasped object, and the dependence of the material and shape of the object are revealed. The contributions of inductors to sensor output are observed experimentally to be in agreement with analytical prediction. Experiment results show that the proposed tactile sensor is useful for three-axis force measurement and slip detection.

Keywords : tactile sensor, robot hand, slip detection, force vector measurement

1. はじめに

ロボットの研究は急速に発展しており、そのなかでロボットハンドの研究もハンドの目的に合わせて種々の原理のものが研究・開発されていると⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾が、その多くは人間の手と比較すると器用さの点で大きく劣っている。その理由の一つとして、人間が視覚や触覚から様々な情報を得ているのに対し、ロボットハンドはそれらの情報を得るために搭載しているセンサの数が少ないことが挙げられる。これは従来のロボットハンドに対しては、あらかじめ定められた対象物を把持し、所定の位置へ移動させる機能のみが求められていたためであり、そのような状況下では少ないセンサでも十分に活動ができた。しかし、人間と同等、もしくはそれ以上に器用に物体把持動作を行うためには、対象物の重量・摩擦係数などの情報が未知の場合でも、対象物を落とさず、かつ壊さないような適切な把持力を設定できる機能を有していなければならない。そのため、ロボットハンドの研究に共通する課題の一つとして、

ハンドが把持する対象物の様々な情報を正確に計測するための触覚センサの開発が挙げられる。

人間が物体を持ち上げ、器用に操ることが可能なのは、人間に力の大きさや表面状態などを知覚するための触覚が備わっているからである。物体を器用に把持するためには、物体から受ける接触力ベクトルを知ること、接触表面に働くすべりをとらえること、この2つが重要である。これまでこれらのセンサは別々のセンサとして開発されていた⁽⁶⁾⁻⁽¹⁴⁾。しかし、それではロボットハンドの構成が複雑化してしまうという問題がある。

そこで我々は、ロボットハンドの指腹部や手のひらに適用が可能で、接触力ベクトルの計測に加えてすべりのような急激な接触状態の変化を検出することができる磁気式の触覚センサを開発した。開発したセンサは、永久磁石と一般の回路素子として知られているインダクタを検出素子として用いているパッシブ型の触覚センサである。このため、すべり発生の瞬間に大きな出力電圧が取り出せる特徴を有している。

本研究では、開発した触覚センサの特性を調べるた

* 筑波大学 システム情報工学研究科 知能機能システム専攻

** 機械工学科 准教授

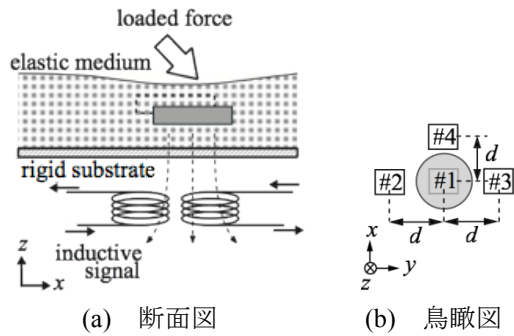


図1 開発した触覚センサ

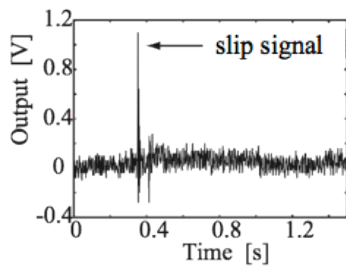


図2 すべり信号

めのプラットホームとして、ロボットハンドを製作した。このロボットハンドに開発した触覚センサを搭載し、すべり検出性能の評価と接触力ベクトルの計測機能の評価を行った。さらに、センサからの出力信号を用いた把持力制御実験を行った。開発した触覚センサからの出力信号は、すべり発生時を除いては微小であるため、信号増幅回路、およびノイズとオフセットを除去するためのフィルタを組み込んだ信号処理回路の製作も行い、それぞれのフィルタの効果を検証した。本稿ではそれらの結果について報告する。

2. 触覚センサの原理

開発した触覚センサの構造を図1に示す。センサは永久磁石が埋め込まれた弾性体と、パッシブ素子として電子回路に用いられるインダクタを複数配列した基板で構成されている。人間に例えると、弾性体が皮膚、インダクタが神経の部分に相当する。図1(a)に示すように、外部から加わる力により弾性体が変形すると、インダクタに対する磁石の位置も変化する。インダクタには、単位時間あたりの磁束密度の変化量に比例した誘導電圧が発生するため、これを用いてすべりの検出や接触力ベクトルの計測を行う。図1(b)は触覚センサを上から見た図である。#1～#4はインダクタであり、永久磁石との位置関係を示している。

インダクタ表面における磁束密度の垂直成分を B_z とすると、インダクタに発生する誘導電圧 V_{out} から B_z を以下の式で計算できる。 N はインダクタの巻き数、 S は断面積である。

$$B_z = \frac{1}{NS} \int V_{out} dt \quad (1)$$

4つのインダクタから B_z を得ることで、磁石の三次元変位量が一意に求まる。各インダクタが検出する B_z をそれぞれ $B_{z1} \sim B_{z4}$ とすると、磁石の変位量 Δx , Δy , Δz は以下の式で表される。この変位量と弾性体の弾性率から、弾性体に加わる接触力ベクトルを計算することができる。ただし、 b_0 と b_1 は弾性体と基板の厚さによって決まる定数である。

$$\Delta y = \frac{-d \cdot \ln(B_{z3}/B_{z2})}{4 \ln(B_{z3}/B_{z1}) - 2 \ln(B_{z3}/B_{z2})} \quad (2)$$

$$b_g = \frac{\ln(B_{z3}/B_{z1})}{2d \cdot \Delta y - d^2} \quad (3)$$

$$\Delta z = \frac{b_g - b_0}{b_1} \quad (4)$$

$$\Delta x = \frac{\ln(B_{z4}/B_{z1})}{2d \cdot b_g} + \frac{d}{2} \quad (5)$$

物体がセンサ表面に接触してせん断力が増大し、接触面ですべりが発生した場合は、磁石が急激に変位する。センサの出力電圧は、式(1)からわかるように磁束密度 B_z の時間微分値に比例する。そのため、磁石の急激な変位が生じると、各インダクタには通常の変位時とは全く異なる図2のようなインパルス状の誘導電圧が発生する。この信号がすべり検出に有効であると考えられるため、本稿ではこの信号をすべり信号と呼ぶこととする。

3. 評価実験用ロボットハンドの製作

開発した触覚センサの有効性を検証するためには、すべり検出性能と接触力ベクトル計測機能を評価する必要がある。定量的な評価を行うためには、単純な動作のもとで実験を行うことが望ましい。そこで、触覚センサの各種評価実験用のプラットホームとして、構成が単純で、動作の自由度が限られたロボットハンドの製作を行った。

図3に製作したロボットハンドの図を示す。ハンド

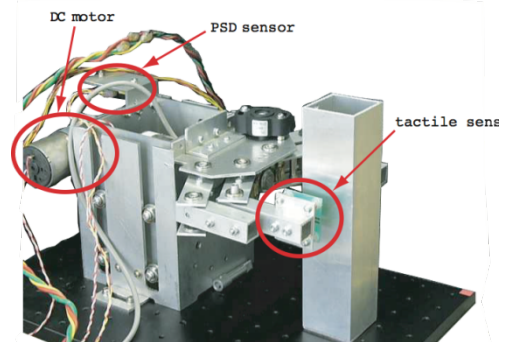


図3 製作したロボットハンド

本体は、触覚センサのマウンタ、フィンガー、アーム、DC モータ、減速装置、光学式ロータリーエンコーダ、可変抵抗器で構成されている。センサマウンタ、フィンガー、およびアームには、非磁性体であるアルミニウムを使用することで、弾性体内の磁石と磁気干渉を起こさないよう配慮している。光学式ロータリーエンコーダと可変抵抗器を用いたフィンガーの位置決め制御により、フィンガーの把持力を制御している。定盤に取り付けた角柱を土台にして、2 個目の DC モータで垂直方向の昇降運動を可能にしている。昇降運動に関するパラメータは、赤外線距離センサ(PSD)によって計測している。開発した触覚センサは、フィンガー先端のセンサマウンタに搭載し、そこで物体を把持する。

4. 信号処理回路の製作

接触力ベクトルの計測を行う際には、触覚センサからの出力信号を適切に処理する必要がある。そこで、信号処理のための回路を新たに製作した。

4.1 回路の構成 開発した触覚センサに用いたインダクタは電子部品用であるため、インダクタンスは $4.7 \mu\text{H}$ と小さく、得られる誘導電圧も微小である。そこで信号を増幅するためにオペアンプを用いた信号増幅回路を製作した。計測可能なオーダーまで信号を増幅するためには、増幅率を 10 万以上にする必要がある。しかし増幅率を大きくすると不要なノイズまで増幅される。そこでこれを除去するためにローパスフィルタ(LPF)を組み込んだ。また、回路に用いたオペアンプは周囲の温度によって変化するオフセットを有している。これを除去するためにハイパスフィルタ(HPF)を組み込んだ。また、回路自体に存在するオフセットを除去するために、オフセットの特性の検証を行った。

製作した信号処理回路を図 4 に示す。触覚センサからの出力信号を Amp1 で増幅する。増幅された信号を LPF に通してノイズを低減させ、Amp2 に入力する。HPF では直流を遮断することで、オフセットの調整およびドリフトの低減を行っている。

4.3 LPF によるノイズの低減 LPF を使用していない触覚センサの出力信号波形と、LPF を用いた触覚センサからの出力信号波形を比較することにより、LPF を用いることでノイズが低減されていることが確認できた。

4.3 HPF によるオフセットの低減 HPF を使用していない触覚センサの出力波形と、HPF を用いた触覚センサからの出力波形を比較することにより、HPF を用いることでオフセットが低減されていることが確認できた。

4.4 ソフトウェアによるオフセットの補償 製作した信号処理回路が有するオフセットを図 5 示す。HPF を構成するコンデンサと抵抗の値を変え、4 種類の異なるカットオフ周波数 f_c で検証を行ったところ、図 5 示すように、どれもほぼ一次的に値が上昇していることがわ

かった。よって、上昇分をソフトウェア上で差し引くことで、オフセットの補償を行うことが可能であると考えられる。このオフセットをソフトウェア上で補償し、補償前と比較したものを図 6 示す。補償を行ったことで、オフセットによる波形の上昇を抑えられたことが確かめられた。

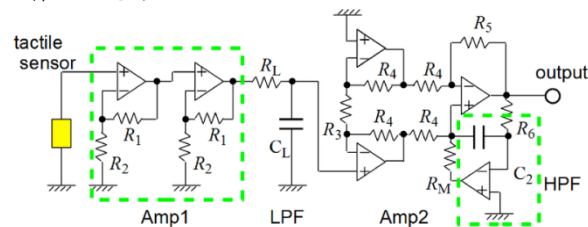


図4 信号処理回路

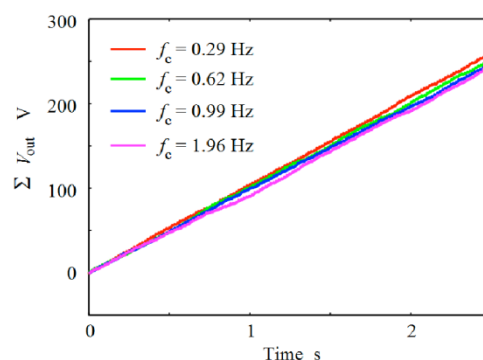


図5 回路の有するオフセット

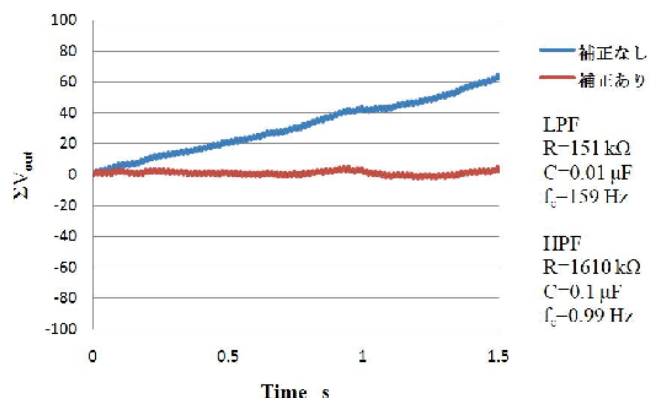


図6 ソフトウェアによるオフセットの補償

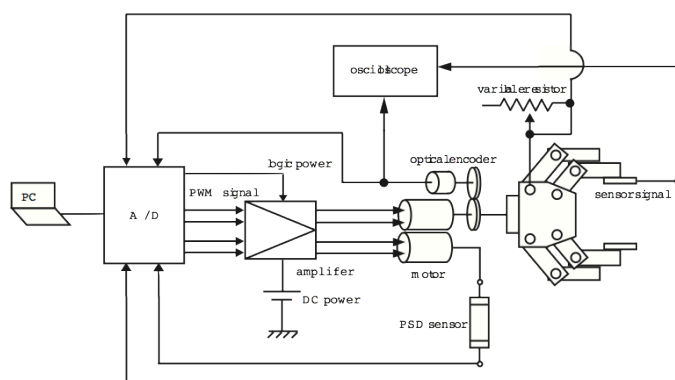


図7 実験装置の構成図

5. すべり検出性能の評価実験

開発した触覚センサのすべり検出性能を評価するために、すべり信号 V_{slip} の測定と、すべり信号を利用した把持力制御実験を行う。

5.1 実験方法 実験装置の構成図を図7示す。本実験では、可変抵抗器と光学式ロータリーエンコーダの出力をPCに取り込み、P制御によりフィンガーの位置制御を行うことで、把持力の制御を実現している。触覚センサからの出力は、リアルタイムですべりの発生を確認するために、PCとオシロスコープに取り込んでいる。

図7のA/D変換器は、ハンドの開閉用と昇降用のモータドライバへ指令値を出力する。それぞれ、ロボットハンドの開閉および昇降のためのモータ用である。また、モータドライバのICに供給するための電源も1系統出力する。ロボットハンドの可変抵抗器とエンコーダの出力とともに、触覚センサの出力も同時に記録するために、PCからA/D変換器を介してオシロスコープへトリガ信号を出力する。A/D変換器の入力には、触覚センサ、可変抵抗器、エンコーダ、赤外距離センサ(PSD)の4出力が取り込まれている。

すべり信号の測定は以下の手順で行う。

- 1) フィンガーの位置決めにより、一定の把持力で容器を把持し、垂直に持ち上げる。
- 2) 容器に水を注ぎ、重量を増やす。
- 3) 物体がすべり落ちる際のセンサからの出力電圧を記録する。

センサが接触する容器側面に様々な材質を貼ることで、材質によるすべり信号の違いを調べる。材質は、アルミニウム、銅、ガラスエポキシ、ポリプロピレン、紙の5種類を用意した。いずれも非磁性体材料であるため、触覚センサと磁気干渉する恐れはない。また、形状によるすべり信号の違いを調べるために、アルミ製の角柱形の容器と円柱形の容器を用意した。

把持力制御実験も同様の手順で行うが、予め信号に適切な閾値を設け、すべり信号がその閾値を越えた際にハンドの把持力を1N強めるという制御を行い、物体をすべり落とさず把持し続けることが可能か調べる。

5.2 実験結果 図8に、各材質および形状で測定したすべり信号 V_{slip} の平均値と標準偏差を示す。実験は各材質および形状ごとに10回ずつ行った。材質を変えて行った実験についてはアルミニウムが一番大きなすべり信号となり、銅が一番小さなすべり信号となった。また、今回実験を行った全ての材質において、0.4Vを超えるすべり信号が得られた。形状を変えて行った実験については、円柱形の容器よりも四角形の容器の方が大きなすべり信号が得られた。

図9に、すべり信号 V_{slip} を利用した把持力制御の実験結果を示す。グラフには、触覚センサの出力信号、ハンドの開閉動作を記録する光学式ロータリーエン

コーダからの出力、そしてPCからのトリガ信号を重ねて表示している。すべりを判別するための閾値は0.5Vとしている。

5.3 考察 図8(a)から、すべり信号の平均値が大きいほど最大値と最小値に幅があることがわかる。これは摩擦が大きい材質ほど大きな出力信号が得られるが、ウレタンゲルと基板との剥離も起きやすくなり、信号のばらつきにつながったと考えられる。

図8(b)からは、角柱形よりも円柱形の容器ほうが信号が小さいことがわかる。円柱形の容器は、角柱形の容器に比べてセンサとの接触面積が少ないために、摩擦力が小さくなり、弾性体および磁石が十分に変位する前にすべりが生じたことが原因と考えられる。

図9から、すべり信号を検出した後、ハンドが動作して把持力を強めていることがわかる。把持力を強めた後も触覚センサの出力電圧はゆっくりとした振動を続けているが、これは二本のフィンガーで把持した際に、接触位置が物体の重心と一致していなかったためと考えられる。すべり信号を検出してからハンドが動き始めるまでの時間は約12.5msであることも読み取れた。すべり信号のパルス幅は約3.8msであり、高い応答性を有していることがわかった。これは開発した触覚センサが、インダクタを用いた微分型であるためである。

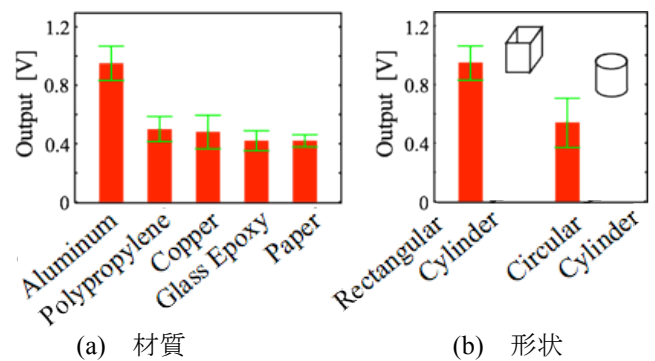


図8 すべり信号の計測結果

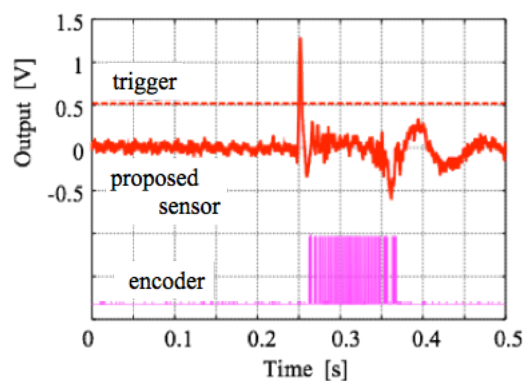


図9 すべり信号とエンコーダの出力

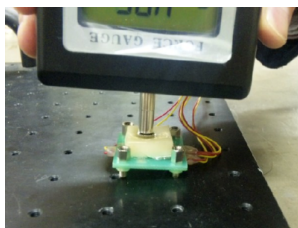


図10 実験の様子

6. 接触力ベクトル計測機能の評価実験

開発したセンサが有するもう一つの機能である、接触力ベクトル計測機能の評価を行う。また、接触力ベクトル計測時において、前章で述べた信号処理回路のフィルタの有効性を確認する。

6.1 実験方法 触覚センサで計測した接触力と、ひずみゲージを用いた引張試験器で計測した接触力を比較することで、開発した触覚センサの接触力ベクトル計測機能の評価する。実験の様子を図10に示す。実験は次の手順で行った。

- 1) 引張試験器を、触覚センサ表面に垂直に押し当てる。
- 2) 触覚センサの出力信号と、引張試験器の出力信号をオシロスコープに取り込む。
- 3) 式(1)～(5)および弾性体の弾性率を用いて触覚センサの出力信号を接触力に変換し、引張試験器の値と比較する。

本実験では、図1(b)に示す#1～#4の各インダクタのうち垂直方向の変化を最も敏感に捉えることのできる#1のインダクタの出力信号のみを記録し、引張試験器の値と比較を行った。さらに、同様の実験をフィルタ無し、LPFのみ、HPFのみ、LPFとHPFの4つの条件で行い、それぞれの出力信号を比較することで、信号処理回路に組み込んだフィルタの有効性を検証した。

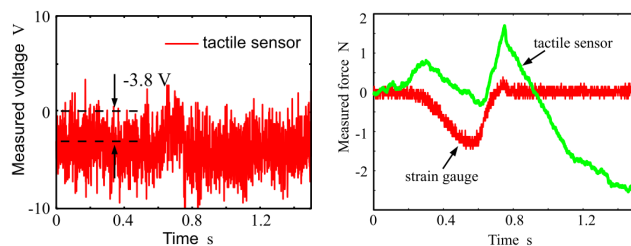
6.2 実験結果 実験結果を図11～図14に示す。各図の左側は触覚センサの出力信号の元波形である。右側はそれを接触力に変換したものと、引張試験器の出力波形を比較したものである。ただし、接触力に変換したものは、後処理としてソフトウェア上でオフセットを除去している。

6.3 考察 図11(a)から、触覚センサの出力信号はオフセットとノイズを多く含んでいることがわかる。そのため、図11(b)に示すように接触力に変換した波形と、引張試験器の波形に大きなずれが生じたと考えられる。一方、各フィルタを実装した図12～図14では、力を加えている間の波形が引張試験器の波形とよく一致している。

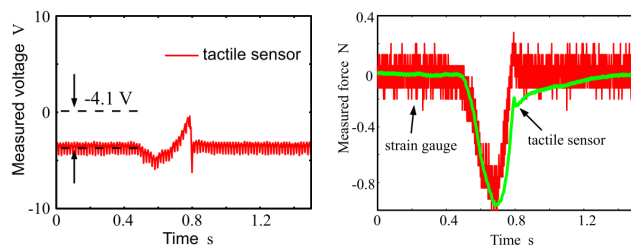
図11(a)と図12(a)を比較すると、LPFによってノイズが低減されていることがわかる。しかしHPFを組み込んでいないため、オフセットの低減は確認できない。接触力に変換後の図12(b)においては、引張試験器の波形とよく一致しているように見える。しかし、前述したように、図12(b)の触覚センサの波形はソ

フトウェア上でオフセットを予め除去したものであるため、実際は時間が経つにつれて引張試験器の波形との差が増大している。よって、LPFのみでは正確な接触力ベクトルの計測には不十分であるといえる。

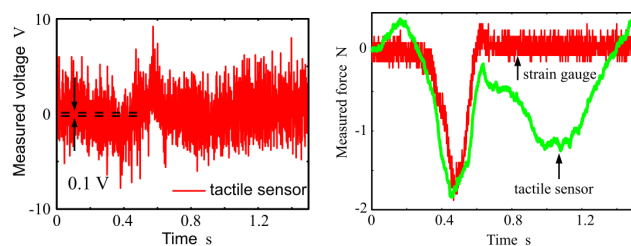
図11(a)と図13(a)を比較すると、HPFによってオフセットが低減されていることがわかる。しかしLPFを組み込んでいないためノイズの低減は見られない。図13(b)も、他の波形と同様にソフトウェア上でオフセットの除去を行ったが、その大きさはLPFのみの時よりも小さかった。これはHPFによってオフセットが大幅に低減させたためであると考えられる。



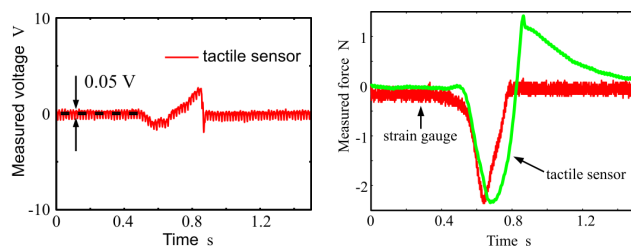
(a) センサの出力信号 (b) センサと荷重計の比較
図11 接触力の計測結果(フィルタ無し)



(a) センサの出力信号 (b) センサと荷重計の比較
図12 接触力の計測結果(LP Fのみ)



(a) センサの出力信号 (b) センサと荷重計の比較
図13 接触力の計測結果(HP Fのみ)



(a) センサの出力信号 (b) センサと荷重計の比較
図14 接触力の計測結果(LP F, HP Fあり)

図1 4は、LPF と HPF の両フィルタを実装した状態で行った実験結果である。力を加えている間は、触覚センサと引張試験器の波形がよく一致しているが、力の解放後に波形の上昇が見られる。これは HPF のみの実験結果である図1 3 (b)にも見られる現象であるが、図1 3 (b)ではオフセットをソフトウェア上で除去しているため、結果的に力の解放後の波形の上昇が抑えられているように見える。この波形の上昇は LPF のみの実験結果である 図1 2 (b)では見られないため、HPF に原因があると考えられる。本実験で実装した HPF は一次フィルタであるため、位相特性に直線性がない。そのため波形が歪められ、図1 4 (b)のような力の解放後の波形の上昇に繋がったと考えられる。LPF は、入力周波数が低域の部分では直線性に近い位相特性が見られる。本実験を行った際の触覚センサに対する接触動作が、ちょうどこの低域部分に相当していたため、LPF のみの場合では波形が歪まずに、図1 2 (b)のように波形の上昇が見られなかったものと考えられる。

ノイズとオフセットの両方を低減するためには、LPF と HPF の両フィルタを実装する必要がある。しかし現状の一次の HPF では非直線性の位相特性によって波形が歪むため、より高次のフィルタを用いることが必要と考えられる。

7. まとめ

本研究で開発した磁気式触覚センサの有効性を検証するために、センサを実装するためのロボットハンドと、増幅回路および HPF と LPF を含む信号処理回路の製作を行った。比較実験によって、HPF と LPF の有効性が確かめられた。また、製作した回路が有するオフセットをソフトウェア上で除去することか可能であることも確かめられた。

開発した触覚センサのすべり検出性能の特性を評価するために、材質や形状の異なる物体に対して把持実験を行った。今回の実験に用いたすべての材質および形状の物体において、すべり信号が確認できた。また、信号に適切な閾値を設けることで、物体をすべり落とさず把持し続けることが可能であることを確認した。

触力ベクトル計測機能の検証については、フィルタの条件を変えた4つの実験結果を比較することにより、LPF、HPF それぞれのフィルタの必要性が確かめられた。また、正確な接触力ベクトルの計測を行うためには、より高次の HPF を用いる必要があることも確かめられた。

以上、本研究で得られた成果が、ロボットハンドによる器用な物体把持や自由な操りの実現に役立てれば幸いである。

参考文献

- (1) Jan Jockusch, et.al. “A Tactile Sensor System for a Three-Fingered Robot Manipulator”, Proc. of IEEE ICRA, vol.4, pp.3080-3086, 1997.
- (2) 東森充ほか：“二重旋回機構を備えた4本指ロボットハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.24, no.7, pp.813-819, 2006.
- (3) 大嶋律也ほか：“腹腔内組立式3指5自由度ハンド”, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.5, pp.453-461, 2008.
- (4) 金子健二ほか：“等身大ヒューマノイド用多指ハンドの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.1, pp.98-109, 2008.
- (5) 横小路泰義ほか：“ロボットハンドによる折り紙作業”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.106, no.410, pp.113-118, 2006.
- (6) Makoto Shimojo, et.al. “A Flexible high resolution tactile imager with video signal output”, Proc. of IEEE ICRA, vol.1, pp.384-389, 1991.
- (7) 下条誠, 谷保勇樹：“2次元分布荷重中心位置検出触覚センサ-センサ構成パラメータとセンサ特性について-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, vol.2005, no.2A1-N-107, pp.156, 2005.
- (8) Ryosuke Tajima, et.al. “Development of soft and distributed tactile sensors and the application to a humanoid robot”, Advanced Robotics, vol.16, no.4, pp.381-397, 2002.
- (9) Jae S.Son, et.al. “A Tactile Sensor for Localizing Transient Events in Manipulation”, Proc. of IEEE ICRA, vol.1, pp.471-476, 1994.
- (10) Yoji Yamada, et.al. “Vibrotactile sensor generating impulsive signals for distinguishing only slipping states”, Proc. of IEEE ICRA, vol.2, pp.844-850, 1999.
- (11) 山田陽滋ほか：“ロボットハンドのための指紋を備えた高周波微振動検出式滑り覚センサ”, 計測自動制御学会論文集, vol.36, pp.473-480, 2000.
- (12) Takashi Maeno, et.al. “Control of grasping force by detecting stick/slip distribution at the curved surface of an elastic finger”, Proc. of IEEE ICRA, pp.3896-3901, 2000.
- (13) Hitoshi Maekawa, et.al. “Development of a finger-shaped tactile sensor and its evaluation by active touch”, Proc. of IEEE ICRA, vol.2, pp.1327-1334, 1992.
- (14) 前川仁ほか：“半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発”, 計測自動制御学会論文集, vol.30, no.5, pp.499-508, 1994.

水平チャネル内マイクロバブル流の摩擦圧力損失特性 —マイクロバブル水の物理化学的特性—

新海藍菜* 安田貴央* 和田徳幸** 鈴木隆起*** 赤対秀明****

Frictional Pressure Drop of Microbubble Flow in a Horizontal Channel -Physicochemical Properties of the Microbubble Water-

Aina SHINKAI* Takahisa YASUDA* Noriyuki WADA**
Takayuki SUZUKI*** Hideaki SHAKUTSUI****

ABSTRACT

Bubbles of micro-order diameter are called microbubbles, and they have particular physicochemical characteristics. One of the characteristics is reduction of frictional pressure drop. Previous studies have reported that the frictional pressure drop can be decreased by microbubble and it depends on the microbubble size or generators. However, the mechanism has not been clarified. In the present study, we focused on the physicochemical characteristics and investigated the influence to frictional pressure drop. In the experiment, the physicochemical characteristics such as DO, density, surface tension and kinetic viscosity are measured. And the pressure drop of microbubble water is also measured in the horizontal channel. The microbubble is generated by swirling flow method, pressurized dissolution method, loop flow method and H type, which is developed by Ariake National College of Technology. As the results, the reduction of frictional pressure drop is confirmed by swirling flow method. Measured physicochemical characteristics are different in each generator. Density and viscosity are nearly-constant in all generators. Therefore frictional pressure drop don't have relationship to density and viscosity.

Keywords: microbubble, physicochemical property, frictional pressure drop

1. 緒言

マイクロバブル(以下, MB と記す)は, 発生時において十～数十 μm の気泡径を有する気泡のことを指し, 気泡径が極めて小さいことから数 mm 程度の気泡では見られない様々な物理化学的特性を有している.

MB に関する研究は, 1990 年代後半から盛んに行われるようになり, 現在では幅広い分野に拡大している. その中でも工業的な分野においては, MB を用いた船舶推進時の摩擦圧力損失低減効果についての研究が進められている. 上入佐ら⁽¹⁾は, 船舶推進時に船舶前方の船底から MB を吹き込むことによって MB を発生させるために必要なエネルギーを考慮した正味のエネルギー削減率が数%得られることを報告している. MB による摩擦圧力損失低減効果に関する研究では, 円管

や矩形管内において MB を流動させることでその基本特性が研究され, 十～数十%の低減効果が報告されている. 一方, 摩擦圧力損失低減のメカニズムは乱流変動成分の抑制に起因するせん断応力の低減と関係づけられているものの, その詳細は明らかにされていない. 本一連の研究においても, 円管内の MB 流に対して, 気泡径や乱流変動成分の測定を行い, 乱流変動成分とせん断応力を関連付けて, 摩擦圧力損失低減に関する検討が行われている⁽²⁾. しかし, これらの摩擦圧力損失に関する研究の中では, 物理化学的特性の影響は考慮されておらず(変化しないとされている), 特に粘度や密度が MB によって変化する場合には, 摩擦圧力損失に関して大きな影響をもつ可能性がある.

MB 水の物理化学的特性に関しては, これまで pH, DO(溶存酸素量), 表面張力は時間ごとに変化するという報告や, 変化しないという報告, また気泡径については発生方式に依存し, 物理化学的特性が気泡径によって異なるという報告があり, 物理化学的特性は発生

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科

*** 機械工学科 講師

**** 機械工学科 教授

方式や環境などの様々な要因に依存する可能性がある。

そこで本研究では4種類のMB発生装置を用い、同一環境下においてMBの気泡径やMB水のDO、密度、表面張力、動粘度の物理化学的特性を測定し、それらのバブリング時間に対する変化特性を調べる。さらに、各発生装置による摩擦圧力損失の特性を測定するとともに、星野ら⁽³⁾が提案しているMBにおける摩擦圧力損失低減メカニズムの提案式から粘度および密度の変化に着目し、摩擦圧力損失への影響について検討する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 MB発生装置 本研究では、超高速旋回方式(ナノプラネット研究所製, M2-LM)、加圧溶解方式(三相電機社製, baboonMBT-2011)、ループ流方式(OK エンジニアリング社製, OKE-MATRIX-MB01)、H型方式(有明高専開発)⁽⁴⁾の4種類のMB発生装置を用いた。

超高速旋回方式では、水流量 $Q_L=17$ L/min、空気流量 $Q_G=0, 40, 80$ mL/minとした。ループ流方式では、この発生器において最大流量である $Q_L=8$ L/minを用い、 $Q_G=0, 150\sim400$ mL/minとした。空気流量に幅があるのは自吸時に脈動していたためで、これは目視によりMBが多く確認できた流量である。H型方式では、超高速旋回方式と合わせ $Q_L=17$ L/min、 $Q_G=40$ mL/minとした。なお、それぞれでMBの発生量は異なると考えられるが、まずはその発生器での特性を調べる。

2.2 MB水の物理化学的特性 4種類のMB発生装置において、気泡径の測定とDO、密度、表面張力、動粘度の物理化学的特性の測定を行う。各物理化学的特性は、作動流体である水道水を水槽(容量35 L)に給水し、最大9時間のバブリング時間に対して3時間ごとに試料を採取した。同一の試料に対して3回の測定を行い、その平均値を用いた。なお、3回のデータのばらつきは $\pm 1\%$ 以内であった。水温は冷却器(ゼンスイ製, ZE-1300E)によって温度 $T=20^\circ\text{C}$ 一定($\pm 0.6^\circ\text{C}$)に保たれ、測定は3日間異なる日時で実施した。

気泡径の測定には、高速度ビデオカメラ(キーエンス製, VW9000, 倍率300倍, フレームレート4000fps)を用いた。焦点のあったMBの直径を測定し、500個のデータを採取した。DOはDO計(東亜電波工業製, DO-11P, 測定精度0.2%未満)、密度は標準比重計(安藤計器製工所製, JIS-B 7525 19 本組標準比重計, 測定精度0.2%未満)、表面張力はデュヌイ表面張力試験器(伊藤製作所製, 測定精度0.2%未満)、動粘度は、毛細管粘度計(Ubbelohde型, 測定精度0.01%未満)を用いて測定した。なお、粘度については、密度と動粘度から算出する。

2.3 摩擦圧力損失 星野ら⁽³⁾は一般的な気液二相流におけるせん断応力の関係式⁽⁵⁾をもとに、気泡が十分小さく流れに対して影響しない、物性値は一定と仮定することでMB流におけるせん断応力を提案している。

$$\tau = \mu_L \frac{du}{dy} - \rho_L \overline{u'v'} \quad (1)$$

ここで、 τ は壁面せん断応力、 μ_L は液相の粘度、 ρ_L は液相の密度、 du/dy は速度勾配、 u' 、 v' は液相速度の変動成分(u 、 v は主流および垂直方向成分)、 $\rho_L \overline{u'v'}$ は乱流の速度変動による応力である。

これまでの研究では、粘度および密度を一定とし、壁面せん断応力の検討が行われているが、粘度や密度は発生方式によって変わるという報告⁽⁴⁾もある。そこで、本研究では、各MB発生装置において摩擦圧力損失低減効果を確認するとともに、粘度や密度の変化の割合が式(1)における壁面せん断応力 τ におよぼす影響について評価する。

Fig.1に実験装置の概略を示す。試験流路①は全長 $L=6$ mの矩形管(幅 $W=50$ mm×高さ $H=20$ mm)である。給水タンク②から供給される作動流体は、混合部⑥、試験流路①、排水タンク⑫を経由し、給水タンク②へと循環する。水温は冷却器④により温度 $T=20^\circ\text{C}$ は一定($\pm 0.5^\circ\text{C}$)に保たれた。試験流路内の摩擦圧力損失は、流路入口($x=0$ m)から $x=2.5$ m および $x=5.5$ m の位置に設けた静圧測定孔よりマノメータを用いて測定した。

レイノルズ数 $Re(=ud/\nu)$ は $8000\sim65000$ の範囲で測定を行った。なお、作動流体は水道水を用い、水の動粘度 ν は $1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (温度 20°C)、等価直径 d は 28.6 mm、試験区間長 l は 3 m、主流方向の平均流速 u は $0.28\sim1.83$ m/s である。

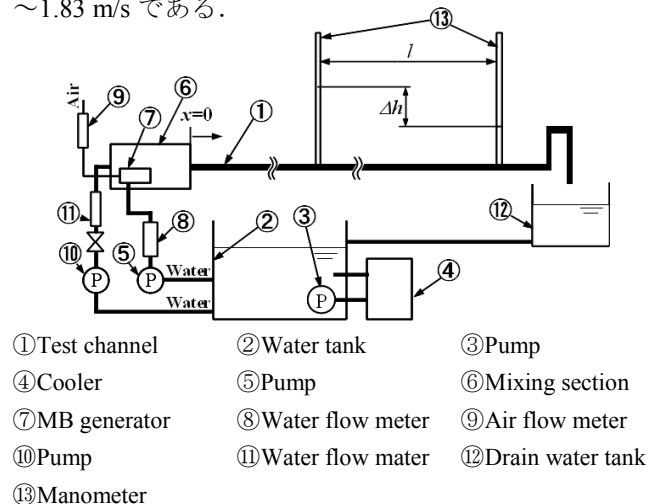


Fig. 1 Experimental equipment for measurement

3. 実験結果および考察

3.1 気泡径 Table 1にピーク位置、ピーク高さ、平均気泡径、最小気泡径、最大気泡径を示す。Fig. 2に4種類のMB発生装置に対する気泡径分布を示す。発生装置によってピーク位置が異なることが確認できる。超高速旋回方式では、各空気流量でピーク高さは異なるものの、ピーク位置は同じ $20\mu\text{m}$ である。加圧溶解方式では、 $30\mu\text{m}$ にピーク位置があり、ピーク高さは最も高い45%になっている。ループ流方式では、空気流

Table 1 Characteristics of bubble diameter

Microbubble generator		Peak position [μm]	Peak value [%]	Average [μm]	Minimum [μm]	Maximum [μm]
Swirling flow method	$Q_G=0$ mL/min	20	23.0	39.4	6.7	155.8
	$Q_G=40$ mL/min	20	23.3	41.0	6.7	246.7
	$Q_G=80$ mL/min	20	19.2	44.4	6.1	223.0
Pressurized dissolution method		30	45.0	34.3	6.1	78.8
Loop flow method	$Q_G=0$ mL/min	10	36.2	26.6	6.1	84.8
	$Q_G=150$ mL/min	40	20.0	62.8	9.2	466.7
H type	$Q_G=40$ mL/min	30	25.2	46.1	6.5	313.0

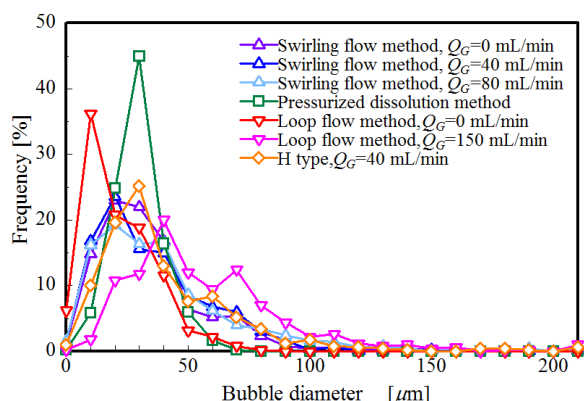


Fig. 2 Distribution of bubble diameter

量によって、ピーク位置、ピーク高さが異なる。空気流量 $Q_G=0$ mL/min では、 $10\mu\text{m}$ で 36.2 %、 $Q_G=150$ mL/min では、 $40\mu\text{m}$ で 20 %であった。H 型方式についても、ピーク位置は $30\mu\text{m}$ 、ピーク高さは 25.2 %である。平均気泡径はループ流方式において $Q_G=0$ mL/min のとき最小となり、 $Q_G=150$ mL/min のとき最大となった。またそれぞれのピーク位置も最小、最大となっている。最大気泡径は、ループ流方式の $Q_G=150$ mL/min の $466.7\mu\text{m}$ であり、最少気泡径は、測定の限界であった $6\mu\text{m}$ あたりに集中している。超高速旋回方式とループ流方式では、空気流量が多くなるにつれ気泡径も大きくなっている。

3.2 MB 水の物理化学的特性

3.2.1 DO Fig. 3 にバブリング時間に対する 4 種類の発生装置による MB 水の DO の変化率を示す。このとき、測定開始時の値(0 時間)を 1.00(破線)とする。超高速旋回方式では、空気流量 $Q_G=40, 80$ mL/min のほとんどの場合において約 5 %増加し、 $Q_G=0$ mL/min では最大約 10 %減少している。 $Q_G=0$ mL/min は空気を供給していないため、キャビテーションによって MB が発生している。そのため、MB が水面から抜けることで DO も減少していると考えられる。ループ流方式では、1 つを除いて減少しており、空気を供給している $Q_G=150$ mL/min でも減少している。 $Q_G=0$ mL/min については超高速旋回方式と同様に水面から抜けると考えられ、 $Q_G=150$ mL/min についても気泡径が他の発生装置に比べ大きいことから、水面から抜けやすいのではないかと考えられる。また、加圧溶解方式と H 型方式

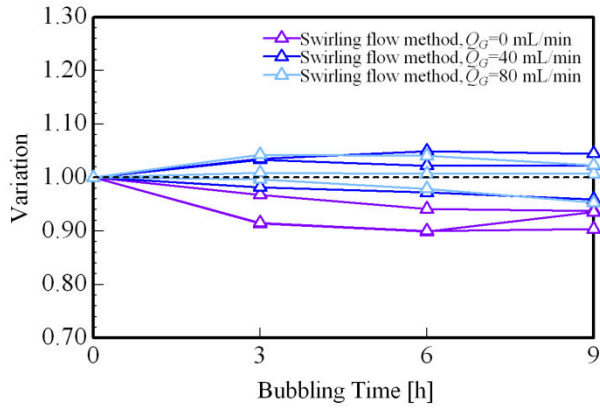
では、3 時間後に加圧溶解方式で約 12~19 %、H 型方式で約 8~11 %と、他の発生方式に比べ大きく増加することが確認できる。なお、3 時間以降はほぼ一定である。

3.2.2 密度 Fig. 4 にバブリング時間に対する 4 種類の発生装置による MB 水の密度の変化率を示す。全発生装置について、 ± 0.5 %以内の変化であるため、ほぼ一定であるとみなすことができる。

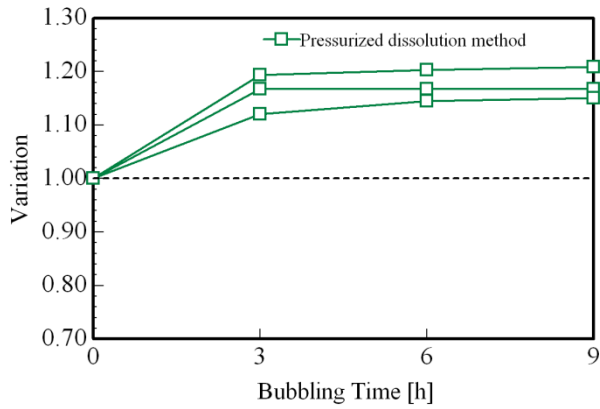
3.2.3 表面張力 Fig. 5 にバブリング時間に対する 4 種類の発生装置による MB 水の表面張力の変化率を示す。超高速旋回方式において、3 時間後に、空気流量 $Q_G=0$ mL/min では約 3~8 %、 $Q_G=40$ mL/min では約 2~4 %減少した。加圧溶解方式では、3 時間後に約 4~7 %減少したが、その後の変動は日によって異なる。ループ流方式でも、3 時間後に約 6~12 %の増加と約 3~7 %の減少に分かれ、その後の変動は、ばらついている。これはコンタミネーションによる影響ではないかと考えられる。H 型方式では、9 時間後に約 16~23 %減少している。氷室らによる研究⁽⁴⁾では、6 時間で約 2 %減少している。しかし、今回は最小でも約 16 %減少しており、氷室らよりも大きな減少が見られた。これは、発生装置の大きさやポンプなどの実験装置が異なることによる違いであると考えられる。

3.2.4 動粘度 Fig. 6 にバブリング時間に対する 4 種類の発生装置による MB 水の動粘度の変化率を示す。超高速旋回方式は、空気流量 $Q_G=0$ mL/min の 1 つを除いて、 ± 1 %以内の変化であるため、ほぼ一定であるとみなすことができる。加圧溶解方式、ループ流方式では、9 時間後には -1 %以内の変化に収まっているため、ほぼ一定であるとみなすことができる。H 型方式においては、ほぼ一定である。氷室らによる研究⁽⁴⁾では、6 時間で約 5 %減少することから、この結果は一致しない。これについても、発生装置の大きさやポンプなどの実験状況が異なることによる違いであると考えられる。また、超高速旋回方式、ループ流方式では、空気流量による変化はあまり見られなかった。

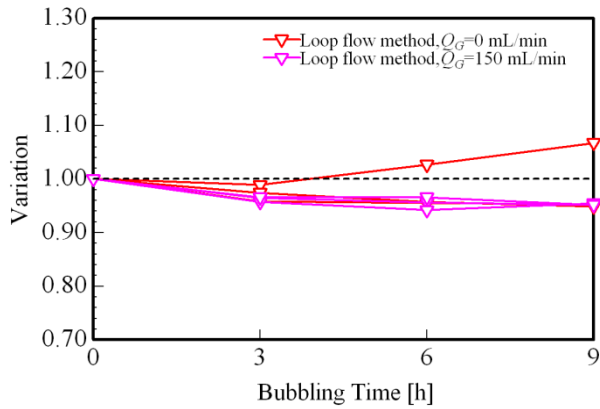
これらの結果より、本実験装置および発生環境では、発生方式によって MB 水の物理化学的特性は異なるといえる。また、動粘度と密度がほぼ一定であることから、粘度についてもほぼ一定であると考えられる。



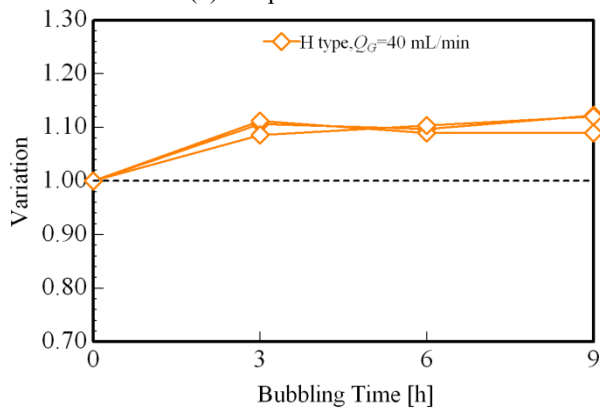
(a) Swirling flow method



(b) Pressurized dissolution method

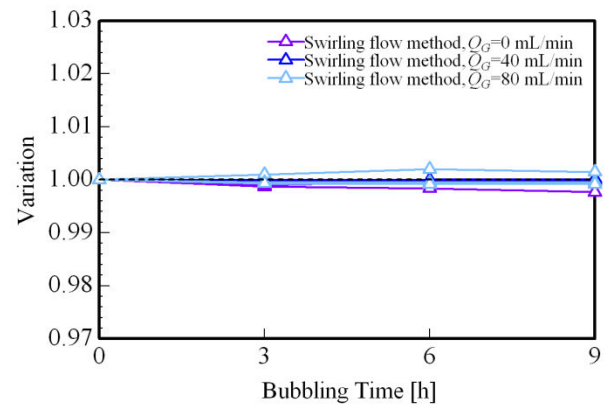


(c) Loop flow method

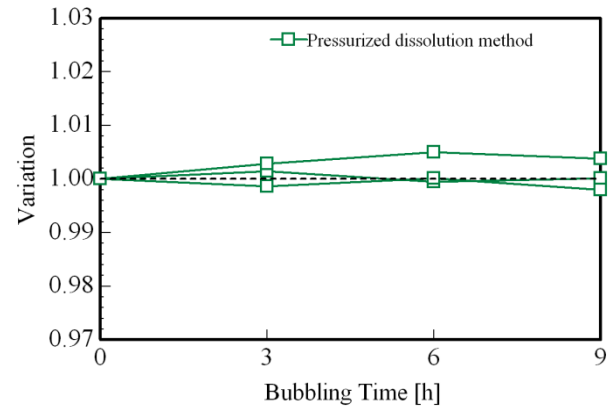


(d) H type

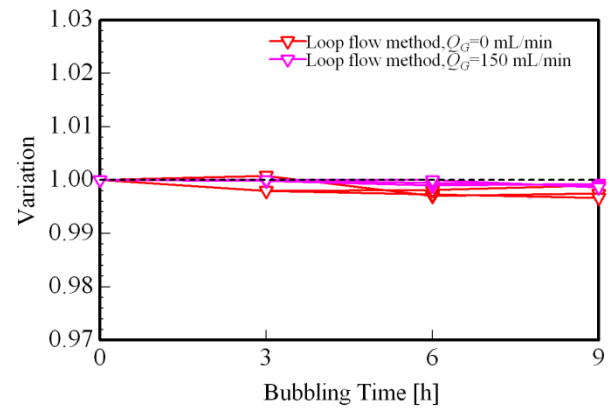
Fig. 3 Variation of dissolved oxygen



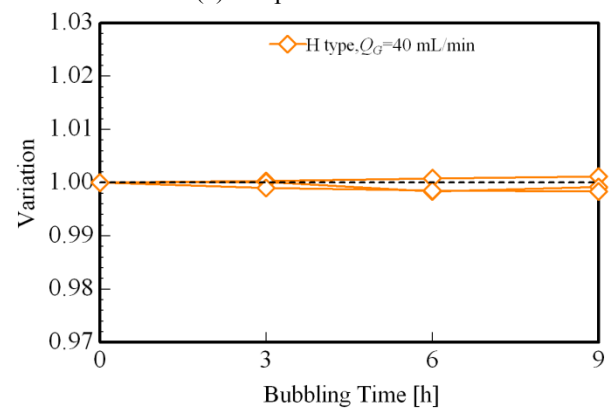
(a) Swirling flow method



(b) Pressurized dissolution method

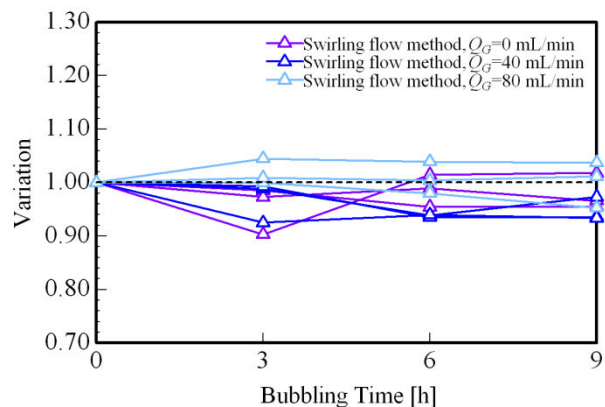


(c) Loop flow method

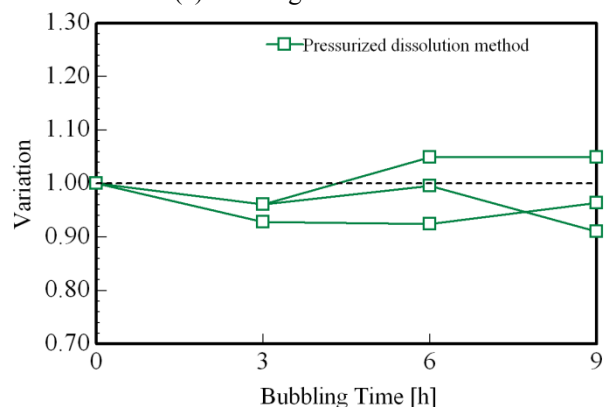


(d) H type

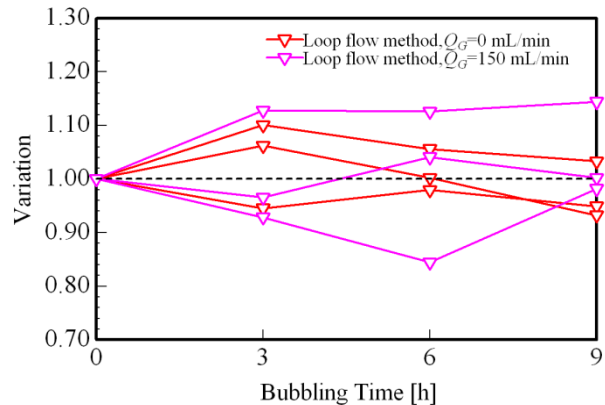
Fig. 4 Variation of density



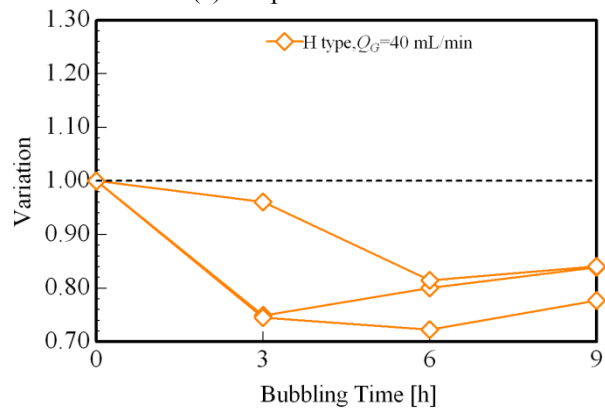
(a) Swirling flow method



(b) Pressurized dissolution method

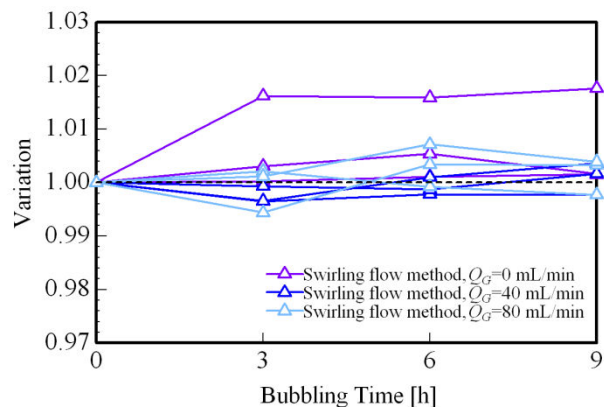


(c) Loop flow method

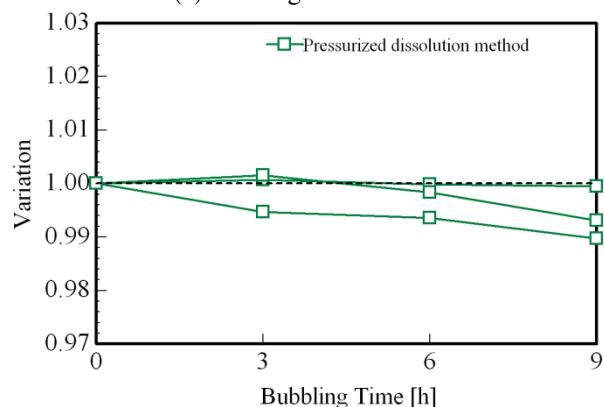


(d) H type

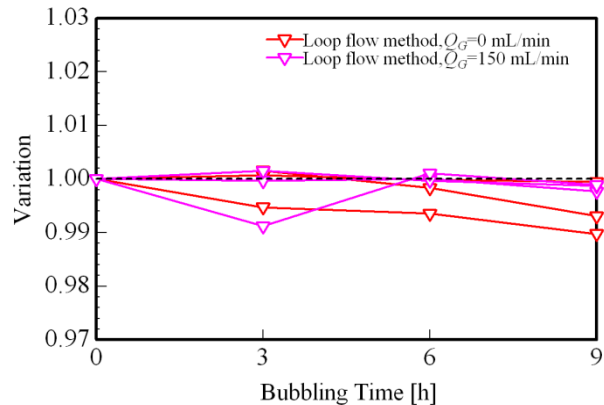
Fig. 5 Variation of surface tension



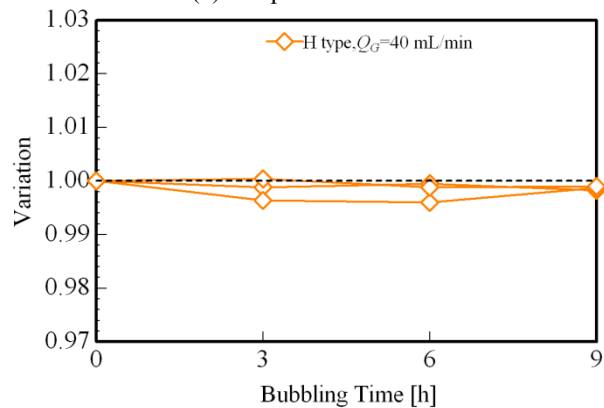
(a) Swirling flow method



(b) Pressurized dissolution method



(c) Loop flow method



(d) H type

Fig. 6 Variation of kinetic viscosity

3.3 摩擦圧力損失 Fig. 7 に水単相流を 1.00 (破線) とした場合のMB 流のレイノルズ数 Re に対する管摩擦係数 λ の変化率を示す。なお、バブリング時間は 1 時間である。超高速旋回方式において、 $Re < 30000$ では空気流量によって異なった変動を示したが $30000 < Re < 50000$ では各空気流量において約 2 %の低減が確認できた。加圧溶解方式では水単相流に比べ、ほぼ Re 全域で λ の変化は見られなかった。ループ流方式では、各空気流量において Re 全域で増加した。 Re が増加するごとに増加率も増加し、空気流量 $Q_G=0$ mL/min では最大約 7 %, $Q_G=150$ mL/min では最大 8 %増加した。H 型方式でも最大 8 %増加した。

これまで、加圧や減圧などの圧力効果によって発生させた MB と強制外力によって MB を発生させたものでは摩擦圧力損失効果が異なり、後者では MB の気泡径が小さいほど摩擦圧力損失低減効果が増大するという報告がある⁽²⁾。加圧溶解方式とループ流方式の $Q_G=0$ mL/min では、圧力効果によって MB を発生させているため、平均気泡径が小さいにもかかわらず (Table 1 参照)、摩擦圧力損失低減効果は得られなかった。これらにより、MB による摩擦圧力損失低減率は気泡径のみに依存するのではなく、MB の発生原理に起因すると考えられる。また、3.2 節より粘度と密度はほぼ一定であることから、2.3 節の式(1)において粘度と密度を一定として扱うことは妥当である。そのため、摩擦圧力損失低減効果を評価するためには、乱流の速度変動による応力や速度勾配が重要であると考えられる。

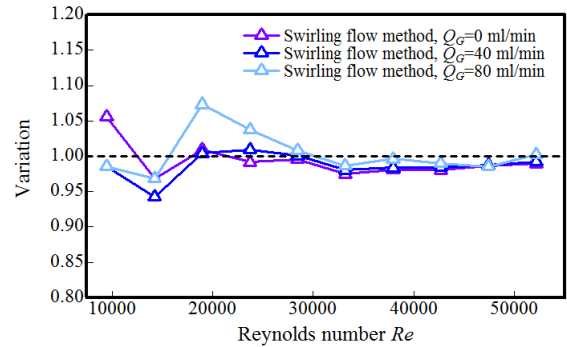
4. 結言

本研究では、以下の結論を得た。

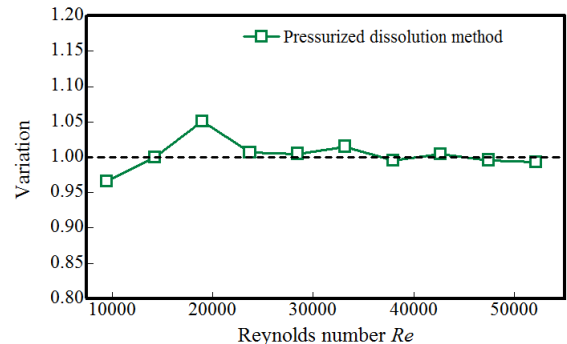
- (1)発生方式によって気泡径分布および物理化学的特性のバブリング時間に対する様相が異なった。
- (2)密度と動粘度は、各発生装置において、ほぼ一定である。DO は、加圧溶解方式と H 型方式では大きく増加、表面張力は、H 型方式のみで大きく減少した。
- (3)摩擦圧力損失は発生方式に依存する。また、気泡径の大きさも発生方式に依存するが、摩擦圧力損失の低減とは整合性がなく、気泡径のみに依存しない。
- (4)MB 流における摩擦圧力損失低減メカニズムの提案式について、粘度と密度を一定として扱うことは妥当である。

参考文献

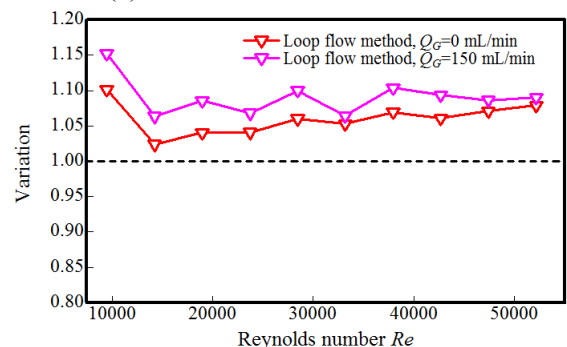
- (1)上入佐ら:「マイクロバブルによる船舶抵抗軽減」, 第 2 回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム, pp. 7-12, 2007.
- (2)前田ら:「マイクロバブルによる摩擦圧力損失低減に関する研究」, 日本混相流学会年会講演会講演論文集, pp. 246-247, 2011.
- (3)星野ら:「水平管内マイクロバブル乱流の摩擦圧力損



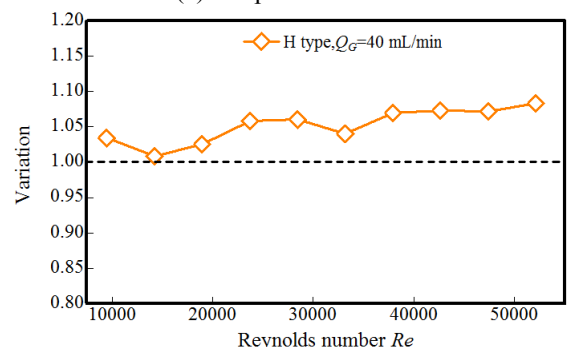
(a) Swirling flow method



(b) Pressurized dissolution method



(c) Loop flow method



(d) H type

Fig. 7 Variation of λ

- 失特性」, 日本混相流学会年会講演会講演論文集, pp. 224-227, 2009.
- (4)氷室:「マイクロ・ナノバブルの物理化学的性質と機能性」, 建設コンサルタントのためのマイクロ・ナノバブル技術フォーラム講演論文集, pp. 11-21, 2005.
- (5)佐藤ら:「気泡流の液速度分布に関する研究」, 機械学会論文集, 41 巻 351 号, pp. 3215-3223, 1975.

画像センサによる三次元位置検出を用いた 移動物体の軌道予測手法

竹森有祐* 小林洋二**

A Trajectory Prediction Method of a Moving Object Using Position Detection in 3-D Space by a Vision Sensor

Yusuke TAKEMORI* Yohji KOBAYASHI**

ABSTRACT

In this paper, we propose a trajectory prediction method for a three dimensional trajectory of a table tennis ball bouncing on a table. We assume that a trajectory of the bouncing ball is separated into a linear trajectory on XY plane and a parabolic trajectory on XZ plane, and that the parabolic trajectory is attenuated in a fixed ratio in X and Z directions every bounce. After detecting position data of the bouncing ball by the stereo method or the direct linear transformation method using a vision sensor with two CCD cameras, we predict the ball trajectory by obtaining the attenuation ratio of the parabolic trajectories and parameters of the trajectories on XY and XZ planes by the least squares method. Finally, we report performance evaluation of the trajectory prediction by experiments where a manipulator hits the bouncing ball according to command of a hitting point predicted by the proposed method.

Keywords: vision sensor, trajectory prediction, parallel stereo, direct linear transformation method, manipulator

1. はじめに

近年、ロボット技術の高度化に伴い、工場の無人ラインなどの人がいない限られた環境だけでなく、人が生活する環境でタスクを行うロボットが現れてきている。そのようなロボットは、センサで取得した外界の情報によって周囲の環境を把握し、それに応じて早く正確に行動する必要がある。近年では、センサを用いて障害物を認識し、ロボットにそれらを回避させる研究⁽¹⁾や、飛来する野球ボールの軌道を予測してその到達点を算出し、ロボットにバッティング動作を実行させる研究⁽²⁾などが行われている。これらの研究では、センサによって得られた情報から未知の動きをする物体の軌道を予測し、その予測結果に応じた指令をロボットに与えることによって、ロボットを動作させている。本稿では、未知の動きをする物体の一例として台上をバウンド

しながら移動する卓球ボール（以下、球と呼ぶ）を取り上げ、画像センサを用いてその軌道を予測する手法を提案する。あわせて画像センサ、コンピュータ、マニピュレータを用いた性能評価実験の結果を報告する。

2. 軌道予測のための機器構成と動作

本稿で述べる軌道予測手法に用いる機器の構成とその配置を図1に示す。これらの機器の具体的な動作は以下の通りである。

- (1) 台の上方に平行に設置された二つの CCD カメラで台上を跳ねる球を撮影し、平行ステレオ法⁽³⁾あるいは Direct Linear Transformation Method⁽⁴⁾（以下、DLT 法と呼ぶ。）によって球の三次元位置情報を取得する。
- (2) 取得した球の三次元位置情報を用いてコンピュータで球の軌道を予測し、台のマニピュレータ側のエンドライン上方における球の到達位置座標を算出する。

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

(3) ラケットを取り付けたマニピュレータの先端を球の予測到達位置へ先回りさせたあと、マニピュレータの先端を前進させ、取り付けたラケットで打球動作を行う。

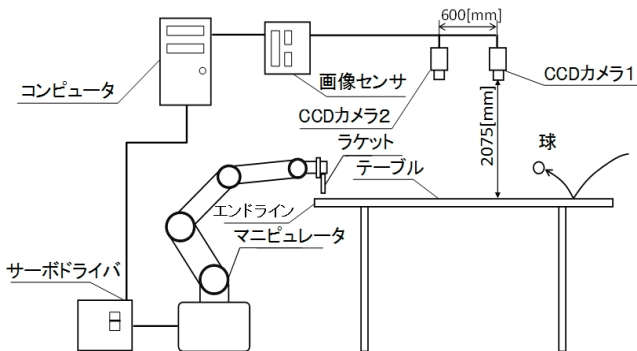


図1 使用する機器の構成と配置。

3. 三次元位置検出手法

本稿では、平行ステレオ法と DTL 法の二つを用いて、卓球台の上を跳ねながら移動する球の位置を検出した。以下にそれぞれの手法について説明する。

3.1 平行ステレオ法 平行ステレオ法とは、焦点距離などの特性が同じ二つのカメラを平行に設置して対象物を撮影し、得られた画像に生じる視差を利用して対象物の三次元空間における座標を導出する方法である。対象物を P とし、それを二つのカメラで撮影したときの、カメラ、対象物 P 、画像の関係を図2に示す。このとき、対象物 P の三次元空間座標 (X, Y, Z) は次の式で求められる。

$$X = \frac{b(x_l + x_r)}{2d}, Y = \frac{by_r}{d}, Z = \frac{bf}{d} \quad (3.1)$$

上の式において、 f はカメラの焦点距離、 (x_l, y_l) および (x_r, y_r) はそれぞれ左右の画像に投影された対象物 P の画像内における座標、 d は $d = x_l - x_r$ で定義される視差、 b は二つのカメラ間の距離である。

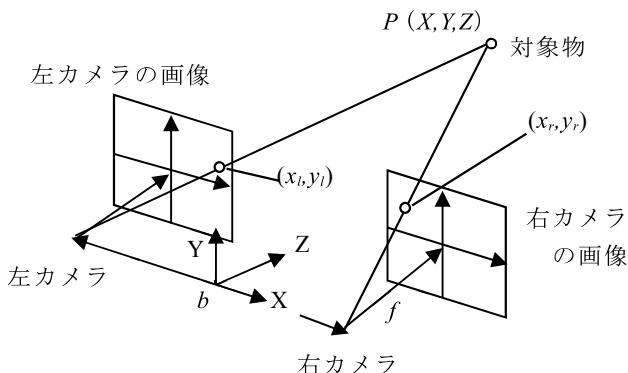


図2 平行ステレオ法の原理⁽³⁾。

平行ステレオ法による位置検出では、カメラのレンズが曲面であるために生じる画像の歪みや、カメラを設置した時の水平・鉛直方向からのずれなどの要因により、対象物の検出位置に誤差が生じる。図1において予め位置を測定した台上あるいはその上方の複数の点で球を静止させ、それらの位置と平行ステレオ法によって検出した球の位置との誤差を調べた結果、その誤差は球の位置に依存することがわかった。そこでカメラで検出した球の座標 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ に対して以下の補正式を作成し、誤差の補正を行った。

$$z(\hat{x}, \hat{z}) = \hat{z} + (0.0004\hat{x}^2 - 0.7\hat{x} + 321.1) \quad (3.2)$$

$$x(\hat{x}, z) = \frac{10}{9}(\hat{x} + 0.245z - 90) \quad (3.3)$$

$$y(x, \hat{y}) = \hat{y} + \frac{250 - \hat{y}}{1 - \frac{1}{0.00006x}} \quad (3.4)$$

3.2 DLT 法 DLT 法は、カメラ画像内における対象物の二次元座標 (u, v) と、三次元空間内における対象物の位置座標 (X, Y, Z) を用いてカメラのキャリブレーションを行う方法である。この方法では、予め三次元空間 (X, Y, Z) にある対象物を撮影し、画像内での対象物の位置 (u, v) を求める。本研究では、台の長辺方向と短辺方向にそれぞれ 100 mm の間隔で格子点を設け、それらの上方 0~400 mm の位置に球を置き、球の位置 (X, Y, Z) と、画像センサによって検出されたカメラ画像内における球の位置 (u, v) を求めた。このとき、一つの組の (u, v) と (X, Y, Z) の関係は以下の式で表される。

$$u = \frac{XP_1 + YP_2 + ZP_3 + P_4}{XP_9 + YP_{10} + ZP_{11} + 1} \quad (3.5)$$

$$v = \frac{XP_5 + YP_6 + ZP_7 + P_8}{XP_9 + YP_{10} + ZP_{11} + 1} \quad (3.6)$$

上の式において $P_1, P_2, \dots, P_{11}$ は、カメラの位置や姿勢、焦点距離などの情報を内包したカメラパラメータである。まず、これらのカメラパラメータを求める。式(3.5)、(3.6)を変形すると、

$$XP_1 + YP_2 + ZP_3 + P_4 - uXP_9 - uYP_{10} - uZP_{11} = u \quad (3.7)$$

$$XP_5 + YP_6 + ZP_7 + P_8 - vXP_9 - vYP_{10} - vZP_{11} = v \quad (3.8)$$

となる。さらに式(3.7)、(3.8)を行列とベクトルの形で表すと以下の式が得られる。

$$\begin{pmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -uX & -uY & -uZ \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -vX & -vY & -vZ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

ここでカメラ画像内の対象物の二次元座標 (u, v) と、三次元空間における対象物の位置座標 (X, Y, Z) の組の数を n として、式(3.9)を n 個並べると以下の式が得られる。

$$\begin{pmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & \cdots & u_n & v_n \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1 X_1 & -v_1 Y_1 & -v_1 Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_2 X_2 & -u_2 Y_2 & -u_2 Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -v_2 X_2 & -v_2 Y_2 & -v_2 Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_n & -u_n Y_n & -u_n Z_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -v_n X_n & -v_n Y_n & -v_n Z_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{11} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

ここで、 T は転置を表す。式(3.10)を $U = XP$ で表すと、カメラパラメータのベクトル P は次式で求められる。

$$P = (X^T X)^{-1} (X^T U) \quad (3.11)$$

つぎに、式(3.11)で得られたカメラパラメータを用いて、二次元の画像データから三次元空間内における対象物の位置座標を算出する。式(3.5)、(3.6)を変形して次式が得られる。

$$X(P_1 - uP_9) + Y(P_2 - uP_{10}) + Z(P_3 - uP_{11}) = u - P_4 \quad (3.12)$$

$$X(P_5 - vP_9) + Y(P_6 - vP_{10}) + Z(P_7 - vP_{11}) = v - P_8 \quad (3.13)$$

さらに、式(3.12)、(3.13)を行列とベクトルの形で表すと次式になる。

$$\begin{pmatrix} P_1 - uP_9 & P_2 - uP_{10} & P_3 - uP_{11} \\ P_5 - vP_9 & P_6 - vP_{10} & P_7 - vP_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u - P_4 \\ v - P_8 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

ステレオカメラのように視点が二つある場合には、一方の視点 A のカメラパラメータ $P_{A1}, P_{A2}, \dots, P_{A11}$ と画像内の対象物の二次元座標 (u_A, v_A) 、他方の視点 B のカメラパラメータ $P_{B1}, P_{B2}, \dots, P_{B11}$ と画像内の対象物の二次元座標 (u_B, v_B) を用いて、式(3.14)は以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} P_{A1} - u_A P_{A9} & P_{A2} - u_A P_{A10} & P_{A3} - u_A P_{A11} \\ P_{A5} - v_A P_{A9} & P_{A6} - v_A P_{A10} & P_{A7} - v_A P_{A11} \\ P_{B1} - u_B P_{B9} & P_{B2} - u_B P_{B10} & P_{B3} - u_B P_{B11} \\ P_{B5} - v_B P_{B9} & P_{B6} - v_B P_{B10} & P_{B7} - v_B P_{B11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_A - P_{A4} \\ v_A - P_{A8} \\ u_B - P_{B4} \\ v_B - P_{B8} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

式(3.15)を $AE = B$ で表すと、三次元空間内における対象物の位置座標 (X, Y, Z) は以下の式で求められる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = E = (A^T A)^{-1} (A^T B) \quad (3.16)$$

4. 球の軌道予測手法

4.1 サーチングエリアの設定 球の三次元位置検出を行うために、まず、サーチングエリアを設定する。サーチングエリアは、前章で述べた球の三次元位置検出を行う領域であり、台の上方に設置した二つのカメラの視野が重なる領域をサーチングエ

リアとして設定する。設定したサーチングエリアを図3に示す。球は図の右から左方向へ跳ねながら移動し、マニピュレータ側のエンドラインに到達する。

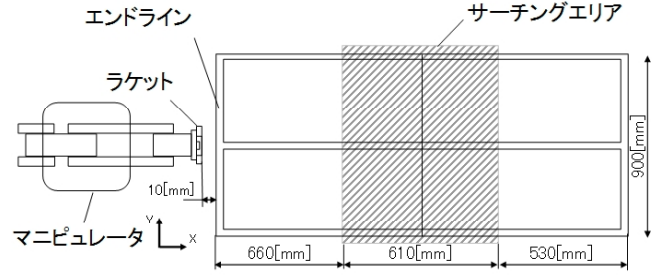


図3 サーチングエリア。

4.2 予測到達位置計算 台上を跳ねながら移動する球がサーチングエリアに到達すると、画像センサは球の位置を検出する。コンピュータはその位置情報を用いて、以下に述べる手順で図4に示すように軌道をXY平面とXZ平面に分けて軌道予測計算を行い、マニピュレータ側のエンドラインの上方における球の予測到達位置を算出する。

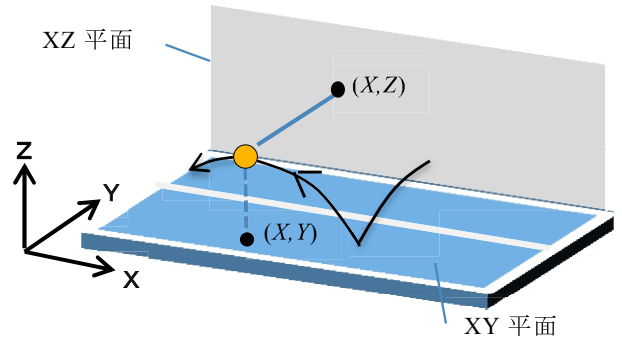


図4 XY平面とXZ平面。

4.2.1 XY平面上の軌道予測 球はXY平面上に直線状の軌道を描いて移動するものとする。そして、画像センサによって検出した球の位置のX座標とY座標の値から、一次の最小二乗法を用いて直線 $y = ax + b$ の係数 a, b を式(4.1)、(4.2)で算出し、それらを式(4.3)に代入してY軸方向の予測到達位置 y_k を算出する。なお、ここではサーチングエリアで取得した位置座標の個数を n とし、 $\sum$ は1から n 個目までの総和を表す。

$$a = \frac{n \cdot \sum(XY) - \sum X \sum Y}{n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (4.1)$$

$$b = \frac{\sum Y - a \cdot \sum X}{n} \quad (4.2)$$

$$y_k = 1800a + b \quad (4.3)$$

4.2.2 XZ 平面上の軌道予測 球は XZ 平面上に放物線状の軌道を描いて移動するものと考え、このとき、図 5 に示すように、放物線は球の弾性と台面との摩擦の影響によってバウンドするごとに X 軸方向に e_x 倍、Z 軸方向に e_z 倍されていくものと仮定する。（以下では e_x 、 e_z を減衰率とよぶ。）そして、画像センサによって検出した球の位置の X 座標と Z 座標の値から、二次の最小二乗法によって放物線 $z = ax^2 + bx + c$ の係数 a 、 b 、 c を求め、式 (4.4) を用いて台上の高さ ($Z = 0$) のときの X 座標、すなわち、最初の放物線において球が台と接触したときの X 軸方向の位置を計算する。

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.4)$$

つぎに、式 (4.5) で初期値を与え、式 (4.6)、(4.7) を用いて $X_s(m) > 1800$ になるまで繰り返し計算を行う。なお、ここで m は予測軌道において球が台と接触した回数である。

$$X_s(0) = x_2 \quad (4.5)$$

$$m = m + 1 \quad (4.6)$$

$$X_s(m) = X_s(m-1) + (x_2 - x_1) \cdot e_x^m \quad (4.7)$$

その後、式 (4.8)、(4.9) により球が台のエンドラインに達したときの予測到達高さ z_k を算出する。

$$x = x_2 - \frac{X_s(m) - 1800}{e_x^m} \quad (4.8)$$

$$z_k = (ax^2 + bx + c) \cdot e_z^m \quad (4.9)$$

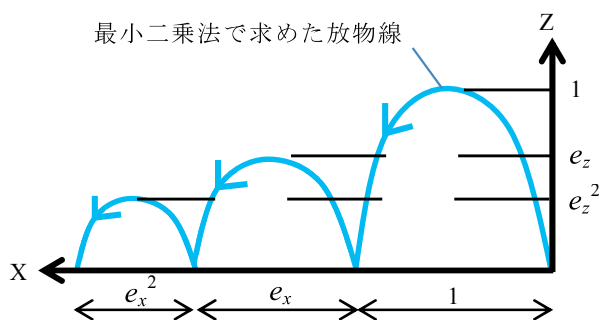


図5 球のXZ平面上の軌道のイメージ図。

4.3 減衰率の計算方法 式 (4.7)、(4.8)、(4.9) を計算するためには、球が台に接触したときの X 軸方向の減衰率 e_x と Z 軸方向の減衰率 e_z を求めておく必要がある。ここでは、以下の二つの方法で減衰率を求めた。

4.3.1 オフラインで計算する方法 これは軌道予測計算を行う前に予め e_x 、 e_z を求めておく方法である。図 6 に示すように、固定した筒の上部から球を挿入して台上を跳ねさせ、実際の軌道を計測して減衰率を求める。これを 10 回行い、その平均値を計算して減衰率を求める。

4.3.2 オンラインで計算する方法 これは軌道予測を行いながら、予測された軌道の計算結果を用いて e_x 、 e_z を求める方法である。図 7 に示すように最小二乗法で求めた一つの放物線の頂点の座標を H_1 、二つ目の放物線の頂点の座標を H_2 とし、それぞれの放物線軌道で球がバウンドしたときの X 軸方向の距離を W_1 、 W_2 とすると、減衰率 e_x 、 e_z は式 (4.10) によって求められる。

$$e_x = \frac{W_2}{W_1}, \quad e_z = \frac{H_2}{H_1} \quad (4.10)$$

この方法では、球がサーチングエリア内で台と一度以上接触する（バウンドする）ときに限り、減衰率 e_x 、 e_z を求めることができる。

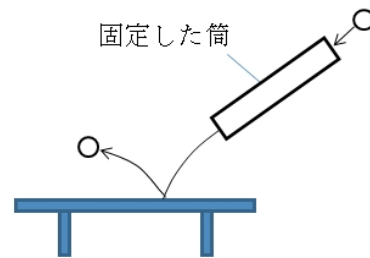


図6 減衰率を測定する際の球の放出方法。

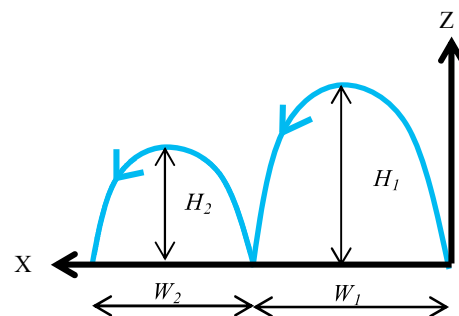


図7 減衰率の計算に必要な量。

5. 性能評価実験

5.1 実験方法 ここでは、提案した軌道予測手法の性能を評価するための実験方法について述べる。図 8 に示すように、固定した筒の上部から球を挿入し、台上へ放出して跳ねながら移動させ、提案手法によって求めた球の予測到達点を指令値としてマニピュレータへ送信し、打球動作を行う。このとき、マニピュレータが打球に成功/失敗する割合および予測到達点と実際の到達点の平均誤差を調べた。ここで、平均誤差とは、打球時のビデオ映像

から、ラケットと球の中心の距離を測って算出した誤差の平均値のことである．実験では、以下の三つの項目について評価を行った．

- (1) 球の三次元位置検出の方法の違い（平行ステレオ法／DLT 法）による軌道予測精度の変化
- (2) 減衰率の計算方法の違い（オンライン／オフライン）による軌道予測精度の変化
- (3) 球の放出角度と高さの違いによる軌道予測精度の変化

なお、本実験では図 8 に示すように、台の面に対する筒の傾き α 、球の放出高さ β をそれぞれ Case 1, Case 2 のように与え、一つの条件につき 50 回の試行を行った．

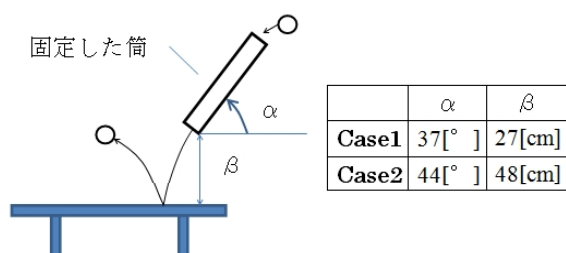


図 8 球の放出角度と高さ．

5.2 実験の結果と考察

5.2.1 三次元位置検出の方法と軌道予測精度

平行ステレオ法と DLT 法を用いて三次元位置検出を行った場合の打球成功率と平均誤差を表 1 に示す．このとき、減衰率は 4.3.1 のオフライン計算によって求め、球の放出角度と高さについては図 8 の Case 1 に設定した．

表 1 位置検出方法の違いによる性能の比較．

平行ステレオ法	打球成功率[%]	100.0
	平均誤差[mm]	31.1
DLT法	打球成功率[%]	98.0
	平均誤差[mm]	28.4

この結果より、球の三次元位置検出に平行ステレオ法を用いた場合と DLT 法を用いた場合では、打球成功率、平均誤差ともに同等の数値を示していることがわかる．なお、DLT 法の打球失敗の原因は、跳ねながら移動する球が卓球台の継ぎ目に接触して軌道が大きく変化してしまったことであった．以上のことにより、平行ステレオ法と DLT 法はともに有効であり、この二つの手法を用いた場合の軌道予測精度は同等であるといえる．

5.2.2 減衰率の計算方法と軌道予測精度

減衰率 e_x 、 e_z をオフライン計算とオンライン計算によって求めた場合の打球成功率と平均誤差を表 2 に示す．なお、ここでは三次元位置検出の方法として平行ステレオ法を用い、球の放出角度と高さについては図 8 の Case 2 に設定した．

表 2 減衰率の計算方法の違いによる性能の比較．

オンライン	打球成功率[%]	70.0
	平均誤差[mm]	62.9
オフライン	打球成功率[%]	60.0
	平均誤差[mm]	77.5

この結果より、減衰率をオンライン計算によって求めた場合は、オフライン計算によって求めた場合に比べ、打球成功率において 10 % 高い数値を示しており、平均誤差も約 15 mm 小さくなっていることがわかる．このときの誤差の分布図を図 9 に示す．誤差はいずれの場合も（マニピュレータを正面に見て）左側に偏った形で Y 軸方向に 150 mm、Z 軸方向に 300 mm の幅で生じている．打球成功率に差が生じた原因は、減衰率をオフライン計算によって求めた場合に比べ、オンライン計算によって求めた場合の方が、実際の値に近い減衰率であったためだと考えられる．また、誤差が左側に偏っている原因は、図 10 に示すように球が台上を斜めに横切る軌道となっていたため、真っ直ぐに前進して打球動作を行うマニピュレータのラケットの左半面に球が当たってしまったためであると考えられる．

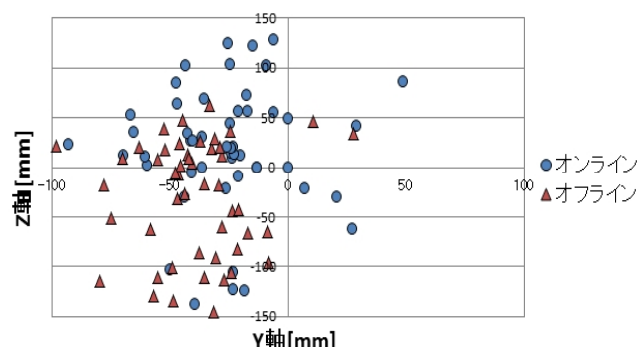


図 9 軌道予測誤差の分布図．

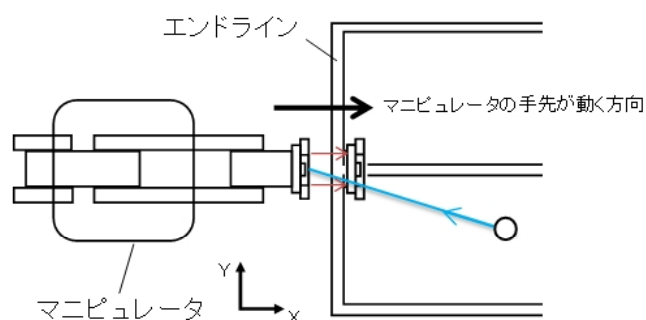


図 10 実験時の球の軌道とマニピュレータの動作．

5.2.3 球の放出角度・高さと軌道予測精度

球の放出角度と高さを変えたときの打球成功率と平均誤差を表 3 に示す．なお、ここでは三次元位置検出の方法として平行ステレオ法を用いた．

表3 球の放出角度と高さの違いによる性能の比較.

		減衰率の計算方法	
		オンライン	オフライン
Case 1	打球成功率[%]	100.0	100.0
	平均誤差[mm]	27.6	31.1
Case 2	打球成功率[%]	70.0	60.0
	平均誤差[mm]	62.9	77.5

この結果より、Case 2 では減衰率の計算方法（オンライン／オフライン）にかかわらず打球成功率が大きく低下しており、平均誤差も約 60～80 mm と大きくなっていることがわかる。打球成功率が低下した原因として、マニピュレータはラケットを X 軸方向に真っ直ぐに押し出す形で打球動作を行うため、図 11 に示すように、Case 2 では Case 1 に比べて打球可能なインターバルが短くなり、打球タイミングにわずかなずれが生じた場合でも、打球に失敗してしまうことが考えられる。また、Case 2 において平均誤差が大きくなった原因は、実際の減衰率と計算に用いた減衰率の誤差がそれぞれのケースで同等であった場合、図 12 に示すように、実際の軌道と予測軌道の誤差は Case 2 の方が大きくなるためであると考えられる。

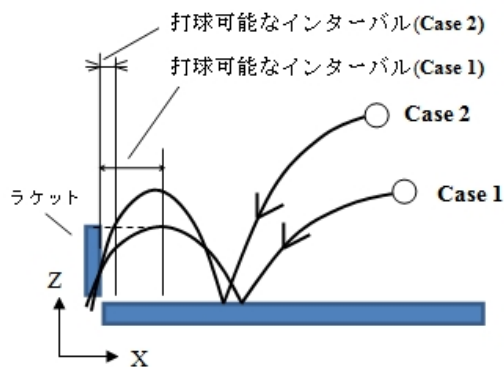


図 11 打球可能なインターバル.

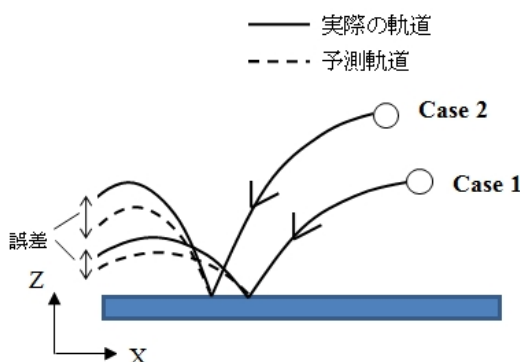


図 12 実際の球の軌道と予測軌道の誤差.

6. おわりに

本稿では、台上を跳ねながら移動する球の三次元軌道予測手法について考察した。本手法では、まず、二台の CCD カメラを用い、平行ステレオ法と DLT

法によって台上を跳ねながら移動する球の三次元位置を検出した。つぎに球の軌道を XY 平面と XZ 平面に分け、球は XY 平面に直線状の、XZ 平面に放物線状の軌道を描いて移動すると仮定し、それぞれ一次と二次の最小二乗法を用いて、球の軌道予測を行った。ここで、XZ 平面の球の軌道は、バウンドするごとに X 軸方向、Z 軸方向ともに、一定の減衰率で減衰すると仮定して、卓球台のエンドライン上方における三次元予測到達位置を算出した。提案した手法の性能評価を行うために、球の軌道予測結果にもとづいた指令値をマニピュレータに与えて打球動作を行わせ、打球成功率と平均誤差を求めた。その結果、まず、台上を跳ねながら移動する球の位置検出方法として平行ステレオ法を用いた場合と DLT 法を用いた場合では、同等の打球成功率が得られた。このことから、これら二つの手法を用いた場合の軌道予測精度は同等であることがわかった。つぎに、減衰率をオフライン計算によって求めた場合と、オンライン計算によって求めた場合の打球成功率を比較した結果、オンライン計算の方が高い精度の軌道予測が可能であることがわかった。最後に、球の放出角度と高さを変更した実験を行い、球の放出角度と高さが大きい場合には、打球成功率が低下することがわかった。この原因として、球の放出角度と高さが大きい場合の方が、マニピュレータが打球可能なインターバルが短くなるために、打球動作を成功させるために要求されるタイミングの精度が高くなることと、減衰率の誤差が存在した場合に予測軌道のずれが大きくなってしまふことの二つが考えられる。

参考文献

- (1) 寺田善貴, 田村雄介, 浅間一:「移動ロボットの軌道生成のためのすれ違いにおける歩行者の行動パターンのモデル化」, 第 24 回自律分散システム・シンポジウム資料, pp175-180, 2012.
- (2) Taku senoo, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa: “High-Speed Batting Using a Multi-Jointed Manipulator”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.1191-1196, 2004.
- (3) 出口光一郎:「ロボットビジョンの基礎」, コロナ社, pp.34-35, 2000.
- (4) 橋原孝博, 小村堯, 宮原満男:「3 次元映画撮影法の導入に伴う 16 mm 動作解析システムの確立に関する研究」, 広島大学総合科学部紀要, IV. 6 巻, pp.33-41, 1988.

変位出力を用いたプロパーな局所コントローラによる 大型柔軟宇宙構造物の分散制御

井本 廉*

小林 洋二**

Decentralized Control for Large Flexible Space Structures by Local Proper Controllers Using Displacement Output

Ren IMOTO*

Yohji KOBAYASHI**

ABSTRACT

This paper considers decentralized position and attitude control of large flexible space structures under the assumption of sensors and actuators collocation. The structures are composed of a number of subsystems interconnected by flexible links which are modelled by springs and dampers. It has been known that Direct Velocity and Displacement Feedback(DVDFB) realizes robust stabilization against uncertain characteristic parameters of the structures. However, to implement DVDFB, both velocity sensors and displacement sensors are required. For reduction of costs, it is desired not to use velocity sensors, so that we employ local proper controllers which use only displacement output. After introducing the controllers, we derive a condition for robust stabilization of closed-loop subsystems and that of an overall closed-loop system which is composed of a number of the closed-loop subsystems. Finally, we present a numerical example to show that a flexible space structure is robustly stabilized by the proposed method.

Keywords : large flexible space structure, decentralized control, displacement output, proper controller

1. はじめに

太陽光発電衛星のような大型柔軟宇宙構造物¹⁾の位置と姿勢を制御するためには、まず構造物の特性パラメータの不確かさに対して閉ループシステムをロバスト安定化する必要がある。これは、柔軟な構造物の特性パラメータを地上で正確に同定することが困難となるからである。次に、望ましい応答特性を実現するために構造物の振動を制御する必要がある。大型宇宙構造物は打上げコスト削減により、軽量の低減衰の構造になり、その結果として、大型柔軟宇宙構造物は多数の振動モードを持つためである。さらに、大型の構造物は複数のサブシステムに分けて打ち上げられ、宇宙空間で組み立てられるため、サブシステムごとにコントローラを配置することが合理的である。これらの要求を満たす手法として、センサ/アクチュエータ・コロケーションの条件の下で閉ループシステムをロバスト安定化するDirect Velocity and Displacement Feedback(DVDFB)²⁾やDirect Displacement Feedback(DDFB)^{3), 4)}が提案されている。しかしながら、DVDFBを実装するためには速度センサと変位センサが必要となり、コストと信頼性の面から望ましくない。また、変位出力のみを用いるDDFBは、文献3)において一般的な理論として提案され、コントローラのパラメータの具体的な設計手法は示されていない。

本稿では、変位出力のみを用いたプロパーな局所コントローラによって閉ループ全体システムをロバスト安定化する分散制御手法を提案する。ここで提案する手法は、文献5)に示された一次のプロパーなコントローラの次数を拡張したものであり、DDFBにおけるコントローラのパラメータの具体的な設計手法の一つとなっている。

2. 制御対象の記述

本章では ℓ 個のサブシステムからなる構造物を考える。第 i 番目のサブシステムの運動は次の二階微分方程式で表される。

$$M_i \ddot{q}_i(t) + D_i \dot{q}_i(t) + K_i q_i(t) = L_i u_i(t) \quad (1)$$

ただし、 $q_i(t) \in \mathbb{R}^{n_i}$ は変位ベクトル、 $u_i(t) \in \mathbb{R}^{r_i}$ は操作入力ベクトル、 $y_i(t) \in \mathbb{R}^{r_i}$ は変位出力ベクトルである。また $M_i, D_i, K_i \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$ はそれぞれ質量、減衰、剛性を表す行列であり、 M_i は正定行列、 D_i, K_i は半正定行列である。 D_i, K_i が半正定行列であることは、宇宙空間における剛体モードの存在による。ここで、 D_i, K_i において次式が成り立つと仮定する。

$$\text{rank} [D_i \ K_i] = \text{rank } D_i = \text{rank } K_i \quad (2)$$

(1)式において行列 $L_i \in \mathbb{R}^{n_i \times r_i}$ は構造物への入力の伝わり方を表し、アクチュエータの配置によって決まる。センサとアクチュエータを同位置・同方向に配置するセンサ/アクチュエータ・コロケーションの場合、変位

*専攻科 機械システム工学専攻

**機械工学科 教授

出力 $y_i(t)$ は次式で表される．

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

L_i^T は出力の検出のされ方を表し、センサの配置によって決まる行列である．ここで、次式を仮定する．

$$\text{rank} [D_i \ L_i] = \text{rank} [K_i \ L_i] = n_i \quad (4)$$

この式は第 i 番目のサブシステム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. サブシステムの局所コントローラ

大型柔軟宇宙構造物を制御する手法として変位センサと速度センサを用いる DVDFB²⁾ が提案されている．しかし、実装時のコスト削減と信頼性の点から、二種類のセンサを用いることは望ましくない．近似 DVDFB⁵⁾ では変位出力のみをフィードバックし、一次のプロパーな局所コントローラを用いて閉ループサブシステムを構成している．このとき、局所コントローラを位相進み補償器として実装すれば、閉ループサブシステムをロバスト安定化できることが報告されている⁵⁾．そこで、本稿では近似 DVDFB における局所コントローラの次数を拡張することで、多数の振動モードに対して位相進み補償を行う．ここで、第 i 番目のサブシステムに対する N_i 次のプロパーな局所コントローラを次式で表す．

$$u_i(s) = -\frac{\gamma_i(s + \alpha_{i1})(s + \alpha_{i2}) \cdots (s + \alpha_{iN_i})}{(s + \beta_{i1})(s + \beta_{i2}) \cdots (s + \beta_{iN_i})} R_i y_i(s) \quad (5)$$

ただし、 γ_i , α_{ik} , β_{ik} ($k = 1, 2, \dots, N_i$) は正のスカラ、 $R_i \in \mathbb{R}^{r_i \times r_i}$ は任意の正定行列である．文献 5) と同様に局所コントローラを位相進み補償器として用いることを考え、このコントローラのパラメータを

$$\alpha_{i\hat{k}-1} < \beta_{i\hat{k}-1} < \alpha_{i\hat{k}} < \beta_{i\hat{k}} < \alpha_{i\hat{k}+1} < \beta_{i\hat{k}+1} \quad (6)$$

$$(\hat{k} = 2, 3, \dots, N_i - 1)$$

と選ぶ．このとき、第 i 番目の閉ループサブシステムのブロック線図を Fig. 1 に示す．

(5) 式の局所コントローラを次の状態方程式と出力方程式で実現する．

$$\dot{z}_{ik}(t) = -\beta_{ik} z_{ik}(t) + \sqrt{\gamma_i A_{ik}} R_i^{1/2} L_i^T q_i(t) \quad (7)$$

$$u_i(t) = -\gamma_i R_i L_i^T q_i(t) + \left[\sqrt{\gamma_i A_{i1}} R_i^{1/2} \quad \cdots \quad \sqrt{\gamma_i A_{iN_i}} R_i^{1/2} \right] z_i(t) \quad (8)$$

$$z_i(t) = [z_{i1}(t) \quad \cdots \quad z_{iN_i}(t)]^T$$

ただし、 $z_{ik}(t) \in \mathbb{R}^{r_i}$ ($k = 1, 2, \dots, N_i$) であり、 $z_i(t) \in \mathbb{R}^{N_i \cdot r_i}$ はコントローラの状態ベクトルである．ここで、(6) 式が成り立つとき、付録より A_{ik} ($k = 1, 2, \dots, N_i$) は正のスカラになることに注意する．

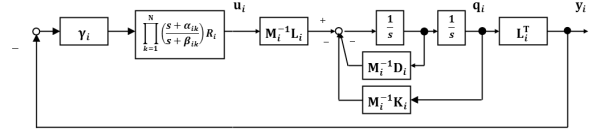


Fig. 1 Block diagram of the i -th closed-loop subsystem

4. 閉ループサブシステム

4.1 閉ループサブシステムの記述 (7), (8) 式の局所コントローラと (1), (3) 式の構造物からなる閉ループサブシステムは次式で表される．

$$M_i \ddot{q}_i(t) + D_i \dot{q}_i(t) + K_{i11} q_i(t) + K_{i12} z_i(t) = 0 \quad (9)$$

$$\dot{z}_i(t) + K_{i12}^T q_i(t) + K_{i22} z_i(t) = 0 \quad (10)$$

ただし、行列 $K_{i11} \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$, $K_{i12} \in \mathbb{R}^{n_i \times N_i \cdot r_i}$, $K_{i22} \in \mathbb{R}^{N_i \cdot r_i \times N_i \cdot r_i}$ は次の通りである．

$$K_{i11} = K_i + \gamma_i L_i R_i L_i^T$$

$$K_{i12} = -L_i \left[\sqrt{\gamma_i A_{i1}} R_i^{1/2} \quad \cdots \quad \sqrt{\gamma_i A_{iN_i}} R_i^{1/2} \right]$$

$$K_{i22} = \text{block diag} \{ \beta_{ik} I_{r_i} \}_{k=1,2,\dots,N_i}$$

4.2 閉ループサブシステムのロバスト安定性 (9), (10) 式で表される閉ループサブシステムの安定性について、次の定理が成り立つ．

[定理 1] (5) 式の局所コントローラのパラメータが (6) 式を満たすとき、(9), (10) 式で表される閉ループサブシステムは安定である．

(証明) 文献 3) の安定化条件より、(9), (10) 式で表される閉ループサブシステムは、次の条件を満たすとき安定である．

- [1] $M_i > 0$, $D_i \geq 0$
- [2] $\begin{bmatrix} K_{i11} & K_{i12} \\ K_{i12}^T & K_{i22} \end{bmatrix} > 0$
- [3] $[D_i \ K_{i12}]$: 行フルランク

条件 [1] は質量行列 M_i の正定性、減衰行列 D_i の半正定性より成り立つ．条件 [3] は (4) 式の仮定より成り立つ．条件 [2] については以下のようにして示すことができる．

条件 [2] は、次式が成り立つことと等価である．

$$K_{i22} > 0 \text{ かつ } K_{i11} - K_{i12} K_{i22}^{-1} K_{i12}^T > 0 \quad (11)$$

ここで、 $\beta_{ik} > 0$ より $K_{i22} > 0$ である．そして、 $K_{i11} - K_{i12} K_{i22}^{-1} K_{i12}^T$ を計算すると

$$K_{i11} - K_{i12} K_{i22}^{-1} K_{i12}^T$$

$$= K_i + \gamma_i L_i R_i L_i^T - \gamma_i \sum_{k=1}^{N_i} \frac{A_{ik}}{\beta_{ik}} L_i R_i L_i^T$$

$$= \frac{\gamma_i}{\prod_{k=1}^{N_i} \beta_{ik}} \left\{ \prod_{k=1}^{N_i} \beta_{ik} - \sum_{k=1}^{N_i} \left(A_{ik} \prod_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^{N_i} \beta_{ip} \right) \right\}$$

となる．この式の右辺は，付録の(A-4)式を用いることにより

$$K_{i11} - K_{i12}K_{i22}^{-1}K_{i12}^T = K_i + \gamma_i \prod_{k=1}^{N_i} \left(\frac{\alpha_{ik}}{\beta_{ik}} \right) L_i R_i L_i^T > 0 \quad (12)$$

と変形できる．(4)式の仮定から(12)式の右辺は正定になり， $K_{i11} - K_{i12}K_{i22}^{-1}K_{i12}^T > 0$ となることから，条件[2]が成り立つ．

以上のことから，(6)式が満たされるとき，上の条件[1]～[3]が成り立ち，(9)，(10)式で表される閉ループサブシステムは安定である．(証明終わり)

閉ループサブシステムの安定性は構造物の特性パラメータには依存せず， $M_i > 0$ ， $D_i \geq 0$ ， $K_i \geq 0$ であれば定理1は成り立つ．したがって，(6)式を満たすように局所コントローラのパラメータを選ぶことによって，閉ループサブシステムをロバスト安定化できる．

5. 閉ループ全体システム

5.1 閉ループ全体システムの記述 ここではバネとダンパで近似される柔軟なリンクで ℓ 個の閉ループサブシステムを柔結合した大型柔軟宇宙構造物の閉ループ全体システムの運動について記述する．結合項を付加した第 i 番目の閉ループサブシステムは次式で表される．

$$\begin{aligned} M_i \ddot{q}_i(t) + D_i \dot{q}_i(t) + K_{i11} q_i(t) + K_{i12} z_i(t) \\ = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{\ell} N_{ij} [D_{cij} \{N_{ji}^T \dot{q}_j(t) - N_{ij}^T \dot{q}_i(t)\}] \\ + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{\ell} N_{ij} [K_{cij} \{N_{ji}^T q_j(t) - N_{ij}^T q_i(t)\}] \\ \dot{z}_i(t) + K_{i12}^T q_i(t) + K_{i22} z_i(t) = 0 \\ i = 1, 2, \dots, \ell \end{aligned}$$

ただし，行列 N_{ij} はサブシステムの結合の仕方を表し，第 i 番目のサブシステムにおける第 j 番目のサブシステムとの結合点の配置によって決まる． D_{cij} ， K_{cij} はそれぞれサブシステムの結合に用いられる柔軟なリンクのダンパ，バネの特性を表す正定行列である．また，第 i 番目と第 j 番目のサブシステムにおいて， $q_i(t) = 0$ ， $q_j(t) = 0$ のとき，結合に用いられるバネは自然長であるものとする．このとき，閉ループ全体システムは次式のように表される．

$$\tilde{M} \ddot{\tilde{q}}(t) + \tilde{D} \dot{\tilde{q}}(t) + \tilde{K}_{11} \tilde{q}(t) + \tilde{K}_{12} \tilde{z}(t) = 0 \quad (13)$$

$$\dot{\tilde{z}}(t) + \tilde{K}_{12}^T \tilde{q}(t) + \tilde{K}_{22} \tilde{z}(t) = 0 \quad (14)$$

ただし，ベクトルと行列は以下に示す通りである．

$$\tilde{q}(t) = [q_1^T(t) \quad q_2^T(t) \quad \cdots \quad q_\ell^T(t)]^T$$

$$\tilde{z}(t) = [z_1^T(t) \quad z_2^T(t) \quad \cdots \quad z_\ell^T(t)]^T$$

$$\tilde{M} = \text{block diag}\{M_i\}_{i=1,2,\dots,\ell}$$

$$\tilde{D} = \text{block diag}\{D_i\}_{i=1,2,\dots,\ell} + \sum_{i=1}^{\ell-1} \sum_{j=i+1}^{\ell} \tilde{N}_{ij} D_{cij} \tilde{N}_{ij}^T$$

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{11} = \text{block diag}\{K_i + \gamma_i L_i R_i L_i^T\}_{i=1,2,\dots,\ell} \\ + \sum_{i=1}^{\ell-1} \sum_{j=i+1}^{\ell} \tilde{N}_{ij} K_{cij} \tilde{N}_{ij}^T \end{aligned}$$

$$\tilde{K}_{12} = \text{block diag}\{K_{i12}\}_{i=1,2,\dots,\ell}$$

$$\tilde{K}_{22} = \text{block diag}\{K_{i22}\}_{i=1,2,\dots,\ell}$$

なお，行列 $\tilde{N}_{ij}$ はサブシステムの結合によって決まり，次式で表されるように第 i ブロックは N_{ij} ，第 j ブロックは $-N_{ji}$ ，それ以外の要素はすべて0となる行列である．

$$\tilde{N}_{ij} = [\cdots \quad N_{ij}^T \quad \cdots \quad -N_{ji}^T \quad \cdots]^T \quad (15)$$

$\begin{matrix} & & i & & j \end{matrix}$

5.2 閉ループ全体システムのロバスト安定性 前節の(13)，(14)式で表される閉ループ全体システムの安定性について，次の定理が成り立つ．

[定理2] 閉ループ全体システム(13)，(14)式において，すべてのサブシステムの局所コントローラのパラメータが

$$\alpha_{ik-1} < \beta_{ik-1} < \alpha_{ik} < \beta_{ik} < \alpha_{ik+1} < \beta_{ik+1} \quad (16)$$

($\hat{k} = 2, 3, \dots, N_i - 1$, $i = 1, 2, \dots, \ell$)

を満たすとき，閉ループ全体システムは安定である．(証明) 定理1の証明と同様に，文献3)の安定化条件より，(13)，(14)式の係数行列が次式を満たすとき，閉ループ全体システムは安定である．

$$\begin{aligned} [1]' \quad \tilde{M} > 0, \quad \tilde{D} \geq 0 \\ [2]' \quad \begin{bmatrix} \tilde{K}_{11} & \tilde{K}_{12} \\ \tilde{K}_{12}^T & \tilde{K}_{22} \end{bmatrix} > 0 \\ [3]' \quad [\tilde{D} \quad \tilde{K}_{12}] : \text{行フルランク} \end{aligned} \quad (17)$$

条件[1]'は $\tilde{M} > 0$ ， $\tilde{D} \geq 0$ であることより成り立つ．条件[3]'は(4)式の仮定より成り立つ．また，条件[2]'は $\tilde{K}_{22} > 0$ かつ $\tilde{K}_{11} - \tilde{K}_{12} \tilde{K}_{22}^{-1} \tilde{K}_{12}^T > 0$ が成り立つことと等価であり，この二式が成り立つことは以下のようにして示すことができる．

まず， $\beta_{ik} > 0$ より $\tilde{K}_{22} > 0$ である．そして， $\tilde{K}_{11} - \tilde{K}_{12} \tilde{K}_{22}^{-1} \tilde{K}_{12}^T$ を計算すると

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{11} - \tilde{K}_{12} \tilde{K}_{22}^{-1} \tilde{K}_{12}^T \\ = \text{block diag} \left\{ K_i + \gamma_i \prod_{k=1}^{N_i} \left(\frac{\alpha_{ik}}{\beta_{ik}} \right) L_i R_i L_i^T \right\}_{i=1,2,\dots,\ell} \\ + \sum_{i=1}^{\ell-1} \sum_{j=i+1}^{\ell} \tilde{N}_{ij} K_{cij} \tilde{N}_{ij}^T \end{aligned}$$

となる．この右辺第一項は(4)式の仮定より

$$\text{block diag} \left\{ K_i + \gamma_i \prod_{k=1}^{N_i} \left(\frac{\alpha_{ik}}{\beta_{ik}} \right) L_i R_i L_i^T \right\}_{i=1,2,\dots,\ell} > 0$$

となり，第二項は少なくとも半正定であるため， $\tilde{K}_{11} - \tilde{K}_{12} \tilde{K}_{22}^{-1} \tilde{K}_{12}^T > 0$ となる．よって，条件[2]’が成り立つ．

以上のことから，(16)式が満たされるとき，条件[1]’～[3]’が成り立ち，(13)，(14)式で表される閉ループ全体システムは安定である．（証明終わり）

閉ループサブシステムの場合と同様に，閉ループ全体システムの安定性は構造物の特性パラメータには依存せず， $\tilde{M} > 0$ ， $\tilde{D} \geq 0$ ， $\tilde{K} \geq 0$ であれば定理 2 は成り立つ．したがって，(16)式を満たすように局所コントローラのパラメータを選ぶことによって，閉ループ全体システムをロバスト安定化できる．

6. 数値例

6.1 制御対象の記述 例としてFig. 2のような柔軟宇宙構造物を考える．Fig. 2では，二つの剛体がバネとダンパで近似される柔軟なリンクによって縦方向に結合された宇宙構造物を一つのサブシステムとし，二つのサブシステムが横方向に柔軟なリンクで柔結合されているものとする．第*i*番目のサブシステムの第*j*番目の剛体の質量を m_{ij} ，慣性モーメントを J_{ij} で表す．各剛体は x_{ij} 方向と y_{ij} 方向の並進運動と，質量中心 O_{ij} 回りの θ_{ij} 方向の回転運動を行うものとする．また，剛体を結合する縦方向のリンクのダンパ定数とバネ定数を d_{vi} ， k_{vi} で表し，横方向のリンクのダンパ定数とバネ定数を d_{ci} ， k_{ci} で表す．結合点 ijk は第*i*サブシステムの第*j*番目の剛体における*k*番目の結合点を表し， ℓ_{ijk} は剛体の質量中心から結合点 ijk までの距離を表す． ψ_{ijk} は質量中心と結合点 ijk を結ぶ線分と剛体の辺がなす角度を表し， ϕ_{ijk} は剛体の辺と斜めに取り付けられた柔軟なリンクがなす角度を表す．センサおよび

アクチュエータは剛体11と剛体22の質量中心に配置される．センサは剛体 ii ($i = 1, 2$)の変位 x_{ii} ， y_{ii} と角変位 θ_{ii} を検出し，アクチュエータは操作入力として x_{ii} 方向 y_{ii} 方向に力を加え，質量中心 O_{ii} 回りにトルクを加えるものとする．なお，すべての剛体において $x_{ij} = 0$ ， $y_{ij} = 0$ ， $\theta_{ij} = 0$ で静止しているとき，剛体間の柔軟なリンクのダンパとバネにより発生する力およびトルクは0であるとする．第*i*番目のサブシステムの運動は，変位ベクトルを

$$q_i(t) = [x_{i1}(t) \ y_{i1}(t) \ \theta_{i1}(t) \ x_{i2}(t) \ y_{i2}(t) \ \theta_{i2}(t)]^T$$

と選ぶことにより，サブシステムの運動を(1)，(3)式の形で表すことができる．なお，そのとき(1)式の係数行列は次式で表される．

$$M_i = \text{diag}\{m_{i1}, m_{i1}, J_{i1}, m_{i2}, m_{i2}, J_{i2}\}$$

$$D_i = \begin{bmatrix} N_{i1} \\ -N_{i2} \end{bmatrix} D_{vi} \begin{bmatrix} N_{i1}^T & -N_{i2}^T \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} N_{i1} \\ -N_{i2} \end{bmatrix} K_{vi} \begin{bmatrix} N_{i1}^T & -N_{i2}^T \end{bmatrix}$$

$$N_{i1} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -\cos \phi_{i11} \\ 1 & 1 & \sin \phi_{i11} \\ -\ell_{i11} \cos \psi_{i11} & \ell_{i12} \cos \psi_{i12} & -\ell_{i11} \sin(\psi_{i11} + \phi_{i11}) \end{bmatrix}$$

$$N_{i2} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -\cos \phi_{i22} \\ 1 & 1 & \sin \phi_{i22} \\ -\ell_{i21} \cos \psi_{i21} & \ell_{i22} \cos \psi_{i22} & \ell_{i22} \sin(\psi_{i22} + \phi_{i22}) \end{bmatrix}$$

$$D_{vi} = \text{diag}\{d_{vi1}, d_{vi2}, d_{vi3}\}$$

$$K_{vi} = \text{diag}\{k_{vi1}, k_{vi2}, k_{vi3}\}$$

$$L_1 = \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad L_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix}$$

ここで， N_{i1} ， N_{i2} は，第*i*番目のサブシステム内の剛体の結合の仕方を表し， D_{vi} ， K_{vi} はサブシステム内の剛体を柔結合するリンクのダンパとバネの特性を表す行列である．

6.2 コントローラのパラメータの決定 ここで，宇宙構造物の剛体の質量[kg]と慣性モーメント[kg m²]，結合に用いる柔軟なリンクのダンパ定数[Ns/m]とバネ定数[N/m]，リンク長 ℓ_{ijk} [m]とリンクの取り付け角 ψ_{ijk} [rad]， ϕ_{ijk} [rad]を次のように与える．

Table 1 Parameters of the space structure in Fig. 2

m_{11}	1	m_{12}	5	m_{21}	1	m_{22}	1.5
J_{11}	50	J_{12}	80	J_{21}	20	J_{22}	40
k_{vij}	5	k_{cij}	5	d_{vij}	0.01	d_{cij}	0.01
ℓ_{ijk}	1	ψ_{ijk}	$\pi/3$	ϕ_{ijk}	$\pi/3$		

このとき，第*i*番目のサブシステムは三つの角周波数 ω_{ij} ($i = 1, 2$ ， $j = 1, 2, 3$)の振動モードをもつ．ここでは，これらの角周波数において位相を進めるようにコントローラのパラメータを決定し，振動の抑制を図る．

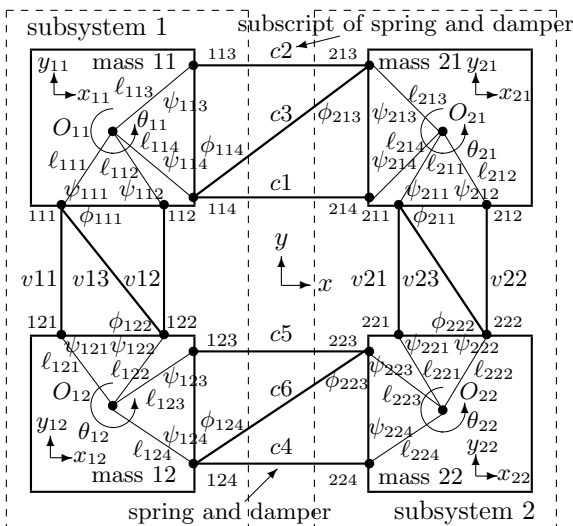


Fig. 2 Space structure

そのために、三次のプロパーな局所コントローラを用いる。ただし、二つのサブシステムは異なる角周波数に振動モードを持つため、サブシステム毎に局所コントローラのパラメータを設計する。第 i サブシステムの局所コントローラを次式で表す。

$$u_i(s) = -\frac{\gamma_i(s + \alpha_{i1})(s + \alpha_{i2})(s + \alpha_{i3})}{(s + \beta_{i1})(s + \beta_{i2})(s + \beta_{i3})} R_i y_i(s) \quad (18)$$

ここで、第 j 番目($j = 1, 2, 3$)の位相進み要素において角周波数を ω_{ij} [rad/s]、最大位相進み量を Φ_{mij} [degree]、折点角周波数を $1/T_{ij}$ で表すと、次式が成り立つ。

$$\omega_{ij} = \frac{1}{T_{ij}\sqrt{a_{ij}}}, \quad \sin \Phi_{mij} = \frac{a_{ij} - 1}{a_{ij} + 1} \quad (19)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{a_{ij}T_{ij}}, \quad \beta_{ij} = \frac{1}{T_{ij}} \quad (i = 1, 2, j = 1, 2, 3)$$

ただし、 a_{ij} は1以上のスカラーである。位相進み量 Φ_{mij} を30 [degree] ($i = 1, 2, j = 1, 2, 3$)とすると、 α_{ij} , β_{ij} をTable 2のように決定することができる。また、これらの値は定理2の閉ループ全体システムの安定化条件(16)式を満たしている。

Table 2 Parameters of local controllers

α_{11}	0.164	β_{11}	0.493	α_{21}	0.248	β_{21}	0.744
α_{12}	0.618	β_{12}	1.855	α_{22}	0.746	β_{22}	2.239
α_{13}	2.379	β_{13}	7.136	α_{23}	2.805	β_{23}	8.416

次に、速応性を向上させるために各サブシステムの γ_i を次式で与える。

$$\gamma_i = 3 \prod_{j=1}^N \left(\frac{\beta_{ij}}{\alpha_{ij}} \right), \quad i = 1, 2 \quad (20)$$

Table 2と(20)式より、 $\gamma_i = 81.0$ ($i = 1, 2$)となる。

6.3 閉ループ全体システムの初期値応答 ここでは、閉ループサブシステムを横方向に柔結合して得られる閉ループ全体システムの初期値応答を計算し、安定性を評価する。初期値として

$$\begin{aligned} q_1(0) &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ q_2(0) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & -0.1 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (21)$$

を与えた場合の初期値応答をFig. 3, Fig. 4に示す。

Fig. 3, Fig. 4より、閉ループ全体システムの初期値応答は原点に収束しており、閉ループ全体システムは安定化されていることがわかる。

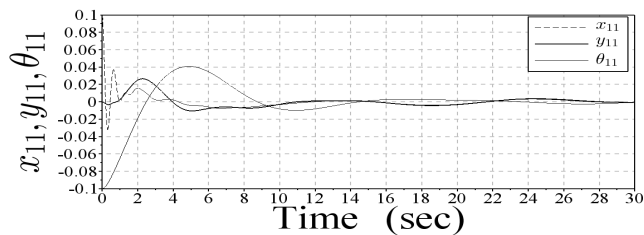


Fig. 3 Initial-state responses of subsystem 1

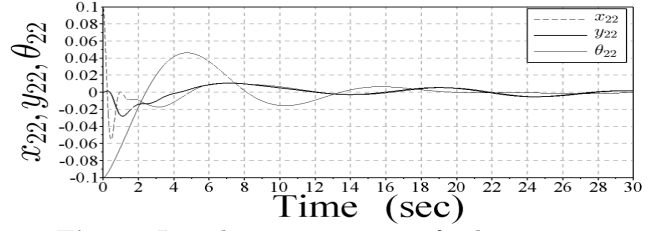


Fig. 4 Initial-state responses of subsystem 2

6.4 閉ループ全体システムのロバスト安定化 ここでは、構造物の特性パラメータの不確かさにより、剛体の質量と慣性モーメント、リンクのパネ定数とダンパ定数が設計モデルと実システムの間で異なる場合を考える。各剛体の質量と慣性モーメント、リンクのパネ定数が、設計モデルではTable 1, 実システムではTable 3で与えられるものとする。ただし、各剛体のリンク長とリンクの取り付け角はTable 1と同じ値であるとするとする。

Table 3 Parameters of space structures with uncertainty of characteristic parameters

m_{11}	5	m_{12}	10	m_{21}	5	m_{22}	15
J_{11}	80	J_{12}	100	J_{21}	40	J_{22}	60
k_{vij}	10	k_{cij}	10	d_{vij}	0.001	d_{cij}	0.001

Table 3の特性パラメータを持つ構造物を、6.2で設計した局所コントローラによって制御した閉ループ全体システムの初期値応答をFig. 5, Fig. 6に示す。なお、初期値は(21)式で与えた。

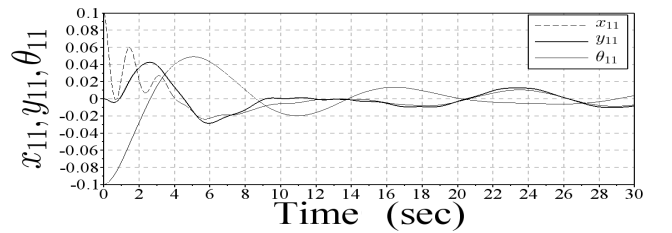


Fig. 5 Initial-state responses of subsystem 1 with characteristic parameters in Table 3

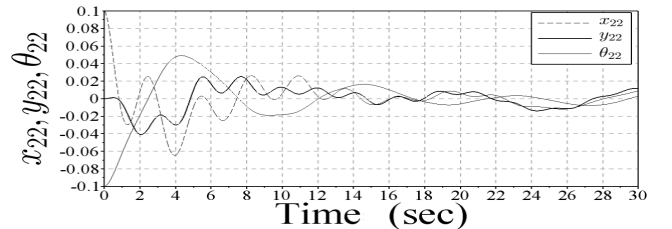


Fig. 6 Initial-state responses of subsystem 2 with characteristic parameters in Table 3

Fig. 5, Fig. 6より構造物の特性パラメータの値に不確かさが存在しても、閉ループ全体システムの初期値応答は原点に収束することがわかる。したがって、閉ループ全体システムはロバスト安定化されている。

7. おわりに

本稿では、大型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局所コントローラによる分散制御手法を提案した。まず、大型宇宙構造物をサブシステムごとに記述し、プロパーな局所コントローラに変位出力のみをフィードバックして閉ループサブシステムを構成する手法を提案した。次に、閉ループサブシステムをバネとダンパで近似される柔軟なリンクで柔結合し、閉ループ全体システムを構成する手法を提案した。そしてこれらの手法により、閉ループサブシステムおよび閉ループ全体システムをロバスト安定化できることを示した。

最後に、提案法の有効性を示すために、二つのサブシステムからなる柔軟宇宙構造物を分散制御する数値例を与えた。そこでは、共振角周波数ごとに位相進み補償を行い、かつロバスト安定化条件を満たすように局所コントローラのパラメータを決定することによって、閉ループ全体システムを安定化できることを示した。さらに、構造物の特性パラメータの値に不確かさが存在しても、閉ループ全体システムの安定性が保たれ、提案法によって閉ループ全体システムをロバスト安定化できることを示した。

付録

(5)式で表されるコントローラは

$$u_i(s) = -\gamma_i \prod_{k=1}^{N_i} \left(\frac{s + \alpha_{ik}}{s + \beta_{ik}} \right) \quad (\text{A-1})$$

$$= -\gamma_i \left[1 - \left\{ \prod_{k=1}^{N_i} (s + \beta_{ik}) - \prod_{k=1}^{N_i} (s + \alpha_{ik}) \right\} / \prod_{k=1}^{N_i} (s + \beta_{ik}) \right] \quad (\text{A-2})$$

と変形できる。また、(A-1)式を部分分数分解すると

$$u_i(s) = -\gamma_i \left[1 - \sum_{k=1}^{N_i} \left(\frac{A_{ik}}{s + \beta_{ik}} \right) \right] \quad (\text{A-3})$$

と表すことができる。ただし、 A_{ik} はスカラである。(A-2)、(A-3)式より次の関係式が得られる。

$$\prod_{k=1}^{N_i} (s + \beta_{ik}) - \prod_{k=1}^{N_i} (s + \alpha_{ik}) = \sum_{k=1}^{N_i} \left\{ A_{ik} \prod_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^{N_i} (s + \beta_{ip}) \right\} \quad (\text{A-4})$$

また、上式は

$$S = T \hat{A} \quad (\text{A-5})$$

と表すことができる。ただし $S \in \mathbb{R}^{N_i}$ における第 k 行成分、 $T \in \mathbb{R}^{N_i \times N_i}$ における第 k 行、第 m 列成分、

$\hat{A} \in \mathbb{R}^{N_i}$ における第 k 行成分は、それぞれ次に示す通りである。

$$S(k) = \sum_{p_1=1}^{N_i+1-k} \sum_{p_2=2}^{N_i+2-k} \cdots \sum_{p_k=k}^{N_i} (\beta_{ip_1} \beta_{ip_2} \cdots \beta_{ip_k} - \alpha_{ip_1} \alpha_{ip_2} \cdots \alpha_{ip_k})$$

$$T(k, m) = \begin{cases} 1 & : k=1 \text{ のとき} \\ \sum_{\substack{p_1=p_0 \\ p_1 \neq m}}^{N_i+2-k} \sum_{\substack{p_2 > p_1 \\ p_2 \neq m}}^{N_i+3-k} \cdots \sum_{\substack{p_{k-1} > p_{k-2} \\ p_{k-1} \neq m}}^{N_i} \beta_{ip_1} \beta_{ip_2} \cdots \beta_{ip_{k-1}} & : k \neq 1 \text{ のとき, ただし } p_0 = 1 \end{cases}$$

$$\hat{A}(k) = A_{ik}$$

$$k = 1, 2, \dots, N_i, m = 1, 2, \dots, N_i$$

ここで、(16)式の仮定より

$$\alpha_{i\hat{k}-1} < \beta_{i\hat{k}-1} < \alpha_{i\hat{k}} < \beta_{i\hat{k}} < \alpha_{i\hat{k}+1} < \beta_{i\hat{k}+1} \quad (\text{A-6})$$

$$(\hat{k} = 2, 3, \dots, N_i - 1)$$

であるので

$$|T| = \prod_{\substack{p_1=1 \\ p_1 < p_2 \leq N_i}}^{N_i-1} (\beta_{ip_1} - \beta_{ip_2}) \neq 0$$

となる。(A-5)式より $\hat{A} = T^{-1}S$ と変形でき、 $A_{ik} (k = 1, 2, \dots, N_i)$ は次式で表される。

$$A_{ik} = \frac{(-1)^{i+1}}{|T|} \prod_{\substack{p_1=1 \\ p_1 < p_2 \leq N_i \\ p_1 \neq i}}^{N_i-1} (\beta_{ip_1} - \beta_{ip_2}) \prod_{p=1}^{N_i} (\beta_{ik} - \alpha_{ip})$$

(A-6)式が成り立つとき、上式の右辺の符号を調べることににより、 A_{ik} は正となる。

参考文献

- 1) J. C. Mankins : The Space Solar Power Option, *Aerospace American*, Vol. **35**, pp. 30-36 (1997)
- 2) 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**, No. 8, pp. 882-888 (1989)
- 3) Fujisaki, Ikeda, Miki : Robust Stabilization of Large Space Structures Via Displacement Feedback, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. **46**, No. 12, pp. 1993-1996 (2001)
- 4) 小林, 池田, 藤崎 : 大型宇宙構造物の変位の簡単な動的フィードバックによる最適制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. **38**, No. 8, pp. 694-701 (2002)
- 5) 鹿田, 小林 : 変位出力を用いた近似DVDFBによる大型宇宙構造物の分散制御, 第48回 自動制御連合講演会講演論文集, pp. 303-304 (2005)

鼻腔内におけるエアロゾル粒子の沈着特性に関する研究

土屋健太* 朝倉義裕** 山本高久***

Research on Deposition Characteristics of Aerosol Particles in Nasal Cavities

Kenta TSUCHIYA* Yoshihiro ASAKURA** Takahisa YAMAMOTO***

ABSTRACT

Nebulizer treatment has been used for nasal diseases such as paranasal sinusitis, hypertrophic rhinitis and inferior concha inflammation. The effectiveness of the nebulizer treatment has been confirmed from clinical view points until now. However there are a few researches that evaluate the effect of the nebulizer treatment quantitatively, i.e., how medicinal mist transports and deposits on inflammation areas of nasal wall. Some researchers calculated intranasal transport phenomena of medicinal droplets using Computed Fluid Dynamics (CFD). However these researches analyzed a few cases. The individual difference was left out of consideration even though there are different shapes of nasal cavities and different grade of medical conditions. This study constructs three-dimensional geometry model of nasal cavity using an actual patient's CT(Computed Tomography) data. Furthermore this study analyzes the characteristics of airflow and medicinal droplet, especially focusing on local deposition characteristics.

Keywords : Biofluid dynamics, Nebulizer Treatment, CFD, Transport Phenomena

1. 緒言

ネブライザ治療とは、副鼻腔炎あるいは花粉症等のアレルギー性鼻炎に対し、現在最も多く用いられている治療法である。本治療法は炎症を抑える抗ヒスタミン薬等を霧化して鼻腔内に導入、薬液粒子を炎症患部に直接沈着させるものである。ネブライザ治療の治療効果は臨床的に認められているものの、鼻腔形状に個人差があり効果にも差が現れてしまう。他方、鼻腔内の物質輸送解析に関する研究報告は幾つかあるものの、いずれも健常な症例を対象としており、鼻腔形状あるいは病状に着目した研究報告は僅かである^{(1),(2)}。そこで本研究では、まず頭部 CT (コンピューター断層撮影: Computed Tomography)・MRI (磁気共鳴画像診断: Magnetic Resonance Imaging) などの医療画像を元にして、実際の症例の鼻腔形状モデルを構築した。その上で数値流体力学による解析 (Computational Fluid Dynamics: CFD 解析) を行い、ネブライザ治療における鼻腔形状が粒子輸送に及ぼす影響を評価する。ネブライザ薬液流入速度及び流入角度・薬液粒

子径の変化における治療効果の追跡を行うことで、鼻腔における薬液粒子沈着部位と沈着粒子数を明らかにした。また、既往の研究で報告されている鼻腔内微粒子沈着に関する実験式を用いて、本研究の解析結果のデータ整理および評価を行い、個別の鼻腔形状に合わせたネブライザ治療を提供するための方針の一つを示した。

2. 解析手法

2.1 症例データ 本研究では、鼻中隔彎曲症・慢性副鼻腔炎・肥厚性鼻炎を患った鼻腔形状を解析対象とした。副鼻腔炎とは、細菌やウイルスによる感染もしくは花粉症などのアレルギーが原因の炎症によって発生した膿や粘液が自然孔より排出されずに副鼻腔と呼ばれる鼻の周囲の骨にある 8 つの空洞に溜まる疾患である。また、肥厚性鼻炎とは慢性鼻炎により鼻腔壁が硬く肥大した症状をいう。鼻中隔彎曲症とは、鼻腔左右に分ける仕切りである鼻中隔を構成する骨が左右のどちらかへ湾曲あるいは突出した症状である。鼻中隔の湾曲は成人のおよそ 90%にあるが、それら全てが治療の対象となることはなく、湾曲による頭痛や鼻づまりの症

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 准教授

*** 岐阜工業高等専門学校 機械工学科 准教授

状が現れた時に鼻中隔湾曲症として取り扱われる。図1は解析対象である成人男性の鼻腔・副鼻腔CTである。同図の太線で囲まれた領域は鼻腔，上顎洞ならびに鼻中隔であり，副鼻腔炎により炎症が生じている事，鼻中隔湾曲があることが確認できる。なお，本CTは撮影間隔 1.25mm, 324 枚から構成されている。

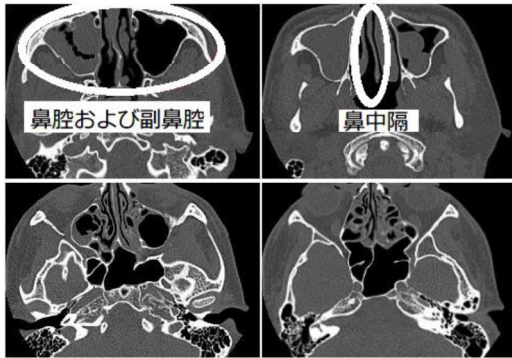


図 1 Nasal cavity/Sinus CT Data(Adult male).

2.2 3次元幾何形状モデル及び計算格子作成 解析対象のCTデータに基づく3次元幾何形状モデル構築ならびに計算格子生成には Mimics (Materizlize Co.) および ICEM-CFD(Ansys Co.)を用いた。図1に示すCTデータにマーチングキューブズ法を導入して壁面境界の3次元化を行う⁽³⁾。次に解析対象の抽出を行い3次元幾何形状モデルを作成した。この形状モデルに対して移動平均法を適用してノイズ処理を行った後，デラウニー三角形分割法により非構造計算格子を作成した⁽⁴⁾。図2に本症例の医療画像データより作成した鼻腔3次元幾何形状モデルを示す。なお，本症例の計算格子数は約185万である。計算格子の妥当性については計算格子数と圧力損失との相関を事前解析により検証し，計算格子精度の解析結果への影響は最小となるようにしている。

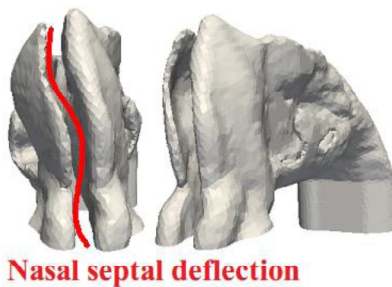


図 2 Three dimensional nasal cavity model.

2.3 解析モデル 本研究におけるCFD解析にはCFX ver. 12.1(ANSYS Co.)を使用した。本解析ソルバーでは解析モデルや境界条件に応じて運動量やエネルギー等の物理量を支配する偏微分方程式群を有限体積法による離散化によって解き，層流，乱流等の様々な流体現象を解析することができる。

鼻腔内における断面積の最大値 0.04 m²におけるレイ

ノルズ数が約700であることから，定常3次元層流解析を行った。鼻水等の障壁については，治療前に鼻を洗浄することを想定して，本解析では解析対象外とした。本研究では，解析体系として気液2相流を扱うために連続相と分散相の支配方程式を連成して解析を行う。連続相の支配方程式として連続の式を(1)式に，運動量保存則を(2)式にそれぞれ示す。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + F_i \quad (2)$$

ここで， U_i ($i=1, 2, 3$)は x_i 方向の平均流速成分[m/s]， P は平均圧力[Pa]， ρ は流体の密度[kg/m³]， ν は流体の動粘度係数[m²/s]である。また， F_i は各方向成分の外力・慣性力を表わしている。また，粒子輸送現象に際しては，連続相である薬液の中を移動する不連続な粒子を考える。本研究では気相中の薬液粒子の輸送に着目しており，分散相の密度の方が連続相よりも大きい場合，圧力勾配項や仮想質量力項は無視できる。また浮力項や回転力項も無視した。したがって本研究での粒子の支配方程式は(3)式となる。

$$m_{\text{Particle}}^i \frac{d\bar{u}_{\text{Particle}}^i}{dt} = \frac{1}{8} \pi d^2 \rho_{\text{Fluid}} C_D |\bar{u}_{\text{Fluid}} - \bar{u}_{\text{Particle}}^i| \times (\bar{u}_{\text{Fluid}} - \bar{u}_{\text{Particle}}^i) \quad (3)$$

m_{Particle} は粒子の質量[kg]， $\bar{u}_{\text{Particle}}$ は粒子の平均速度[m/s]， $\bar{u}_{\text{Fluid}}$ は薬液の平均速度[m/s]， ρ_{Fluid} は薬液の密度[kg/m³]， d は粒子の直径[m]， C_D は抵抗係数であり(4)式および(5)式で表される。

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}^{1+0.15(\text{Re}^{0.687})}} \quad (\text{Re}^i < 800) \quad (4)$$

$$\text{Re}^i = d^i \frac{|\bar{u}_{\text{Fluid}} - \bar{u}_{\text{Particle}}^i|}{\nu_{\text{Fluid}}} \quad (5)$$

また本研究では粒子追跡に際して，個々の粒子に着目したLagrange法により解析を行った。そこで，(6)式により液滴の位置を解いた。

$$\frac{d\bar{x}_{\text{Particle}}^i}{dt} = \bar{u}_{\text{Particle}}^i \quad (6)$$

2.4 離散スキームおよび解析条件 本研究では，支配方程式を有限体積法により離散化し，対流項に風上差分法と中心差分法を併用した高解像度法(High resolution scheme)により解析を行った⁽⁵⁾。連続相と分散相のカップリングには，連続相の流動が分散相の運動に及ぼす影響と分散相の運動が連続相の流れ場に及ぼす影響の両方を考慮するTwo-Way法を用いた。本研究における解析条件を示す。

- (1) 解析体系は大気圧(298K)の空気および主成分が水(298K)と仮定した薬液粒子の二相流と仮定。
- (2) 流入速度は 0.25, 0.5, 1.0 m/s, 流入角度は 45°，

75°, 90°とした．ここで流入角度は図3に示すように水平面上を基準にしている⁽¹⁾．流入粒子数および粒子径はそれぞれ3000個, 10 μ mとした．

- (3) 壁面境界は流速を0とする no-slip 条件とした．
- (4) 流入境界には一様流れ，流出境界では相対圧力0Paと設定した．
- (5) 粒子の沈着条件は，10 μ m以上の粒子については80%以上の粒子が鼻腔に沈着することから反発係数0とした⁽⁶⁾．

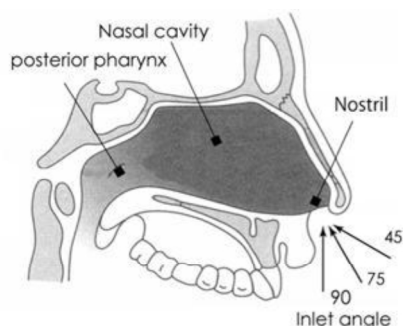


図3 Schematic drawing of nebulizer angle.

2.5 沈着および沈着率の定義 ネビュライザ治療における効果を定量的に評価する為に沈着，および沈着率という指標を導入する．本解析における沈着とは粒子が壁面境界に衝突したときを指す．また沈着率とは，鼻腔に流入した薬液粒子の個数に対する鼻腔に衝突及び沈着した粒子の個数を百分率で表したものである．この沈着率が高ければ高い程，鼻腔に流入した薬液粒子が流出することなく沈着していることを示している．図2を18個の領域に分割した3次元幾何形状モデルを図4に示す．本図においてR01-R04は右鼻腔壁面の上部の領域番号を指し，R01U-R04Uは右鼻腔壁面下部の領域番号を指す．また，左鼻腔壁面には同様にL01-L04およびL01U-L04Uの領域番号を付している．本研究では鼻腔全体での沈着率のみならず，各領域の沈着率も求めた．

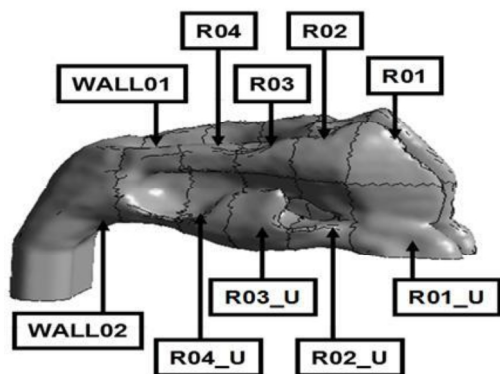


図4 Divided into 18 areas at 3D-Geometric model.

2.6 Stokes 数によるデータ整理 本研究においては，人やラット等の様々な動物において鼻腔内の粒子沈着

を測定した結果から算出された L.Zhang らの実験式(1993)を用いて解析結果との比較を行う⁽⁷⁾．はじめに実験式の導出について概説する．鼻腔形状における沈着率 η とは，粒子の挙動を表す Stokes 数と鼻腔形状により定まるため(7)式で表現される．

$$\eta = \eta(S_{tk}, \xi_i), \quad \xi_i = 1, 2 \quad (7)$$

ここで Stokes 数とは(8)式で表される粒子の挙動を示すパラメータである．

$$S_{tk} = \frac{d_a^2 V}{18 \mu a} \quad (8)$$

d_a は粒子の直径[m]， a は解析対象における代表長さ[m]， V は，代表速度[m²/s]， μ は連続相の粘度[Pa $\cdot$ s]を示す．

また，沈着率 η は鼻腔に流入される薬液の体積流量 Q を[m³/s]用いることによって(9)式と表される．

$$\eta = \left[\frac{(d_a^2 Q)^\alpha}{C + (d_a^2 Q)^\alpha} \right]^\beta \quad (9)$$

ここで， $\alpha \cdot \beta$ は種々の動物における鼻腔の形状係数をあらわしており，人間は $\alpha=1.257$ ， $\beta=0.609$ である．

補正係数 C は全ての動物に対して $C=10^5$ となる．

(10)式は(8)式において体積流量 Q を用いて示された Stokes 数の表示である．また(11)式における a は外鼻孔の断面積 A の 1/2 乗として近似される⁽⁷⁾．(9)式を(10)式を用いて表すと(11)式になる．

$$S_{tk} = \frac{d_a^2 Q}{18 \mu A^{3/2}}, \quad (a \cong A^{1/2}) \quad (10)$$

$$\eta = \left[\frac{(S_{tk})^\alpha}{C_1 A^{-3\alpha/2} + (S_{tk})^\alpha} \right]^\beta, \quad C_1 = C(18\mu)^{-\alpha} \quad (11)$$

また，流入角度による補正を行ったものを(12)式に示す．

$$\eta = \left[\frac{(S_{tk} \cdot \theta)^\alpha}{C_1 A^{-3\alpha/2} + (S_{tk} \cdot \theta)^\alpha} \right]^\beta \quad (12)$$

(14)式を縦軸に沈着率，横軸に Stokes 数にしたグラフを図5に示す．

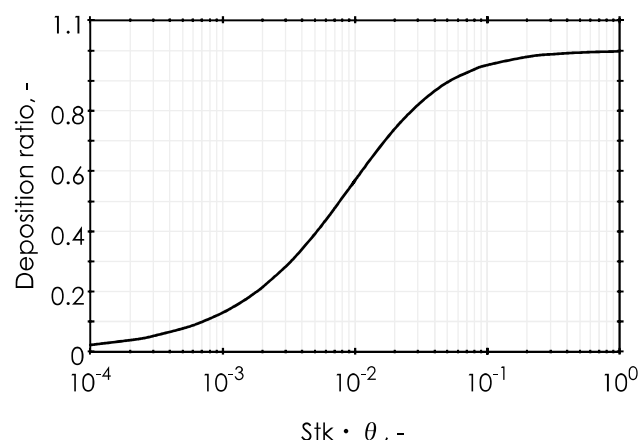


図5 Relationship between deposition ratio and S_{tk} calculated by eq.12.

3. 解析結果及び考察

3.1 薬液粒子の輸送特性 流入角度および流入速度の変更による鼻腔各部の沈着率を解析により求めた。図 6, 7 に流入角度 90° , 0.5 m/s の薬液粒子の飛跡を示す。図 6 の左鼻腔内での薬液粒子の飛跡をみると 90° で流入した薬液粒子が L01 を通過せずに鼻腔中部および咽頭部へ流出している。他方、図 7 の右鼻腔では外鼻孔付近で多くの飛跡が止まっており、残りの薬液粒子が R02, R03 を介して鼻腔後方へと輸送されていることが分かる。図 8 に各断面での速度、圧力分布を示す。なお、同図中の LR01 は、図 4 における R01, R01U, L01, L01U を統合した領域の断面であることを意味する。本結果より左右の鼻腔の最高速度が約 1.6 倍大きくなっていることがわかる。これは本解析対象が鼻中隔湾曲症により、右鼻腔断面が狭小になっているためである。圧力分布に着目すると LR01 および LR03 の右鼻腔壁面の速度上昇が顕著にみられる部分において、圧力低下が生じている。また、LR01 および LR02 の左鼻腔壁面の上部において圧力が他の領域に比べ上昇していることがわかる。

3.2 薬液粒子の沈着特性

3.2.1 流入速度の変化における鼻腔各部の沈着率 図 9, 10 に流入角度 90° 固定で流入速度を操作したときの鼻腔内沈着率分布を示す。

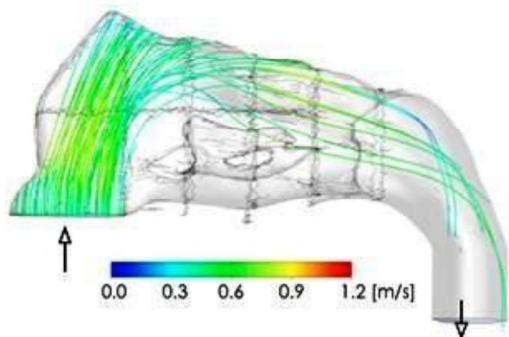


図 6 Trajectories of particle in the left nasal cavity (0.5 m/s , 90°).

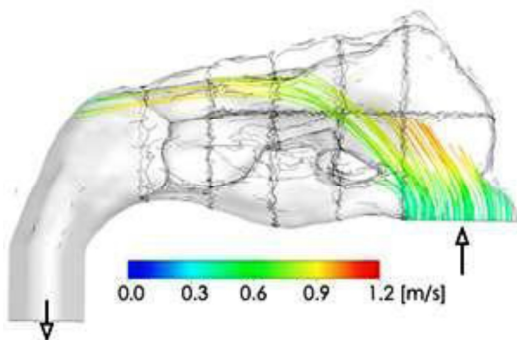


図 7 Trajectories of particle in the right nasal cavity (0.5 m/s , 90°).

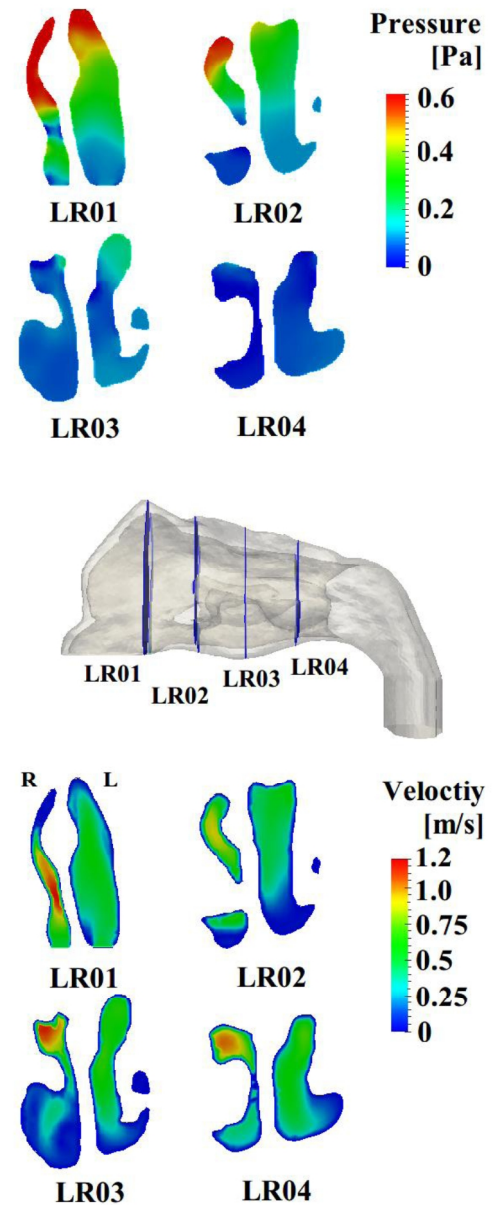


図 8 Contour plot of pressure and velocity in the nasal cavity.

左鼻腔の粒子輸送に着目すると、薬液粒子が鼻腔内の広域に輸送されていることが分かる。各領域の沈着率をみると鼻腔上部領域である L01, L01U が約 4-8 %, L02 が約 10-15 %, L03 が約 10 %, L04 が約 4-6 %であった。その一方で下部領域である L02U, L03U, L04U はいずれも沈着率が 1 %未満であった。流入角度 90° で流入した薬液粒子は慣性力により直接、鼻腔上部へと輸送され、そのまま沈着したことが原因と考えられる。また、鼻腔下部であるにも関わらず L01U では沈着が確認されたが、同領域は外鼻孔に隣接する領域であり、薬液粒子が同領域を通過する際に沈着すると考えられる。

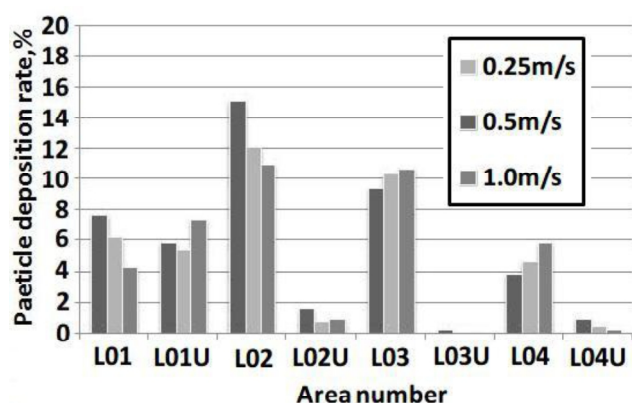


図 9 The effect of nebulizer velocity on particle deposition ratio in the left nasal cavity.

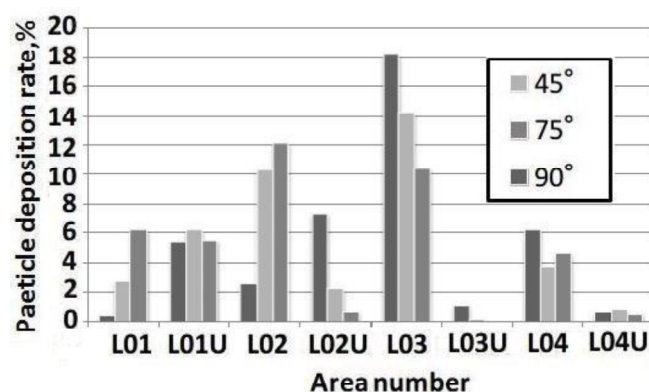


図 11 The effect of inlet angle on particle deposition ratio in the left nasal cavity.

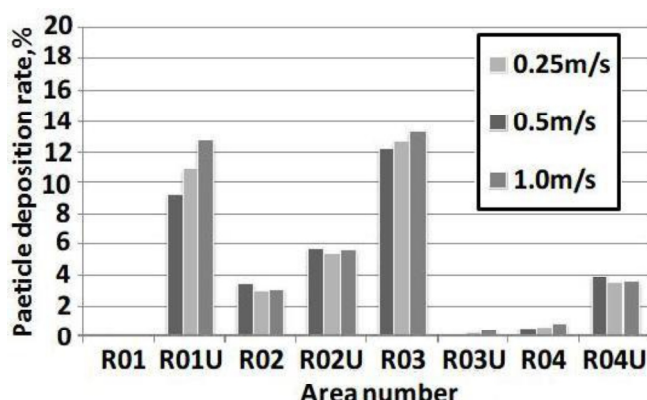


図 10 The effect of nebulizer velocity on particle deposition ratio in the right nasal cavity.

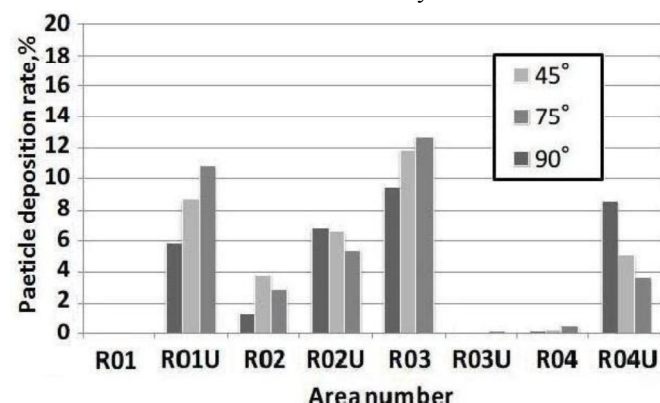


図 12 The effect of inlet angle on particle deposition ratio in the right nasal cavity.

次いで右鼻腔の粒子輸送特性に注目する。薬液粒子飛跡から粒子の殆どが鼻腔下部領域を通過しており、鼻腔上部にまで粒子輸送が行われていないことが分かる。沈着率はR01Uでは約9-13%，R02は約3%，R03は約13%，R04は約4%であり、R01を除いた鼻腔上部への薬液沈着が顕著である。これは左鼻腔でみられた沈着特性と同様である。特筆すべきは鼻腔上部のR01に薬液沈着がみられない点であり、左鼻腔での傾向と全く異なっている。図7において薬液粒子がR01を通過していないことや図8における当該領域での圧力が他の領域の1.5倍-2倍上昇し、薬液が輸送されないことが理由として挙げられる。

全体を総括して、それぞれの領域において沈着率の僅かな差がある部分、全く薬液粒子が沈着していない部分があるが、流入速度の変化による差は最大5%とあまり変化がみられないことがわかった。このように、鼻腔内に流路の狭小がみられる症例においては、流入速度の操作による薬液粒子の大幅な沈着率向上は期待できないと考察される。

3.2.2 流入角度の変化における鼻腔各部の沈着率

図11, 12に流入速度0.5 m/s固定で流入角度を操作したときの鼻腔内沈着率分布を示す。

はじめに左鼻腔の壁面の解析結果について述べる。図11において薬液流入角度90°(垂直方向)に関しては先に述べたとおり慣性力により薬液粒子は鼻腔上部に輸送されL02で沈着率のピークが生じている。流入角度75°については角度を鼻腔上部から鼻腔下部に少し向けた分、沈着率のピークがL03に遷移していることがわかる。また、流入速度45°では90°、75°の結果に示されるような緩やかな沈着率の増加を示しておらず、L03で沈着率のピークを示している。これは、流入角度45°で流入された粒子がL01からそのまま角度の大きな変化なくL02Uを通過しL03へ向かい沈着したものと考察される。L03で多くの粒子が沈着した後、残存粒子がL04あるいは咽頭部へと輸送されたと考えられる。

つぎに右鼻腔の壁面の解析結果について述べる。R01に薬液が沈着していない原因は先に述べたとおり、解析対象が抱える鼻中隔湾曲症による流路狭小によるものである。また右鼻腔壁面は左鼻腔壁面同様に流入角度90°と75°では角度による流れの遷移による沈着率のピークの違いがみられる。また流入角度45°では流入角度90°、75°の結果に示される放物線を描くような沈着ではなく沈着率の直線的な増加がみられる。R01以外に関しては、鼻中隔湾曲症による薬液沈着率の影響が出ていないためこの症例では、鼻中隔湾曲症と角度の

関係はないものであると考察できる。

全体を総括して、左右の鼻腔壁面における沈着率をみると、例として R03, R01U 部において角度が低角側になるにつれ沈着率が直線的に低下しているのではないかと考察できる。この 2 つの領域だけではなく他の領域においても同様の傾向がみられた。

3.3 Stokes 数によるデータ整理 薬液流入速度および流入角度を操作した場合の沈着率と $S_{tk} \cdot \theta$ との相関を図 13 に示す。本解析において取り扱った薬液流入速度および流入角度は次の通りである；(1) 流入角度 90° 固定とし、流入速度 0.1-1.0 m/s の範囲を 0.1 m/s 刻み、流入速度 1.0-10.0 m/s 範囲を 1.0 m/s 刻みの計 20 通り、(2) 流入速度 0.5 m/s 固定で流入角 10-90° の範囲を 10° 刻みの 9 通り、以上全 29 条件の解析を同図でまとめている。ここで図中の沈着率は、投入された粒子数のうち、解析対象である鼻腔の全領域で沈着した粒子総数の割合を表している。

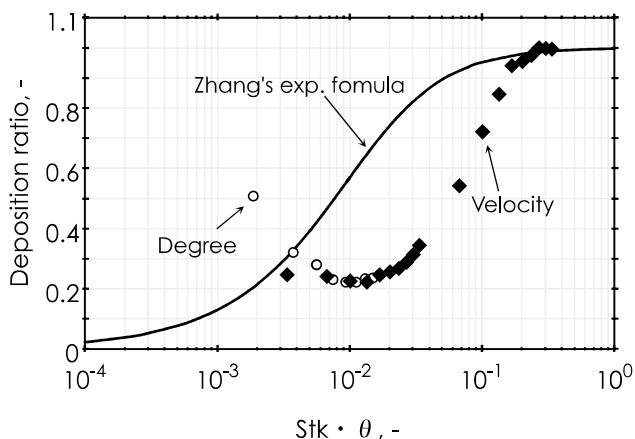


図 13 Relationship between Stokes number and deposition ratio.

本結果から角度、速度を変更した場合において、Zhang らの曲線から外れることがわかる。この原因は鼻腔形状、すなわち図 8 に示した本症例が抱える鼻中隔に起因する左外鼻孔近傍の流路拡大、ならびに右外鼻孔近傍から中部にかけて生じている流路狭小が要因であると考えられる。流入角度に着目すると沈着率が流入速度を変化させた場合に比べて小さい。これは (12) 式において θ はラジアン角度で示されるため、 $S_{tk} \cdot \theta$ の値が低くなることに起因すると考えられる。また、Zhang らの曲線および解析結果において $S_{tk} = 1$ 付近で沈着率が 100 % を示している。これは Stokes 数が 1 を超えることは、連続相である空気の動きに分散相である薬液粒子が従わず、慣性力によって沈着が生ずる事を意味している。

以上より、本研究で取り扱った解析対象において、薬液流入角度に比べ薬液流入速度を増加させた方が薬液

粒子の沈着率向上に寄与することが確認された。また、鼻腔全体という巨視的な見方をする **Stokes** 数を 1 に近づく値を取ることで沈着率を向上させることができると考えられる。また、本考察において最も重要なことは、Zhang らの曲線と本解析結果とが合致しないことが明らかになったことである。これは既往の研究では正常な鼻腔を対象としているが、他方、本研究では鼻中隔彎曲症例を対象としており、鼻腔形状が大きく異なることに起因していると推察される。すなわち鼻腔内の薬液粒子の挙動は Stokes 数のみで表すことはできず、鼻腔形状等の変化を考慮した補正が必要だと考えられる。

4. 結言

本研究では、実症例を対象に鼻腔空間内の物質輸送特性を数値流体解析により明らかにした。特に、鼻腔内の各部において薬液流れにおける粒子沈着数を求め、その基礎的な特性を明らかにすることを試みた。本研究で取り扱った症例において、単に鼻腔の特定部位における沈着数だけを取り扱うならば、ネビュライザ治療薬液の流入速度や流入角度の変化は治療効果に反映しないことが明らかになった。しかし鼻腔全体として考えた場合、流入速度の増加ひいては Stokes 数の増加が沈着率の増加に繋がることが明らかとなった。また本解析結果により、鼻疾患を有する鼻腔において、単に粒子の挙動を示す Stokes 数による沈着率の表現が困難であることが解明された。

参考文献

- (1) 紋谷慎ら：鼻腔形状が鼻腔内物質輸送現象に及ぼす影響に関する研究、豊橋技大修士論文、2009。
- (2) KIMBELL Julia S.: Characterization of Deposition from Nasal Spray Devices Using a Computational Fluid Dynamics Model of the Human Nasal Passages Journal of Aerosol Medicine 20(1), 59-74, 2007.
- (3) W. E. Lorensen, H. E. Cline: Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm, Proc. 14th annual conf. computergraphics and interactive techniques (New York), pp.163-169, 1987.
- (4) D. Shenton: Three-Dimensional finite element mesh generation using delaunay tessellation, IEEE transactions on Magnetics, 21(6), 2535-2538, 1985.
- (5) ANSYS Japan: CFD 理論セミナー, 2008.
- (6) Hatch, T.F.: Distribution and deposition of inhaled particles in respiratory tract. Bacteriological Reviews, 25, 237-240, 1961.
- (7) L. Zhang & C. P. Yu: Empirical Equations for Nasal Deposition of Inhaled Particles in Small Laboratory Animals and Humans, Aerosol Science and Technology, 19:1, 51-56, 1993.

高面圧すべり接触におけるステンレス鋼の摩擦・摩耗特性(1)

－鉱油系潤滑油の効果－

岸本 広大*・岩坂 明*・中辻 武**

Friction and Wear Properties of Stainless Steel under High Pressure in Sliding Contact(1) -The effect of additives in the mineral oil-

Kodai KISHIMOTO*, Akira IWASAKA*, Takeshi NAKATSUJI**

ABSTRACT

Boundary lubrication can easily be broken to yield severe adhesion when subjected to high pressure sliding contact. In such a case, so-called extremely pressure additives are usually added to the mineral oil to protect the surfaces from severe wear and seizure. It is almost the same for the lubrication of deep drawing. The present authors conducted the friction tests for non additive, S type, P type, CI type, S-P blended type, CI-P blended type and solid lubricants by using a four-ball tester to clear the difference between their protection mechanisms for wear and scuffing. In thus way, we could find an adequate guideline for right selection of additives suited to the encountered problem. However, an adequate guideline for stainless steel of being apt to yield severe adhesion could not be found yet. Therefore, we conducted the friction tests for stainless steel.

Keywords: tribology, EP additives, high pressure, severe wear and scuffing

1. 緒言

高荷重の圧延や深絞り等の塑性加工における工具と被加工材の接触面間は、金属接触が支配的な状態となり、厳しい潤滑状態になる場合が多い。このような状態では、熱の影響により金属表面に極度の摩耗や凝着および焼付きが生じやすくなり、加工面が荒れる場合がある。これらを防止するために、金属接触面に物理吸着膜や化学吸着膜を形成させる方法や、極圧添加剤を混入させ、熱を利用して化学反応膜を形成させる方法がある。

本研究では、加工対象を難加工材料としてよく知られている、SUS304 ステンレス鋼とし、鉱油系潤滑油を使用したときの塑性加工性について検討を行った。

具体的な添加剤の種類としては、硫黄(S)系単体添加剤、リン(P)系単体添加剤、塩素(Cl)系単体添加剤、S-P ブレンド添加剤、CI-P ブレンド添加剤の極圧添加剤や、二硫化モリブデン(MoS_2)やカルシウムスルホネート(SO_3CaSO_3)の固体潤滑剤を用いた。極圧添加剤は、熱によって金属と反応し、硫化鉄被膜、リン酸鉄被膜、塩化鉄被膜といった融点の高い膜を形成する。固体潤滑剤は、接触中に粒子を形成するものであり、その粒子が金属の接触表面

の粗さに入り込み、それが膜となり二面を物理的に分離する。実験は、一般的指標を得るために、高速四球形摩擦試験機を用い、すべり速度を一定、荷重を3段階に変化させ摩擦実験を行った。本報ではその結果について報告する。

2. 原理

2. 1 潤滑の種類 図1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 μ が0.08以下になることを目標としている。

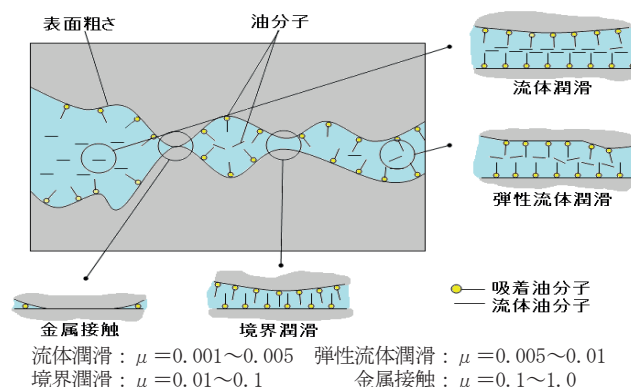


図1 潤滑状態の種類。

* 神戸高専専攻科 機械システム工学専攻

** 神戸高専機械工学科 教授

3. 実験装置および実験方法

3. 1 実験装置 実験は図 2-1 の高速四球形摩擦試験機を使用した。試験機の主要部である、試料油容器を拡大したものを図 2-2 に示す。試験球は、固定球には直径 1/2 インチ SUS304 ステンレス鋼(以下, 304 鋼)を用い, 回転球には工具を想定し, 同径の Si_3N_4 セラミック球(以下, Si_3N_4), SUJ2 高炭素クロム鋼(以下, SUJ2 鋼)の 2 種を用いた。加工対象である SUS304 ステンレス鋼のビッカース硬度は硬度測定した HV284(2780[MPa])を用いた。また, それぞれの試験球の表面粗さはラッピングにより算術平均粗さ $R_a=0.01\mu\text{m}$ に仕上げられていた。

固定球は 3 球, 回転球は 1 球使用。オイルカップの下から油圧により負荷をかけ, 回転球のみ回転させ, オイルカップを固定す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, ひずみ量 γ を測定し, 2 面間の摩擦係数 μ を算出する。また実験後に図 3 の万能投影機にて摩耗痕径を測定し, 摩耗痕の大きさからも検討を行う。



図 2-1 高速四球形摩擦試験機。

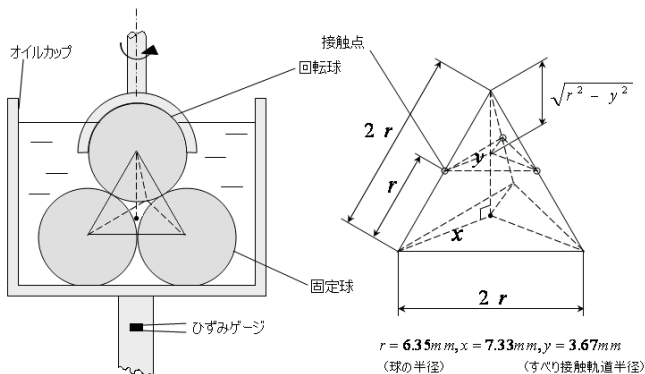


図 2-2 試験装置主要部。



図 3 万能投影機。

3. 2 実験条件 負荷荷重は荷重比 α で定義される。荷重比 α とは, 荷重を一般的にするための無次元量である。

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{HV} \quad \dots(1)$$

$\sigma_{\max}$ =最大ヘルツ応力[MPa]

HV=ビッカース硬度[MPa]

ただし, $0.10 < \alpha < 0.20$ は低荷重, $0.20 < \alpha < 0.35$ は中荷重, $\alpha > 0.35$ は高荷重にそれぞれ分類される。試験で与えた荷重比は, 0.5(高荷重), 0.7(厳しい高荷重), 0.8(超高荷重)の 3 段階とした。回転球の回転速度は 1000[rpm], 試験時間は 900[sec]で行った。ただし, HV は一般的指標を得るために, JIS 法や shell 法で規定されている SUJ2 高炭素クロム鋼の硬度, HV(7840[MPa])を用いた。またこれは, Cr 入り冷間・熱間金型材料の材質に近い。

3 個の固定球と上部回転球間に荷重 W が油圧により加えられると, 単位球あたりの垂直荷重 P は, 幾何学的に式(2)のように表される。

$$P = \frac{W}{\sqrt{6}} \quad \dots(2)$$

測定したひずみ量 γ を図 4 を用いて, 摩擦モーメント T に変換し, 摩擦係数 μ を式(3)から計算する。

$$\mu = \frac{T}{0.011 P} \quad \dots(3)$$

μ : 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]

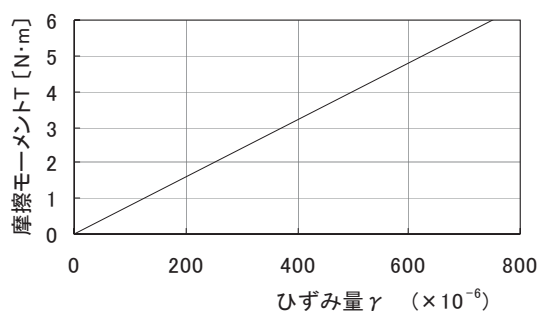


図4 ひずみ量 γ と摩擦モーメントTの関係。

3. 3 潤滑油 試料油は一般的に広く用いられる ISO VG 32 タービン油を基油とし、様々な極圧添加剤や固体潤滑剤を混入させたものを用いた。添加剤の種類は、S系、P系、Cl系、S-P系、Cl-P系の5種類の極圧添加剤と、MoS₂系、SO₃CaSO₃系の2種類の固体潤滑剤を使用した。混入した添加剤の成分量を表1に示す。

表1 極圧添加剤、固体潤滑剤の種類と添加量。

各添加油	添加剤の内訳 (質量%)
S系単体添加油	S添加剤5%
P系単体添加油	P添加剤2%
Cl系単体添加油	Cl添加剤4%
S-P系 ブレンド添加油	S添加剤5%
	P添加剤2%
Cl-P系 ブレンド添加油	Cl添加剤4%
	P添加剤2%
二硫化モリブデン系 単体添加油	MoS ₂ 添加剤5%
カルシウムスルホネート系 単体添加油	SO ₃ CaSO ₃ 添加剤10%

4. 実験結果および考察

4. 1 各添加剤における摩擦係数の変化 回転球にSUJ2鋼を使用した、 $\alpha=0.5$ の場合の各添加剤における摩擦係数 μ の変化を図5に示す。摩擦係数の図において、上矢印は摩擦係数 μ が0.7に達しているものであり、実験中に焼き付いたことを表している。また、目標値である摩擦係数 $\mu=0.08$ を図中に太い破線で示している。

P、S-P、MoS₂添加油を使用した場合、非常に良好な潤滑状態を保つことができるという結果が得られた。しかし、SO₃CaSO₃添加油では摩擦係数が目標値よりも大きく、その他の潤滑油では、実験開始直後に焼き付くという結果に至った。焼き付いた原因としては、親和性が高く、凝着が起きやすい組み合わせであることが原因だと考えられる。

この組み合わせで α を0.7に上げて実験を行った場合、0.5で焼き付かなかったものも、全て焼き付くという結果に至った。これらの結果から304鋼を加工する工具材料に鋼系を使用するのは望ましくないと考えられる。

次に回転球にSi₃N₄を使用した場合の各添加剤における摩擦係数 μ の変化を図6($\alpha=0.5$)、図7($\alpha=0.7$)、図8($\alpha=0.8$)に示す。

図6($\alpha=0.5$)の場合、全ての潤滑油で良好な潤滑状態を保つことができていた。図6～図8より、SUJ2鋼を使用するよりもSi₃N₄を使用する方が良いということがわかった。

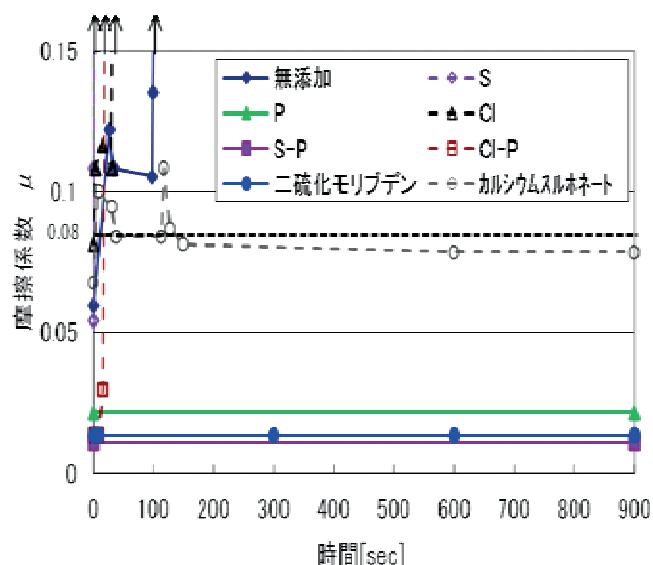


図5 SUJ2鋼の回転球を使用して、 $\alpha=0.5$ の条件で試験した場合の各添加剤に対する摩擦係数の経時変化。

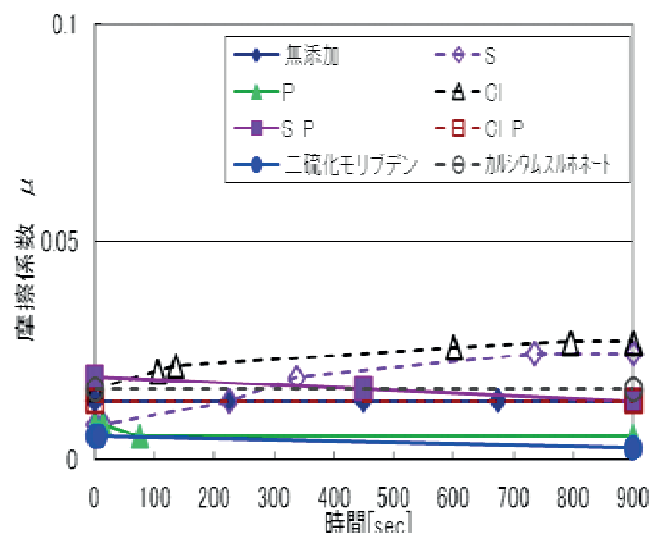


図6 Si₃N₄の回転球を使用して、 $\alpha=0.5$ の条件で試験した場合の各添加剤に対する摩擦係数の経時変化。

図7 ($\alpha=0.7$)の場合、 $\alpha=0.5$ よりも荷重が大きいため、少し不安定なものもあるが、全ての潤滑油で目標値である $\mu=0.08$ 以下の値をとることができている。 Si_3N_4 との組み合わせは、鋼とは逆に親和性の低い組み合わせであることが大きな要因であると考えられる。

図8 ($\alpha=0.8$)では、無添加潤滑油の場合焼付き、P系添加油の場合目標値よりもやや高い摩擦係数をとるという結果となり、それ以外の潤滑油では目標値よりも低く良好な潤滑状態を保つことができた。摩擦係数からみると、工具はセラミックを使用すれば、潤滑油は無添加とP系添加油以外、どれを使用してもよいと考えられる。

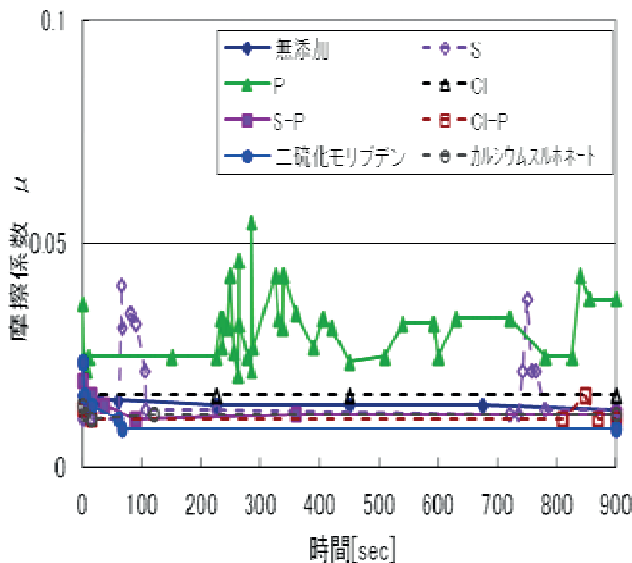


図7 Si_3N_4 の回転球を使用して、 $\alpha=0.7$ の条件で試験した場合の各添加剤に対する摩擦係数の経時変化。

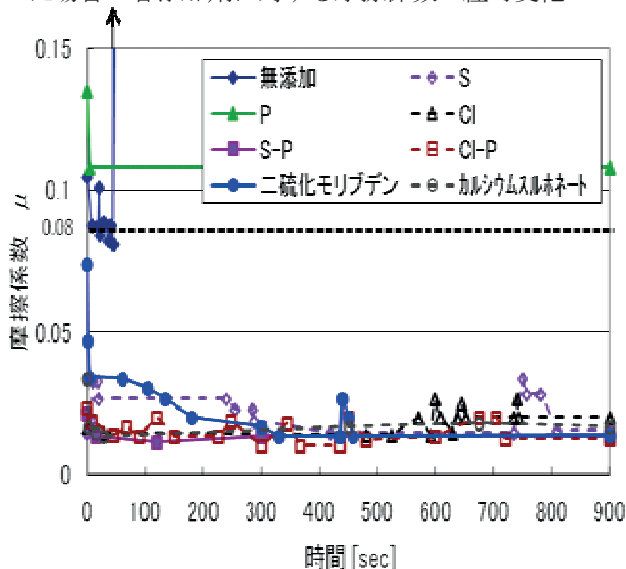


図8 Si_3N_4 の回転球を使用して、 $\alpha=0.8$ の条件で試験した場合の各添加剤に対する摩擦係数の経時変化。

4. 2各添加剤における摩耗痕径の変化 図9に回転球を Si_3N_4 とした場合の304鋼に生じた摩耗痕径を示す。摩耗痕径は図3の万能投影機を使用し測定した。摩耗痕の値は、固定球3球の摩耗痕の平均値をとった値である。

摩耗痕径は、接触面の凝着の指標と捉えられ、この値が小さいほど、耐凝着性は高いと考えられている。図中に示した横実線、横破線、横一点鎖線はそれぞれ、各荷重段階で式(4)から求めた摩耗痕径の理論値 dt を示す。

$$dt = 2 \sqrt{\frac{P}{\pi \sigma_y}} \quad \dots(4)$$

ただし、 $\sigma_y = \text{HV}/3$ 、 P =回転球と固定球1個あたりの垂直荷重、 σ_y =材料の表面流動応力、HVは304鋼の硬さである2780[MPa]を使用した。304鋼はオーステナイト系であり、通常HVは1960[MPa]以下、耐力は205[MPa]であるが、球を線材から旋削・研削・ラッピングで仕上げる過程で加工硬化が大きく、表面近傍はマルテンサイト状態に変化していると考えられ、表面硬度HVは実測値2780[MPa]と上昇した。

摩耗痕の大きさは多少の差が見られた。 $\alpha=0.7$ までは反応性の高いCl系や固体潤滑剤である MoS_2 系や SO_3CaSO_3 系が材料の流動による避けられない理論摩耗痕径 dt 程度まで小さくなっていた。固体潤滑剤に関しては、ある程度の荷重までは、2面を分離する方が効果があるということを物語っている。しかし、 $\alpha=0.8$ ではCl系、S-P系、Cl-P系の方が小さくなるという結果になった。これは超高荷重下では、固体潤滑剤が破壊され凝着防止効果が低く、反応熱を必要とする極圧添加剤の方が効果が大きいことを示している。

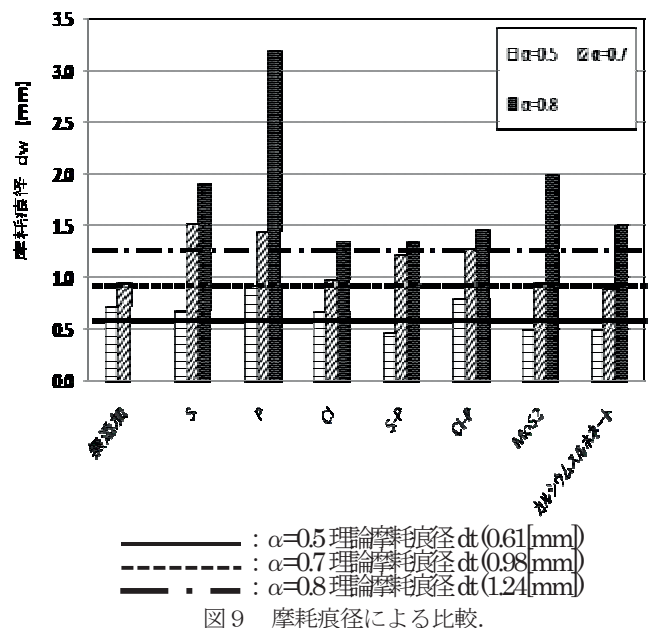


図9 摩耗痕径による比較。

5. 結言

SUS304 ステンレス鋼の深絞りには、それとの親和性の低さからセラミック工具が有効という結論が得られたが、荷重の大きさによって使用する潤滑油を変える必要があるという結果も得られた。 $\alpha=0.7$ の厳しい高荷重の下では、Cl 系および MoS_2 系や SO_3CaSO_3 系、 $\alpha=0.8$ の超高荷重下では Cl 系や S-P 系、Cl-P 系を使用するほうが加工面は安定すると思われる。

最近では環境面を考慮し、Cl フリーの方向にあるので、 $\alpha=0.7$ の厳しい高荷重下では二硫化モリブデンやカルシウムスルホネートの固体潤滑剤が、 $\alpha=0.8$ の超高荷重下では S-P 系極圧添加剤を使用する必要があると思われる。

参考文献

- (1)トライボロジー, 1980, 講談社, 著者 Hチコス 監訳者桜井俊男 pp.124-130.
- (2)トライボロジー, 1998, 理工学社, 山本雄二 兼田楨宏 pp.13-14.
- (3)トライボロジー概論, 1982, 養賢堂, 木村好次 岡部平八郎 pp.34-36.
- (4)Reaction Characteristics of Cl-P Blended EP Additives in Early Stages of Severe Sliding Contact, Japanese Journal of Tribology, Vol.42, No.11(1997) T.Nakatsuji, A.Mori pp.1273-1285(Allerton Press, Inc.).

謝辞

本研究は平成 21~23 年度科研費基盤研究(c) (21560156)の助成を受けたものである。

高面圧すべり接触におけるステンレス鋼の摩擦・摩耗特性(2)

－水溶性潤滑油の効果－

岩坂 明*・岸本 広大*・中辻 武**

Friction and Wear Properties of Stainless Steel under High Pressure in Sliding Contact(2) -The effect of water solubility lubricants-

Akira IWASAKA, Kodai KISHIMOTO*, Takeshi NAKATSUJI**

ABSTRACT

Boundary lubrication can easily be broken to yield severe adhesion when subjected to high pressure sliding contact. In such a case, so-called extremely pressure additives are usually added to the mineral oil to protect the surfaces from severe wear and seizure. It is almost the same for the lubrication of deep drawing. The present authors conducted the friction tests for such water solubility lubricants as, 300E, 300S, 300S-S, 300S-ZnP and solid lubricants by using a four-ball tester to clear the difference between their protection mechanisms for wear and scuffing. In this way, we could find an adequate guideline for right selection of additives suited to the encountered problem. However, an adequate guideline for stainless steel of being apt to yield severe adhesion could not be found yet. Therefore, we conducted the friction tests for stainless steel.

Keywords: tribology, EP additives, high pressure, severe wear and scuffing

1. はじめに

高荷重の圧延や深絞り等の塑性加工における工具と被加工材の接触面間は、金属接触が支配的な状態となり、厳しい潤滑状態になる場合が多い。このような状態では、熱の影響により金属表面に極度の摩耗や凝着および焼付きが生じやすくなり、加工面が荒れる場合がある。これらを防止するために、金属接触面に物理吸着膜や化学吸着膜を形成させる方法や、極圧添加剤を混入させ、熱を利用し化学反応膜を形成させる方法がある。

本研究では難加工材であるステンレス鋼を対象にし、環境面を考慮し、水溶性潤滑油剤を使用した時の加工性について検討を試み、鉱油系潤滑油剤(以下、不水)を使用した過去の実験データとの比較を行った。

具体的な水溶性潤滑油剤の種類としては、市販のダイファン 300E と新しく開発した 300S, 300S-S, 300S-ZnP を使用した。これら全ては接触面に物理吸着膜を形成させる OH 基を有している。また、300S は 300E に界面活性剤が添加されているもので、300S-S は化学反応を主体と

する硫黄系極圧添加剤が 5% 添加されており、300S-ZnP にはリン酸亜鉛系極圧添加剤が 5% 添加⁽¹⁾されている。極圧添加剤は、熱によって金属と反応し、硫化鉄被膜、リン酸鉄被膜、塩化鉄被膜といった融点の高い膜を形成する。固体潤滑剤は、接触中に粒子を形成するものであり、その粒子が金属の接触表面の粗さに入り込み、それが膜となり二面を物理的に分離する。

実験は、一般的指標を得るために、高速四球形摩擦試験機を用い、すべり速度を一定、荷重を 3 段階に変化させ摩擦実験を行った。本報ではその結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置 実験は図 1 の高速四球形摩擦試験機を使用した。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、固定球には直径 1/2 インチ SUS304 ステンレス鋼(以下、304 鋼)を用い、回転球には工具を想定し、同径の Si₃N₄ セラミック球(以下、Si₃N₄)、SUJ2 高炭素クロム鋼(以下、SUJ2 鋼)の 2 種を用いた。加工対象である SUS304 ステンレス鋼のビッカース硬度は硬

* 神戸高専専攻科 機械システム工学専攻

** 神戸高専機械工学科 教授

度測定した HV284 (2780 [MPa]) を用いた。また、それぞれの試験球の表面粗さはラッピングにより算術平均粗さ $Ra=0.01 \mu m$ に仕上げられていた。

固定球は 3 球、回転球は 1 球使用。オイルカップの下から油圧により負荷をかけ、回転球のみ回転させ、オイルカップを固定す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、ひずみ量 γ を測定し、2 面間の摩擦係数 μ を算出する。また実験後に万能投影機にて摩耗痕径を測定し、摩耗痕の大きさからも検討を行う。



図 1 高速四球形摩擦試験機。

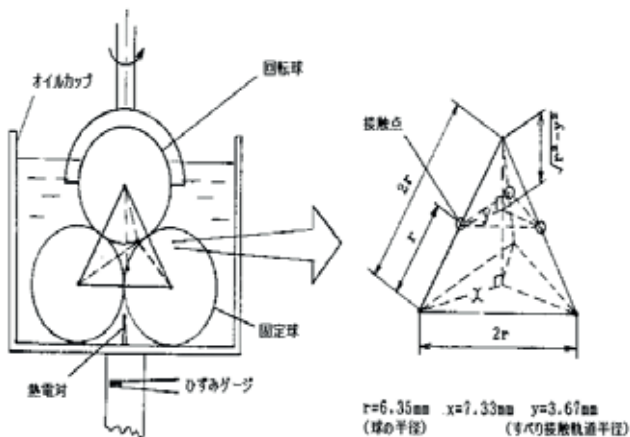


図 2 試験装置主要部。



図 3 万能投影機。

2.2 実験条件 負荷荷重は荷重比 α で定義される。荷重比 α とは、荷重を一般的にするための無次元量である。

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{HV} \quad \dots (1)$$

$\sigma_{\max}$ = 最大ヘルツ応力 [MPa]

HV = ビッカース硬度 [MPa]

ただし、 $0.10 < \alpha < 0.20$ は低荷重、 $0.20 < \alpha < 0.35$ は中荷重、 $\alpha > 0.35$ は高荷重にそれぞれ分類される。試験で与えた荷重比は、0.5 (高荷重)、0.7 (厳しい高荷重)、0.8 (超高荷重) の 3 段階⁽²⁾ とした。回転球の回転速度は 1000 [rpm]、試験時間は 900 [sec] で行った。ただし、HV は一般的指標を得るために、JIS 法や shell 法で規定されている SUJ2 高炭素クロム鋼の硬度、HV (7840 [MPa]) を用いた。またこれは、Cr 入り冷間・熱間金型材料の材質に近い。

3 個の固定球と上部回転球間に荷重 W が油圧により加えられると、単位球あたりの垂直荷重 P は、幾何学的に式 (2) のように表される。

$$P = \frac{W}{\sqrt{6}} \quad \dots (2)$$

測定したひずみ量 γ を摩擦モーメント T に変換し、摩擦係数 μ を式 (3) から計算する。

$$\mu = \frac{T}{0.011 P} \quad \dots (3)$$

μ : 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]

3. 実験に関わる原理

3.1 実験における目標摩擦係数と境界潤滑 図 4 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 μ が 0.08 以下になることを目標としている。

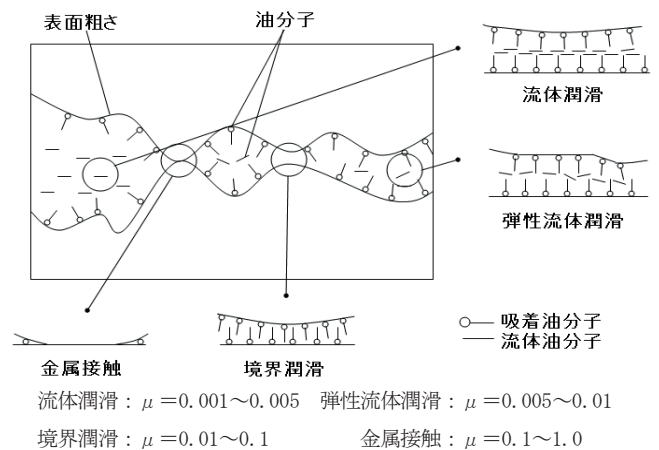


図 4 潤滑状態の種類。

3.2 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。

3.2.1 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氣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5に示す。

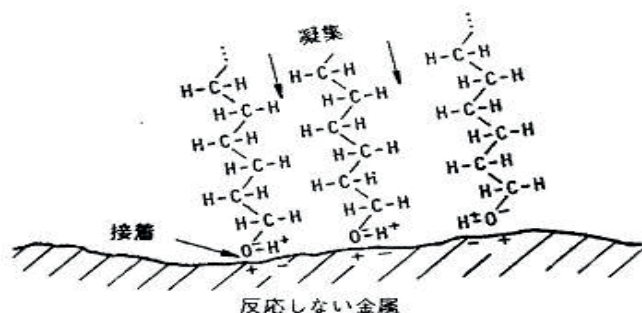


図5 物理吸着の模式図。

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6に示す。

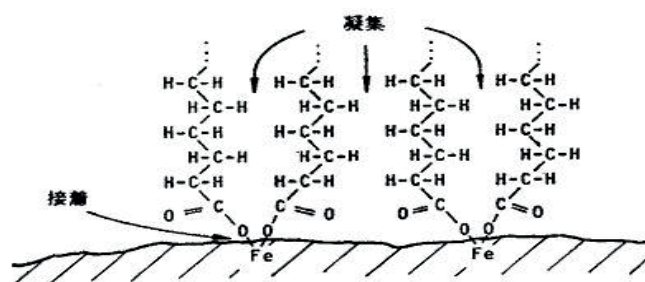


図6 化学吸着の模式図。

3.2.2 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C1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、アミン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C1-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。化学反応例の模式図を図7に示す。

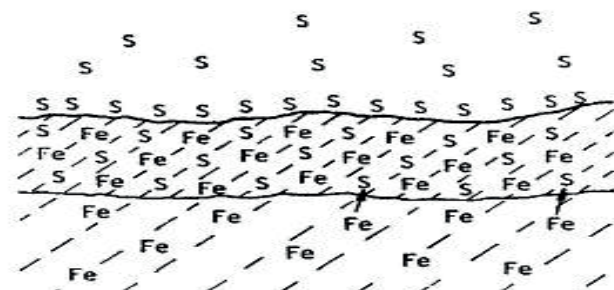


図7 化学反応例の模式図。

4. 実験結果および考察

4.1 不水溶性潤滑油における摩擦係数の変化

回転球にSUJ2鋼を使用した、 $\alpha=0.5$ の場合の摩擦係数の変化を図8に示す。図において、上矢印は実験中に焼付いたことを表している。P、S-P、 MoS_2 添加油を使用した場合、良好な潤滑状態を保つことができた。しかしそれ以外では焼付き、 $\alpha=0.7$ に上げた場合、全て焼付くという結果に至った。これらの結果から、工具材料としてSUJ2等の鋼系を使用するのは望ましくないと考えられる。

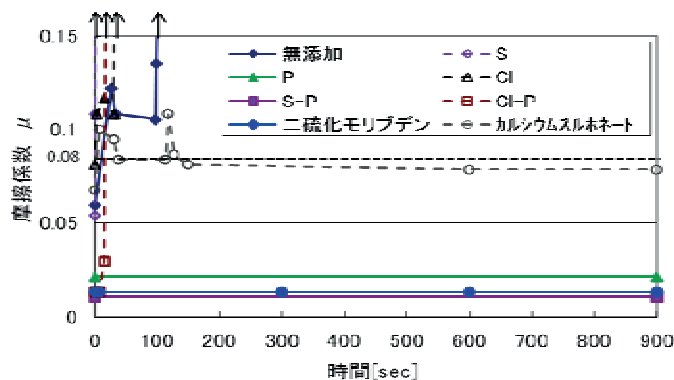


図8 回転球:SUJ2鋼 摩擦係数($\alpha=0.5$), 不水。

次に、回転球にセラミックを使用した場合の摩擦係数の変化を図9($\alpha=0.7$)、図10($\alpha=0.8$)に示す。

まず $\alpha=0.5$ の場合、全ての潤滑油が良好な潤滑状態を保つことができた。図9($\alpha=0.7$)の場合でも、 $\alpha=0.5$ よりも荷重が大きいため、不安定なものもあるが、全ての潤滑油が、目標値である $\mu=0.08$ 以下の値をとることができている。セラミックとの組み合わせは、鋼とは逆に親和性の低い組み合わせであることが要因であると考えられる。

図10($\alpha=0.8$)では、無添加の潤滑油の場合焼付き、P系を添加した潤滑油の場合は、目標値よりもやや高い摩擦係数をとるという結果となった。それ以外の潤滑油は目標値よりも低く、良好な潤滑状態を保つことができた。摩擦

係数から見ると、工具はセラミックを使用すれば良いと考えられる。

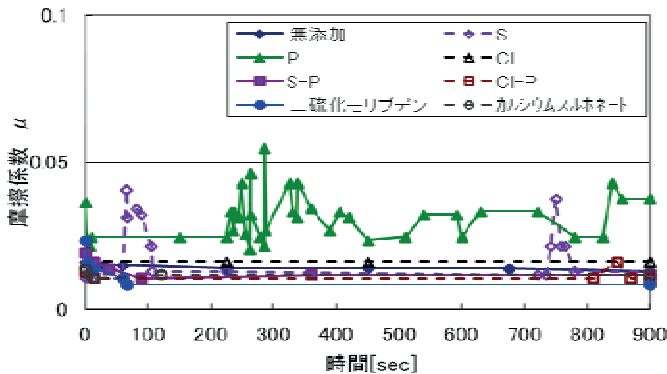


図9 回転球:セラミック 摩擦係数($\alpha=0.7$), 不水.

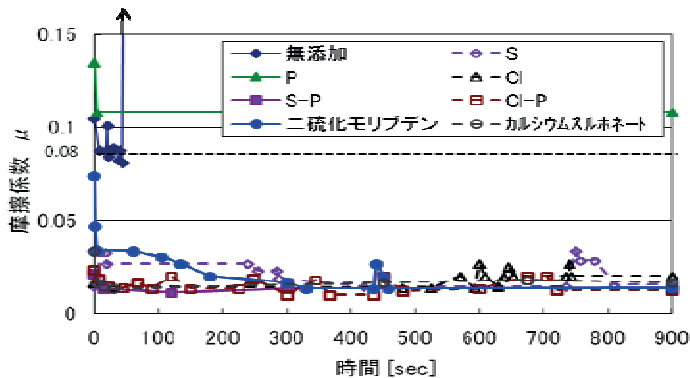


図10 回転球:セラミック 摩擦係数($\alpha=0.8$), 不水.

4.2 水溶性潤滑油における摩擦係数の変化 潤滑油を水溶性に変えて実験を行った場合について、検討を行う。回転球はセラミックを使用し、実験を行った。図11 ($\alpha=0.7$) に摩擦係数の変化を示す。

水溶性潤滑油を使用した場合、 $\alpha=0.5$ では全ての潤滑油が良好な潤滑状態を保つことができた。図11 ($\alpha=0.7$) の場合でも、全ての潤滑油が目標値以下の値をとることができた。しかしながら、 $\alpha=0.8$ に上げた場合、全て焼付くという結果に至った。

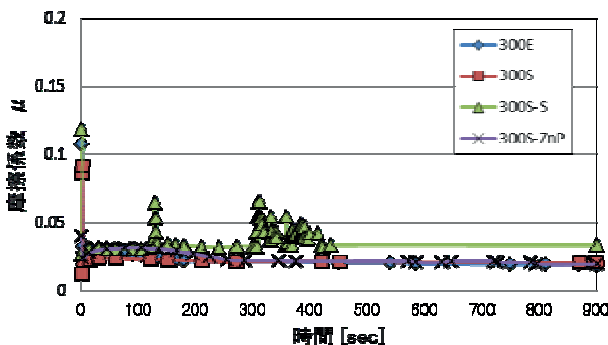


図11 回転球:セラミック 摩擦係数($\alpha=0.7$) 水溶性.

4.3 水溶性潤滑油における摩耗痕径による比較 図12に

$\alpha=0.7$ の時の摩耗痕による比較を示す。摩耗痕径は、接触面の凝着の指標と捉えられ、この値が小さいほど、耐凝着性は高いと考えられている。図中の破線は式(4)から求めた摩耗痕径の理論値 dt を示す。

$$dt = 2 \sqrt{\frac{P}{\pi \sigma_y}} \quad \dots (4)$$

ただし、 $\sigma_y = HV/3$, P =回転球と固定球1個当たりの垂直荷重、 σ_y =材料の表面流動応力、 HV は 304 鋼の硬さである 2780 [MPa] を使用した。304 鋼はオーステナイト系であり、通常 HV は 1960 [MPa] 以下、耐力は 205 [MPa] だが、球を線材から旋削・研削・ラッピングで仕上げる過程で加工硬化が大きく、表面近傍はマルテンサイト状態に変化していると考えられ、表面硬度 HV は実測値 2780 [MPa] と上昇した。図から見て分かるように、300E と 300S が比較的小さい摩耗痕となっている。300S-S や 300S-ZnP の摩耗痕は 300E や 300S に比べて大きくなっている。4 種類の水溶性潤滑油剤の摩耗痕の比較からは、極圧添加剤を加えない 300E が最も良好な潤滑油剤と言える。極圧添加剤は摩擦をある程度低下させるが、摩耗を促進するようである。

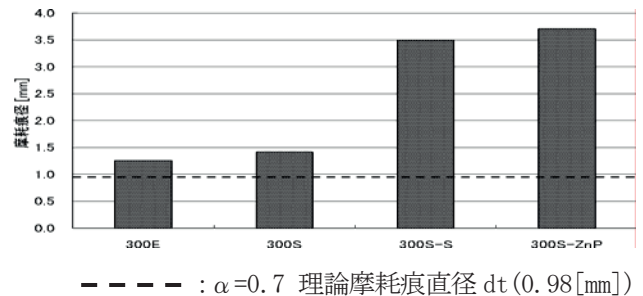


図12 摩耗痕径による比較.

5. おわりに 加工対象をステンレス鋼とした場合の工具材料は、親和性の観点から、鋼よりもセラミックの方が良いという結果が得られた。また、環境面を考慮し $\alpha=0.7$ までは水溶性を使用すべきであると考えられる。 $\alpha=0.8$ では不水を適用する方法しかないという結果が得られた。

参考文献

- (1) 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

謝辞

以上の研究は、科研費（21560156）の助成を受けたものである。

工業英語とキャリア教育の融合を目指した授業における Twitter を用いたコミュニケーション利用に関する研究

佐藤 徹哉*

A Study on Twitter Communication Utilization in Engineering English Class Aimed to Be Consolidated with Career Development Education

Tetsuya Sato*

ABSTRACT

While the importance of the global engineer education has been rapidly increased, the Kosen-education which features the 5-year intensive training starting from 10th grade age, has been also expected to be evolved into the global engineer training institute. That is why we have established the digital circuit fundamentals class using an world standard English textbook published in the US for the 2nd year class in the department of electrical engineering, in order to endorse the “Technology learning in English” and “English learning on Technology studies” simultaneous concept. Following to this unique class in the 2nd year, this paper reports on practical study results on the novel engineering English class utilizing Twitter communications aimed to be consolidated with a career development education. Twitter was well accepted in 4weeks by most students as their quick question channel. Though about 2/3 of students saw the class being interesting, only a half students have been convinced the class being useful so far.

Keywords : ESP, English for Special Purpose, Engineering English, Career Development Education, Twitter

1. はじめに

近年、多くの企業において研究開発だけでなく商品企画、設計、製造のあらゆるフェーズでの国際協働が不可欠となり、技術を英語で語れる国際技術者の養成が強く求められている。中学校の卒業生を入学させて若年からの5年間一貫技術者教育を行う高専においても、創立当初からの強みである若年からの実験・実習を中心とした実践教科と、座学で学ぶ専門教科とのシナジーを活かした教育に加えて、技術を英語で語れるようになるための技術コミュニケーション力の養成面においても、若年からの英語教育と専門教育のシナジーが期待されている。このような要請を背景として、高専においても若年から専門知識を国際共同開発の現場で通用する英語で学ぶことにより、専門学習と英語学習のシナジーを活かした効果的な国際技術者教育を目指した取り組みが活発に行われている。⁽¹⁾ 専門技術を英語で学習するためには、教科書を英語で書かれた世界的に幅広く用いられているものとするのと、さらに他高専においては外国人専門科目教員により授業も英語で行う取り組みが行われているが、筆者は英

語力自体が学習途上にある若年から専門学習と英語学習のシナジーを活かした教育を目指すには、英語の教科書を用いた日本語による授業が適すると考え、電気工学科2年生のデジタル回路の授業で用いる教科書を米国 McGraw-Hill 社 Schaum's Outline シリーズの “Digital Principles, 3rd edition” とした授業を行っており、専門技術としてのデジタル回路学習における成績向上と英語学習に対するモチベーション向上とのシナジー効果が認められたことを報告した。⁽²⁾

最終的に年度末に行ったアンケートでは、1年間の英語教科書を用いてのデジタル回路授業を通して英語力が向上したと肯定的な回答をした学生が63%（中立回答32%、否定的回答5%）、技術を英語で学ぶ/英語を技術で学ぶシナジーを活かした授業が総合的に効果的であると肯定的な回答をした学生が66%（中立回答21%、否定的回答13%）であったのに対して、1年間を通して徐々に慣れたと肯定的な回答をした学生は55%（中立回答26%、否定的回答18%）、他の教科でも同様に英語の教科書を用いて欲しいと肯定的な回答をした学生は37%（中立回答29%、否定的回答34%）にとどまった。定期試験/中間試験の結果からデジタル回路の専門技術としての実力が向上していること

* 電気工学科 教授

は間違いないが、34%の学生が他の教科にも英語教科書を用いることに否定的な回答をしていることは、英語力に関しては決して単なる慣れで自動的に身につくものではなく、予習復習も含め相当な学生の努力の上に成り立っているものと考えられる。一方、英語の教科書を用いるだけでなく授業も英語で行うことに肯定的な回答をした学生は34%（中立回答34%、否定的回答32%）であり、他の教科にも英語教科書を用いることにに対して肯定的な回答をした学生のほとんどが授業も英語で行うことを望んでおり、英語学習に対して極めて前向きな学生と、苦手意識を持つ学生が固定化している様子が伺われた。

この2年生を対象としたディジタル回路の専門教科授業では、専門技術の習得が第一目的であり、英語力向上に関しては、英語の教科書を用いることと定期試験/中間試験問題も英文で問うことで自然と英語の表現に慣れるという以上の真に英語力向上のための授業は行っていないため、前向きな学生の意欲は伸ばせても英語に苦手意識を持つ学生の意欲喚起には繋がっていないものと考えられる。そこで本論文では、上述の2年生でのディジタル回路授業に続いて、3年生での工業英語授業において、英語力の向上と、特に英語学習に対するモチベーションの向上を目的として新たな授業設計を行い、実践実験を行った結果を報告する。

2. 授業設計と授業実践実験

2.1. 授業設計の考え方 工業英語で教授すべき技術者が国際協働の現場で使える英語力に関して、筆者は2010年4月に本校に着任するまでの22年間パナソニック(株)において数多くの国際協働をリードしてきた中で、英語力の向上は一朝一夕にならず長時間あらゆる英語に接して吸収することが大切で、特に長時間あらゆる英語に出来るだけ多く接するためには興味を持続できる題材を絶やさないようにすることの重要性を強調して後進の指導にあたってきた。2年生のディジタル回路では教科書の英文を読むだけでも、30,000 words以上の多読を行っていることとなり、近年見直されつつあるものの高校の検定教科書が1冊あたり8,000~10,000 wordsであることと比べても多くの英文に接する機会は提供できているものと考えられる。一方、興味を喚起して意欲に繋げる面においては、ディジタル回路技術がデジタルカメラやスマートフォンなどの身の回りの機器の中でどのように使われているのかを説明して興味を喚起することはあっても、英語が国際協働の中でどのように使われているかを説明することは出来ていないのが現状である。

そこで電気工学科3年生で学ぶ工業英語では、英語が国際協働の中でどのように使われているかを学ぶことで、英語学習が将来技術者としてどのように役に立

つかと言うキャリア教育に繋げ、英語学習に対するモチベーションを高めることを目的のひとつとし、その目的に適する英文教材を素材として多読授業を行う授業設計とした。工業英語教育とキャリア教育の融合により、実践的な英語力向上と英語学習に対するモチベーション向上を目論んだ授業設計である。

2.2. 授業内容 授業内容は上述の目的を達するため、学生にとって近い将来の使用シーンを想定して下記のトピックを厳選し、本当に実社会で役立つ英語表現を身につけるためにも、実際に使われている本物の英文素材を教材として用いた。

(1)学術論文 海外の著名な学術雑誌に掲載された論文と、論文投稿のガイドラインを英文教材として、論文の構成や良く用いられる表現を学ぶ。電気工学科では4年生の後期から研究室配属となっており、必要に応じて多くの英文論文を読むことになるため、学生にとっては実社会に出る前に最初に向き合う必要がある英文素材として学術論文を扱うこととした。

(2)国際学会(カンファレンス) 著名な国際学会の発表ガイドラインを英文素材として学術論文と比較しながら国際カンファレンスについて学び、併せて口頭発表ならではの表現を学ぶ。4年生で研究室配属された学生が、5年生あるいは専攻科において、自らの研究成果を国際学会で発表することを想定して2番目に扱うトピックとした。

(3)数式・回路・プログラム 実社会での国際協働で最初に英語が必要になるのは技術ミーティングの場面であると予想されるが、それに先立って、数式や回路、プログラムなど、エレクトロニクス分野で用いられる英語表現を学ぶ。

(4)技術ミーティング 海外企業との技術打ち合わせで使用される英語を学ぶ。ここではミーティングで良く用いられる英語表現だけでなく、技術打合せを行う目的や注意事項も併せて学ぶ。

(5)英文議事録 英文議事録の書き方、および議事録で使用される英語を学ぶ。ここでもミーティングの成果を議事録にまとめる際の注意事項も併せて学ぶ。

(6)共同開発実務 英文機密保持契約書やライセンス契約書を例として、海外企業との共同開発で使われる英語を学ぶ。新入社員の間は一人の技術者として技術ミーティングと呼ばれるだけであっても、すぐに協働開発実務として必要になるためである。

(7)米国特許 米国特許公報の基本形式および米国特許公報で使われる英語を学ぶ。共同開発実務の中では、先行技術調査と研究開発成果の知的財産権確立の両面で重要である。

(8)エレクトロニクス製品カタログ 身近な電器製品としてデジタルカメラを取り上げ、商品特長の訴求方法などのカタログで使われる英語を学ぶ。開発成果として商品化が決まった場合には必ず作成が必要

になる。

(9)エレクトロニクス製品マニュアル 身近な電器製品としてデジタルカメラを取り上げ、操作方法の説明など、取扱説明書（ユーザマニュアル）で使われる英語を学ぶ。

(10)エレクトロニクス製品保証書 身近な電器製品としてデジタルカメラを取り上げ、保証適用期間や対象、条件など、保証書で使われる英語を学ぶ。製品マニュアルや製品保証書も開発した商品の発売が決まった場合には必ず作成が必要になる。

(11)規格書 身近な規格としてデジタルカメラの画像ファイルとして広く普及しているExif規格を例として、規格書で使われる英語を学ぶ。今日のデジタル機器で国際規格と無縁な商品は皆無と言っても過言でない程に商品開発実務の中で規格書の重要性は高まっていることを背景としてトピックに含めた。

2.3. 授業実践実験 授業実践実験として、本校電気工学科3年生を対象に、工業英語として授業を行い、学生からのフィードバックを注意深くモニターすることとした。

学生からのフィードバックとしては、定期試験/中間試験の結果から工業英語分野での英語力を評価するのはもちろんであるが、本授業の目的のひとつである英語学習へ向けてのモチベーション面についてはアンケートを通じてフィードバックを集計することとした。

また、特に本授業では、従来の工業英語教育にとどまらず、英語学習が将来技術者としてどのように役に立つかと言うキャリア教育に繋げることを目的としているため、単に良く使う重要表現の習得であったり、語法の正解/不正解にとどまらない、国際技術者としての考え方の教育が重要であるため、学生から自由な発想に基づく質問やコメントを引き出し、教員からもタイムリーなフィードバックを行うことを目的として、積極的なTwitter利用を勧めることとした。Twitterは140文字までのショートメッセージをリアルタイムで手軽に共有できる手段として幅広く普及しており、本論文と同様に学生と教員の双方向インタラクションツールとしての有意義な報告が活発に行われている。

⁽³⁻⁶⁾ 上述の授業設計に基づく教材一式を配布し、Twitterでの自由な質問やコメントも勧めた上で授業実践を行った。

3. 授業実践結果

3.1. Twitter利用についての当初アンケート結果

工業英語教育とキャリア教育の融合を目指した本授業の開始時点でのTwitter利用に関するアンケート結果を図1に示す。図1は本授業でのTwitter利用に関する各項目について5段階のリッカートスケール（強くそう思うを5、そう思うを4、どちらとも言えないを3、そう思わないを2、全くそう思わないを1）で回答を得

た結果で、各項目の一番上のバーがクラス全員の平均、二番目の斜線バーがTwitterアカウント所持者の平均、三番目の縦線バーがTwitterアカウント未所持者の平均を表す。

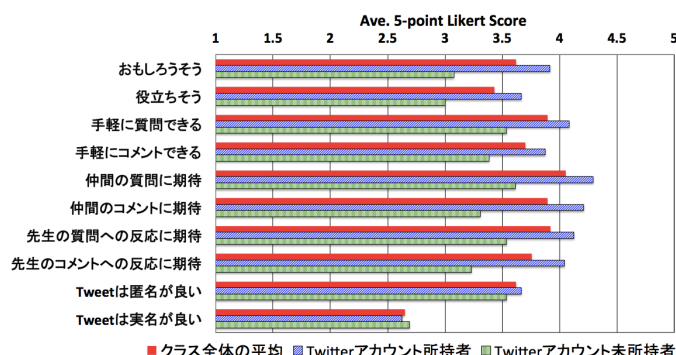


図1 授業開始前のTwitter利用アンケート結果

総合的にもおもしろそう/役に立ちそうとの項目はクラス平均で3.5程度にとどまり、既にTwitterを授業導入されている他大学の既報値より低い傾向にあるが、本授業を行っているクラスが高校3年生に相当する学齢であるため授業開始時点でのTwitterアカウント所持者が約65%と低く、未保持者の多くがTwitterに対して必ずしも良い印象を抱いていなかったために低めに現れているものと考えられる。一方、Twitterアカウント所持者は既にTwitterの利便性を知っているため比較的高い結果となっているものと考えられる。具体的な利用方法としては、手軽に質問できる/コメントできるとの思いに加えて、仲間の質問/コメントを読むことに期待する思いや、先生の反応に期待する思いも多く、いずれもTwitterアカウント所持者が未所持者よりも前向きな期待を持っていることが明らかとなった。

また、Twitterアカウントは個人で複数のアカウントを持って使い分けることが可能であるので、既にアカウントを持っている学生も新たに授業用アカウントを作成して匿名でTweetすることも勧めた上でアンケートを行ったが、アカウントの保持者/未保持にかかわらずやや匿名が良いとする意見が多い結果となった。

これらの結果から、Twitterアカウント保持者と未保持者と大きく受け止め方が異なる結果が明らかとなったので、当面4週間程度の実践授業を行った後に再度アンケートを行うこととした。

3.2. Twitter数の変化

授業第1週から4週目までの各週毎の次回授業までのTweet数を図2に示す。若干飽和傾向にあるものの順調にTweet数は伸びており、4週間でほぼ第1週の5倍近い積極的なやりとりがなされる状態となった。当初は質問でもコメントでもない単なるつぶやきもあったが、次第に質問とそれに対する回答が多くを占めるようになった。他の授業で学んだ事柄との関係を問う質問など、授業中には直

接授業教材と関係ないため質問し難かった事柄も自宅から素朴な疑問として Tweet してくれる例もあり、そういう Tweet は貴重なクラスへの貢献として感謝する旨もクラス内で共有した。このように授業が進むに連れて、徐々に本授業の狙いがクラス内に広まるとともに Twitter の便利さを実感する学生も増えてきたものと考えられる。

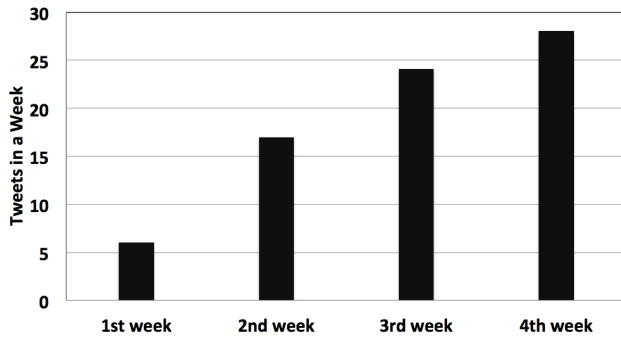


図2 授業開始後第4週までの Twitter 数の変化

3.3. 第4週授業後のアンケート結果 Tweet 数も5倍近くに増加した第4週後に再度 Twitter 利用に関するアンケートを実施した結果を図3に示す。

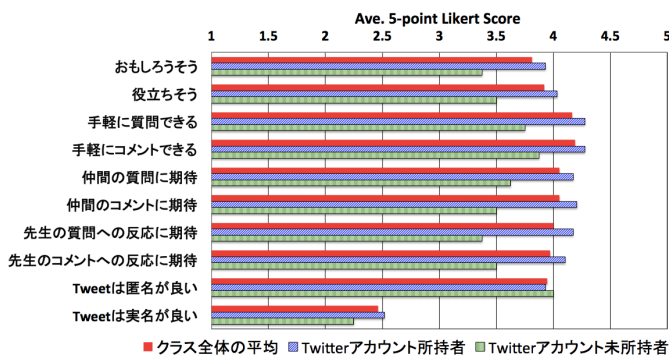


図3 第4週授業後の Twitter 利用アンケート結果

第4週授業後のアンケート結果では、総合的にもおもしろそう/役に立ちそうとの項目はクラス平均で 3.8～3.9 程度にまで上昇した。Twitter アカウント所持者が当初の 65%から 78%に増加し、未所持者が 35%から 22%に減少したことでクラス平均値が所持者の平均値に近づいているが、未所持者の平均も当初 3.1 程度であったものが 3.4 程度に上昇しており、未だアカウントを取っていない学生も授業を通じて Twitter の便利さを感じているものと考えられる。手軽に質問/コメントできるとの項目もクラス平均で 4.2 程度にまで上昇した。こちらも Twitter アカウント未所持者の平均も増加しているのが特徴である。一方、仲間の質問/コメントへの期待は当初アンケート結果と大差なく、先生の反応への期待も若干の増加にとどまった。実名が良いか、匿名が良いかについては、アカウントの所持/未所持にかかわらず、匿名が良いとの回答が増加した。実際に第4週までに Tweet されている質問・コ

メントは全て匿名であり、匿名であることによって周りの目を気にせずに気軽に質問できるのが良い点と受け取られているものと考えられる。

また、第4週授業終了の時点で、Twitter によるコミュニケーションも活かしながら工業英語教育とキャリア教育の融合を目指す本授業の目論見が興味深い（おもしろい）と感じるか、効果的である（役に立つ）と感じるかを5段階のリッカートスケール（強くそう思うを5、そう思うを4、どちらとも言えないを3、そう思わないを2、全くそう思わないを1）で回答を得た結果を図4に示す。興味深い（おもしろい）と思うかについては肯定的な回答が 65%を占め（否定的な回答は 3%）平均が 3.9 であったのに対して、効果的である（役に立つ）と思うかについては肯定的な回答が 50%にとどまり（否定的な回答が 12%）平均も 3.6 であり、興味深い（おもしろい）とは感じながらも、本当に効果的である（役に立つ）のかどうかには疑問も感じている学生が少なくないことがわかった。

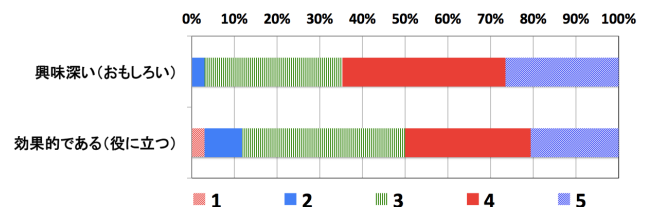


図4 本授業に対するアンケート結果

4. まとめ

国際技術者養成のためのカリキュラムの一貫として電気工学科2年生に導入した英文教科書を用いたデジタル回路授業に続く3年生の工業英語授業として、単に工業英語分野で良く用いられる英語表現を学ぶだけでなく、デジタル回路授業では説明できていなかった『英語が国際協働の中でどのように使われているか』を学ぶことで、工業英語教育とキャリア教育の融合により、実践的な英語力向上と英語学習に対するモチベーション向上を目論んだ授業設計を行った。国際協働の現場で実際に用いられている本物の英文を教材として多読授業を行うことで英語学習とキャリア教育のシナジー効果の最大化を目指し、単に良く使う英語表現の習得であったり、語法の正解/不正解にとどまらない、国際技術者としての考え方を伝授するため、学生から自由な発想に基づく質問やコメントを引き出し、教員からもタイムリーなフィードバックを行うことができる Twitter による質問・コメントを勧めながら授業実践を行った。

結果としては、授業開始から僅か4週間と言う短期間の内に Tweet による前向きな質問は当初の5倍近い数に増加し、Twitter アカウント未所持者も 35%から 22%に減少し、クラス全体に前向きに質問する気風を

広げることができた。

第4週授業終了の時点で実施した、Twitterによるコミュニケーションも活かしながら工業英語教育とキャリア教育の融合を目指す本授業の目論見が興味深い（おもしろい）と感じるか、効果的である（役に立つ）と感じるかのアンケート結果からは、興味深い（おもしろい）と思うとの肯定的な回答が65%を占め、否定的な回答は3%であったのに対して、効果的である（役に立つ）との肯定的な回答は50%にとどまり、否定的な回答も12%存在する結果となったが、今後文部科学省後援工業英語能力検定（工業英検）試験⁽⁷⁾などの外部評価試験を通じて実力向上を実感することで最終的に効果的であった（役に立った）と感じるように授業を進める予定である。

実際に、11月18日に実施された2012年度秋季の工業英検試験においては、本授業実施クラス40名の中から19名が大学専門課程/高専上級学年在学程度とされる3級を受験し、内9名が合格し、英語学習に対するモチベーション向上とともに工業英語力の向上にも繋がっていることが伺われる結果となった。

参考文献

- (1) 天日三知夫, アナスタシア・ライニアソン, 向井守, 山田弘文: 「外国人専門科目教員による専門科目授業の取り組み」, 平成23年度全国高専教育フォーラム教育研究活動発表概要集, pp.33-34, 2011
- (2) 佐藤徹哉, 「専門教科で英文教科書を用いた若年からの国際技術者教育 ～電気工学科2年生でのデジタル回路における取り組み～」, 神戸高専 研究紀要(ISSN 0910-1160), 第50号, pp.81-85, 2012
- (3) 村上正行, 「Twitter を活用した授業における受講生の発言の分析と課題」, 日本教育工学会第27回全国大会講演論文集, pp.749-750, 2011
- (4) 森真也, 細野雄紀, 三瓶広紀, 森裕生, 尾澤重知, 「授業用 Twitter クライアント・アーカイブシステムの開発」, 日本教育工学会第28回全国大会講演論文集, pp.921-922, 2012
- (5) 尾澤重知, 鈴木聖司, 土屋順紀, 森裕生, 江木啓訓, 「大人数授業における Twitter 利用と「授業実況」の効果の検討」, 日本教育工学会第28回全国大会講演論文集, pp.925-926, 2012
- (6) 森裕生, 横山啓太, 江木啓訓, 尾澤重知, 「Twitter を導入した授業における「デジタル私語」の傾向」, 日本教育工学会第28回全国大会講演論文集, pp.927-928, 2012
- (7) 公益社団法人日本工業英語協会 web 情報, <http://jstc.jp>

部分影による出力低下を抑制する太陽電池モジュールの設計

津吉 彰* 濱本 耕平** 徳田 圭佑*** 土江 竜生***

The Enhanced Design of Solving the Partial Shading Problem in Photovoltaic Modules

Akira TSUYOSHI* Kohei HAMAMOTO** Keisuke TOKUDA*** Tatsuki DOE***

ABSTRACT

The enhanced design of photovoltaic module was investigated so that the partial shading problem in photovoltaic modules could be solved. When a photovoltaic module is partially shaded, its electrical power output decreases more than the ratio of lost solar irradiation. Especially in case of the independent PV system, reliability becomes lower due to power loss by the partial shading. Small system such as a solar light has a few PV modules. Therefore power loss due to partial shading means a fatal accident. In the large scale of PV generation bypass diodes equipped each PV module can compensate power loss caused by partial shading. In this study the enhanced design of the PV module which has blocking diodes in each series and bypass diodes on each cell is proposed and investigated by computer simulation and the experiment of the trial manufactured module. When the number of series connection of PV cells comparably larger, the proposed design is effective in the efficiency.

Keywords : enhanced design, photovoltaic module, partial shading, bypass diode, blocking diode

1. はじめに

近年太陽電池の低価格化に伴い、利用範囲の拡大が進んでおり、たとえばLEDなどによる照明の低価格化とあいまって、街灯などの独立型太陽電池が数多く導入されている⁽¹⁾。そのほかにも防災拠点への導入として、防災型太陽電池が導入されている⁽²⁾。太陽電池は日照が得られない場合、発電しないため独立型システムでは併設した蓄電池によって、電力不足を補償している。したがって、低日照による出力の低下が続くとシステムが停止する。街灯や僻地の防災用のテレメータなどでは、設置場所のメンテナンスが行き届かない恐れがある。特に、太陽電池のパネルが小面積である場合、樹木等による部分的な影（以降 部分影とよぶ）による出力低下が問題となる場合もある。太陽電池パネルの25%の部分陰により、出力が半減するデータも示されている⁽³⁾。また筆者らの予備的計測では、

ある太陽電池ではわずか10%の部分影により出力が50%まで低下する事も確認した。このように部分影による出力低下は、天候による出力不足と輻輳した場合、システムの運用に問題が生じる。しかし、部分影は天候不良による低日照と異なり、日照部分の出力を有効に利用する事により、影響を緩和可能である。そこで本研究室は、バイパスダイオード、逆流防止ダイオードをセルレベルで回路に組み込みモジュールを構成する手法により、部分影による出力低下を軽減する太陽電池モジュールの提案を行い、シミュレーションを行うとともに実験的な評価を行った。

2. 太陽電池のシミュレーション

太陽電池の部分影等による障害時の特性を解明するのが本研究の目的である。今回検討の対象とした太陽電池は、セルレベルで入手が容易であったアモルファス系の太陽電池セルである。その太陽電池のSPICEモデルを株式会社ビーテクノロジーの協力により、作成していただいたものを使用した。使用したアモルファス

* 電気工学科教授

** 専攻科 電気電子工学専攻

*** 電気工学科5年

太陽電池は三洋電機株式会社製の AM-8801CAR のセル（ $57.7 \times 55.1 \times 1.1\text{mm}$ ）である。

この太陽電池の実測（データシート）と作成した SPICE モデルによるシミュレーションの結果を表 1 に示す。ここで、計算に使用する SPICE として、LTspice（リニアテクノロジー社製）を使用した。

表 1 設計、検討に使用した太陽電池の特性
（面照度 50kLx 時）

Symbol		Measurement	Simulation	%Error
Pmax	mW	92.56	92.70	0.15
Vpm	V	5.20	5.20	0.00
Ipm	mA	17.80	17.83	0.15
Voc	V	6.80	6.75	-0.67
Isc	mA	20.40	20.30	-0.49

ただし、 Pmax :最大出力
Vpm :最適動作電圧
Ipm :最適動作電流
Voc :開放電圧
Isc :短絡電流

この表より、今回用いた SPICE モデルは計算誤差は上記計算範囲では十分小さく、今後のモジュール設計に利用できるものと判断した。なお、この太陽電池の最大効率は約 6.17%であるが、今回のシミュレーションでは 50kLx という条件のため最大効率は約 5.84%となっている。

次に、太陽電池モジュールのシミュレーション用回路の一例を図 1 に示す。図 1 は 12 個の太陽電池三洋電機製 AM-8801CAR を 3 並列、4 直列で接続した回路である。

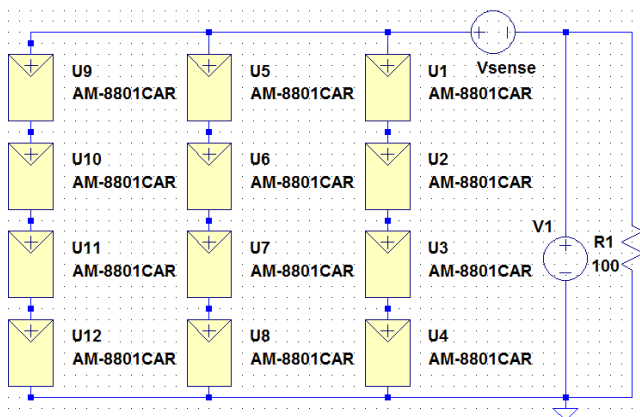


図 1 太陽電池シミュレーション回路図の一例

図において、R1 は任意抵抗、V1 は出力特性シミュレーションの DC スイープ用電源、Vsense は電流検出用の電圧源、U1～U12 は太陽電池の SPICE モデルで AM-8801CAR という型番を附している。今回のシミュレーションでは周りの天気や気温といった環境の変化には着目せず、面照度を 50kLx に固定した発電状況の太陽光パネルの特性とする。具体的な計算方法は図 1 に示す DC スイープ用電源 V1 の電圧を 0V から 0.1V の間隔で上げていき、その時の電流を計算している。

2.1 部分影の無い無障害時の特性 まず、太陽電池に部分影が無い場合の特性を計算した。12 個のセルを 2 直列 6 並列、3 直列 4 並列、4 直列 3 並列、6 直列 2 並列に接続した際の結果をそれぞれ図 2 から図 5 に示す。

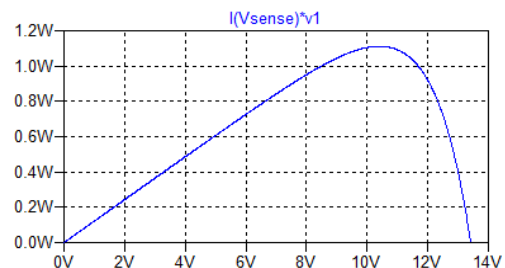
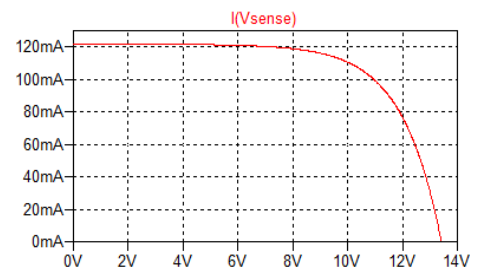


図 2 無障害時 V-I 特性,P-V 特性(2 直列 2 並列)

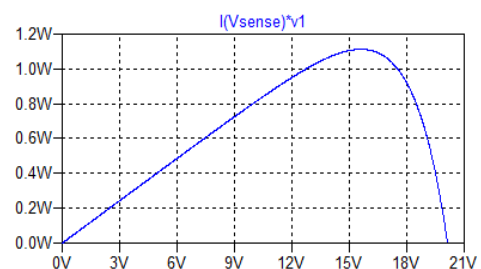
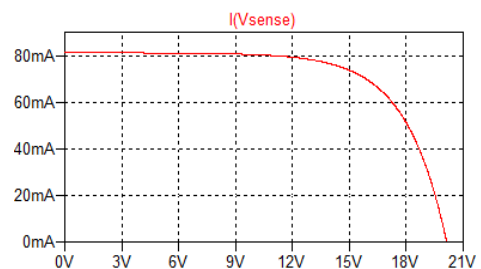


図 3 無障害時 V-I 特性,P-V 特性(3 直列 4 並列)

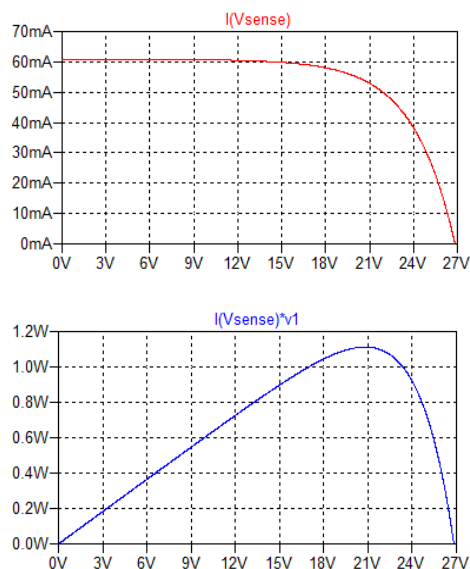


図4 無障害時 V-I 特性,P-V 特性(4 直列 3 並列)

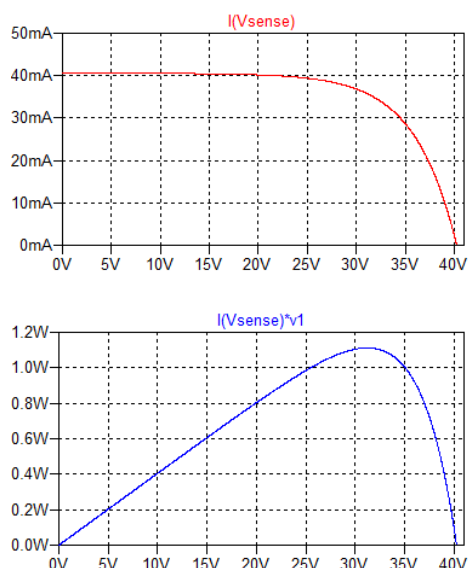


図5 無障害時 V-I 特性,P-V 特性(6 直列 2 並列)

当然の事ながら、部分影の無い無障害時ではいずれの接続法においても、最大出力はセル 12 個分の $12 \times 92.56 = 1110\text{mW}$ を示している。開放電圧は直列数に比例し、短絡電流は並列数に比例するという、いずれも理論通りの結果を示している。

2.2 部分影時の特性 続いて、図 1 の回路において U12 セルが陰のため、光起電力をゼロとして計算する事により、部分影時の特性を求めた。12 個のセルを 2 直列-6 並列、3 直列-4 並列、4 直列-3 並列、6 直列-2 並列に接続した際の結果をそれぞれ図 6 から図 9 に示す。部分影により日射量は (11/12) 倍になるため、理想的な最大出力は 1018W であるが、いずれもその出力を下回り、直列数が多いほど出力が低下している。6 直列 2 並列では理想出力の約 60% の出力となっており、モジュール内の部分影による効率低下が確認された。

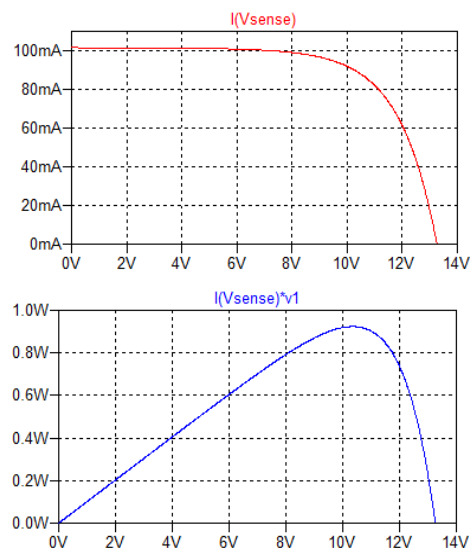


図6 部分影時 V-I 特性,P-V 特性(2 直列 6 並列)

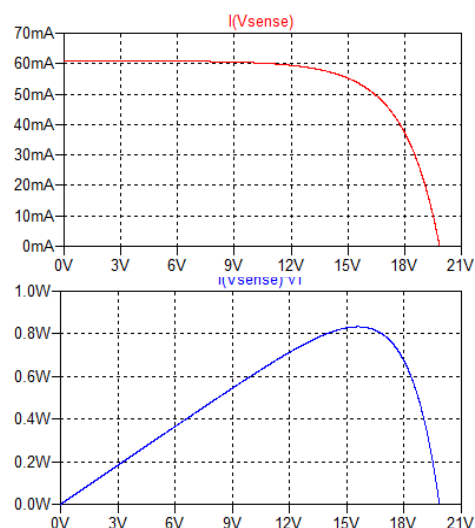


図7 部分影時 V-I 特性,P-V 特性(3 直列 4 並列)

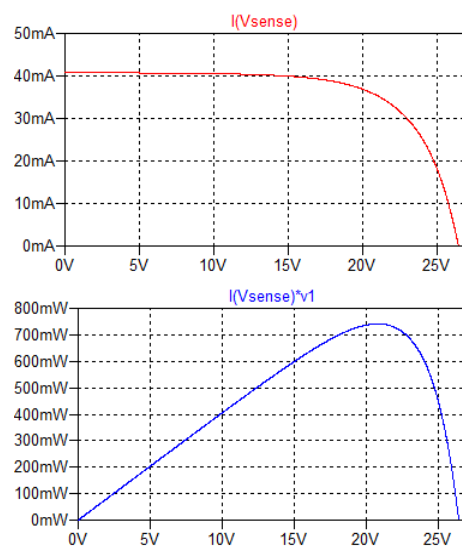


図8 部分影時 P-V 特性(4 直列 3 並列)

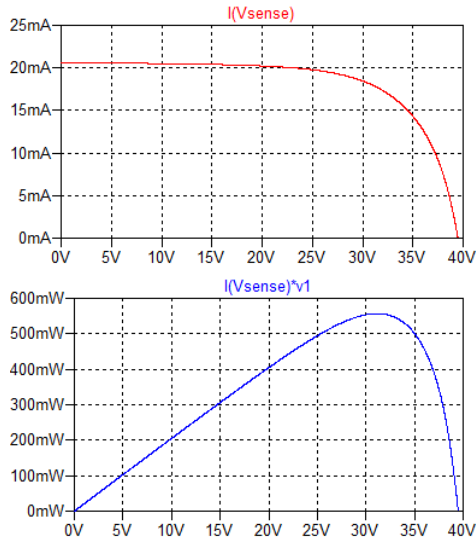


図9 部分影時 V-I 特性,P-V 特性(6 直列 2 並列)

3. 部分影による出力低下を抑制する回路設計

現状の市販モジュールはモジュール単位でバイパスダイオード、逆流防止ダイオードといった出力不平衡時の損失を防止する回路を備えている。本研究で提案するモジュールはセル単位で対策を施す事により、1モジュール内の出力不平衡も補償可能である。近年順方向電圧降下の小さい性能の優れたショットキーダイオードが開発されたため、セル単位でダイオードを設置する場合でも、平常時の損失を小さくすることができる。ここでは、図10のようにダイオードを接続した際の特性について検証した。

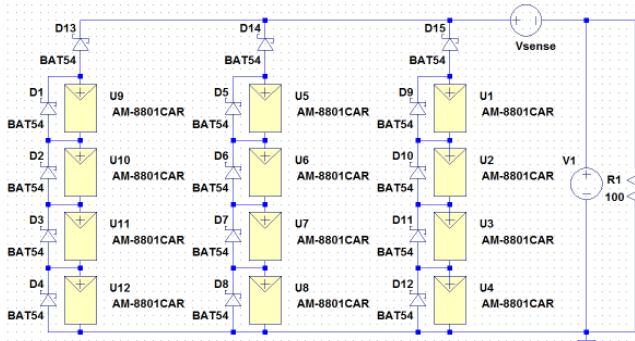


図10 ダイオード組込時のシミュレーション回路図

シミュレーションの結果の一例を図11から図15に示す。無障害時の電力については図11と図4を比較して分かるように供給電力にはほとんど差が無く、ダイオードによる正常時の損失はセル1110mWを出力する合計12枚に対し、10mW程度とかなり低いことが確認された。また、部分影に対する損失抑制効果については、例えば6直列2並列のモジュール構成の場合、図9と図15を比較すると無対策の場合の出力550mWに対し、950mWと73%も大きな出力が得られる事が確認された。

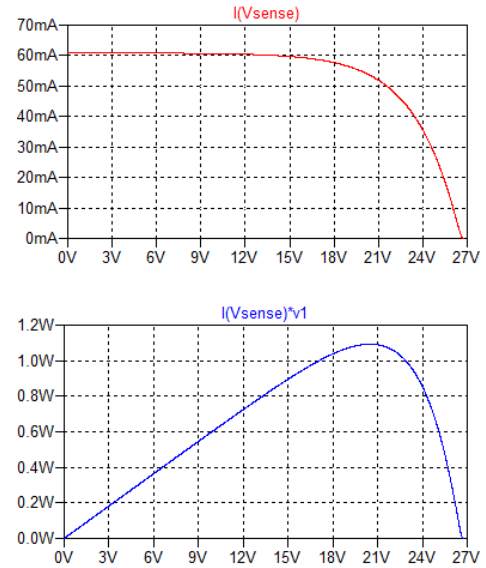


図11 正常時 V-I 特性,P-V 特性(4 直列 3 並列)

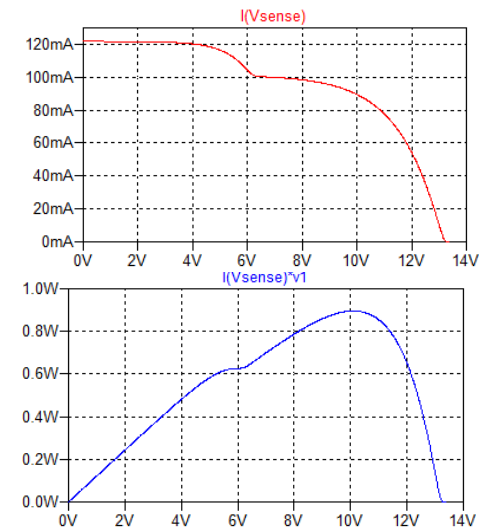


図12 部分影時 V-I 特性,P-V 特性(2 直列 6 並列)

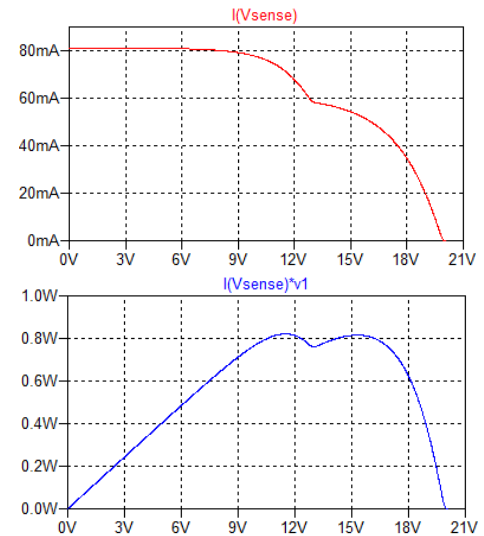


図13 部分影時 V-I 特性,P-V 特性(3 直列 4 並列)

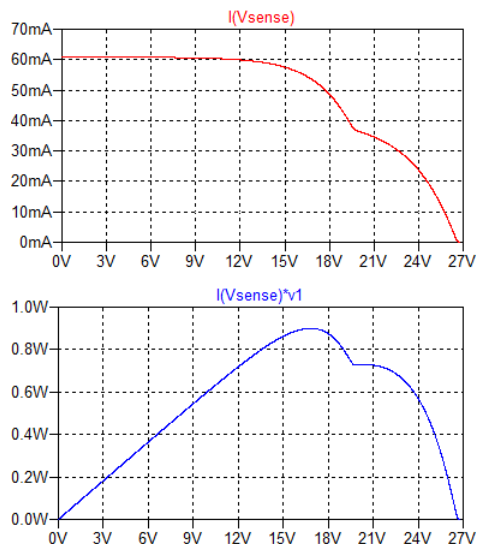


図 14 部分影時 V-I 特性,P-V 特性(4 直列 3 並列)

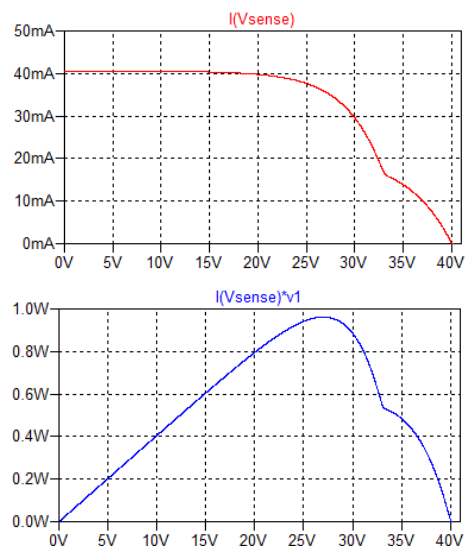


図 15 部分影時 V-I 特性,P-V 特性(6 直列 2 並列)

以上の結果をまとめ、表 2 に示す。それぞれの計算方法は下記の通りである。

$$\text{効率} = \frac{\text{最大出力 (Pmax)}}{\text{太陽光エネルギー (Ps)}} \times 100[\%] \quad (1)$$

無障害時

$$Ps = \frac{500W}{m^2} (50kLx \text{ 相当}) \times \text{パネル面積}(m^2) \times \text{総パネル数} \quad (2)$$

部分影時

$$Ps = \text{無障害時 } Ps - \frac{500W}{m^2} (50kLx \text{ 相当}) \times \text{部分影面積}(m^2) \quad (3)$$

$$\text{利用率} = \frac{\text{効率 (無障害)}}{\text{効率 (それぞれの条件の効率)}} \times 100 \quad (4)$$

表を見てわかるように、直列接続数が増えるにつれて全てのパネルの効率・利用率が低下していることが分

かる。これは直列中に一つでも障害が出た場合その列全てに影響が出るため、このような結果になったと考えられる。ダイオードを接続した場合を未接続の場合と比較すると、4 直列以上の場合に出力が向上した。直列接続数が多い時ほどダイオードの効果がある事が確認できた。

表 2 シミュレーションまとめ

		ダイオードなし			ダイオードあり		
		最大出力(w)	効率(%)	利用率(%)	最大出力(w)	効率(%)	利用率(%)
無障害時		1.112	5.82	100	1.093	5.72	98.29
障害発生時	2直列 6並列	0.923	5.28	90.55	0.896	5.12	87.9
	3直列 4並列	0.832	4.76	81.62	0.821	4.7	80.54
	4直列 3並列	0.741	4.24	72.67	0.9	5.14	88.29
	6直列 2並列	0.556	3.18	54.57	0.962	5.5	94.38

4.提案回路の試作による検討

シミュレーションを行ったモジュール構成でモジュールを試作した。図 16 に回路図、図 17 に外観を示す。

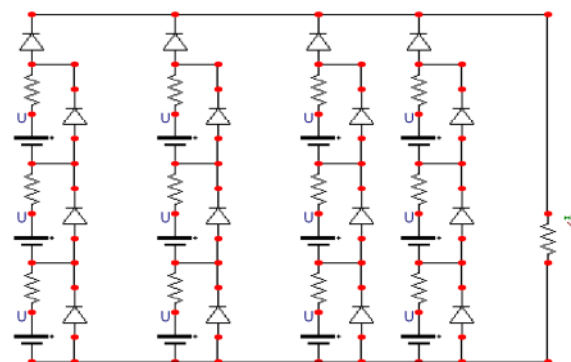


図 16 試作モジュールの回路図

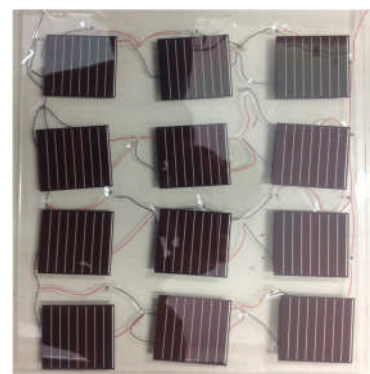


図 17 試作モジュールの外観

ここでは太陽電池を定電源圧源として図示している。ダイ

オードとしては、バイパスダイオード、逆流防止（ブロッキング）ダイオードともにパナソニック社製ショットキーダイオード DB3X315E0L を使用した。試作したモジュールは通常ソーラーシミュレータにより試験されるが、校内に適当な設備が無いいため、試験的に天候の安定した日に屋外で実験を行った。本実験は出力の絶対的な大きさは評価対象で無く、部分影の影響と、ダイオードによる改善効果の確認が主目的であり、本論文では問題としない。結果を図 18～20 に示す。

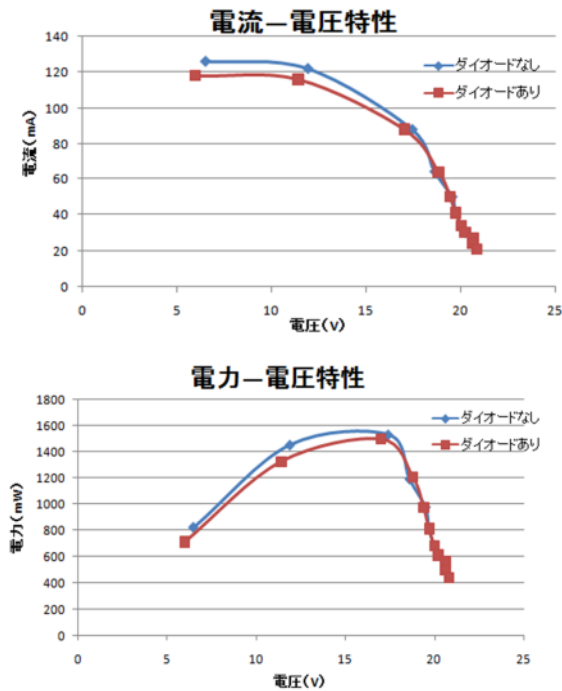


図 18 試作モジュールの特性(影なし)

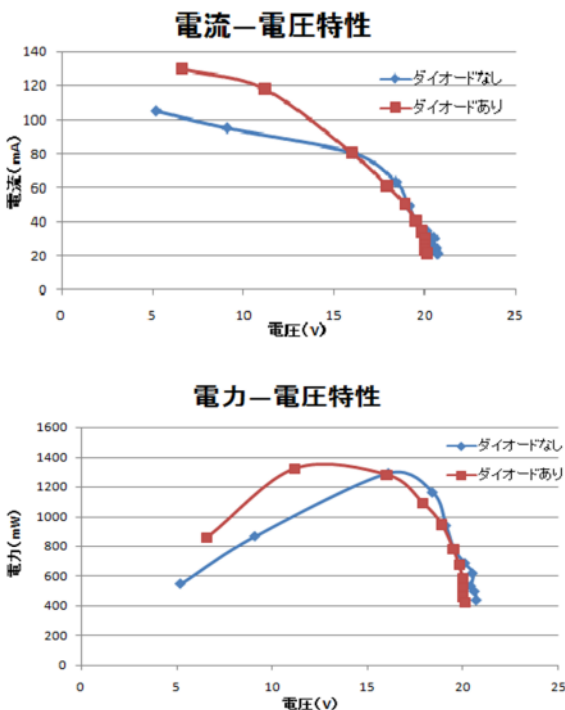


図 19 試作モジュールの特性(影 1 セル分)

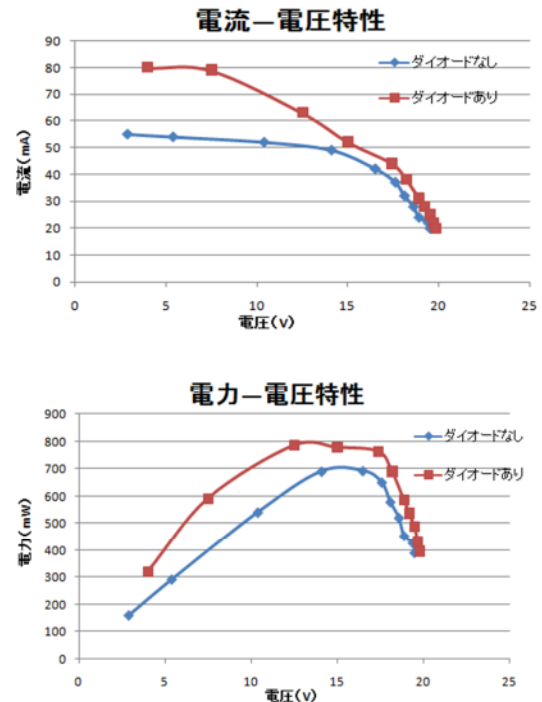


図 20 試作モジュールの特性(影 2 セル分)

電流、電圧、電力の各値については、シミュレーションと入射光の条件が違ったため、大きさが異なるものの、シミュレーションの結果とおなじ傾向の結果が得られた。

4. まとめ

シミュレーションならびに、試作したモジュールにより、モジュールの一部に日陰や付着物による部分影が生じた場合の出力低下を軽減できるモジュール構成について検討した。提案した各セルにバイパスダイオードを付属する回路構成が有効であることを確認した。今後、より実用的な規模での検討をして、防災用のテレメータ電源などの設備に利用できるモジュールの開発につながると思われる。

謝辞

本研究において、太陽電池のSPICEモデル作成に、株式会社ビーテクノロジーに協力頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 経 済 産 業 省 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部新エネルギー対策課:「太陽光発電システム等の普及動向に関する調査」,2011
- (2) たとえば,森山正和ほか「情報防災拠点における太陽光発電システムの有効性に関する研究」,神戸大学都市安全研究センター研究報告 8, 363-368, 2004-03
- (3) Wang, Y.-J *et al.*, "Analytical modeling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules", IET Renewal Energy, Vol.4 , pp.272 – 282,2010

ウェーブレット変換によるギター音色の解析

築地美由樹*

笠井正三郎**

Tone Analysis of Guitar using Wavelet Transform

Miyuki TSUKIJI*

Shozaburo KASAI**

ABSTRACT

In this paper, we discuss some results of tone analysis of guitar using a Wavelet transform. Sound analysis of musical instruments has been well researched and an important theme in conducting sound analysis. To accomplish the research, customarily Fourier transform is mainly used. However, it is difficult for Fourier transform to clarify the relation between frequency and time. Whereas this relation is important to research on sound. Wavelet transform enables us to clarify the relation between them. Wavelet transform is superior in this point. Results in this paper suggest that this method may make it possible to distinguish the musical performance from a Wavelet transform result. To summarize, We proved that Wavelet transform could distinguish the musical performance, and that Wavelet transform result changes with a guitar and a player's skill.

Keywords : Wavelet transform, tone analysis, guitar

1. はじめに

音楽音響学は、楽器の設計および製作への寄与、演奏技術に関する知見、音楽情報処理ソフトウェアの開発などさまざまな目的のもと日々進化を続け、変貌を遂げている。中でも楽器の音色については、構造や製法、奏法のあらましなどを含め、音の聞こえ上の性質と物理的な性質との対応関係を説明するため、さまざまな人が音色解析を行っており、多くの理論・意見が集約されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

音色解析に使われる代表的な解析手法としてフーリエ変換が挙げられるが、フーリエ変換による解析は周波数の情報を含む一方で、時間的な情報は失われるという欠点があった。時間軸情報を得るためには、窓関数を用いて信号を一定間隔ずつ切り出し、それを次々にスペクトル解析する短時間フーリエ変換が必要となる。しかし、短時間フーリエ変換の窓幅は一定間隔であり、幅の広い窓は周波数分解能が良いが時間分解能は悪く、逆に幅の狭い窓は時間分解能が良いが周波数分解能が悪いという難しい問題があった。それに対しウェーブレット変換は、高周波領域では時間間隔を狭くしてより細かく解析し、低周波領域では時間間隔を広げてより大きく解析を行うという柔軟な作業が可能である。このためウェーブレット変換では広い周波数領

域の解析を可能にし、また、信号の急激な変動にも対応できる。

本研究では、これまでウェーブレット変換の応用研究が行われており、平成19年度の研究⁽⁵⁾では、連続ウェーブレット変換を用いて楽器ごとの音色の特徴を見つけ出すことは非常に容易であるとの結論が出ている。そこで、本研究では、多種多様な楽器の中で、ギターの音色についてウェーブレット変換を行い、楽音解析への適用の可能性および有用性を検証することを目的とし、得られた知見について報告する。

2. ウェーブレット変換

ウェーブレット変換には、連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換があり、離散ウェーブレット変換は画像処理の分野ではJPEG2000という画像圧縮の標準の中で使われるほど普及しているが、連続ウェーブレット変換においては異常信号の検出⁽⁶⁾など極限られた応用例がある程度で、その応用はあまり一般に行われていない。しかしながら、実務的な必然性から生まれたこのウェーブレット変換は、早くから数学的な体系の整備がされたこともあり、誕生からすぐに、ありとあらゆる応用が盛んに議論されている。本研究では、時間周波数解析にすぐれた連続ウェーブレット変換によりギター音色の解析を行う。

2.1 ウェーブレット解析の概要 ウェーブレット解析は信号の時間と周波数の関係を2次元的にダイナミックに解析するものである。また、その基底関数はマザー

*大阪府立大学工学部電気情報システム工学科（平成23年度電子工学科卒業）

**電子工学科 教授

ウェーブレットと呼ばれる小さな波の薄片である。ウェーブレット変換は、この基底関数となるマザーウェーブレットをいろいろな縮尺に引き伸ばし、この関数と信号との内積取ることにより類似成分の抽出を行う。さらに個々のウェーブレットを時間軸方向に移動させながら、それぞれの時間位置で信号の周波数解析を行う。

2.2 連続ウェーブレット変換 ウェーブレットとは、平均値が0で原点 $t = 0$ の周りに局在する波として定義され、波の基本単位として用いられる。この関数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び、 $\psi(t)$ で表現する。ウェーブレット関数は2つの実数パラメータ a, b を用いて、(1)式のように基底 $\psi_{a,b}(t)$ を生成する。

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

ここで、 a は拡大縮小、 b はシフトのためのパラメータであり、さらに、 $1/\sqrt{a}$ は正規化のための係数である。図1に、ウェーブレット $\psi(t)$ を b だけシフトし、 a に伸長した $\psi_{a,b}(t)$ を示す。

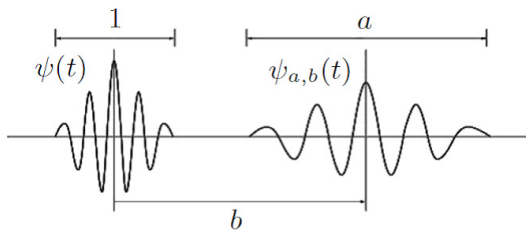


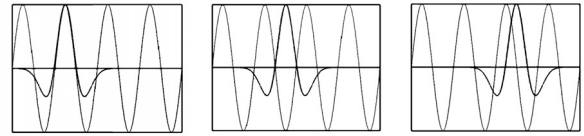
図1 ウェーブレットのスケールとシフト

さらに、この $\psi_{a,b}(t)$ と信号 $f(t)$ との内積がウェーブレット変換あるいは連続ウェーブレット変換であり、(2)式で定義される。

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

ウェーブレット関数は一般的に複素数であり、(2)式の $\overline{\psi(t)}$ は、 $\psi(t)$ の複素共役である。ウェーブレット係数 $(W_{\psi}f)(b, a)$ はフーリエ変換のフーリエ係数に相当し、 $t = b$ において、 $f(t)$ の中に $\psi_{a,b}(t)$ の成分がどれだけ含まれているかを示している。また、 $1/a$ は周波数に相当し、 a が小さいと高周波成分、 a が大きいと低周波成分に対応する。

図2は、正弦波形に対しメキシカンハットウェーブレットによって、さまざまな位置でウェーブレット係数を調べている図を示している。図2(a)は、ウェーブレット係数が大きな正の値の場合である。図2(b)は、図2(a)からウェーブレット信号の位相がシフトしており、この場合ウェーブレット係数は大きな負の値をとる。また、図2(c)は、ウェーブレットと信号によって値がゼロになる点を示している。



(a) 正の相関を与える場合 (b) 負の相関を与える場合 (c) ゼロの相関を与える場合

図2 正弦波形から情報を得るウェーブレット

3. 測定系の構成及び解析手段

図3に測定系の構成を示す。解析に用いたギター音は、PCに接続されたマイク(オーディオテクニカ, AT9745)を用いて取り込む。録音にはWindowsに標準で組み込まれているサウンドレコーダーを使用し、取り込む際のサンプリング周波数はCDと同じ44.1kHzとし、wave形式で保存した。解析を行う信号は元の音源からサウンドレコーダーを用いて切り取り、ScilabのWavelet TOOLBOXを用いウェーブレット変換を行った。

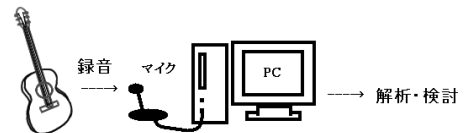


図3 測定系の構成

4. 音の解析方法

4.1 基本事項 ウェーブレット関数は一般的に複素数であるため、ウェーブレット係数は実部と虚部を持つ。そのため解析結果は振幅と位相の2種類の結果が得られた。振幅(各図の明るさ)は、明るくなるほどウェーブレット係数の絶対値が大きいことを表している。一方、位相の値は成分波形の時間軸上の $-\pi$ と π の間で周期的に変化する。図の上では最も暗い色から最も明るい色にかけて $-\pi$ から π へと段階的に変化させることでその値を表現した(後述図4等を参照)。

位相、振幅の結果とも横軸は時間軸、縦軸はスケール値を表す。スケール値は、値が低いところは高周波成分を表し、高ければ低周波成分にあたる。これらのことを総合して考えて、音の特徴を分析する。

4.2 相関係数 音色の特徴を述べる際に、ある程度定性的な判断が含まれるのはやむを得ないが、2つ以上の音色の類似性を判断する際、肉眼で漠然と「似ている」では正当性に欠ける。そのため、結果に対して、相関係数を用いて検証を行った。相関係数とは、主に2つの画像の間の類似性を検証するのに用いられる手法であり、(3)式で定義される。

$$R = \frac{\sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n \{f(s,t) - \bar{f}\} \{g(s,t) - \bar{g}\}}{\sqrt{\sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n \{f(s,t) - \bar{f}\}^2} \sqrt{\sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n \{g(s,t) - \bar{g}\}^2}} \quad (3)$$

この式において、 f, g はそれぞれ2つの2次元配列を表しており、 $f(s, t), g(s, t)$ はそれぞれ s 行 t 列の画素値を示す。 $\bar{f}, \bar{g}$ は、すべての要素の平均値を表す。 m, n は配列の要素の個数である。この場合、対象がまったく同一であったときは、計算結果は1になり、2つの対象の類似性が少なくなっていけばなっていくほど計算結果は0に近くなる。ウェーブレット変換した結果に対して相関係数を計算することにより、音色の感覚的な類似性とウェーブレット変換結果の類似性がどの程度一致するものかを検証した。

4.3 音色の解析 解析に用いた音色のデータはwaveファイルの音を必要に応じて適当なサイズに調整することで作成し、それを連続ウェーブレット変換することにより解析を行った。解析結果の図をエクスポートし、その画像に対して相関係数を求めることで類似性を検証した。相関係数は比較したい画像の全ての組み合わせについてその値を求めたので、その全組み合わせを表に記載した。

また、各音色に再現性があるかを確認するため、各音は複数回同じ奏法で録音を行った。そのため5章の解析結果では、それぞれの音に対してウェーブレット変換を行った結果を確認し、そのいずれの場合でも当てはまることについて、その特徴を述べている。

さらに、同じ奏法でも楽器や奏者によって音色に変化がみられる可能性がある。そのため異なるギター2台を使用し、また、奏者も変更してそれぞれ録音を行った。その詳細を表1に示す。

表1 録音条件		
区分	ギター1	ギター2
価格	20万円	80万円
奏者	中級者	熟練者
録音回数	3回	2回

5. 解析結果

5.1 基底の選択 ウェーブレット変換は基底によって結果が変わるため、比較検討を行う研究の場合、同じ基底を用いて変換を行う。そこで、いくつかの音源に対して解析を行い、その結果、相関やスケール値ごとの係数の総和の比較などから、本研究ではMorlet基底を使用してギター音の解析を行うことにした。

5.2 演奏位置での比較 始めにギターの弦を弾く右手の位置を変えることで解析結果にどのような違いが生じるかを検討した。以降、表1のギター1で録音した

表2 演奏位置での比較

番号	名称	弦	音	演奏位置
①	通常的位置	6弦開放弦	E	通常
②	ブリッジ寄り	6弦開放弦	E	ブリッジ寄り

ものと、ギター2で録音したものとそれぞれについて順に述べる。まず、解析を行った2種類の音の詳細を表2に示す。なお、奏法は表の番号を使って区別する。また、表の演奏位置は、弦を弾く右手の位置を意味し、サウンドホールと弦の交点の辺りを通常として、その位置と駒の中間辺りをブリッジ寄りと呼ぶことにする。

5.2.1 ギター1 ギター1を使用した場合の表2の奏法による音の解析結果、相関係数を順に示す。図4は①の場合、図5は②の場合のギター音の解析結果である。また、表3、表4は①と②の位相と振幅における相関係数を示している。

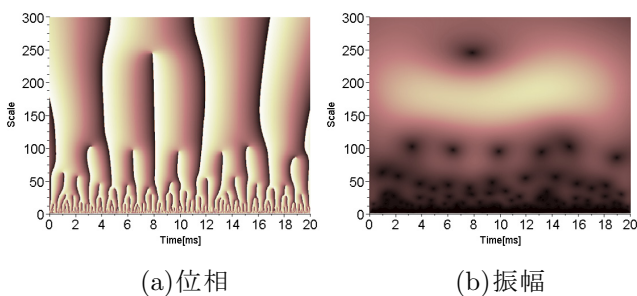


図4 ①通常的位置

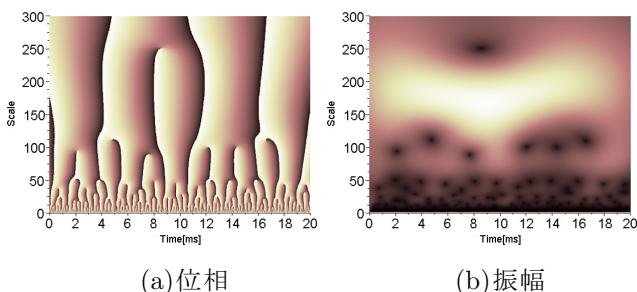


図5 ②ブリッジ寄り

表3 ①と②の相関係数(位相)

		①		
		音源1	音源2	音源3
②	音源4	0.726	0.665	0.601
	音源5	0.691	0.721	0.604
	音源6	0.567	0.518	0.519

表4 ①と②の相関係数(振幅)

		①		
		音源1	音源2	音源3
②	音源4	0.966	0.945	0.916
	音源5	0.957	0.948	0.884
	音源6	0.881	0.864	0.837

表5 ①の相関係数

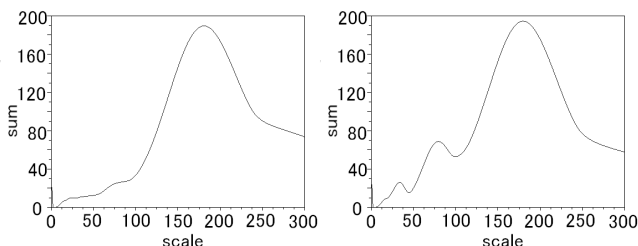
音源	位相	振幅
音源1と音源2	0.841	0.984
音源1と音源3	0.553	0.926
音源2と音源3	0.581	0.846

表6 ②の相関係数

音源	位相	振幅
音源4と音源5	0.777	0.968
音源4と音源6	0.557	0.872
音源5と音源6	0.521	0.880

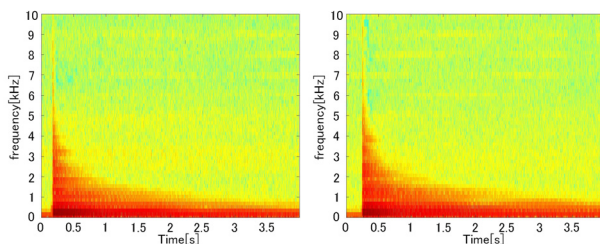
これら2種類の音は聞え上大変よく似ており、録音した音源を聞いて区別するのは難しい部類に入る。解析の結果からも大きな違いを述べることは難しく、各音源での相関にもばらつきがある。比較のため、①と②についてそれぞれ3回分の音の相関係数を表5、表6に示す。①と②との相関と数値に差がないところからも、これら2つの音を区別するのは難しいといえる。

次に、図6に各スケールでの振幅値の総和を示す。この結果から、①に比べ②はスケール値70付近で値が大きくなっていることがわかる。②は、①よりも基音に対する倍音の成分がわずかに強いと考えられる。このことを確認するため、これら2つの音色に対し短時間フーリエ変換を行った。窓関数はハニング窓を使用し、窓長を256点、移動量を64点とした。その結果を図7に示す。この図から、わずかではあるが①の奏法に対し②の奏法には音の出だしで高周波成分が多く含まれていることがわかる。今回は確認のため短時間フーリエ変換を行っ



(a)①通常的位置 (b)②ブリッジ寄り

図6 ウェーブレット係数の総和



(a)①通常 (b)②ブリッジ寄り

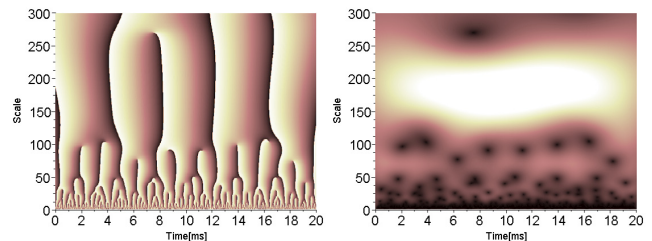
図7 短時間フーリエ変換結果

た結果を記載したが、図6のほうが図7に比べはつきりとその違いがわかることが確認できる。

5.2.2 ギター2 ギター2での①と②の解析結果を図8、図9に、表7、表8にその相関係数を順に示す。

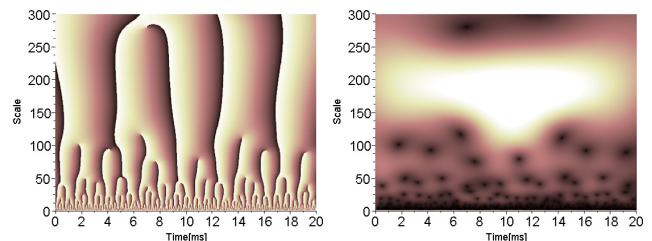
演奏位置での比較のみに限らず、ギター2で演奏した場合、全てで、ギター1で演奏した場合に比べ振幅での明るさが全体として強くなっている。聞え上の音量は揃えてあるため、この原因としてはギター2がギター1に比べ音の持続時間が長く、減衰が遅いことが考えられる。

この奏法の場合には、ギター1で演奏した場合に比べ、ギター2で演奏した場合、それぞれの奏法での再現性が高く、ギター1で演奏した場合のように、2種類の奏法どちらであるかに関わらず演奏のたびに結果がばらばらになるという事態にはならなかった。そのため図8と図9のわずかな形状の違いは、そのまま音色の違いといえる。また、①は2回録音してあるため、お互いの相関



(a)位相 (b)振幅

図8 ①通常的位置



(a)位相 (b)振幅

図9 ②ブリッジ寄り

表7 ①と②の相関係数(位相)

		①	
②	音源3	0.574	0.574
	音源4	0.665	0.659
	音源1 音源2		

表8 ①と②の相関係数(振幅)

		①	
②	音源3	0.954	0.947
	音源4	0.951	0.938
	音源1 音源2		

を求めたところ、位相が0.871,振幅が0.975であった。①と②の位相の相関が0.574~0.665,振幅の相関が0.938~0.954であるため、相関の数値からも奏法によって結果に違いが出ていることがわかる。

5.3 ハーモニクス奏法との比較 次に、特殊奏法の中でも代表的な奏法であるハーモニクス奏法について解析を行った。その音の詳細を表9に示す。

表9 ハーモニクス奏法との比較

番号	名称	弦	音	演奏位置
③	ハーモニクス奏法	4弦7フレット	A	通常
④	同じ音高	1弦5フレット	A	通常

5.3.1 ギター1 次に、表9の③と④の奏法の解析結果を図10,図11に記載する。また、その相関を表10,表11に示す。④は③と同じ音高にあたる音を通常の演奏方法(弦を押さえること)によって演奏した場合である。③と④を比較してみると、位相、振幅とも④は非常に周期性が高いことが確認できる。振幅については、最も強い成分がほぼ同じスケールにあることから、この2つが同じ音高であることが確認できるが、スケールの低い部分では大きな違いが見られる。ここで、④の奏法で3回録音した際のお互いの相関を表12に示す。③と④の相関は、これらの値に対し、はっきりと低い値となっている。また、③は④に比べスケールの低い部分での振幅が暗いことから、倍音成分が抑えられていることがわかる。

ここで、周期性を定量的に評価するため、周期と思われる時間幅の信号を基準信号として自己相関を求めた。図12にそれぞれの奏法に対する相関係数のグラフ

表10 ③と④の相関係数(位相)

		③		
		音源1	音源2	音源3
④	音源4	0.539	0.530	0.456
	音源5	0.463	0.488	0.483
	音源6	0.423	0.442	0.492

表11 ③と④の相関係数(振幅)

		③		
		音源1	音源2	音源3
④	音源4	0.887	0.934	0.758
	音源5	0.870	0.926	0.747
	音源6	0.874	0.937	0.754

表12 ④の相関係数

音源	位相	振幅
音源4と音源5	0.787	0.991
音源4と音源6	0.627	0.988
音源5と音源6	0.711	0.990

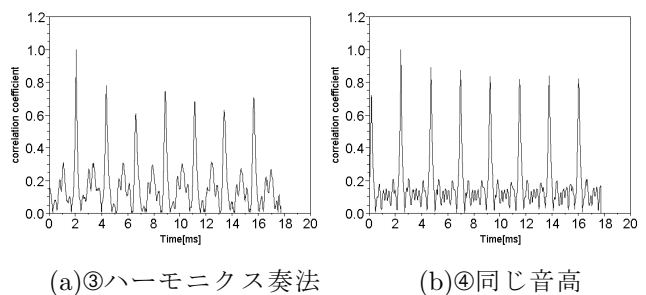


図12 ④同じ音高

を示す。なお、相関が1になっているところが基準となる信号である。どちらも周期の点で大きな値をとっているものの、④に対し③は相関係数が低く、④は周期性が高いといえる。

最後に、ハーモニクス奏法に失敗し、音が濁った場合のウェーブレット変換結果を図13に記載する、図10と比較すると、位相において、スケール100付近で周期性

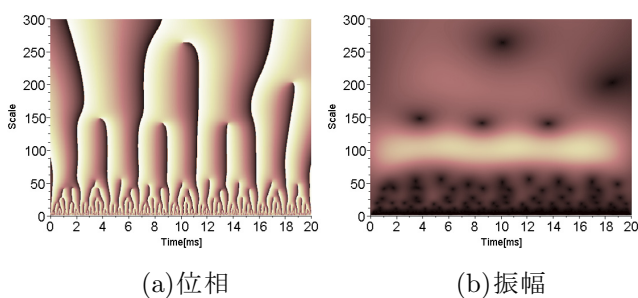


図10 ③ハーモニクス奏法

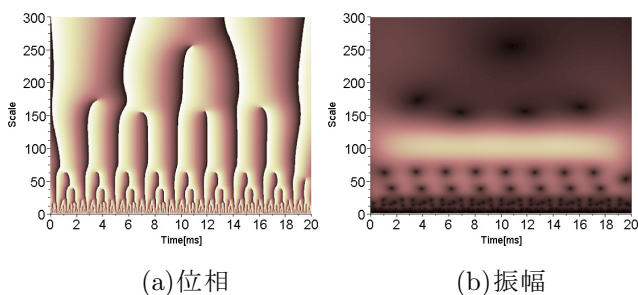


図11 ④同じ音高

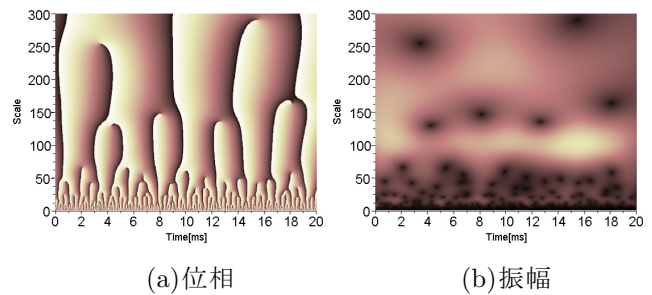


図13 ③ハーモニクス奏法(失敗)

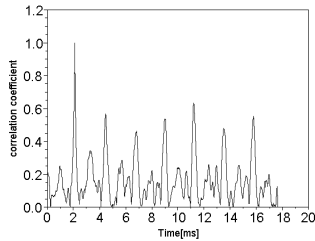


図14 失敗した場合の周期性の自己相互評価

が高かったものがばらばらになり、周波数が時間的に変化していることがわかる。振幅においても、スケール100付近で水平方向に帯状に明るくなっていたものが、画面全体が明るくなっている。

ここでも、周期性の自己相関評価を行い、その結果を図14に示す。図14と図12(a)を比較すると、図14は、周期における相関係数のピークが小さい。このことから、ハーモニクス奏法としての完成度が高ければ、位相の周期性が高く、また振幅においても一部のスケール値のみが大きくなるものと予想される。

5.3.2 ギター2 まず、③と④の音について比較を行う。解析結果を図15、図16に、相関係数を表13、表14に示す。

ギター2の場合もギター1と同様、位相、振幅とも④の奏法は非常に周期性が高いことが確認できる。

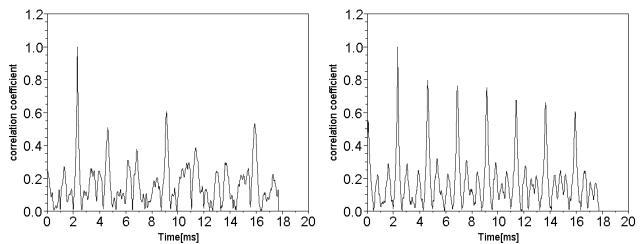
また、図15(b)と図16(b)から③に比べ④の奏法の方が基音とみられるスケールにおける大きさが一定で、帯状に水平に広がっている一方、③では時間によってわずかに値が変動している。このこともギター1、ギター2に

表13 ③と④の相関係数(位相)

		③	
		音源1	音源2
④	音源3	0.558	0.535
	音源4	0.567	0.498

表14 ③と④の相関係数(振幅)

		③	
		音源1	音源2
④	音源3	0.929	0.878
	音源4	0.928	0.890



(a)位相

(b)振幅

図17 ④同じ音高

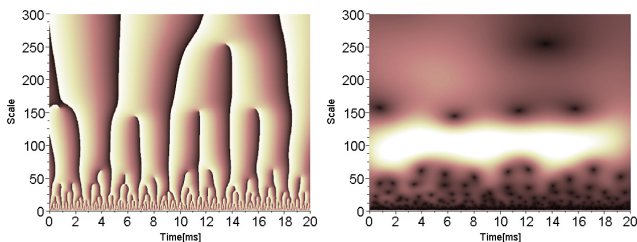
共通する結果である。また、④の奏法で2回録音した際、お互いの相関は位相が0.602、振幅が0.964であったのに対し、低い値となっている。ここでも、周期性の自己相関評価を行い、その結果を図17に示す。

5.4 ハンマリング奏法との比較 次に、ハンマリング奏法について通常の奏法との比較を行った。録音した音の詳細は表15の通りである。この奏法についてはギター2での録音の際、雑音がギター音の信号に対して無視できないほど強く混じってしまった。そのためギター1についての解析結果のみを述べる。

表15 ハンマリング奏法との比較

番号	名称	分類	弦	音	演奏位置
⑥	通常の奏法	通常	1弦3フレット	G	通常
⑦	ハンマリング奏法	特殊	1弦3フレット	G	通常

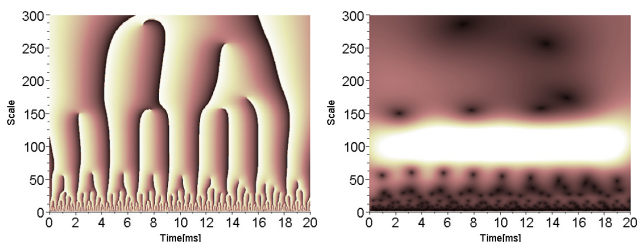
5.4.1 ギター1 発音前から今までより長めに時間を取りウェーブレット変換を行った際の振幅の結果を図18に示す。それぞれの音の発音までの時間が異なっているが、図18(a)の場合と図18(b)の場合では、どちらも発音のタイミングでスケール200付近の振幅が非常に強くなっていることが確認できる。その後、図18(a)の場合ではスケール100周辺に振幅の強い部分が集中している。一方で図18(b)の場合は弦のアタックの瞬間にスケール200付近が強くなることは変わらないが、その後もう一度同じスケールで振幅が強くなっていることが分かる。



(a)位相

(b)振幅

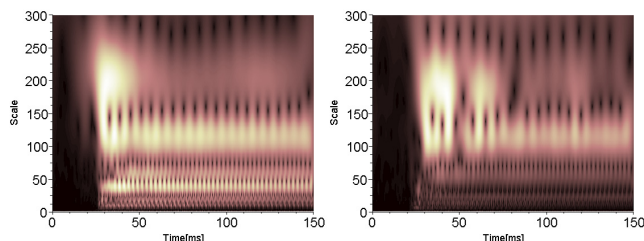
図15 ③ハーモニクス奏法



(a)位相

(b)振幅

図16 ④同じ音高



(a)⑧通常の奏法 (b)⑨ハンマリング奏法

図18 時間を長くとした場合

通常の奏法は指が弦を弾く際に強い衝撃が出る。一方、ハンマリング奏法は左指で弦を叩くようにして音を出す奏法であるため、指がフレットを叩く音と、弦がフレットにぶつかる音が含まれており、これがハンマリング奏法の特徴の一つである。この2つの衝撃音が図18(b)に現れていると考えられる。

ハンマリング奏法では、特に弦がフレットにぶつかる際の衝撃音を極力鳴らさないよう気を配りながら演奏する必要がある。演奏巧者であれば、この衝撃音は小さくなる。今回はギター2での録音が上手くいかず、確認することができなかったが、ギター1とギター2ではこの点で差があると予想される。

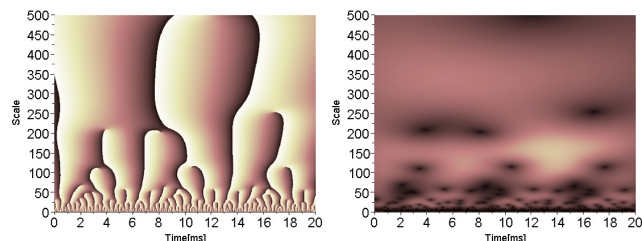
5.5 開放弦と弦を押さえた場合の比較 次に、開放弦と弦を押さえた場合の比較を行ったので、その結果を示す。ギターやヴァイオリンなどの弦楽器には開放弦による音と指で弦を押さえた上で演奏する音とがあり、場合によりはっきりと区別して演奏することがある。ここでは、この2つの音の違いについて検証する。録音した音の詳細は表16の通りである。

表16 開放弦と弦を押さえた場合の比較

番号	名称	分類	弦	音	演奏場所
⑧	開放弦	通常	4弦開放	D	通常
⑨	押さえた弦	通常	5弦5フレット	D	通常

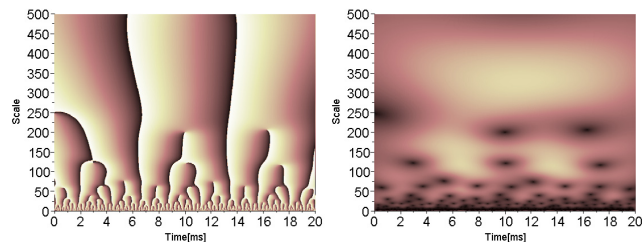
5.5.1 ギター1 表16の奏法による解析結果を図19、図20に、その相関係数を表17、表18に示す。これら2種類の音も演奏位置を変えて演奏した場合と同様、聞え上大変よく似ているが、聞き分けは可能である。しかし図19(a)と図20(a)の間に大きな差は無く、その違いを述べるのは難しい。ところが図19(b)と図20(b)で比較すると、図20(b)はスケール値150のほかに350で振幅の値が非常に大きくなっている。このことから、⑧の奏法では、耳の聞え上の音(D音)の成分はあまり強く表れず倍音成分が多く含まれていると考えられる。

次に相関係数に注目する。⑧の奏法で3回録音した際、お互いの相関の平均は位相で0.681、振幅で0.953であった。位相では表17の数値と大きな差はないが、振幅は表



(a)位相 (b)振幅

図19 ⑧開放弦



(a)位相 (b)振幅

図20 ⑨押さえた弦

表17 ⑧と⑨の相関係数(位相)

		⑧		
		音源1	音源2	音源3
⑨	音源4	0.424	0.549	0.441
	音源5	0.625	0.714	0.628
	音源6	0.502	0.661	0.530

表18 ⑧と⑨の相関係数(振幅)

		⑧		
		音源1	音源2	音源3
⑨	音源4	0.857	0.903	0.874
	音源5	0.824	0.890	0.865
	音源6	0.794	0.846	0.825

18とはその違いが数値としてはっきりと表れている。

5.5.2 ギター2 次に、ギター2の場合のこれら2種類の音色の比較を行う。⑧、⑨の奏法による音の解析結果を図21、図22に、その相関係数を表19、表20に示す。

ギター2の場合もギター1と同様に図21(b)と図22(b)で比較すると、図22(b)はスケール値150のほかに350で振幅の値が非常に大きくなっている。また、図21(a)と図22(a)では、スケール100以下の形状に違いがみられ、部分的な位相のずれや周波数の変化に相違点がある。相関係数では⑨の2つの音は位相で0.911、振幅で0.981であったのに対し、表19、表20では明らかに低い値となっている。ギター1に比べギター2は位相、振幅共にその差がはっきりと表れている。

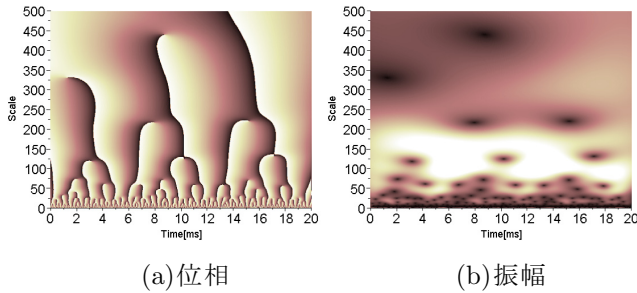


図21 ⑧開放弦

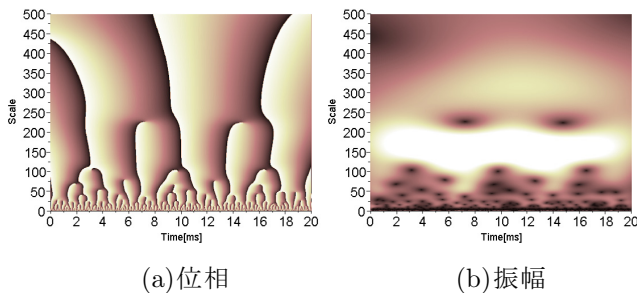


図22 ⑨押さえた弦

表19 ⑧と⑨の相関係数(位相)

		⑧	
		音源1	音源2
⑨	音源3	0.590	0.650
	音源4	0.621	0.627

表20 ⑧と⑨の相関係数(振幅)

		⑧	
		音源1	音源2
⑨	音源3	0.801	0.825
	音源4	0.821	0.837

6. 結論

本研究では、ギター音に対してMorlet基底を用いてウェーブレット変換を行い、楽音の解析を行った。

解析を容易にするため、単音に限定してギター音色の特徴解析を行い、ギターや奏者による影響を考え、同じ奏法で2通りのパターンを用意した。結果として、同じ奏法でもギターと奏者によってその解析結果は異なったものとなることが分かった。高価なギターを熟練の奏者が演奏した場合の方が再現性が高く、安価なギターをあまり熟練でない奏者が演奏した場合にはその結果にばらつきが生じやすいという結果となった。高価なギターを熟練の奏者が演奏した場合には、奏法の違いによる音色の差は、ウェーブレット変換の解析結果上で位相、振幅共にはっきりと表れており、相関係数でもその事実を確認することができた。また、聞え上で

奏法による差の大きいものは、解析結果でもその違いが容易に確認でき、差の大きいものについては、楽器や奏者によらず似た傾向を示すことを確認した。

ウェーブレット変換を用いてギター音色の解析を行うことで、音の時間的な変化が視覚的にわかりやすくなり、奏法ごとの特徴づけを容易に行うことができた。また、位相、振幅に分けて解析することができるため、周期性は位相の結果を見ることで、信号に含まれる周波数成分は振幅の結果を見ることで容易に評価できた。このように、ウェーブレット変換は特徴のわからない信号の評価を行うのに適していると考えられる。

7. 今後の課題

現段階では、音源の位相の調整を手作業で行っている。今後さらに詳しくさまざまなパターンの音色解析をするのであれば、これらの作業をプログラムで行えるようにする必要があると思われる。

また、録音に使用したギターは都合によりよい環境で録音が行えず、周囲の雑音(車が走る音、人の声など)に配慮して録音を行う必要があった。そのため、わずかではあるが音源に楽器の音色ではない音が含まれている可能性がある。よりよい結果を得るためには録音スタジオのような専用の場所で録音を行うのが好ましい。

また、今回解析を行ったものはギター音の中でもほんの一部である。さらに詳しい研究を行うためには、弦やフレットによる音色の違いを考慮する必要がある。

参考文献

- (1) 安藤由典:「楽器の音響工学」, 音楽之友社, 1971.
- (2) N.H.フレッチャー, T.D.ロッシング:「楽器の物理学」, シュプリング・フェアーク東京, 2003.
- (3) 大蔵康義:「目で見える楽器の音 by FFT Analysis」, 図書刊行会, 2004.
- (4) 吉川茂, 鈴木秀男:「音楽と楽器の音響測定」, コロナ社, 2007.
- (5) 木場隼介, 笠井正三郎:「ウェーブレット変換を用いた楽音の解析」, 神戸高専研究紀要, 第47号, pp.75-81, 2009.
- (6) 章忠, 川端洋昭:「ウェーブレット変換による異常信号診断法に関する研究」, 日本機械学会論文集(C編), Vol.67, No657, pp.1289-1296, 2001.

H_∞ 制御による光ピックアップのサーボ制御

藤田貴大*

笠井正三郎**

Optical Pickup Servo Control using H_∞ Control Theory

Takahiro FUJITA*

Shozaburo KASAI**

ABSTRACT

Optical pickup is a part of optical disc drives and it is used for two dimensional servo control. Conventionally, both of these control systems are respectively huddled by two phase compensators based on classical control theory. Because of classical control systems can handle only single-input single-output (SISO) system, an interference between two servo systems have to be ignored. And it deteriorates the performance of the servo control. Therefore, controllers based on multiple-input multiple-output (MIMO) control theory are conceived that it is effective to suppress the interference with considering it. Accordingly, we focused on H_∞ control theory, that can handle MIMO systems and design servo systems easily. We are aiming at the reduction of interference and to improve the control performance in this research.

Keywords : optical pickup, servo control, H_∞ control theory, decoupling

1. 序論

CD・DVDを始めとする光ディスクの記録再生は、ディスク表面の記録溝にレンズにより絞り込んだレーザー光を照射し、その反射光を読み取ることで行われる。

この際、外部からの振動や変形したディスクが回転することによりレーザー光の焦点位置が目標点からずれてしまうため、光ディスクドライブにおいてはレーザー光の焦点をディスク表面に結像させる焦点合わせと、目標のトラックへの追従を行う必要がある。

このための機構が光ピックアップであり、レーザー光の対物レンズを電磁アクチュエータによりディスクの鉛直方向、あるいは直径方向に駆動することで焦点合わせとトラックの追従を行っている。

これらの焦点合わせ、トラック追従の制御はそれぞれフォーカシングサーボ制御、トラッキングサーボ制御と呼ばれる。

従来、この2つの制御系は古典制御理論に基づく位相補償により単入出力(SISO)系として設計されてきた。しかし実際の光ピックアップでは、アクチュエータによる駆動力と重心の位置関係やセンサの検出方法などの理由で両者の間に干渉が存在している。干渉を考慮した系は2入力2出力の多入出力(MIMO)系となるが、古典制御理論の枠組みではMIMO系の取り扱いは難しく、これを無視することでSISO系に近似しているのが現状である⁽¹⁾。

この相互干渉は一方の系から他方の系に対する外乱となるため、これらを見せず陽に考慮し、抑制することができる。そこで本研究ではMIMO系を扱うことができ、サーボ系の設計に不可欠な周波数領域での設計が可能な H_∞ 制御理論に注目し、サーボ系の干渉低減を目指した。

2. 光ピックアップの構造とモデル

本研究では、制御器の設計に先立ち光ピックアップのモデルを入出力特性より実験的に作成した。ここでは光ピックアップの構成とモデル構造の決定、およびシステム同定による制御モデルの作成手順について簡単に説明する。

2.1 光ピックアップの構成 図1に今回実験に用いた光ピックアップ、KSS-240A(SONY製)の外観図を示す。この光ピックアップでは対物レンズをプラスチック製のヒンジにより片持ち支持し、電磁アクチュエータにより駆動している。また本体部には専用の信号処理ICを備え、フォーカシング、トラッキング方向の追従偏差を演算・出力することができる。

2.2 モデル構造の決定 光ピックアップの機械的構成は多種存在し、支持方法やヒンジの材質、駆動方法などに違いがあるが、弾性支持されたレンズ部分を電磁アクチュエータで駆動するという構成は基本的に共通である。弾性支持された剛体への駆動力とその変位の間の伝達関数 $G(s)$ は一般に二次遅れとなり、式(1)

*専攻科 電気電子工学専攻

**電子工学科 教授



図1 KSS-240Aの外観図

で記述される．ここで、 K_s は定常ゲイン、 ω_n は固有角振動数、 ξ は減衰係数である．

$$G(s) = \frac{K_s \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

光ピックアップにおいてもこの表現は従来より用いられており⁽²⁾、本研究でも光ピックアップの物理モデルは二次遅れ系に従うものとした．

2.3 システム同定 モデル構造が決定されたため、式(1)における K_s 、 ω_n 、 ξ の各パラメータを測定することで制御モデルが得られる．これらのパラメータ決定法は主に2種あり、対象の物理定数を実測することでパラメータを決定する物理同定と、対象の入出力データからモデル構造に沿うようにパラメータを決定するシステム同定に分けられる．光ピックアップの構造は小型かつ精密であり、分解が必要な物理同定は不適であると判断し、本研究ではシステム同定を用いて制御モデルを決定した．

システム同定を行うにあたり、干渉を考慮した光ピックアップの動特性を図2のブロック線図により表現した．ここに u は光ピックアップのアクチュエータへの入力電圧、 y はレーザーの焦点位置である．また添字 f 、 t はそれぞれフォーカシング、トラッキング方向を表す． G_{ba} は入力 a と出力 b の間の伝達関数である．同図は焦点位置をある方向へ駆動しようとするとき、干渉要素 G_{ft} 、 G_{tf} の作用により他方向へも応答が生じることを意味している．

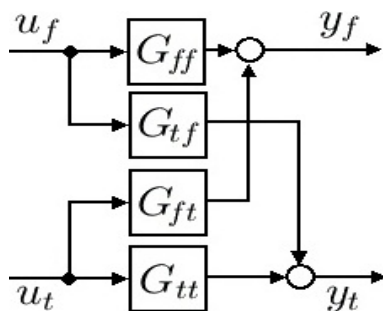


図2 ピックアップのブロック線図

これら4つの伝達関数 G_{ff} 、 G_{ft} 、 G_{tf} 、 G_{tt} について、スウィープ試験により周波数応答を得、それに沿うように上記の3つのパラメータを決定した．スウィープ試験はあるシステムに対し、正弦波状の励起信号を周波数を変えつつ印加し、その際の出力から周波数応答を求める方法である．例えば G_{ft} の周波数応答はトラッキングアクチュエータに励起信号を印加した際のフォーカシング方向での焦点位置の変動として得ることができる．

2.4 同定結果 システム同定により得られた周波数応答をもとに二次遅れ系で近似した各伝達関数を式(2)に、そのボード線図を図3に示す．

$$\begin{aligned} G_{ff} &= \frac{2.795 \times 10^6}{s^2 + 175.9s + 3.948 \times 10^5} \\ G_{tf} &= \frac{6.218 \times 10^4}{s^2 + 287.5s + 2.221 \times 10^5} \\ G_{ft} &= \frac{1.974 \times 10^5}{s^2 + 86.71s + 1.880 \times 10^5} \\ G_{tt} &= \frac{6.064 \times 10^5}{s^2 + 301.6s + 1.011 \times 10^6} \end{aligned} \quad (2)$$

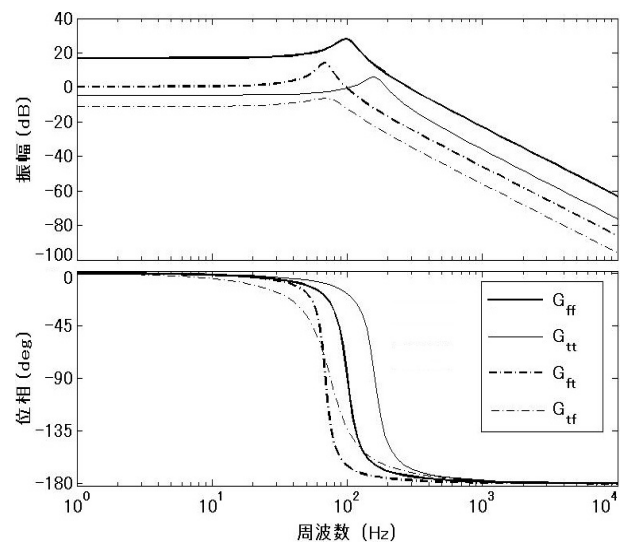


図3 ピックアップのボード線図

3. 制御器の設計

ここでは前節で得られた光ピックアップの制御モデルに対し、サーボ制御系を設計する過程を説明する．まずはじめに従来の古典制御理論での設計によるサーボ制御系の要求仕様を示す．次に本研究で用いた H_∞ 制御理論の概要を述べ、これを用いて干渉低減を加味したサーボ制御器を構成した手順を示す．

3.1 制御系の仕様 図4に干渉を無視した従来の古典制御理論を用いたフォーカシング、トラッキングサーボ系のブロック線図を示す．ここで r はディスクの変形により変動する焦点の目標位置、 e は目標点 r と現在の

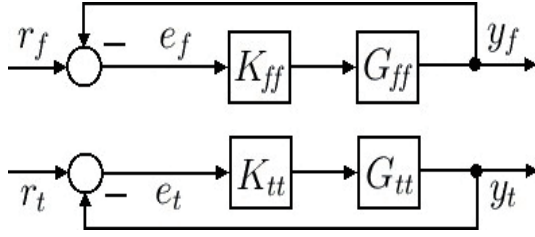


図4 古典制御理論におけるサーボ系の表現

焦点位置 y の偏差である。 K はそれぞれのサーボ系の位相補償器を示す。

制御系の構成は基本的なサーボ制御系と同じく、追従偏差により補償器を動作させ、焦点位置を目標点に保持することを目的としている。一般に、ディスクの変形量はメーカーにより最大変形量と再生時の回転周波数における変形加速度の2つの仕様により規定されている⁽³⁾。これは周波数ごとの許容変形量が、図5の点線のように加速度の制限を受けない低周波帯で最大変形量 r_{max} となり、高周波帯では加速度の制限のため -40dB/dec で減少することを示している。このように変動量は低周波帯域で大きいため、この部分で積極的な抑制が必要となる。

補償器 K と制御対象 G からなる直結フィードバック系において、外乱と出力の間の伝達関数を感度関数と呼び、ブロック線図の変形により式(3)と表せる。

$$S := \frac{1}{1+GK} = \frac{\mathcal{L}[e]}{\mathcal{L}[r]} \quad (3)$$

つまり感度関数が小さな帯域ではサーボ制御の偏差率が小さくなる。また r_{max} が $\omega = 0$ での値であることから、 $|G(0)K(0)| \gg 1$ を仮定すると、許容される最大偏差量 e_{max} を用いて一巡伝達関数 $G_0 = GK$ の定常ゲインを式(4)のように決定できる。

$$|G_0(0)| > \left(\frac{e_{max}}{r_{max}} \right)^{-1} \quad (4)$$

以上より一巡伝達関数に必要な最低ゲインの周波数特性は図5の実線となる。またゲイン交差角周波数 ω_0 が大きいほど高周波数の変動にも高精度に追従できるが、ノイズの影響の増加、二次共振による不安定化などの問題が起きるため折衝が必要となる。本研究では一般的な音楽用CDドライブにおける仕様として以下のものを用いた。

- 定常ゲイン $|G_0(\omega = 0)|$: 50dB程度
- 制御帯域 ω_t : 30Hz程度
- ゲイン交差角周波数 ω_0 : 数kHz程度

3.2 H_∞ 制御理論の概要 H_∞ 制御理論は H_∞ ノルムと呼ばれる、周波数領域での評価指標を用いた制御系の設計理論である。

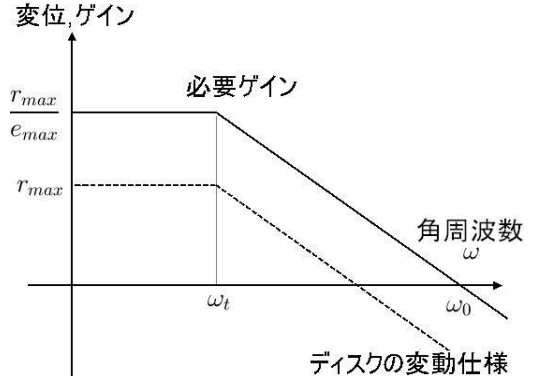


図5 制御系の設計仕様

3.2.1 H_∞ ノルム 前項で示した通り、SISO系でサーボ制御系を設計する際には一巡伝達関数の周波数領域におけるゲインを用いる。しかしこの伝達関数のゲインを用いた設計はMIMO系に直接適用することはできない。例えば、図2をMIMO系として表現した場合、その入出力関係は信号ベクトルと伝達行列により表現され、式(5)～式(7)のようになる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{u} \quad (5)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_f \\ u_t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_f \\ y_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

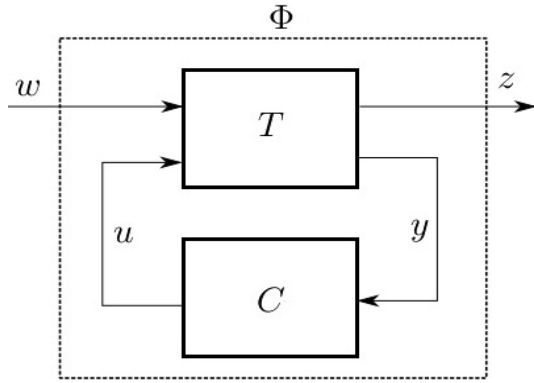
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{ff} & G_{ft} \\ G_{tf} & G_{tt} \end{bmatrix} \quad (7)$$

この系における $\mathbf{u} \rightarrow \mathbf{y}$ 間の信号伝達の大きさは各々の伝達関数のゲインでは定義できない。そこで H_∞ 制御理論では伝達行列の最大特異値 $\sigma_{max}(\mathbf{G})$ を用いて式(8)で定義される H_∞ ノルム $\|\mathbf{G}\|_\infty$ を $\mathbf{G}$ のノルムとして用いる。

$$\|\mathbf{G}\|_\infty := \sup_{\omega} (\sigma_{max}(\mathbf{G}(j\omega))) \quad (8)$$

伝達行列の特異値は、非正方行列も含めた一般の伝達行列の非ユニタリな成分を表すため、 H_∞ ノルムは伝達行列の増幅率の周波数領域における上界を意味する。

3.2.2 H_∞ 標準問題 H_∞ ノルムは増幅率の上界であるため、制御系の設計の際には特定の入出力間での応答の上界を抑制する形で用いられる。例えば、ある制御系の外乱入力端から偏差の間で H_∞ ノルムを小さく出来れば、外乱の影響を抑制することができる。このような制御問題を一般化した形式は H_∞ 標準問題と呼ばれ、図6で表される一般化フィードバック系に対し、以下の要求を満たすフィードバック補償器 C を求める問題と定義されている。


 図6 $\mathcal{H}_\infty$ 標準問題

- 任意に与えられた正定数 γ に対し, $w \rightarrow z$ 間の伝達行列 Φ について以下の式(9)を満足する.

$$\|\Phi\|_\infty < \gamma \quad (9)$$

- T および C からなる閉ループを漸近安定化する

ここで w, z はそれぞれ評価入力, 評価出力といい, $\mathcal{H}_\infty$ ノルムにより応答を評価する入出力変数の組を表す. Φ は評価入出力間の伝達行列である. y, u は補償器への入力と補償器の出力を意味する. T は一般化プラントと呼ばれ, 評価入出力を加えて拡張された制御対象である. また γ は $\mathcal{H}_\infty$ ノルムをどの程度小さくするかのスカラー指標である. この条件を満足する出力フィードバック制御則は制御系設計ソフトを用いて数値的に求めることができる.

3.3 $\mathcal{H}_\infty$ 制御理論を用いたサーボ補償器の設計 干渉を無視せずMIMO系で表現したサーボ制御系は図7のようになる. この系において r から e までの応答を抑制することでサーボ制御の要求を達成できる. $r \rightarrow e$ 間の伝達行列はSISO系の感度関数に対応して感度行列と呼ばれ, 式(10)と表される.

$$S = (I + GK)^{-1} \quad (10)$$

図8がこのサーボ制御問題を $\mathcal{H}_\infty$ 標準問題へと帰着させた際の一般化フィードバック系である. 同図の W は重み関数と呼ばれる既知の伝達行列であり, $\mathcal{H}_\infty$ ノルムの抑制具合を周波数領域で操作するために用いられ

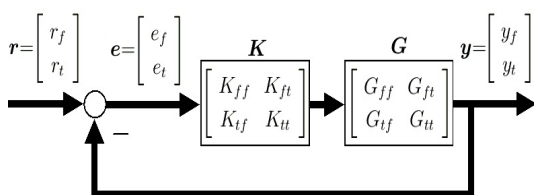
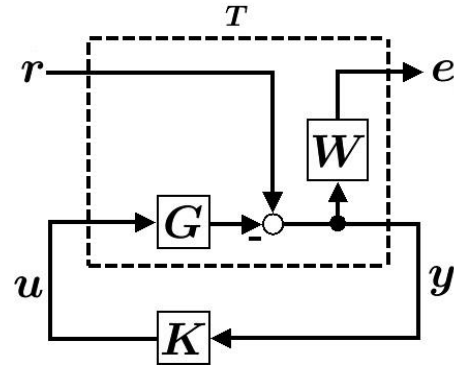


図7 MIMO系によるピックアップサーボ系の表現


 図8 ピックアップサーボ制御の $\mathcal{H}_\infty$ 標準問題への帰着

る. この系では評価入出力間の伝達行列 Φ は式(11)となるため, 式(9)が満足されている限り, W の特異値が大きい帯域ではサーボ制御の仕様がよく満足されることとなる.

$$\Phi = WS = W(I + GK)^{-1} \quad (11)$$

$\|\Phi\|_\infty$ が十分に小さいならば, 制御帯域において目標値 r と y はほぼ一致し, 式(12)が成立する.

$$r = \begin{bmatrix} r_f \\ r_t \end{bmatrix} \doteq \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_f \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_f \\ y_t \end{bmatrix} = y \quad (12)$$

これは偏差 e が良好に抑えられているとき, ディスクの変動とピックアップの出力変位が一致し高い追従性能が得られることと, 各方向の出力変位は各々の方向の変動にのみ依存する干渉低減性を示している.

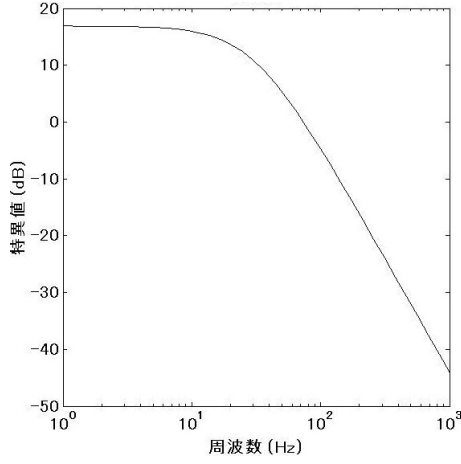
実際の補償器は重み関数 W , 制御対象 G , 定数 γ により決定される. 今回はサーボ系の開ループ定常ゲインを50dB, 制御帯域を30Hzと定めたため, これを満足するように重み関数 W を試行錯誤的に定め, 式(13)とした. 図9に重み関数の特異値を示す.

$$W = \frac{7}{(1 + s/60\pi)^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

また今回の場合, γ による性能設定は W の定常ゲインにより行えるため $\gamma = 1$ とした. 以上の条件のもと, MATLABのmixsynコマンドを用いて

- $\|W(I + GK)^{-1}\|_\infty < 1$
- 閉ループ系が漸近安定

を満足する補償器 K を決定した. 式(14)～式(17)に設計された K_{ff} , K_{tf} , K_{ft} , K_{tt} の伝達関数を, 図10にそ

図9 重み関数 W の特異値プロット

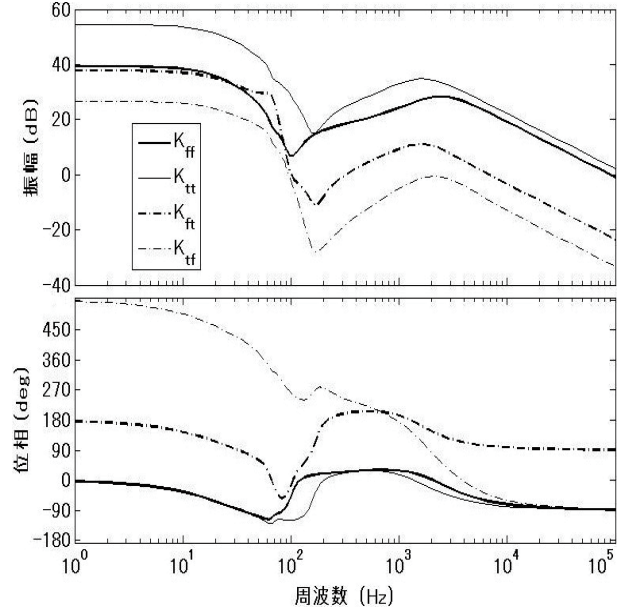
のボード線図を示す。

$$\begin{aligned}
 K_{ff} = & (5.682 \times 10^5 s^{11} + 1.098 \times 10^{10} s^{10} \\
 & + 1.037 \times 10^{14} s^9 + 3.212 \times 10^{17} s^8 \\
 & + 3.188 \times 10^{20} s^7 + 3.164 \times 10^{23} s^6 \\
 & + 1.799 \times 10^{26} s^5 + 9.373 \times 10^{28} s^4 \\
 & + 3.241 \times 10^{31} s^3 + 8.969 \times 10^{33} s^2 \\
 & + 1.674 \times 10^{36} s + 1.265 \times 10^{38}) / K_{DEN}
 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 K_{tf} = & (1.367 \times 10^4 s^{11} + 6.621 \times 10^7 s^{10} \\
 & - 2.024 \times 10^{12} s^9 - 2.988 \times 10^{15} s^8 \\
 & - 4.120 \times 10^{18} s^7 - 7.782 \times 10^{21} s^6 \\
 & - 4.976 \times 10^{24} s^5 - 6.768 \times 10^{27} s^4 \\
 & - 2.853 \times 10^{30} s^3 - 1.271 \times 10^{33} s^2 \\
 & - 3.348 \times 10^{35} s - 2.939 \times 10^{37}) / K_{DEN}
 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 K_{ft} = & (-4.233 \times 10^4 s^{11} - 1.224 \times 10^9 s^{10} \\
 & - 1.710 \times 10^{13} s^9 - 5.087 \times 10^{16} s^8 \\
 & - 7.219 \times 10^{19} s^7 - 9.554 \times 10^{22} s^6 \\
 & - 7.033 \times 10^{25} s^5 - 4.795 \times 10^{28} s^4 \\
 & - 2.030 \times 10^{31} s^3 - 6.891 \times 10^{33} s^2 \\
 & - 1.391 \times 10^{36} s - 1.058 \times 10^{38}) / K_{DEN}
 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 K_{tt} = & (8.098 \times 10^5 s^{11} + 2.078 \times 10^{10} s^{10} \\
 & + 2.657 \times 10^{14} s^9 + 7.814 \times 10^{17} s^8 \\
 & + 9.874 \times 10^{20} s^7 + 1.207 \times 10^{24} s^6 \\
 & + 7.775 \times 10^{26} s^5 + 4.535 \times 10^{29} s^4 \\
 & + 1.678 \times 10^{32} s^3 + 4.984 \times 10^{34} s^2 \\
 & + 9.613 \times 10^{36} s + 7.302 \times 10^{38}) / K_{DEN}
 \end{aligned} \quad (17)$$

図10 H_∞ 制御理論によるサーボ補償器

$$\begin{aligned}
 (K_{DEN} = & s^{12} + 3.819 \times 10^4 s^{11} + 7.309 \times 10^8 s^{10} \\
 & + 6.955 \times 10^{12} s^9 + 3.510 \times 10^{16} s^8 \\
 & + 3.704 \times 10^{19} s^7 + 2.859 \times 10^{22} s^6 \\
 & + 1.501 \times 10^{25} s^5 + 5.737 \times 10^{27} s^4 \\
 & + 1.628 \times 10^{30} s^3 + 3.043 \times 10^{32} s^2 \\
 & + 3.164 \times 10^{34} s + 1.360 \times 10^{36})
 \end{aligned}$$

4. シミュレーションによる評価

設計された補償器を用いサーボ系を構成した場合の制御性能をシミュレーションにより評価し、従来法である古典制御理論に基づく設計の場合と比較した。

4.1 周波数応答評価 H_∞ 制御理論、古典制御理論それぞれに基づく補償器により制御されたサーボ系において、式(18)で表される目標位置 $\mathbf{r}$ から焦点位置 $\mathbf{y}$ の間の伝達行列の周波数応答を求めることでサーボ制御の性能と干渉低減性を評価する。

$$G_{cl} = GK(I + GK)^{-1} \quad (18)$$

位相補償器についてはサーボ制御能力を H_∞ 制御と揃えるため、サーボループの定常ゲインや制御帯域が一致するものを位相進み遅れ補償を用いて式(19)のように設計した。

$$\begin{aligned}
 K &= \begin{bmatrix} K_{ff} & K_{ft} \\ K_{tf} & K_{tt} \end{bmatrix} \\
 K_{ff} &= 40 \cdot \frac{1 + s/600\pi}{1 + s/200\pi} \cdot \frac{1 + s/800\pi}{1 + s/6000\pi} \\
 K_{tf} &= 0 \\
 K_{ft} &= 0 \\
 K_{tt} &= 500 \cdot \frac{1 + s/800\pi}{1 + s/100\pi} \cdot \frac{1 + s/900\pi}{1 + s/8000\pi}
 \end{aligned} \quad (19)$$

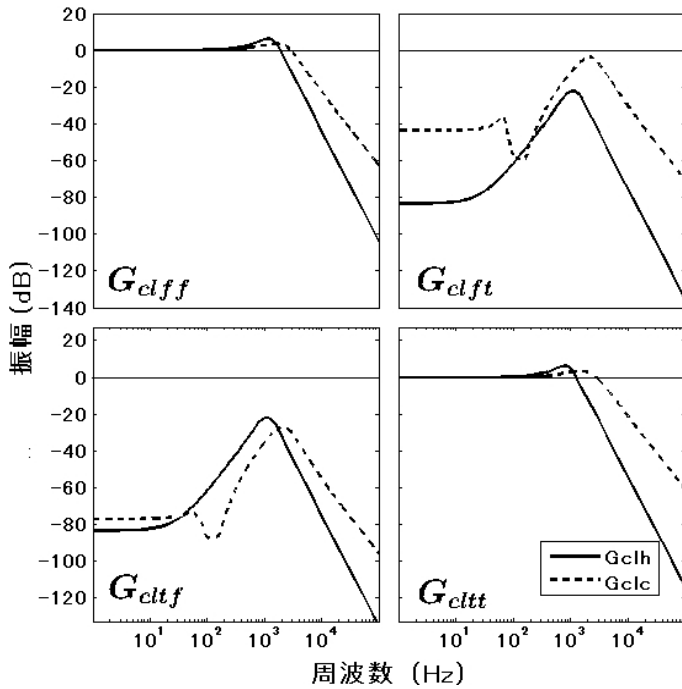


図11 閉ループ系のゲイン特性

閉ループ系 G_{cl} は2入出力の伝達行列であり、4つの伝達関数からなる。これらを入出力に対応した添字により式(20)のように定義する。また図11に各伝達関数のゲイン特性を示す。

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_f \\ y_t \end{bmatrix} = \mathbf{G}_{cl} \mathbf{r} = \begin{bmatrix} G_{clff} & G_{clft} \\ G_{cltf} & G_{cltt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_f \\ r_t \end{bmatrix} \quad (20)$$

サーボ制御の性能は G_{clff} 、 G_{cltt} のゲイン特性から評価でき、これらのゲインが制御帯域で0に近ければ $\mathbf{y}$ が $\mathbf{r}$ にほぼ一致し、追従偏差が小さいことを示す。また干渉低減効果は G_{clft} 、 G_{cltf} のゲイン特性から評価でき、これらのゲインが小さい方がより干渉を低減できていることを示す。図11の G_{clff} 、 G_{cltt} から明らかなように制御性能自体には大差がないが、干渉要素 G_{clft} および G_{cltf} のゲインは制御帯域で $\mathcal{H}_\infty$ 制御によるもののほうが下回っている。定常値ではフォーカシング方向からトラッキング方向への干渉で6dB、トラッキング方向からフォーカシング方向で40dB以上の干渉低減効果を期待できる。

4.2 時間領域での評価 周波数領域での評価を確認するため、時間領域での応答をシミュレーションにより評価した。図12はフォーカシング・トラッキング方向にそれぞれ目標値信号 r_f 、 r_t を与えた際の偏差量 e_f 、 e_t を示したものである。目標値信号はCDの等倍再生時に主モードとなる8Hzの正弦波を単位振幅で印加し、干渉が制御性能に最も悪影響を与えるよう位相を反転させている。同図から明らかなように、個々の一巡ゲインを統一しているにも関わらず $\mathcal{H}_\infty$ 制御を用いたほう

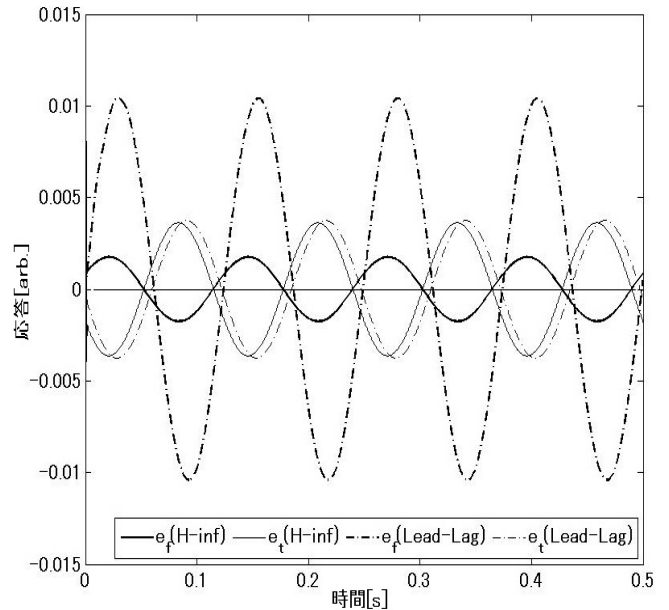


図12 従来法と提案法の時間応答の比較

が偏差量が小さくなっており、干渉低減の効果が現れていると言える。また周波数応答で示したとおり、特にフォーカシング方向の偏差でその差が顕著である。

5. 結論

本研究の目的は光ピックアップのフォーカシング、トラッキングサーボ制御において、これらの相互干渉を低減することであった。そのために本研究ではまずシステム同定により光ピックアップのモデル化を行いサーボアクチュエータの干渉を考慮した特性を得た。次に得られたモデルに対して $\mathcal{H}_\infty$ 制御による制御器を設計した。そして提案法である $\mathcal{H}_\infty$ 制御と従来法である古典制御(位相補償)の干渉量を周波数領域および時間領域のシミュレーションにより比較し、提案法が干渉低減に寄与していることを確認した。特にトラッキング方向からフォーカシング方向へは40dB以上の高い減衰効果が得られた。

現在、本研究では実際のCDドライブを模した実験装置を製作し、DSPにより制御器を構成することで実機による実験を行なっている。今後はこの実機を用い、シミュレーションにより確認された干渉低減効果の実証を行う予定である。

参考文献

- (1) 米澤 実：「DVD装置における計測制御技術」，計測と制御 第43巻 第3号，p.257，2004。
- (2) 村山登ほか：「光ディスク技術」，ラジオ技術社，pp.135-150，1988。
- (3) 角田義人：「光ディスクストレージの基礎と応用」，電子情報通信学会，p.98，p.102，2001。

想起背景を用いた移動物体抽出に関する研究

神田 嵩臣*

藤本 健司**

A Study of Object Extraction Using Recalling Background

Takaomi KANDA*

Kenji FUJIMOTO**

ABSTRACT

Recently, demand for object extraction technology and object recognition technology has been increasing in many disciplines. To improve accuracy of these technologies, researchers have studied background subtraction method which extract objects. However, many conventional methods have some restrictions, because it's difficult to deal with background transition caused by alteration of ambient light or background objects. Consequently, the camera must be fixed to obtain moving images in most cases. In this paper, we propose a new object extraction method that is able to use a moving camera. This method takes advantage of properties of Neural Networks, ability of learning and recalling images and robustness. After a Neural Network learns background images, if an image including objects is inputted, the Neural Network outputs the recalling background image that corresponds to the input. Then, the recalling image is postprocessed to detect objects. The experimental results showed that the proposing method is able to extract objects under various situations.

Keywords : neural network, background subtraction method, object extraction

1. はじめに

近年、デジタルビデオカメラなどの電子光学機器の発達により、様々な分野で物体抽出技術や物体認識技術の需要が増加している。しかし、物体抽出技術においては、広範囲に渡って動作させようとする全方位カメラといった特殊なカメラや複数台のカメラが必要となり、高価であったり設置が複雑となったりする問題がある。また、一般物体認識技術に関しては、長年に渡って研究が行われてきたにもかかわらず、人間の顔の認識を除いては、ほとんど実用的な精度に至っていない⁽¹⁾。したがって、これらの問題を解決しようと現在も多くの研究が行われている。

ここで、物体の領域を精度よく抽出することは、物体抽出技術だけではなく、物体認識技術の精度を向上させるためにも必要である。この物体領域の抽出手法は様々な存在するが、動画像において物体の抽出を行う手法としては、背景差分法が広く知られている。しかし、従来の背景差分法は、木々の揺れといった背景物体の変動や照明の変化などへの対応が難しく、様々な雑音が前景として抽出されてしまう。さらに、ほとんどの場合でカメラは静止していなければならない、使用には様々な制約が伴う。この制約の内、輝度ヒストグラム法を用いた手法⁽²⁾や、混合ガウス分布を用いた手

法⁽³⁾などで、背景の変化に対応できることが知られている。しかし、いずれもカメラは静止していなければならない、加えて、急激な背景の変化には対応が難しい。

また、近年ではコンピュータの性能の急速な向上により、膨大な計算量が必要となる処理も容易に行えるようになってきているため、複雑系を用いた研究が注目を集めている。その中の1つに、生体の神経回路網を模倣したニューラルネットワーク (Neural Networks: 以下NN)⁽⁴⁾を用いたものがある。これは、人間の脳のシナプスの可塑性を模した学習機能と、外部からの入力に応じて自分自身の構造を変えていく自己組織化の機能を有しており、周囲の状況に合わせた柔軟な認識を行うことができる。

そこで本研究では、NNが有する学習・想起能力とロバスト性を利用することにより、従来の背景差分法のカメラが静止していなければならないという制約を解消できると考えた。したがって、移動している1台のwebカメラより取得した画像に対して物体抽出が行える背景差分法の実現を目的とする。これが実現できれば、広範囲に渡る物体抽出が安価となることに加えて、移動するロボットに搭載したカメラを用いた物体抽出も可能となるため、物体抽出技術や物体認識技術のさらなる発展が期待できる。

*専攻科 電気電子工学専攻

**電子工学科 准教授

2. 提案する手法

2.1 提案する手法の概要 今回提案する手法の概略図を図1に示す。まず、図1(a)に示すように、webカメラを移動させながら背景として学習させる動画(学習用背景動画)とその背景に物体が入った動画(入力動画)を撮影する。そして、図1(b)に示すように学習用背景動画から任意枚数の画像を切り出し、NNにその画像を1枚ずつ学習させていく。学習が終了した後、図1(c)に示すように入力動画から任意枚数の画像を切り出し、学習済みのNNに入力画像を1枚入力すると、それに対応して想起された背景画像(想起背景画像)が出力される。この入力画像と想起背景画像の差分をとり、処理を加えることにより物体抽出を行う。

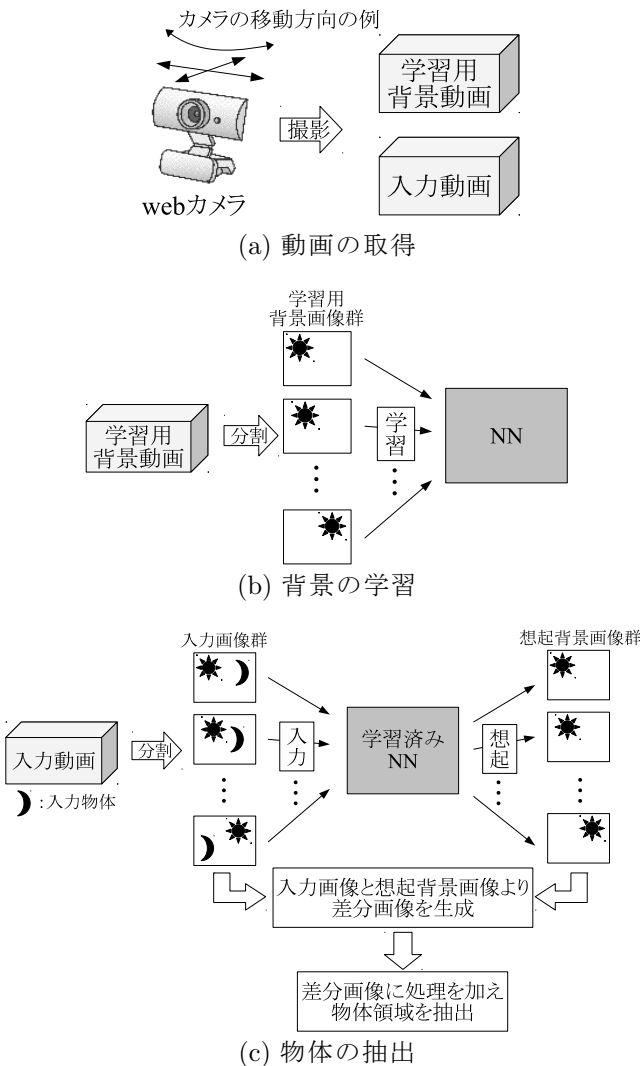


図1 提案する手法の概略図

2.2 NNの学習 図1(b)で示したように、提案する手法はNNの学習が必要となる。今回、NNとしては3層フィードフォワード型NNを使用し、誤差逆伝搬(Back Propagation)法⁽⁴⁾で学習を行う。

NNへの入力としては、以前の研究⁽⁵⁾ではRGB表色系で表される画像の全画素の3要素(R,G,B)を用いていた。しかし、RGB- $YCbCr$ 変換式⁽⁶⁾により画像を $YCbCr$

表色系に変換し、事前調査を行った結果、多少精度が悪くなるものの入力要素として輝度Yのみを用いても問題ないことがわかった。今回はNNの出力や学習を行う速度を高速化するために、入力として全画素の輝度Yのみを用いることにした。したがって、入力層および出力層のユニット数を n 個、画像の高さを L_{height} [画素]、幅を L_{width} [画素]とすると、 $n = L_{\text{height}} \cdot L_{\text{width}}$ である。また、隠れ層のユニット数は任意の個数とする。

2.3 物体抽出のための画像処理 図1(c)で示したように、物体抽出を行うために差分画像に画像処理を加える必要がある。その手順を図2に示す。まず、差分画像には入力画像や想起背景画像に含まれていたノイズがそのまま引き継がれるため、メディアンフィルタを適用することでノイズの軽減を行う。次に、ある閾値により2値化を行い、物体領域として抽出された反応画素(1:白)とそれ以外(0:黒)に分割する。最後に、必要に応じて物体抽出を抑制する処理を行う。この処理を「面積制限処理」と呼ぶこととする。次の項より、これらの具体的な処理方法を説明していく。

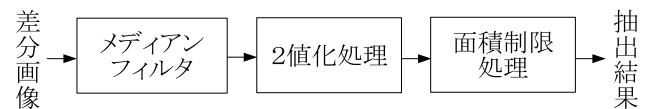


図2 差分画像から物体抽出を行う手順

2.3.1 メディアンフィルタ ここでは、 3×3 のメディアンフィルタを用いる。これは、注目画素とそれに8隣接している画素の輝度値の中央値を求め、注目画素に中央値を与えるフィルタである。

2.3.2 2値化処理 今回、2値化処理を2種類用意した。それらの処理手順を以下に示す。

- (1) 1つの閾値を用いた2値化
 - (i) 閾値 t で2値化
- (2) 2つの閾値を用いた2値化
 - (i) 閾値 t で2値化
 - (ii) 反応画素(1:白)を起点として8隣接している画素のみ拡大閾値 t_{ex} で2値化
 - (iii) 反応画素が増加しなくなるまで(ii)を繰り返す

(1)の閾値の決定には、以前の研究⁽⁵⁾と同様に柔軟な閾値決定を行える判別分析法を用いる。ここで、 $0 \sim 255$ の間の閾値決定では物体がない場合でも背景領域を物体として抽出してしまうため、閾値決定範囲の下限を差分画像の平均輝度値 $D_{\text{ave}} + 30$ とする。(2)の2つの閾値の決定には、平均輝度値 D_{ave} を変数として閾値 t を求める関数、およびその閾値 t を変数として拡大閾値 t_{ex} を求める関数を統計的に作成し、使用する。

2.3.3 面積制限処理 8隣接している反応画素数を面積としたとき、それが10画素以下ならば、その部分の画素の値を0にする処理を行う。ノイズが抽出された場合は小さな面積となることが多いと考えられるため、これによりノイズの抽出の軽減を図る。

3. 評価方法

3.1 評価用画像の作成 物体抽出の評価を行うにあたって、入力画像のどの部分が物体領域であるかをあらかじめ知っておく必要がある．今回はその領域を目視で確認し、手動で設定する．図3に評価用画像の作成例を示す．まず、図3(a)の学習用背景画像と図3(b)の入力画像を目視で確認し、物体の輪郭に沿って点を打つ．この際に、連続して打った2点間を直線で補間する．そして、輪郭線で領域を分割した後に物体領域を選択することで、図3(c)に示すような物体領域(白)と背景領域(黒)に分けられる．ここで、輪郭線付近の物体の有無については間違いが多くなってしまうため、輪郭線とその4隣接画素を無効領域(灰色)とした．



図3 評価用画像の作成例

3.2 物体抽出の評価 図4は、差分画像を画像処理することにより生成された抽出結果と、その入力画像に対応する評価用画像を用いて評価を行った例である．この例における評価用画像は概念的なものであり、実際に6×6画素の画像では、このような無効領域の評価用画像は作成できない．抽出結果の反応画素は、評価用画像のどの領域に属するかによって「正反応」、「無効反応」、「誤反応」に分けられる．

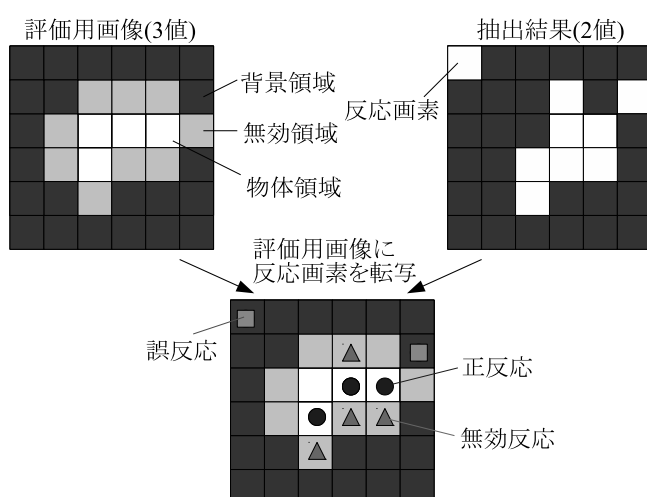


図4 抽出結果と評価用画像を用いた評価例

目的とする処理によっては、誤反応がある程度多くとも正反応が多ければよい場合と、その逆の場合が存在する．しかし、今回は正反応1つと誤反応1つを同等

の価値とみなし、次のような評価式で評価値を求めることにする．

$$\text{評価値[画素]} = \text{正反応数[画素]} - \text{誤反応数[画素]} \quad (1)$$

また、正反応率と誤反応率は以下のとおりとする．

$$\text{正反応率[\%]} = \frac{\text{正反応数[画素]}}{\text{物体領域面積[画素]}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{誤反応率[\%]} = \frac{\text{誤反応数[画素]}}{\text{背景領域面積[画素]}} \times 100 \quad (3)$$

ここで、評価値は物体抽出の精度を相対的に評価する指標となる．一方、正反応率はどの程度物体を抽出できたか、誤反応率はどの程度背景を抽出してしまったかを表し、絶対的な評価の指標となる．

4. 実験方法

4.1 事前準備 まず初めに、図1(a)にも示したように、学習用背景動画と入力動画を用意する必要がある．これらは、簡易なスイング機構に取り付けたwebカメラ(Logicool HD Webcam C270)により、320×240画素で180秒間撮影し、取得した．今回は、カメラの動きはスイングのみとした．その後、それらの動画を80×60画素に圧縮し、それぞれ5000枚の学習用背景画像と300枚の入力画像に分割した．さらに、その入力画像に対応する評価用画像も300枚作成した．

以上の手順を異なる場所で5セット繰り返し、それぞれを“S1”，“S2”，“S3”，“S4”，“S5”と名付けた．最後に、各セットの学習用背景画像をそれぞれNNに同程度学習させた．このとき、中間層のユニット数は1000個とした．

ここで、学習用背景画像の例としてS1の画像の一部を図5に示す．また、各セットにおいて300枚を総計した評価用画像の各領域面積を表1に示す．

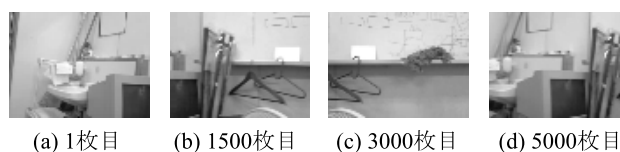


図5 S1の学習用背景画像の一部

表1 評価用画像の各領域面積

	物体領域面積[画素]	背景領域面積[画素]
S1	61935	1355531
S2	76412	1326989
S3	82141	1316062
S4	87431	1327157
S5	58417	1355923

4.2 1つの閾値を用いた場合

4.2.1 1つの閾値で得られる最大の評価値の確認

最初に、画像1枚ごとに評価値が最大となる閾値を決定したとき、その最大の評価値がどの程度の値になるかを確認した。なぜなら、この値が1つの閾値を用いたときの目標値であり、以降に示す結果の比較対象となるからである。評価値が最大となる閾値の決定は、評価用画像を利用することにより実現した。ここで、面積制限処理は適用しないものとした。

4.2.2 判別分析法の適用 ここでは、判別分析法により閾値を決定することで、4.2.1項で求めた最大の評価値と、どの程度の差が見られるかを確認することが目的である。したがって、メディアンフィルタを適用した差分画像に対して、判別分析法を用いて閾値を決定し、2値化を行ったとき、各セットでどのような評価が得られるかを確認した。ここでもまた、面積制限処理は適用しないものとした。

4.2.3 面積制限処理の適用 次に、4.2.2項と同様に判別分析法による2値化を行った後、面積制限処理を適用することによって、評価がどのように変化するかを確認した。

4.3 2つの閾値を用いた場合

4.3.1 2つの閾値で得られる最大の評価値の確認

4.2.1項と同様に、評価用画像を利用することで、画像1枚ごとに評価値が最大となる閾値と拡大閾値の組み合わせを決定し、最大の評価値を求めた。

4.3.2 関数による閾値決定の適用 まず、閾値 t と拡大閾値 t_{ex} を求める関数を作成する必要がある。これには、S1, S2, S3で作成された差分画像の平均輝度値 D_{ave} と、4.3.1項で求めた閾値 t と拡大閾値 t_{ex} を使用した。そして、 D_{ave} - t 平面と t - t_{ex} 平面にこれら3セット900点をプロットし、最小二乗法により3次多項式のフィッティング関数を求めた。これらのフィッティング関数を使用して、各セットにおいて2つの閾値を決定し、2値化を行い、どのような評価になるかを確認した。

4.3.3 面積制限処理の適用 最後に、4.3.2項と同様にフィッティング関数による2値化を行った後、面積制限処理を適用することによって、評価がどのように変化するかを確認した。

5. 実験結果

5.1 1つの閾値を用いた場合

5.1.1 1つの閾値で得られる最大の評価値の確認結果

評価用画像を用いて評価値が最大となる閾値を1枚ごとに設定した場合の1セットあたり300枚を総計した評価結果は表2のとおりである。これより、理想的な閾値を選択した場合、評価値は19000～42000画素程度であり、それに伴う正反応率は約39～62%、誤反応率は約0.5～1%となった。したがって、単純な処理のみでも良好な精度が得られる可能性があることがわかった。

さらに、学習条件の改善や得られた反応画素を用いた補間などを行うことによって、この精度を向上させることができると考えられる。

表2 1つの閾値による最大の評価値とそれに伴う正反応率・誤反応率

	評価値[画素]	正反応率[%]	誤反応率[%]
S1	27363	54.24	0.46
S2	24432	46.09	0.81
S3	18840	39.15	1.01
S4	41565	61.58	0.93
S5	23017	62.12	0.98

5.1.2 判別分析法の適用 次に、判別分析法により閾値を決定した場合の評価結果を表3に示す。これより、評価値は8800～19000画素程度であり、正反応率は約17～31%、誤反応率は約0.3～0.4%となった。この結果を表2と比較すると、判別分析法による2値化では最大の評価値に対して約39～63%の評価値を得られていることがわかった。また、正反応率と誤反応率はともに減少している。

表3 判別分析法による2値化の評価

	評価値[画素]	正反応率[%]	誤反応率[%]
S1	13492	31.01	0.42
S2	15353	27.63	0.43
S3	8765	17.42	0.42
S4	18852	26.60	0.33
S5	9069	25.17	0.42

5.1.3 面積制限処理の適用結果 判別分析法によって2値化を行った後、面積制限処理を適用した結果を表4に示す。面積制限処理を適用していない表3に比べて、評価値はS4を除いて各セットで2000画素程度増加している。S4においても約400画素の減少のみであり、悪化はわずかである。このことから、面積制限処理は有効であることがわかった。しかし、面積制限処理によって、10画素以下の面積の物体が抽出不可能になることに注意する必要がある。また、正反応率と誤反応率は、当然のことながらどちらも減少した。

表4 判別分析法による2値化後の面積制限処理の評価

	評価値[画素]	正反応率[%]	誤反応率[%]
S1	15601	29.73	0.21
S2	17188	25.91	0.20
S3	10887	15.44	0.14
S4	18421	24.44	0.22
S5	11339	23.04	0.16

5.2 2つの閾値を用いた場合

5.2.1 2つの閾値で得られる最大の評価値の確認結果

ここでは、最大の評価値が得られる閾値と拡大閾値の組み合わせを1枚ごとに設定し、1セットあたり300枚を総計した評価を表5に示す。この結果より、理想的な2つの閾値を選択した場合、評価値は32000～57000画素程度であり、それに伴う正反応率は約54～74%、誤反応率は約0.2～0.9%となることがわかった。これより、1つの閾値を用いた場合よりも2つの閾値を用いたほうが、より高い可能性を有することが確認できた。

表5 2つの閾値による最大の評価値とそれに伴う正反応率・誤反応率

	評価値[画素]	正反応率[%]	誤反応率[%]
S1	40451	69.71	0.20
S2	36782	58.14	0.58
S3	32033	53.71	0.92
S4	56759	74.27	0.62
S5	32714	67.41	0.49

5.2.2 関数による閾値決定の適用結果 まず始めに、S1, S2, S3に対して、評価用画像を用いて評価値が最大となる2つの閾値を1枚ごとに設定した。そして、このときの差分画像の平均輝度値 D_{ave} と閾値 t と拡大閾値 t_{ex} の関係を確認した。この平均輝度値 D_{ave} と閾値 t の関係を図6に、閾値 t と拡大閾値 t_{ex} の関係を図7に示す。また、それぞれ図6、図7中に示したフィッティング関数は3次多項式であり、最小二乗法によってフィッティングを行った。図6を見ると、フィッティング関数近傍に大半の点がプロットされているが、 D_{ave} が35～40付近で t が0付近といった特異点が数点見られる。これは入力画像のほとんどが物体領域であるときに起こりうる。また、図7を見ると $t = t_{ex}$ の位置に多くプロットされている。さらに、その数は t が小さいほど多い傾向にある。これは入力画像のすべてが背景領域の場合、 t が小さくなり、かつ物体領域を増加させる t_{ex} が不要になるためである。

次に、フィッティング関数を用いて2つの閾値を決定した。これは D_{ave} が評価用画像を用いることなく得られるため、 D_{ave} から t を求め、その t より t_{ex} を求めることで決定できる。この評価結果を表6に示す。表6の結果より、フィッティング関数により2つの閾値を決定した場合は、評価値は13000～22000画素程度であり、正反応率は約23～42%、誤反応率は約0.2～0.6%となることがわかった。この評価値を表5に示した最大の評価値と比較すると、約39～55%の値が得られており、その効率は判別分析法と比べても遜色がないことがわかった。また、判別分析法で得られた評価値(表3)と比較すると、いずれも判別分析法より高い評価値が得られていることがわかる。これより、S1, S2, S3を基に

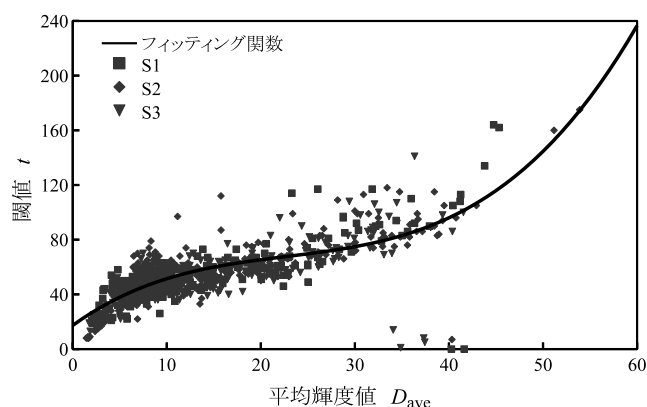


図6 平均輝度値 D_{ave} と閾値 t の関係

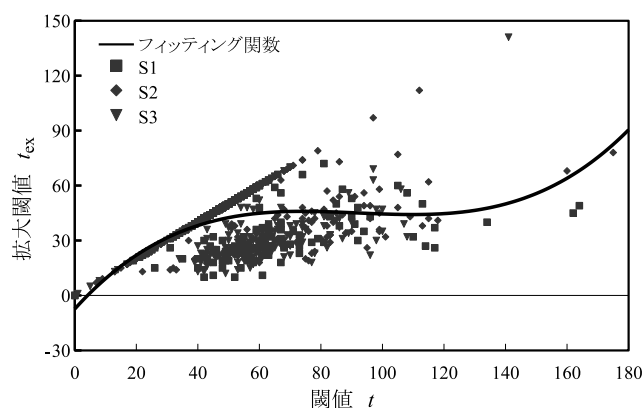


図7 閾値 t と拡大閾値 t_{ex} の関係

表6 フィッティング関数による2値化の評価

	評価値[画素]	正反応率[%]	誤反応率[%]
S1	20004	42.35	0.46
S2	20320	37.13	0.61
S3	13090	22.80	0.43
S4	22299	29.28	0.25
S5	16376	33.34	0.23

作成した関数であるが、S4やS5にも適用できることが確認できた。ただし、今回は用意できたセット数が少なかったため、さらにセット数を増やして検証していかねばならない。また、今回の手法では t の理想値と計算値のずれによって、 t_{ex} の基となる反応画素がなくなってしまった可能性がある。この問題を解決することによって精度が向上すると考えている。

5.2.3 面積制限処理の適用結果 5.2.2項と同様にフィッティング関数によって2値化を行った後、面積制限処理を適用した結果を表7に示す。この結果を表6に示した面積制限処理なしの結果と比較すると、すべてのセットの評価値が平均500画素ほど増加していることがわかった。これより、5.1.3項と同様に面積制限処理が有効であることが確認できた。また、正反応率や誤反応率を比較すると、その変化は判別分析法の後に面

表7 閾数による2値化後の面積制限処理の評価

	評価値[画素]	正反応率[%]	誤反応率[%]
S1	20684	42.21	0.40
S2	20896	37.01	0.56
S3	13519	22.53	0.38
S4	22551	29.10	0.22
S5	16890	33.12	0.18

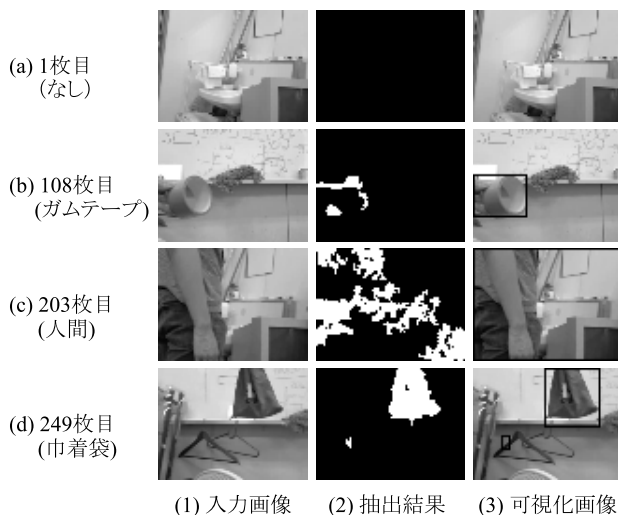


図8 S1の入力画像の一部とそれに対する抽出結果と可視化画像(枚数の下の括弧内は入力物体を表す)

積制限処理を適用したときよりも幾分小さい。これは、拡大閾値が面積を増加させるためだと考えられる。

最後に、この処理を行った各セットのうち、S1の入力画像の一部とそれに対する抽出結果、可視化画像を図8に示す。可視化画像は、抽出結果において8隣接している反応画素を長方形に線で囲ったものを入力画像上に表示している。ここで、長方形が重なる場合にはそれらを統合した。図8を見ると、図8(a)は物体がなく誤反応もない、よい結果が得られた。また、図8(b)は物体を抽出できているものの、欠損が多い結果となった。図8(c)では物体の一部しか抽出できておらず、誤反応も多くなってしまった。この可視化画像は、抽出結果の反応画像が画像全体に広がっているため、画像の一番外側に線が引かれている。誤反応が多くなった原因としては、物体が大きいために背景の想起が不安定になったことが考えられる。図8(d)は物体をよく抽出できているが、少し誤反応もみられた。

6. まとめ

今回、スイングカメラを用いた物体抽出法を構築し、実空間を撮影した動画を用いて実験、評価を行った。2値化の手法としては2種類用意したが、1つの閾値を用いるよりも2つの閾値を用いたほうが、よりよい精度の物体抽出を実現する可能性があることがわ

かった。ここで、2つの閾値の決定方法として提案したフィッティング関数を用いた方法は、最大の評価値に対して39～55%程度の評価値が得られることが確認できた。また、正反応率は約23～42%、誤反応率は約0.2～0.6%となり、簡単な処理で精度がよい物体抽出を実現できた。さらに、面積制限処理も評価値の向上には有効であることがわかった。

しかし、よりよい精度を実現するためには、現状で問題点が3つ存在する。1つ目は、物体抽出に欠損がでてしまうことである。これは、背景想起によるノイズも原因の1つとしては考えられるが、主な原因は背景と物体の輝度値の差が小さいときに抽出ができなくなることである。この解決のためには、輝度値以外のほかの要素を用意する必要がある。2つ目は、物体が大きくなると背景想起が不安定になることである。また、3つ目はNNの学習誤差が出力層のユニットによってばらつくことで、誤反応が発生しやすくなることである。これらに対しては、NNの構造や学習方法を変更していかなければならない。

今後は、これらの問題点の解消に加えて、より柔軟に環境に適応する手法の構築を目指す。このためには、並進しているカメラに対する実験も行う必要がある。また、環境光が変化する場合への対応も行わなければならない。これらの環境への適応は、従来の背景差分では困難とされている。しかし、我々が提案した手法では、以前の研究⁽⁶⁾においてこれらに対応できる可能性が示唆されており、柔軟な対応が期待できる。

参考文献

- (1) 柳井啓司：「一般物体認識の現状と今後」、情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. SIG 16(CVIM 19), pp. 1-24, 2007.
- (2) 早坂光晴, 富永英義：「動画からの背景画像生成を用いた移動物体抽出法に関する一検討」、情報処理学会研究報告 オーディオビジュアル複合情報処理, AVM29-1, pp. 1-6, 2000.
- (3) 島田敬士, 有田大作, 谷口倫一郎：「混合ガウス分布による動的背景モデルの分布数増減法」、画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2006), pp. 746-751, 2006.
- (4) 吉富康成：「ニューラルネットワーク」、朝倉書店, 2002.
- (5) 藤本健司, 神田嵩臣：「ニューラルネットワークによる背景想起を利用した物体抽出システムの開発」、神戸高専研究紀要, 第50号, pp. 69-74, 2012.
- (6) Radiocommunication Sector of ITU : “Studio encoding parameters of digital television for standard 4 : 3 and wide-screen 16 : 9 aspect ratios”, Recommendation ITU-R BT. 601-7, pp. 2-3, 2011.

プログラム間の類似性の定量化手法

小田悠介*

若林茂**

Method of Similarity Quantification between Program Codes

Yusuke ODA*

Shigeru WAKABAYASHI**

ABSTRACT

We propose a new algorithm that calculates similarity value between two computer programs. Our method applies Kernel Method to syntax trees generated from each source code. This way has following characteristics: it is able to quantify degree of syntactic difference between source codes, and user can execute additional analysis based on linear algebras. This paper describes our algorithm first, and shows a result of applying it to students' program codes actually. In addition, we tried categorizing students' programs using its result and Kernel-modified clustering algorithm (Kernel-AHC on the Centroids: K-AHC-C). This paper also discusses the comparison between results of K-AHC-C and human-power categorizing.

Keywords : Programming Education, Similarity between Program Codes, Kernel Method, Clustering

1. はじめに

プログラミング教育の現場では、教師がプログラミングに関する適当な問題を学生に提示し、学生がこの問題を解くプログラムを作成し提出する、という形式をとることが多い。この方法は簡便に学生へ自学自習の時間を与える方法で効果的だが、一方で教師の負担は非常に大きく、数十名の学生から送信されるプログラムを逐一解析し、評価を付けなければならない。

ところで、学生から送られてくるプログラムは多くの場合、非常に似ている、もしくは完全に一致してしまうことがある。これは次のような仮定を置くことにより引き起こされるものと考えられる。

- 与えられる問題は全ての学生において同一である。
- 問題の規模が小さく、作成されるソースコードが長大にならない。
- どの学生も同じ单元まで受講している。

例えば、図1(a), (b)は、2011年度の神戸市立工業高等専門学校(以降、本文では神戸高専とする)電子工学科2年の科目「プログラミングI」において、学生から提出されたPascal言語のプログラムを2名分抜粋したものである。

ここで出題された問題は、入力された数値列の合計と平均を求めるものである。両者のプログラムは全く同じ処理を行う。これらの異なる点は、識別子(変数名、

(a)
(b)

図1 学生から提出されたプログラムのソースコード

関数名、型名など)の命名やインデント、空白、空行の有無であり、このような特徴を機械的な処理で除外してしまえば、両者が同じ処理を行うプログラムであることは容易に判明すると思われる。

このように、小さな問題に対して学生が提出するプログラムは、そのほとんどが「よく似た」内容であり、全てのプログラムを同じように精査するのは効率的ではない。2つのプログラムがどの程度似ているか、つまり、プログラム間の類似性を機械的に抽出することができれば、抽出された情報によって教師の作業量の軽減が期待できると考えられ、また評価自体の自動化なども視野に入れることができると考えられる。

プログラム間の類似性に関して、井上らによる従来の研究⁽¹⁾では、2つのプログラムについて複数の比較法を順番に適用してゆき、プログラムが一致したときの比較レベルをプログラム間の距離とする手法(段階的感度比較法)が提案された。しかし、この手法で求めら

*専攻科 電気電子工学専攻

**電子工学科 教授

れる距離は間隔尺度としての要件を満たしておらず、そのままでは他のクラスタリングアルゴリズムへ応用することが難しいなどの問題があった。

そこで本研究では、従来法のような問題が発生しない新しい類似性の尺度を提案した⁽²⁾。従来法では特定の比較法による比較結果に注目していたが、本手法で注目するのは、プログラムから生成できる構文木の形状である。これに、様々なデータ構造を特徴空間に写像することなく解析することができるカーネル法を用いて、プログラム間の類似性を定義した。

本論文ではまず、新しく提案したカーネル法に基づく類似度の定義を行い、実際にこれを用いて学生のプログラム同士の類似度の算出を試みた。その後、カーネル法に適用できるよう変形したクラスタリングアルゴリズム、特に今回は重心法を用いて、学生のプログラムをクラスタに分けることを試みるとともに、人間(プログラミングの授業を担当している教員)が手作業で行ったクラスタリング結果とも照らし合わせ、本手法による類似度がどのような特徴を持つのかも調査した。

2. カーネル法

カーネル法はパターン認識などで用いられる手法で、データ構造同士の「内積」に相当するスカラ値を定義し、内積から導かれる特徴空間上でデータの解析を行う。この内積をカーネルと呼ぶ。特徴空間への写像に対して解析を行うのは通常のパターン認識と同じだが、カーネル法にはいくつかの特筆すべき点がある。

1. データ構造を選ばない。

カーネルの値は、内積の要件さえ満たしていればどのような計算を用いて導出しても構わない。このため、実質的にどのようなデータ構造にもカーネル法を使用することができる。

2. 特徴空間の次元に制約がない。

前述したように、カーネル法による特徴空間は内積により定義される。このため特徴ベクトルを厳密に求めるような方法をとることはなく、特徴空間上の種々の値(距離、角度など)を内積から直接計算して求める。このため、特徴空間の次元を制限することによる制約を受けることはない。

3. 線型代数による解析が可能である。

カーネルの値は線型代数の手法により定義されるので、線型代数を用いる解析法への応用が可能である。

以降では特に断りがない限り、データ構造 T_i, T_j に関するカーネルを $\kappa(T_i, T_j)$ 、 T_i, T_j に対応する特徴空間上の仮想的なベクトルを $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ と書くこととする。

3. カーネル法のプログラムへの応用

ほとんどのプログラミング言語は、記述されたプログラムの構造を構文木で表すことが可能である。木構造に対するカーネルは既にいくつか提案されており、プログラムを構文木の形に変換すれば、木構造カーネルを用いてデータ解析をすることが可能である。この様子を図2に示す。

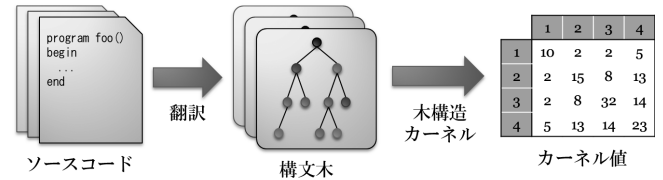


図2 プログラムへのカーネルの適用

4. 木構造カーネル

木構造カーネルに共通した特徴は、2つの木の間に共通する構造がどの程度含まれているかを表していることである。これをプログラムの構文木に適用する場合、ある部分について同じ構造のプログラムが書かれていれば、構文木の形状も共通部分を含むことになる。このため、木構造カーネル上では似た構造を持つプログラムほどカーネルの値が大きくなると考えられる。今回は木構造カーネルの中でも全部分木カーネル⁽³⁾と呼ばれるものを用いた。

まず、次の条件を満たすものを(ある木に対する)部分木と定義する。

- 少なくとも1個以上の子を持つ任意のノードを選んで、このノード(部分木の根とする)と、子孫ノードの組み合わせで得られる木である。
- 部分木の根以外のあるノードが木に含まれる場合、その兄弟ノードも全て木に含む。

2つの木構造 T_i, T_j に対して、これらの部分木が一致する個数を数えたものを全部分木カーネル $\kappa_A(T_i, T_j)$ と定義する。これは次式により表現される。

$$\kappa_A(T_i, T_j) \equiv \sum_{\nu_i \in T_i} \sum_{\nu_j \in T_j} \kappa_R(\tau(\nu_i), \tau(\nu_j)). \quad (1)$$

ここで、 ν_i, ν_j は T_i, T_j に含まれるノード、 $\tau(\nu)$ は ν とその全ての子孫ノードで構成される木である。また $\kappa_R(T_i, T_j)$ は共通ルート部分木カーネルと呼ばれるもので、次の再帰式により定義される。

$$\kappa_R(T_i, T_j) \equiv \begin{cases} 0, & \text{if condition} \\ \prod_{n=1}^{d(\text{root}(T_i))} \kappa'_n(T_i, T_j), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{condition} &\equiv d(\text{root}(T_i)) \neq d(\text{root}(T_j)) \\ &\vee d(\text{root}(T_i)) = 0 \\ &\vee \text{label}(\text{root}(T_i)) \neq \text{label}(\text{root}(T_j)) \end{aligned}$$

$$\kappa'_n(T_i, T_j) \equiv \kappa_R(\tau(\text{ch}_n(\text{root}(T_i))), \tau(\text{ch}_n(\text{root}(T_j)))) + 1$$

ここで、 $d(\nu)$ はノード ν の出次数、 $ch_n(\nu)$ は ν の n 番目の子、 $root(T)$ は木 T の根、 $label(\nu)$ は ν のラベル(ノードに関連付けられたデータ)である。プログラムの構文木では、ラベルの値は識別子名、制御構造名、演算子といった情報を表す文字列や数値となる。

5. 余弦類似度

次にカーネルを用いて、2つのデータ構造間の類似性を測る尺度を定義する。まず、カーネルとは特徴空間上の内積である、と定義されるため、内積の定義より次の式が常に成り立つ。

$$\begin{aligned}\kappa(T_i, T_j) &= \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle \\ &= |\mathbf{x}_i| |\mathbf{x}_j| \cos \theta_{T_i, T_j}\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、 θ_{T_i, T_j} は特徴空間上で $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ がなす角である。これを $\cos \theta_{T_i, T_j}$ について書き直すと、

$$\begin{aligned}\cos \theta_{T_i, T_j} &= \frac{\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle}{|\mathbf{x}_i| |\mathbf{x}_j|} \\ &= \frac{\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i \rangle \langle \mathbf{x}_j, \mathbf{x}_j \rangle}} \\ &= \frac{\kappa(T_i, T_j)}{\sqrt{\kappa(T_i, T_i) \kappa(T_j, T_j)}}\end{aligned}\quad (4)$$

となる。この $\cos \theta_{T_i, T_j}$ は、 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ のなす角に関する情報を $[-1, 1]$ もしくは $[0, 1]$ の値域で与える。後者の値域となるのは、特徴ベクトルの全ての要素が正値のみを取る場合である。全部分木カーネルは各要素について「ある部分木を含む場合は1, 含まない場合は0」という特徴空間に写像することに等しいので、値域 $[0, 1]$ に該当する。

T_i と T_j が同じ部分木を多く持っている場合、 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ は特徴空間上で近い方向を向く、つまり θ_{T_i, T_j} が0に近づく。よって、 $\cos \theta_{T_i, T_j}$ が1に近づくほど T_i と T_j が似た要素である、とすることができる。逆に T_i と T_j が全く同じ要素を持っていない場合、 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ は直交する。これは $\cos \theta_{T_i, T_j}$ が0となる場合に対応する。この $\cos \theta_{T_i, T_j}$ を余弦類似度と名付け、特徴空間上の類似度を測る指標として用いることとする。ここで重要なのは、 $\cos \theta_{T_i, T_j}$ の値を特徴ベクトルを用いず、その内積(カーネル)のみを用いて計算できることである。

6. アルゴリズムの実装

図3に、本研究で実装したアルゴリズムの概略を示す。今回対象とした言語は、神戸高専電子工学科2年の科目「プログラミングI」で用いられるPascal言語である。言語仕様については同科目で用いられる教科書⁽⁴⁾に従った。

まず、対象のPascalプログラムを前処理として翻訳器に入力し、構文木を得る。これらの構文木の全ての

ペアに対して全部文木カーネル $\kappa_A(T_i, T_j)$ を計算し、グラム行列 K を得る。グラム行列とは i, j 要素が $\kappa(T_i, T_j)$ となるような行列のことである。 K の要素を用いて、余弦類似度 $\cos \theta_{T_i, T_j}$ を計算する。

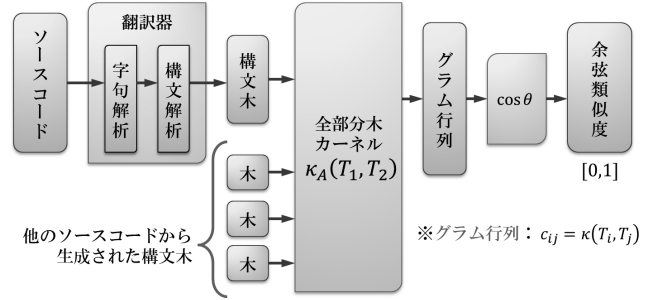


図3 アルゴリズムの内部構造

7. 余弦類似度の算出結果

実際に学生から収集したプログラムに対して、本アルゴリズムを適用した。収集したプログラムは神戸高専電子工学科2年の科目「プログラミングI」において出題された練習問題に対する回答であり、1問に対する学生40人分の回答を1データセットとして、合計12データセットを得た。図4に示すのは、その中の1問、

1000以下の素数の一覧表を作成しなさい。
ただし、1行に表示する素数は10個とする。

に対するデータセットについて、余弦類似度を計算した結果である。

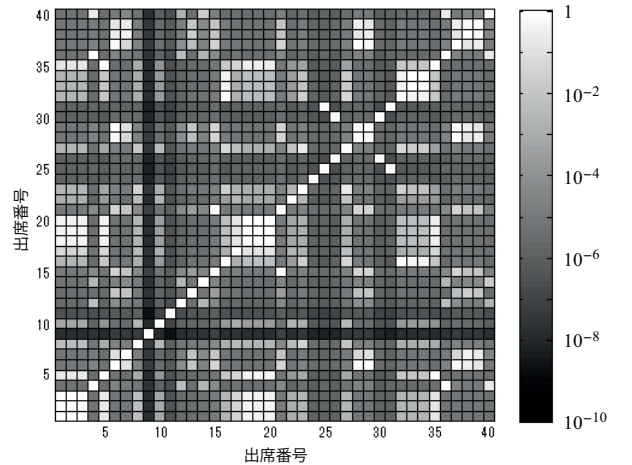


図4 学生のプログラム同士の余弦類似度

図4の縦軸、横軸は学生の出席番号である。出席番号が交差する点の色はそれらの学生が提出したプログラム同士の余弦類似度を示し、色が明るいほど余弦類似度が大きい(1に近い)ことを示す。

図4から、いくつか読み取れる事実がある。左下か

ら右上への対角線上のマスは全て白であるが、これは同じ学生のプログラム同士の余弦類似度が1であることを示しており、自明な結果である。また一般的に $\kappa_A(T_i, T_j) = \kappa_A(T_j, T_i)$ となる性質があるが、これは図が対角線について対称であることから確認できる。

全部分木カーネルの定義から、余弦類似度が1となるのは構文木が全く同一である場合に限られる(異なる形状の木には必ず異なる部分木が含まれるため)。つまり、交点のマスが白い学生同士、例えば左下の出席番号1, 2, 3番の学生などは、改行やインデント、空白などの違いを除いて同じプログラムを提出している可能性が高い。ただし、識別子名のみが異なる場合については、今回の手法では検出されず、類似度に影響は出ないことが分かっている。これは構文木の部分木の数や形状に、ノードのラベルとして扱われる識別子名が直接影響しないためである。

さらに図4からは、「プログラムA, B, Cがあつて、AとBの類似度が高く、BとCの類似度が高い場合、AとCの類似度も同じように高い」という規則性が見受けられる。つまり、類似度の高いプログラム同士が一定のグループ性を持っていると推測できる。学生を何らかのクラスタリング法を用いて並べ替えることで、より明確な情報が得られると考えられる。

8. 重心法

前章までに示した学生のプログラム間の類似性を詳しく調べるために、重心法をカーネル法へ応用したカーネル重心法を用いて、学生のプログラムのクラスタリングを行った。重心法とは凝集型階層クラスタリング(Agglomerative Hierarchical Clustering: AHC)と呼ばれる手法の一種であり、類似性の高いデータ群(クラスタ)2個を単一のクラスタにまとめる作業を繰り返すことにより、データ間の類似性を階層的な形で可視化することができる。

特徴空間上のベクトル $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ についてのユークリッド距離を $\text{dist}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ と書くこととする。ベクトル N_α 個が属するクラスタ α と、 N_β 個が属するクラスタ β があるとき、それぞれのクラスタの重心ベクトル $\mathbf{g}_\alpha, \mathbf{g}_\beta$ は

$$\mathbf{g}_\alpha = \frac{1}{N_\alpha} \sum_{\mathbf{x}_i \in \alpha} \mathbf{x}_i \quad (5)$$

$$\mathbf{g}_\beta = \frac{1}{N_\beta} \sum_{\mathbf{x}_j \in \beta} \mathbf{x}_j \quad (6)$$

であり、これら重心間の距離 $\text{dist}(\mathbf{g}_\alpha, \mathbf{g}_\beta)$ は、

$$\text{dist}(\mathbf{g}_\alpha, \mathbf{g}_\beta) = \text{dist} \left(\frac{1}{N_\alpha} \sum_{\mathbf{x}_i \in \alpha} \mathbf{x}_i, \frac{1}{N_\beta} \sum_{\mathbf{x}_j \in \beta} \mathbf{x}_j \right) \quad (7)$$

で表される。

重心法のアルゴリズムは次の通りである。

1. 全ての特徴ベクトルを要素数1のクラスタと見なす。この時点では、クラスタの重心座標は特徴ベクトルと一致する。
2. 現在見えているクラスタの全ての組み合わせに対して重心間の距離 $\text{dist}(\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_j)$ を求める。ただし、 i, j はクラスタを表す添字である。
3. $\text{dist}(\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_j)$ の値が最も小さいクラスタの組を探し、これをまとめて新たなひとつのクラスタとする。
4. クラスタ数が1になるまで(2)～(3)を繰り返す。

9. 重心法のカーネル法への適用

重心法はそのままでは特徴ベクトルの値を必要とするため、カーネル法へ適用することはできない。特徴ベクトルを用いる計算はクラスタの重心間の距離 $\text{dist}(\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_j)$ のみであるので、この式を変形してカーネルのみを用いるようにする。

特徴空間上のベクトル $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ について、そのユークリッド距離 $\text{dist}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ は余弦定理を用いて、

$$\text{dist}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sqrt{|\mathbf{x}_i|^2 + |\mathbf{x}_j|^2 - 2|\mathbf{x}_i||\mathbf{x}_j|\cos\theta} \quad (8)$$

で表される。ここで根号内の各項は $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ の内積で置き換えられるので、

$$\text{dist}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sqrt{\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i \rangle + \langle \mathbf{x}_j, \mathbf{x}_j \rangle - 2\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle} \quad (9)$$

となる。 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ としてクラスタ α, β の重心 $\mathbf{g}_\alpha, \mathbf{g}_\beta$ を代入すると、根号内の各項はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{g}_\alpha, \mathbf{g}_\alpha \rangle &= \frac{1}{N_\alpha^2} \left\langle \sum_{\mathbf{x}_i \in \alpha} \mathbf{x}_i, \sum_{\mathbf{x}_j \in \alpha} \mathbf{x}_j \right\rangle \\ &= \frac{1}{N_\alpha^2} \sum_{\mathbf{x}_i \in \alpha} \sum_{\mathbf{x}_j \in \alpha} \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle \\ &= \frac{1}{N_\alpha^2} \sum_{T_i \in T_\alpha} \sum_{T_j \in T_\alpha} \kappa(T_i, T_j) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{g}_\beta, \mathbf{g}_\beta \rangle &= \frac{1}{N_\beta^2} \left\langle \sum_{\mathbf{x}_i \in \beta} \mathbf{x}_i, \sum_{\mathbf{x}_j \in \beta} \mathbf{x}_j \right\rangle \\ &= \frac{1}{N_\beta^2} \sum_{\mathbf{x}_i \in \beta} \sum_{\mathbf{x}_j \in \beta} \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle \\ &= \frac{1}{N_\beta^2} \sum_{T_i \in T_\beta} \sum_{T_j \in T_\beta} \kappa(T_i, T_j) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{g}_\alpha, \mathbf{g}_\beta \rangle &= \frac{1}{N_\alpha N_\beta} \left\langle \sum_{\mathbf{x}_i \in \alpha} \mathbf{x}_i, \sum_{\mathbf{x}_j \in \beta} \mathbf{x}_j \right\rangle \\ &= \frac{1}{N_\alpha N_\beta} \sum_{\mathbf{x}_i \in \alpha} \sum_{\mathbf{x}_j \in \beta} \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle \\ &= \frac{1}{N_\alpha N_\beta} \sum_{T_i \in T_\alpha} \sum_{T_j \in T_\beta} \kappa(T_i, T_j) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。ここで T_α, T_β は、クラスタ α, β に属する特徴ベクトルに対応するデータ構造の集合である。これらを

距離の定義に代入すると、最終的に、

$$\text{dist}(\mathbf{g}_\alpha, \mathbf{g}_\beta) = \sqrt{\begin{aligned} & \frac{1}{N_\alpha^2} \sum_{T_i \in T_\alpha} \sum_{T_j \in T_\alpha} \kappa(T_i, T_j) \\ & + \frac{1}{N_\beta^2} \sum_{T_i \in T_\beta} \sum_{T_j \in T_\beta} \kappa(T_i, T_j) \\ & - \frac{2}{N_\alpha N_\beta} \sum_{T_i \in T_\alpha} \sum_{T_j \in T_\beta} \kappa(T_i, T_j) \end{aligned}} \quad (13)$$

が得られる。これによって、カーネルによる特徴空間上のベクトル間の距離を求めることができる。この距離の定義を用いて行う重心法をカーネル重心法(Kernel-AHC on the Centroids: K-AHC-C)と呼ぶ。上記の式については、鶴田による研究⁽⁵⁾でも同様のものが紹介されている。

10. カーネル重心法の適用結果

カーネル重心法により生成されたクラスタの順に、図4を並べ替えたものを図5に示す。

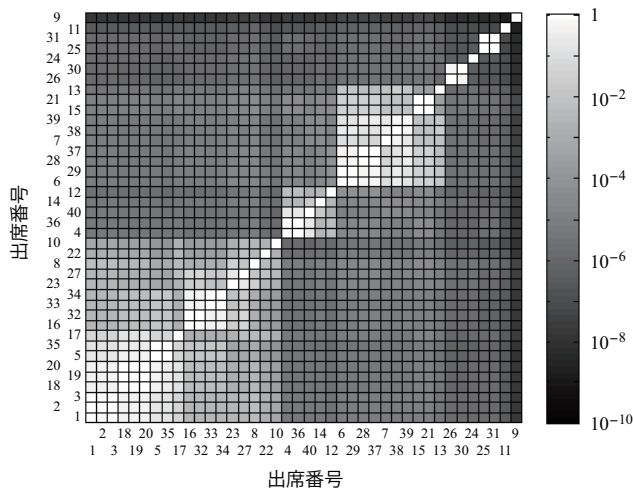


図5 カーネル重心法による並べ替え後

この図を見ると、対角線上に3つの大きな明るい矩形を見て取れる。これは、学生のプログラムがおよそ3つのグループに大別できることを示唆している。

11. 教員による分類結果との比較

図5の結果が実際に有用なものであるかどうかを確かめる必要があるため、人間の手作業による分類結果との比較を行った。表1は、神戸高専電子工学科のプログラミング系科目を担当する教員に依頼して得た図5と同じデータセットの分類結果に、図5に見られたクラスタを合わせて表示したものである。

基準1～4は教員側が独自に考案した比較基準であり、それぞれ明確にプログラムを分類することができるものである。具体的には表2のような分類法であった。基準1はプログラムの計算量に基づく分類、基準2～4はプログラムの全体的な構成による分類である。備考については、基準とは別にプログラムに何らかの特徴が

表1 教員による分類結果と図5の比較

出席番号	基準				備考	図5でのクラスタ
	1	2	3	4		
1	C	A	A	A	—	X
2	C	A	A	A	—	X
3	C	A	A	A	—	X
18	C	A	A	A	—	X
19	C	A	A	A	—	X
20	C	A	A	A	—	X
5	C	A	A	A	—	X
35	C	A	A	A	—	X
17	A	A	A	A	—	X
16	C	A	A	A	—	X
32	C	A	A	A	—	X
33	C	A	A	A	—	X
34	C	A	A	A	—	X
23	B	A	A	A	—	X
27	A	A	A	A	—	X
8	B	A	A	A	—	X
22	A	A	A	A	—	X
10	A	A	A	A	—	X
4	A	B	A	B	—	Y
36	A	B	A	B	—	Y
40	C	B	A	B	—	Y
14	C	B	A	B	—	Y
12	A	B	A	B	—	Y
6	A	A	A	B	—	Z
29	A	A	A	B	—	Z
28	A	A	A	B	—	Z
37	A	A	A	B	—	Z
7	C	A	A	B	—	Z
38	C	A	A	B	—	Z
39	C	A	A	B	—	Z
15	A	A	A	B	—	Z
21	A	A	A	B	—	Z
13	C	A	A	B	—	Z
26	C	A	A	A	あり	—
30	C	A	A	A	あり	—
24	C	A	A	A	あり	—
25	A	B	B	A	あり	—
31	A	B	B	A	あり	—
11	C	A	A	A	あり	—
9	A	B	B	A	あり	—

表2 教員による比較基準

基準	概要
1	素数判定の繰り返し回数が, A: $n-1$, B: $\frac{n}{2}$, C: $\sqrt{n}$
2	A: 今までに出力した総数を10で割った余りで現在の行に出力した個数を計算 B: 現在の行に出力した個数を変数で保持し, 10になる度に0へ戻す
3	A: 素数の出力に write(改行なし) と writeln(改行あり) を場合によって選択 B: 素数の出力には write を使い, 改行のみ別に出力
4	冗長な(ひとつにまとめることができる)if文が, A: ある, B: ない

見られた場合に付記されたようである。また、表全体は図5の左から右の順となるように出席番号を並べ替えている。表の最も右の列は図5に見られた3つのクラスタを示しており、それぞれ図5の左下から最初の18名をクラスタX、次の5名をクラスタY、続く10名をクラスタZとした。

表1を見ると、備考を付記された学生のプログラムについては図5のどのクラスタにも属していないことが分かる。つまり、他人と明らかに異なるプログラムは本手法で明確に区別することができると考えられる。また基準2と基準4に注目すると、両方がAに分類されているプログラム、基準2がAで基準4がBに分類されているプログラム、両方がBに分類されているプログラムが、それぞれ図5におけるX、Y、Zの各クラスタに対応していることが分かる。これより、プログラムの全体的な構造に着目している分類法には本手法が比較的良好一致した結果を出していると考えられる。

一方で基準1に関しては、図5におけるそれぞれのクラスタに分散してしまっている。これは、基準1による分類先を決定する部分がプログラム中の1ヶ所しかなかった(素数判定時のループ条件のみ)ため、共通な部分木の数にはあまり影響が出なかったからであると推測できる。

12. まとめ

本研究では、プログラム間の類似性を定量化するために、新たにカーネル法に基づく類似度を提案した。その結果、

- 本手法では、数学的な手続きを用いて後段の解析を追加できることを示した。たとえば本論文ではカーネル重心法によるクラスタリングを行い、学生のプログラム間に見られるクラスタを観察する

ことができた。

- 全部分木カーネルによる解析結果が、教員の手作業による分類結果のうち、プログラムの全体的な構造に着目したものとよく一致することが確認できた。一方、プログラムの特定の部分のみに着目した分類結果に関しては、今回の手法ではあまり合致しないことが分かった。

という事実が得られた。

これらを踏まえて、今後取り組むべき課題としては、

- 単純な構文木の使用では明確になりにくいと分かった差異、たとえば制御構造の条件判定の違いなどについて、より明確にクラスタリングできるようにデータ構造を変形すること
- 現状では考慮されていない識別子の差異などを組み込む方法の開発
- 手法のより厳密な評価

が挙げられる。

参考文献

- (1) 井上晴喜, 若林茂: プログラム間の類似性に関する研究, 教育システム情報学会第31回全国大会講演論文集, 教育システム情報学会, p219-220 (2006)
- (2) 小田悠介, 上村康輔, 若林茂: プログラム間の類似性の定量化手法, 教育システム情報学会第37回全国大会講演論文集, 教育システム情報学会, pp.178-179 (2012)
- (3) John Shawe-Taylor, Nello Cristianini, 大北剛 訳: Kernel Methods for Pattern Analysis, 共立出版, p470-482 (2010)
- (4) 真野芳久: Pascalプログラミングの基礎, サイエンス社, p.234-254 (1994)
- (5) 鶴田育緒: An application of kernels for clustering, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, p.20 (2006)
URL: <http://www.sk.tsukuba.ac.jp/SSE/degree/2005/thesis/200105351.pdf> (2012年9月6日閲覧)

粗粒材を用いた岸沖断面地形と粒径分布の特性に関する研究

見垣亮太* 辻本剛三** 柿木哲哉*** 宇野宏司***

A Study on Evolutions of Beach Profiles and Grain Size Distribution using Coarse-grained Sand Particles

Ryota MIGAKI* Gozo TSUJIMOTO** Tetsuya KAKINOKI*** Koji UNO***

ABSTRACT

Beach erosion has been an important issue in Japan. Therefore many beach erosion control works have been carried out to reduce beach erosion. One of them is an artificial nourishment method. This paper has focused on beach profile changes with coarse grain sediments and the distributions of sediment under tidal level fluctuations. A sand bar near the breaking point is formed at the more onshore side. Also the sand bar is shifted toward the offshore side at the high water level and the onshore side at the low water level. The berm formed at the low water level is moving gradually onshore with increasing water level, and coarse grain sediments are deposited at the surface near the berm. But an alternate layer of fine and coarse grain sediments is formed from the grand surface in the vertical direction. By using by mixing sand and coarse again sediments, reducing erosion than in case of using only the coarse sediments. This result is the same even when considering the water level fluctuations.

Keywords : beach profiles, grain size distribution, coarse-grained sand particles

1. 研究背景・目的

海浜は国土を構成する重要要素の1つである。しかし、海岸侵食が半世紀以上にわたって、問題となってきた。海岸侵食は防災効果の低減への影響等が懸念されており、侵食対策が必要とされている。侵食対策としては、護岸堤等の漂砂制御施設が設置されることが多いが海浜の景観悪化、下手側の侵食を進行させる等の問題が懸念されている⁽¹⁾。そのため、養浜工が注目されている。しかし、侵食が生じている海浜に同粒径の砂粒子を供給することでは、再び流出を繰り返すことも考えられる。その対策として粗粒材等の礫材を供給することも検討されている。さらに、養浜を行う際に重要なのは防護的機能を果たし、環境機能が変化しないこと、人が安全に利用できることである⁽²⁾。そのためには、養浜後の地形変化等を把握しておく必要がある。

本研究では海浜保全対策の1つとして移動床において粗粒材を用いて台形上のマウンドを設置し、海浜の安定化検討することを目的とする。そのために、潮位変化を伴う波動場での海浜断面形状や砂の粒径分布等を調べる。

2. 実験概要

2.1 マウンド設置位置の選定と地形計測方法 図1に示すように2次元造波水槽(長さ18 m×幅60 cm×高さ80 cm)に中央粒径0.48 mmの砂粒子を用いて勾配1/15の移動床を作成した。その地形に中央粒径1.0~2.0 cmの粗粒材を用いて台形上のマウンドを斜面上に設定した。設置条件は以下の3種類とした。(後述の図3参照)

Case1:マウンドの沖端が平均水面時の汀線(粗粒材が水に浸かっていない状態)

Case2:マウンドの中心が平均水面時の汀線

Case3:マウンドの岸端が平均水面時の汀線(粗粒材が水に浸かっている状態)

17時間波を作用させるとほぼ平衡状態に達すること

* 専攻科 都市工学専攻

** 都市工学科 教授

*** 都市工学科 准教授

を予備実験で確認した．計測には，3 時間毎(最後のみ 2 時間)にレーザー距離測定器を用いて，2 cm 間隔で 5 m 区間の底面高さの地形変化を測定した．表層の底質粒度をデジタルカメラ (IXY DIGITAL900IS, Canon 社) を用いて高さ 33 cm, 倍率 9.1 倍で 10 cm 間隔でフラッシュ撮影した．その画像を Rubin⁽³⁾が提案する手法を用いて淘汰係数，中央粒径(d_{50})を算出し，粒度分布を調べた．図 2 は最終地形のマウンド付近の写真であり，最終地形では粒径の鉛直分布を求めるために表面を数 mm ずつスライスして撮影した．

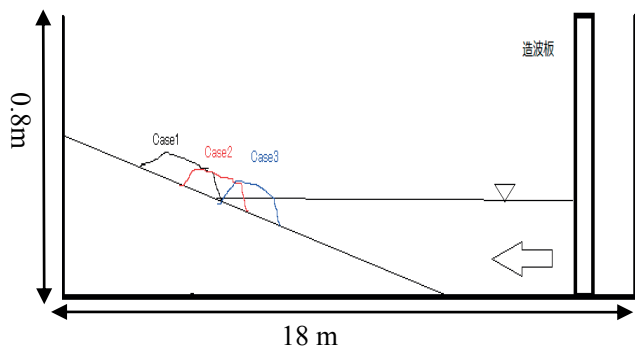


図 1 2次元造波水槽



図 2 最終地形 (バーム付近)

2.2 実験ケース

2.2.1 侵食地形にマウンド作成 海岸侵食が発生している海岸では一様勾配であることは考え難い．そのため，一様勾配(1/15 勾配)の移動床を作成して，3 時間波を作用させ平衡状態にした地形を初期地形とし，マウンドを設置して，2.1 での地形変化，漂砂量，底質特性と比較した．

2.2.2 粗粒材のみの場合と粗粒材と砂粒子の混合マウンドの場合での比較 マウンド作成時に粗粒材と砂粒子を混合させることで経済的で景観にもより良いと考え，粗粒材と砂粒子を 2:1 の割合で混合させてマウンドを作成した場合も検討した．その結果を 2.1 での地形変化，漂砂量，底質特性と比較した．

2.2.3 水位変動を考慮した場合の比較 実際の海浜では潮位が変化変動している．その潮位変化を考慮するために，1 潮汐を低潮位(35 cm)~平均潮位(40 cm)~高潮位(45 cm)~平均潮位~低潮位として水位を 5 時間で変化させ，2.1 での地形変化，漂砂量，底質特性と比較した．

2.3 実験条件 辻本ら⁽⁴⁾の実験条件を用いた．表 1 に侵食型の波の条件を示す．

表 1 実験波の条件

平均波		有義波	
波高(cm)	周期(秒)	波高(cm)	周期(秒)
7.3	1.22	11.3	1.35

3. 結果と考察

3.1 マウンド設置位置の選定

3.1.1 地形変化 図 3(a)~(c) に 2.1 で述べた Case1~Case3 の場合の各造波時間における地形変化と最終地形での粒度分布を示す．時間経過に伴いバームは岸側に，トラフとバーは沖側に動いている．全体を通して Case2 は Case1, Case3 に比べ，バーム・バーが大きく，Case2 が最も底質移動していることが確認できた．また，どの Case においても粗粒材は 1.0~2.0 m 付近の表面に堆積することがわかる．

図 4 に 17 時間後における Case1~3 とマウンドを設置しない場合での地形の比較を示す．マウンドを設置することで汀線付近の侵食が低減され，Case2 がマウンド付近での堆積傾向が著しかった．

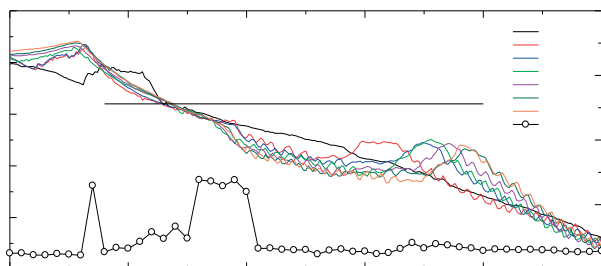


図 3(a) Case1 での地形変化と粒度分布

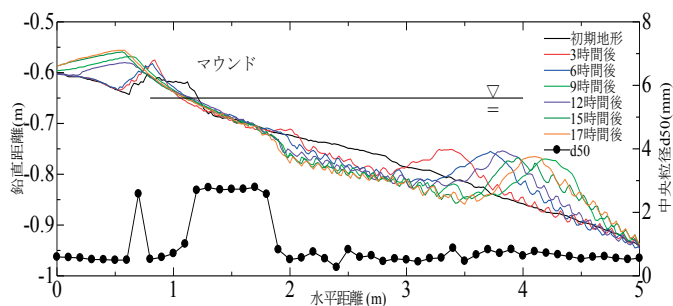


図 3(b) Case2 での地形変化と粒度分布

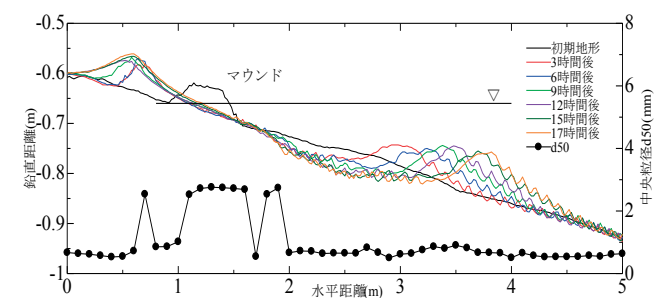


図 3(c) Case3 での地形変化と粒度分布

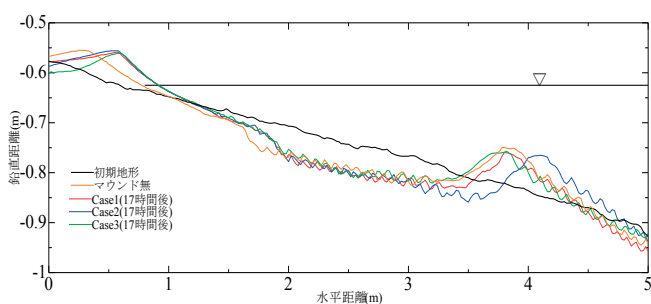


図 4 17 時間後での比較

3.1.2 漂砂量 図 5(a)~(c)に図 3 の漂砂量を示す。プラス側が沖向きでマイナス側が岸向きの漂砂であることを表している。各 Case において 0 ~2.0 m までは岸向き, 2.0 ~5.0 m では沖向きに砂粒子が移動しているが, Case2 が汀線付近で最も岸向きに漂砂していることがわかり, 図 4, 図 5(b) より Case2 は汀線付近で堆積傾向にあると考えられる。

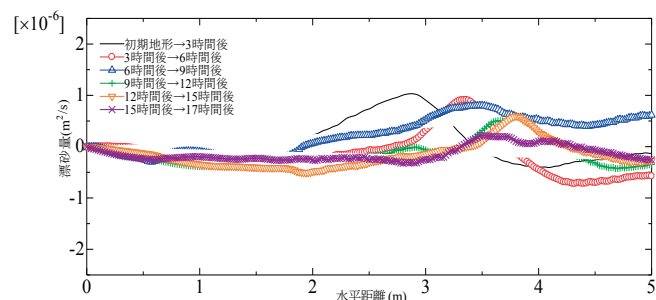


図 5(a) Case1 の漂砂量

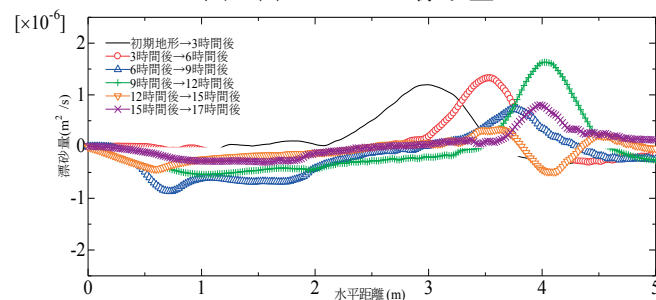


図 5(b) Case2 の漂砂量

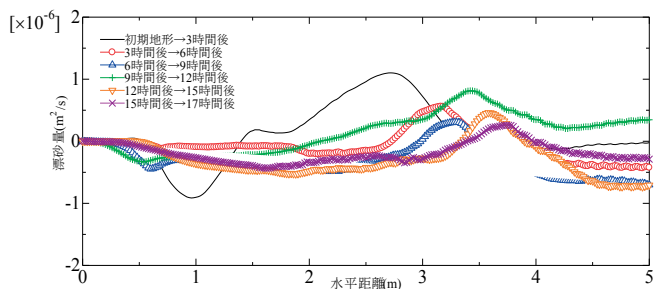


図 5(c) Case3 の漂砂量

3.1.3 底質特性 図 6(a)と図 6(b)に 0.5 m と 4.0 m における表面からの距離と中央粒径(d_{50})・淘汰係数の関係を示す。淘汰係数は 1.2 程度で粒径が均一である。各 Case とも 0.5 m において淘汰係数が大きい。図 6(a)より Case1 と Case3 に比べ Case2 は淘汰係数のバラつきが少なく, 粗粒材が 0.5 m 付近から移動が少ないことがわかる。またマウンド付近では砂粒子と粗粒材が交互に挟まれている層が見られる。図 6(b)より 4.0 m の沖では粗粒材は移動していないことがわかる。

図 3(a)~図 3(c)の粒度分布と図 6(a), 図 6(b)より粗粒材の移動範囲は 0 ~2.0 m の範囲であることがわかり, マウンド設置位置付近からは大きく移動しないことがわかった。これは粗粒材は粒径が大きいため移動し難いということもあるが, 時間経過に伴い, 粗粒材の上に砂粒子が漂砂し堆積することによって移動範囲が制限されていることも考えられる。

・ 0.5 m(水平距離)

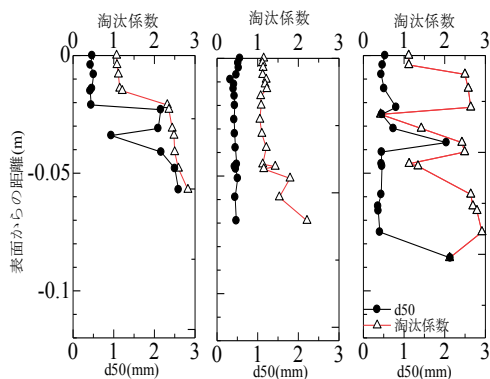


図 6(a) 中央粒径と淘汰係数
(左:Case1 中央:Case2 右:Case3)

・ 4.0 m(水平距離)

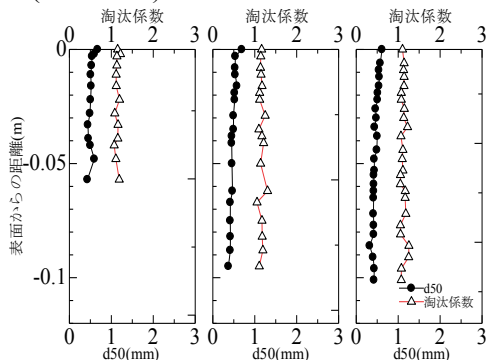


図 6(b) 中央粒径と淘汰係数
(左:Case1 中央:Case2 右:Case3)

3.1.4 マウンド作成位置の決定 Case2 がより汀線付近に対して堆積傾向が見られたので、以後 Case2 を用いて研究を行った。

3.2 侵食地形にマウンド作成

3.2.1 地形変化 図 7 に一様勾配から侵食型の波を作作用させた後にマウンドを設置して 17 時間波を再び作用させてできた各造波時間後の地形と最終地形の粒度分布を示す。図 3(b) と比べ、バームが高くなっている。これはマウンド設置後に、マウンド設置前にできたバームの上に砂粒子が堆積したことにより高くなったためだと考えられる。

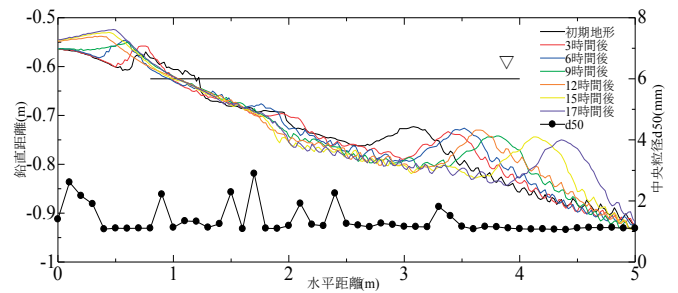


図 7 侵食型地形にマウンド作成での
地形変化と粒度分布

3.2.2 漂砂量 図 8 に図 7 の漂砂量を示す。図 5(b) と比較すると移動が少ない。汀線付近での漂砂量は減少しているが、図 5(b) との差は見られなかった。

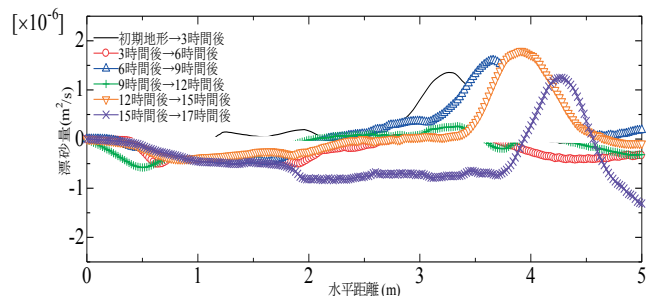


図 8 侵食型地形にマウンド作成後での漂砂量

3.2.3 底質特性 図 9 に図 7 の表面からの距離と中央粒径(d50)・淘汰係数の関係を示す。0.5 ~ 1.0 m 程度では粗粒材が埋まり、砂粒子が堆積している。粗粒材は水平距離 0 ~ 1.0 m 程度の範囲で移動することがわかった。

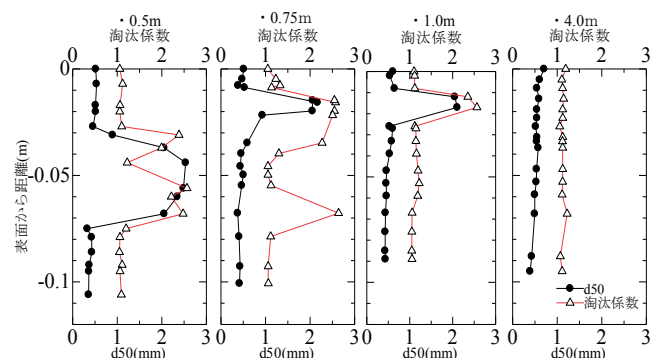


図 9 侵食型地形にマウンド作成後での底質特性

3.2.4 初期勾配の決定 一様勾配と平衡勾配での実験では大きな変化は見られないため、以後、一様勾配で実験を行った。

3.3 粗粒材のみの場合と粗粒材と砂粒子の混合マウンドの場合での比較

3.3.1 地形変化 図 10 に粗粒材と砂粒子を混合したマウンドを設置した場合の各造波時間後の地形変化と最終地形の粒度分布を示す。マウンドに砂粒子を混ぜることで侵食が低減されることがわかる。また、粒度分布を見るとマウンドを設置した周辺だけでなく 2.0 ~3.0 m 付近のトラフにも粗粒材が移動していることがわかる。図 11 にマウンドが粗粒材のみの場合と粗粒材と砂粒子を混合させた場合による地形変化の比較を示す。混合マウンドの方が粗粒材のみの場合に比べ侵食を防ぎ、汀線付近で堆積傾向があることがわかる。

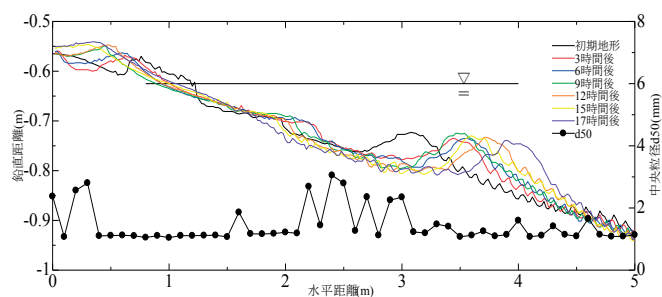


図 10 混合マウンドの場合での地形変化と粒度分布

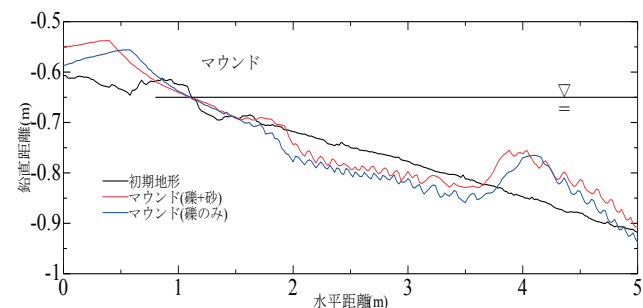


図 11 マウンドの違いによる地形変化の比較

3.3.2 漂砂量 図 12 に図 10 の漂砂量を示す。図 5 (b) と比較すると波を作用させて 3 時間後までは漂砂は多い。これはマウンドの粗粒材の間に砂粒子が混ざっているため空隙が少なく、初期地形から 3 時間後の早い時間で漂砂が多いためと考えられる。

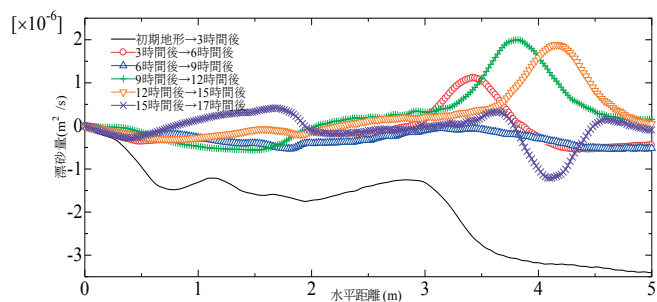


図 12 混合マウンドの場合での漂砂量

3.3.3 底質特性 図 13 に図 10 の 17 時間後での表面からの距離と中央粒径(d_{50})・淘汰係数の関係を示す。

図 10 (a) の粒度分布で 0.5 m, 0.75 m では表面には粗粒材が見られないことがわかったが、鉛直方向には砂粒子と粗粒材が交互に挟まっていることがわかる。

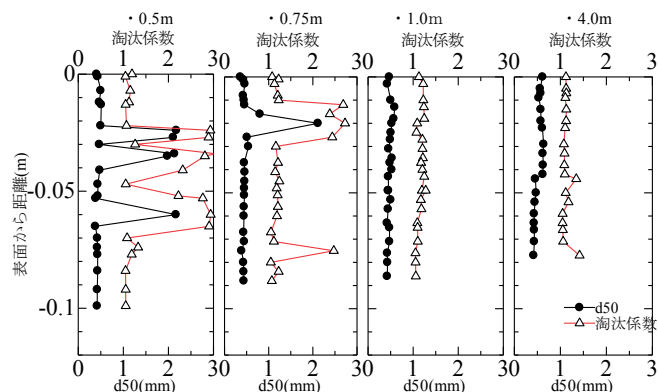


図 13 混合マウンドの場合での底質特性

3.4 水位変動を考慮した場合の比較

3.4.1 地形変化 図 14 (a) に水位変動を考慮したマウンドが粗粒材のみの場合での地形変化と最終地形の粒度分布、図 14 (b) に水位変動を考慮したマウンドが粗粒材と砂粒子を混ぜた場合での地形変化と最終地形の粒度分布、図 15 に 1 潮汐後の両者の比較を示す。

図 14 (a) と図 3 (b)、図 14 (b) と図 10 を比較すると水位変動を考慮することでバームが低くなり高低差が少なくなるため、水位変動の影響があることがわかる。また、粒度分布を見ると混合マウンドを設置した場合では周辺だけでなく 2.0~3.0 m 付近のトラフまで粗粒材が移動していることがわかる。図 15 より水位変動場でも混合マウンドを用いた方が、侵食が低減されることがわかる。

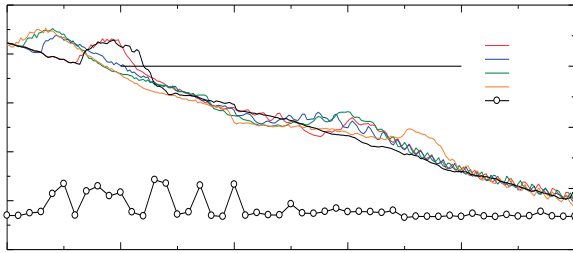


図 14(a) 粗粒材のみのマウンドでの地形変化

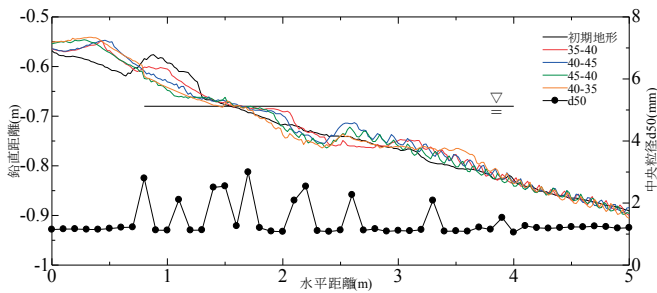


図 14(b) 混合マウンドでの地形変化

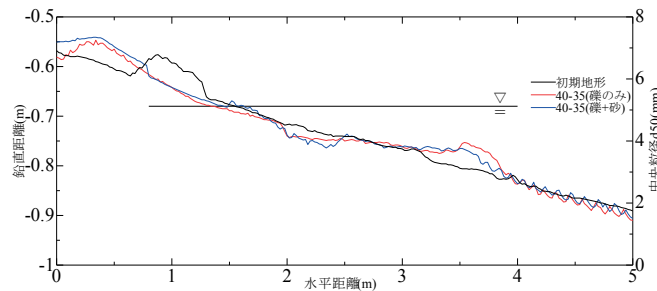


図 15 1 潮汐後の比較

3.4.2 底質特性 図 16(a)に水位変動を考慮したマウンドが粗粒材のみの場合での底質特性, 図 16(b)に水位変動を考慮したマウンドが粗粒材と砂粒子を混ぜた場合での底質特性を示す. 図 6, 図 13 と比較すると水位変動を考慮することで表面にも粗粒材が堆積することがわかる. また, 図 14 や図 16 から広い範囲で粗粒材が見られることがわかった. これは水位が下がる際に粗粒材も移動したためと考えられる.

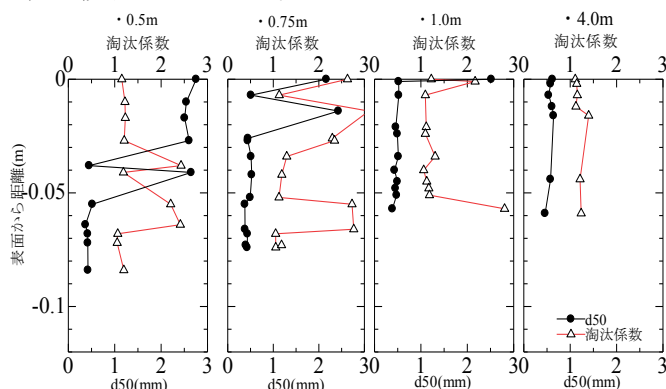


図 16(a) マウンド(粗粒材のみの)の底質特性

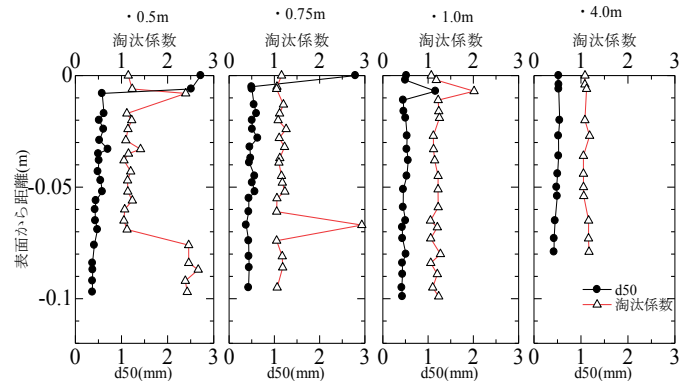


図 16(b) マウンド(粗粒材+砂粒子)の底質特性

4. 結論

本研究から以下のことが明らかとなった.

- ・マウンド設置により, マウンド周辺で砂粒子の堆積傾向が見られる.
- ・初期地形を平衡勾配と一様勾配にした場合, 最終地形には差が見られないため, 実験時には一様勾配からの実験で行うことができる.
- ・マウンド作成時には粗粒材だけではなく砂粒子を混ぜ合わせることで, 粗粒材のみの場合より侵食を低減させる.
- ・水位変動場においてもマウンドの粗粒材に砂粒子を混ぜて設置することで侵食が低減できる.

以上の結果より粗粒材と砂粒子を混合させたマウンドが良いと確認できたため, 今後, 粗粒材と砂粒子との比率を変え, より適正な比率を検討していく必要がある.

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」, 2005.
- (2) 酒井大樹:西暦 2010 年度神戸市立工業高等専門学校特別研究報告書「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」.
- (3) Davit M.Rubin: A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment, Journal of sedimentary research, Vol. 74, No.1, pp.160-165, 2004.
- (4) 辻本剛三, 酒井大樹, 山田文彦, 柿木哲也, 宇野宏司: 平均水位変動が混合粒径の海浜地形と底質特性に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 66 巻, pp.536-540, 2010.

ブラウン管パネルガラス製発泡ガラス材とその混合土の地盤工学的特性

鳥居宣之* 古宮雅之** 澁谷啓**

Geotechnical Properties of Foamed Glass Material Made from CRT Display and its Mixed Soil

Nobuyuki TORII* Masayuki FURUMIYA** Satoru SHIBUYA**

ABSTRACT

In recent years, the development and the practical application of various recycled materials as a campaign with the formation of a Recycling Oriented Society have been promoted. A foamed glass which is one of the recycling materials of waste bottle glass can be utilized as a geotechnical material. In Japan, because the analog broadcasting was ended on July, 2011, it is estimated that many Cathode Ray Tube (CRT) TVs would be discarded in the near future. Thus, some method for the new usage of a discarded CRT should be studied. The aim of this study is to investigate the applicability as a Geo-Material of a foamed glass material made from the CRT panel glass. A series of the laboratory soil tests using the foamed glass and its mixed soil were carried out.

Keywords : foamed glass material, CRT panel glass, geotechnical property and laboratory soil test

1. はじめに

現在、廃棄物の発生を抑制するとともに、廃棄物をリサイクルすることによって廃棄物の減量を図ることが求められており、廃棄物のリサイクルに関する様々な法整備（例えば、平成12年5月の建設リサイクル法）がなされてきた。これに伴って政府・民間が協同してリサイクル率を高める動きが活発化し、様々なリサイクル製品の開発、活用が進められている。

昨年の7月に地上アナログ放送が終了したことを受け、多量のブラウン管テレビが排出されると予想されている。廃棄されたブラウン管テレビは、ブラウン管と基盤類・プラスチックに分別され、ブラウン管はさらにパネルガラスとファンネルガラスに分割され、それぞれカレット化した後、海外に輸出され、再度ブラウン管へとリサイクルされてきた。しかし、ブラウン管テレビの世界需要は年々減少しており、ブラウン管テレビの廃棄量は増加すると考えられるため、ガラス

カレットの余剰が発生すると予想されている⁽¹⁾。ブラウン管のパネルガラスとファンネルガラスの重量比は2:1⁽²⁾であるため、ガラスカレットの余剰の発生抑制にはパネルガラスの再利用の用途を増加させることが効果的であると考えられ、ブラウン管パネルガラスの新たな再利用方法の確立が求められている。

廃ガラスの再利用の用途として、廃びんガラスを粉末加工したガラスパウダーに発泡剤などの添加剤を加え、高温焼成することで得られる軽量・多孔質の人工骨材である発泡ガラス材が開発され、建設分野への有効利用に向けた研究が行われてきている⁽³⁾。パネルガラスは有害物質を含んでいないため、廃びんガラスと同様、発泡ガラス材としての再利用が可能であると考えられるが、現状では地盤材料としての適用例がほとんどない状況である。また、ブラウン管パネルガラスとびんガラスでは組成が異なる⁽⁴⁾ため、ブラウン管パネルガラスを発泡ガラス材にして地盤材料として再利用する際には、その地盤工学的特性を把握しておく必要があると考えられる。

本研究ではブラウン管パネルガラスから製造された発泡ガラス材の地盤材料としての適用性を調べるこ

* 都市工学科 准教授

** 神戸大学大学院

を目的に、各種土質試験を行った。具体的には、発泡ガラス材の締固め特性、破碎性、pH、透水性、強度特性などを調べた。また、比較のため発泡ガラス材に土試料を加えた混合土についても同様の試験を行い、その結果から地盤材料としての適用性について考察した。

2. 試料の概要

2.1 試験試料

本研究で用いた発泡ガラス材は、ブラウン管パネルガラスを原料とし、発泡剤として自然材料である二枚貝を使用した環境に配慮したポーラスガラスと呼ばれるものである。一般に土は粒度分布を持つ材料であり、粒度分布が異なるとその性質は変化することが知られている。したがって、粒状材料の地盤工学的性質を評価する場合、基準となる粒度分布を決める必要がある。本研究では同じリサイクル材料であるアッシュストーンの粒度分布を採用することとした。これは、アッシュストーンが発泡ガラス材と同様、軽量かつ吸水率が高いという性質を持つためである。また、発泡ガラス材に混合する土試料には、神戸市内の橋の工事の際に発生した細粒分質礫質砂(SFG)を用いることとした。図1に用いた発泡ガラス材試料（粒径19mm以上）ならびに細粒分質礫質砂の外観を示す。

2.2 試料の基本物性

発泡ガラス材の基本物性を知るため、密度試験、含水比試験、粒度試験ならびに吸水率試験を行った。なお、密度試験は粒径2mm以下の試料について行った。上記試験より得られた基本物性値を表1に、粒径加積曲線を図2に示す。

表1より、発泡ガラス材の密度は 2.500g/cm^3 で、一般的な土と比べてやや小さな値であることがわかる。この結果は、粒子内に間隙がほとんど存在しない粒径2mm以下の試料について試験を行ったもので、発泡ガラス材は粒径が大きくなるにつれて、粒子自体の内部間隙が増えてより軽量になると考えられるので、粒度調整を行った試料全体としては一般的な土と比べて非常に軽量となることが考えられる。吸水率は、多少バ

ラつきがあるものの、30～40%程度であり、一般的な砂礫材料に比べて非常に大きな吸水性を持つといえる。

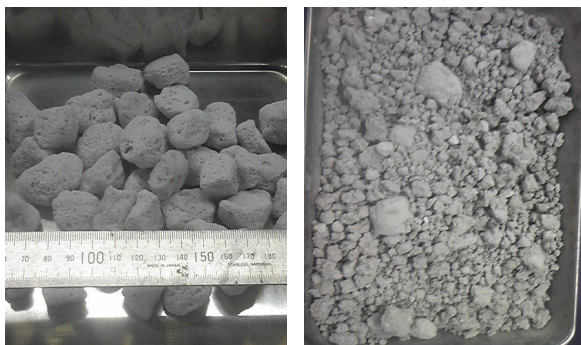
2.3 試料調整

本研究で用いた発泡ガラス材は製造過程で2mm未満、2mm以上5mm未満、5mm以上10mm未満、10mm以上25mm未満に分級されており、所定の粒度分布で試験を行うため、粒度調整を行った。具体的には、発泡ガラス材を、JIS A 1204「土の粒度試験」で使用されるふるい目の大きさに対応した粒度階（小さいものから順に、 $75\mu\text{m}$ 以下、 $75\sim 106\mu\text{m}$ 、・・・、 $9.5\sim 19\text{mm}$ 、 $19\sim 26.5\text{mm}$ ）に分級した後、所定の粒度分布になるように各粒度階から必要量を採取し、十分混合したものを試料とした。

混合土の試料調整については、混合土の乾燥質量における細粒分質礫質砂の乾燥質量百分率を混合率と定義し、混合率30%（発泡ガラス材：土＝7：3）、50%（発泡ガラス材：土＝5：5）の二種類の混合土を作成した。作成した混合土の粒径加積曲線を図2に示す。なお、定義上、発泡ガラス材単体は混合率0%、細粒分質礫質砂単体は混合率100%となる。この定義に従い、所定の混合率になるように発泡ガラス材、細粒分質礫質砂の必要量を採取し、十分に混合したものを混合土試料とした。

表1 基本物性。

物性値	発泡ガラス材
$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.500
w(%)	0.0
吸水率(%)	30～40
U_c	92.6
U_c'	1.66
$D_{\max}(\text{mm})$	25.0
$D_{50}(\text{mm})$	7.00



a) 発泡ガラス材 b) 細粒分質礫質砂

図1 使用した試料の外観。

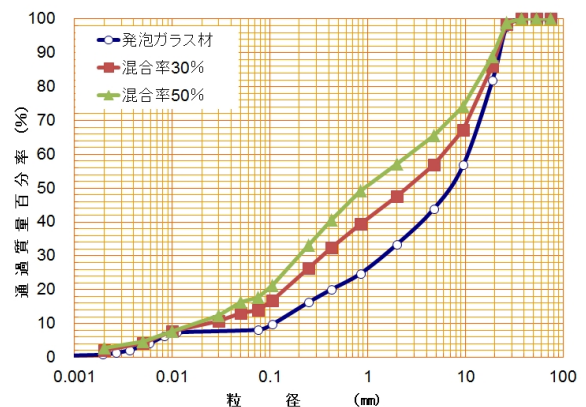


図2 粒径加積曲線。

3. 試験の概要

本研究では、発泡ガラス材単体と混合率の異なる 2 種類の混合土（混合率 30%, 50%）について締固め試験、粒度試験（締固めによる破碎性の評価）、pH 試験、透水試験、三軸圧縮試験を行った。

3.1 締固め試験

発泡ガラス材および混合土について締固め試験を実施した。試験は JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験」に準じて行い、試料の最大粒径が 19mm 以上であることと、発泡ガラス材が破碎を生じやすい材料であることを考慮し、突固め方法は B-c 法（湿潤法、非繰り返し法）を採用し、内径 15cm、容積 2209cm³ のモールドを用い、各層 55 回ずつ 3 層に分けて突固めた。なお、突固めは自動締固め試験装置で自動的に行い、2.5kg のランマーを 30cm の高さから自由落下させた。

3.2 粒度試験（締固めによる破碎性の評価）

びんガラスを用いた発泡ガラス材は、破碎を生じやすい材料であることが指摘⁽³⁾されている。粒子破碎が起こると締固め特性や透水性に大きな影響を及ぼすため、締固め前後の粒径加積曲線の比較を行い、本研究で用いた発泡ガラス材の破碎性を検証した。なお、締固め前の粒径加積曲線は、図 2 の粒径加積曲線を採用し、締固め後の粒度試験は、締固め後の試料を全て混合したものから採取した試料を用いて行った。

なお、破碎性を表わす尺度となる破碎率に関してはこれまで様々な提案がなされてきたが、現在汎用されている Marsal⁽⁵⁾の粒子破碎率 B_M を本研究では用いることとした。 B_M とは、各粒度階における粒子破碎前後の残留質量百分率の差の負符号の総和と定義されており、これを式で表すと次のようになる（図 3 参照）。

$$B_M = \sum \Delta m(d_k) \quad (1)$$

ここに、 $\Sigma \Delta m(d_k)$ ：図 3 に示す試験前後の粒径加積曲線より得られた、ふるい目 d_{k+1} を通過し d_k に残留する通過質量百分率 ($m_i(d_k)$, $m_f(d_k)$) の差分 ($\Delta m(d_k) = m_i(d_k) - m_f(d_k)$) に対し、 $\Delta m(d_k) \leq 0$ のみを加えた値。

なお、本研究では、土の粒度試験で使用されるふるい目の大きさに対応した粒度階（小さいものから順に、

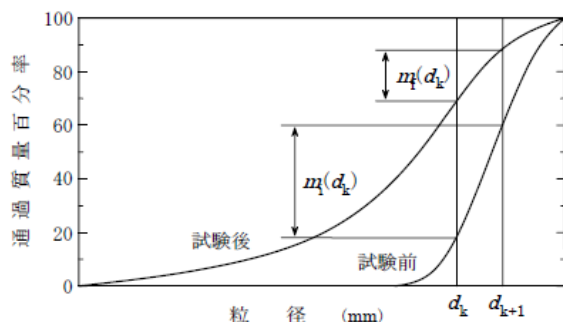


図 3 Marsal の粒子破碎率 B_M の概念図⁽⁵⁾。

75 μ m 未満, 75 μ m 以上 106 μ m 未満, ..., 9.5mm 以上 19mm 未満, 19mm 以上 26.5mm 未満) を基準に B_M の計算, 比較を行うこととした。

3.3 pH 試験

廃棄物再生材料を地盤材料として利用する場合、周辺土壤に及ぼす環境的な影響について検討する必要がある。そこで、本研究では発泡ガラス材と混合土の pH を測定することとした。具体的には、蒸留水 2000ml に試料 300g を加えて攪拌して懸濁液を作成し、3 時間後に pH を測定した。図 4 は pH 計測時の様子である。

3.4 透水試験

本研究では、定水位透水試験を行い、発泡ガラス材の透水性と低透水材料に対する透水性改善効果について調べることにした。

発泡ガラス材単体については締固め度 $D_c = 85$, 95% の供試体について試験を行い、混合土については締固め度 $D_c = 90$, 95% の供試体について試験を行った。

a) 供試体の作成

透水円筒は内径 10cm、容積 1000cm³ のものを使用し、所定の締固め度になるように試料を準備し、3 層に分け油圧ジャッキを用いて静的に締固めた。

b) 試験手順

以下に試験手順を示す。

①供試体をセットした透水円筒に透水円筒カラーを装着し、底部から水浸させ、供試体を飽和させる。

②透水円筒カラーに注水し、越流口から越流させ、給水側の水位を一定に保つ。

③越流水槽から越流する様子を調べ、越流量がほぼ一定になることを確認する。

④測定時間における流出水量を測定する。

⑤④を 5 回行い、平均値を求める。

3.5 三軸圧縮試験

発泡ガラス材の強度特性を調べるため、三軸圧縮試験を行った。試料は 19mm ふるい通過分を使用し、締固め試験より得られた最適含水比で、締固め度 $D_c = 95\%$ となるように試料を準備し、直径 10cm、高さ 20cm の供試体を作製した。圧密・せん断条件は圧密排水



図 4 pH 計測時の様子。

（CD）条件とし，せん断過程で発泡ガラス材が破碎により吸水し，試験結果に影響を及ぼす可能性があることから，この影響を受ける時間を減じるため，一般の三軸圧縮試験より大きいひずみ速度 $0.3\%/min$ でせん断を行うこととした．なお，せん断時の有効拘束圧は 50, 100, 200kPa とした．図 5 は，本研究で用いた三軸圧縮試験機である．

a) 供試体の作製

供試体の作製の際には負圧法を用いた．上述した供試体寸法に適合するモールドの内面に負圧を与えてゴムスリーブを密着させ，モールド内に試料を 3 層に分けて動的に締固めることにより供試体を作製した（図 6 参照）．なお，圧力室内では，圧力室内に水を入れ，供試体の有効等方応力を変化させないように負圧をセル圧に置き換えることとした．

b) 供試体の飽和

本研究では，以下の手順で供試体の飽和度を高めた．

- ①セル圧を加えた供試体内の間隙の空気を炭酸ガスと置き換える．
- ②セル圧を加えた供試体内の内部に脱気水を通水する．
- ③供試体内の有効拘束圧を変化させないように 200kPa の背圧を加える．

c) 圧密過程

前述した手順で供試体の飽和度を高め，B 値が 0.95 以上となっているのを確認した後，セル圧を増加させ所定の圧密応力で等方圧密を行った．なお，軸変位量と排水量を計測し，3t 法で圧密が収束したのが確認できるまで圧密を行った．

d) せん断過程

圧密が完了した供試体をひずみ速度 $0.3\%/min$ で軸ひずみが 15%に到達するまでせん断した．せん断の手順については以下のとおりである．

- ①荷重計と変位計の原点の確認，調整を行う．
- ②セル圧を一定として，ひずみ速度が一定になるように連続的に供試体を圧縮する．
- ③圧縮中は軸圧縮力，軸変位量および体積変化量を計測する．
- ④軸ひずみが 15%に達したとき，圧縮を終了する．
- ⑤供試体を圧力室から取り出し，供試体の変形・破壊状況などを観察し，記録する（図 7 参照）．

4. 試験結果および考察

4.1 締固め試験

図 8 に発泡ガラス材，混合土，細粒分質礫質砂の締固め曲線を，図 9 に混合率と最適含水比 w_{opt} および最大乾燥密度 ρ_{dmax} の関係を示す．

a) 発泡ガラス材の締固め特性

発泡ガラス材の最適含水比 w_{opt} は 51.5%，最大乾燥密度 ρ_{dmax} は $0.71g/cm^3$ であった．締固め曲線はなだら



図 5 三軸圧縮試験機．

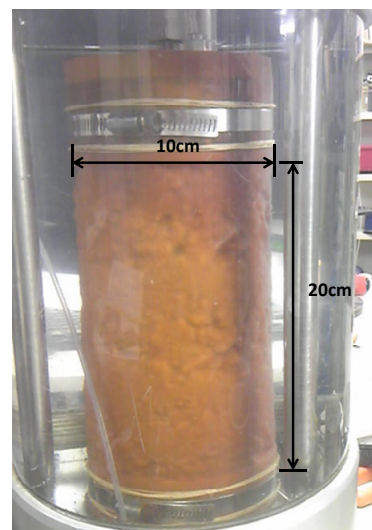


図 6 供試体外観（混合率 30%）．



図 7 せん断終了時の供試体の外観（混合率 30%：有効拘束圧 200kPa）．

かな形状で、最適含水比から離れた領域においても乾燥密度は大きく変化せず、ほぼ一定の値となった。一般的に粒径幅の広い粗粒土ほど締固め曲線は鋭く立った形状で左上に位置し、このため最適含水比は小さく、最大乾燥密度は高くなる傾向がある⁽⁶⁾とされている。本研究で採用した発泡ガラス材の基準粒度分布は、均等係数 $U_c = 92.6$ 、曲率係数 $U_c' = 1.66$ で粒径幅の広い試料といえるが、上述した傾向とは異なり最適含水比は大きく、最大乾燥密度は小さい値であった。前者の要因としては、発泡ガラス材の吸水性の高さが挙げられ、加えた水が発泡ガラス材の粒子内に吸収され、間隙水として作用するのに多くの水が必要であったため、最適含水比が大きくなったと考えられる。後者の要因としては、発泡ガラス材の軽量が挙げられる。

b) 混合土の締固め特性

細粒分質礫質砂を 30% 含む混合土の最適含水比 w_{opt} は 40.5%，最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 0.88g/cm^3 であった。締固め曲線はなだらかな形状で、発泡ガラス材単体と同様、最適含水比から離れた領域ではほぼ一定の乾燥密度を示した。

細粒分質礫質砂を 50% 含む混合土の最適含水比 w_{opt} は 30.5%，最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 0.98g/cm^3 であった。締固め曲線は最もなだらかな形状を示し、含水比が最適含水比を離れても乾燥密度は大きく変化しなかった。

c) 締固め特性に関する考察

図 8 より、各試料の締固め曲線は、いずれも細粒分質礫質砂と比較してなだらかな形状を示しており、含水比 $w = 10 \sim 50\%$ の広い範囲で乾燥密度が大きく変化しないことがわかる。また、いずれの試料も含水比が高い領域においても締固め曲線がゼロ空気間隙曲線に漸近していないことがわかる。しかしながら、混合率が増加するにつれて締固め曲線が細粒分質礫質砂のそれに近づき、それに伴いゼロ空気間隙曲線に漸近する様子が確認できる。

図 9 より、混合率が高くなるにつれて最適含水比が小さく、最大乾燥密度が大きくなり、細粒分質礫質砂の最適含水比、最大乾燥密度に概ね線形的に近づいていることが確認できる。このことから、締固め特性が大きく変化するような特殊な混合率は存在せず、混合土は発泡ガラス材と細粒分質礫質砂の中間的な締固め特性を示し、混合率を変化させることで $0.7 \sim 1.5\text{g/cm}^3$ 程度の任意の密度に調整することが可能であると考えられる。

4.2 粒度試験(締固めによる破碎性の評価)

図 10 に粒度試験の結果を、図 11 に混合率と破碎率の関係を示す。発泡ガラス材単体については沈降分析を行わず、ふるい分析のみを行なっているが、これは発泡ガラス材単体ではほとんど団粒化しておらず、また、粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の質量百分率が締固め前後であまり変化していなかったためである。

a) 締固め前後における粒径加積曲線の変化

図 10 から、いずれの試料も締固め後の粒径加積曲線が締固め前に比べて左側にシフトしていることが確認できる。これは粗粒分が当初より小さな粒度階へ移動したことを表しており、締固めにより破碎が生じてい

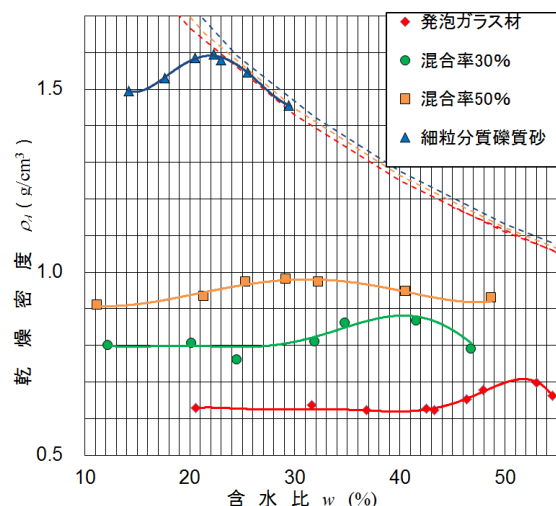
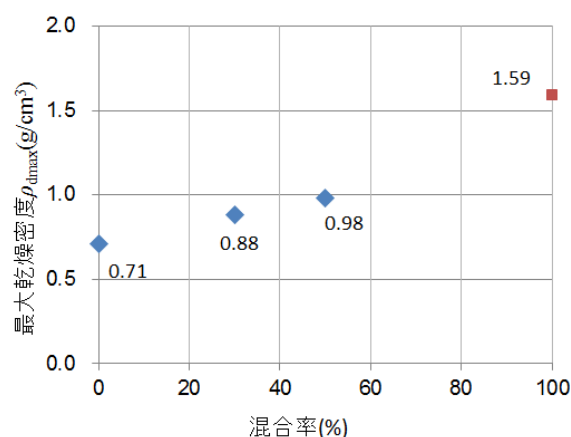
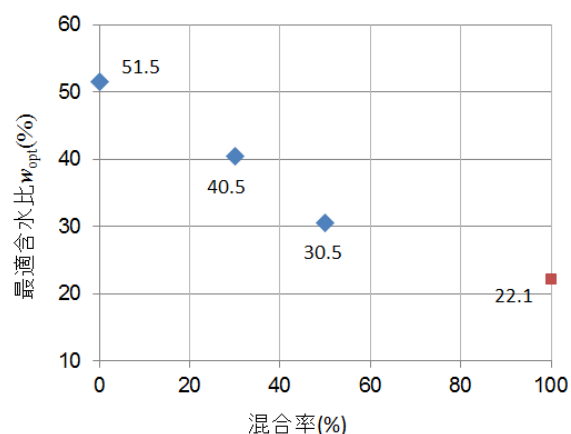


図 8 各試料の締固め曲線。



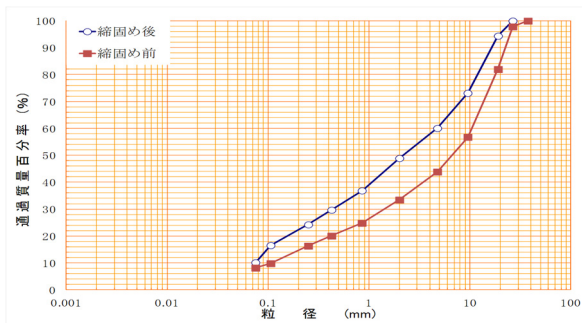
a) 混合率 vs 最大乾燥密度



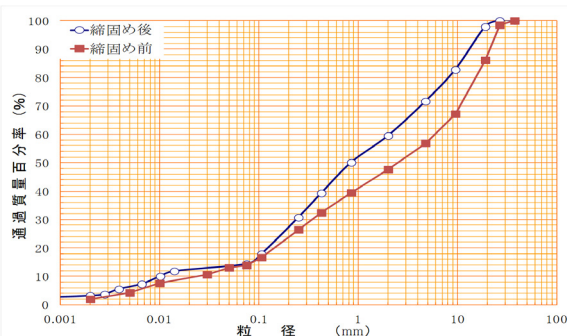
b) 混合率 vs 最適含水比

図 9 混合率と最大乾燥密度、最適含水比の関係。

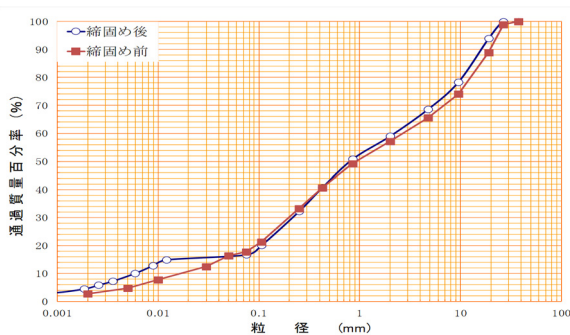
るといえる．締固め前後の粒径加積曲線の変化は発泡ガラス材単体が最も大きく，混合率 30%，50%の順に



a) 発泡ガラス材



b) 混合土（混合率 30%）



c) 混合土（混合率 50%）

図 10 各試料の粒度試験結果．

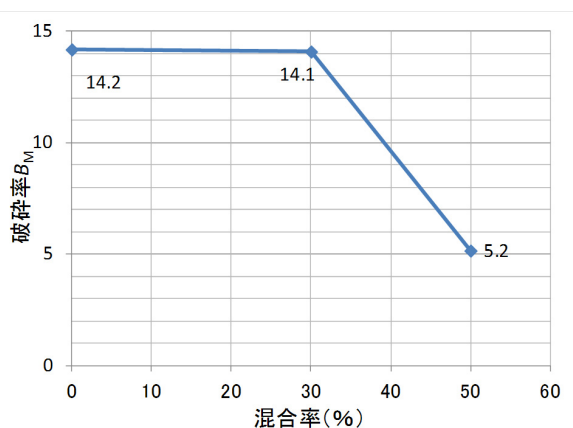


図 11 混合率と破砕率の関係．

小さくなっており，細粒分質礫質砂の割合が大きくなるほど粒径加積曲線が変化していないことがわかる．また，混合率 50%では，他の試料と比べて粒径加積曲線の変化が非常に小さく，締固め前の粒径加積曲線とほぼ同じ形状を示した．

b) 混合率と破砕率の関係

図 11 から，混合率が増加するにつれて破砕率が減少し，混合率 50%では破砕率が大幅に低下することが確認できる．これは，土粒子が発泡ガラス材の間隙を充填し，緩衝材として作用したためであると考えられる．また，発泡ガラス材単体と混合率 30%ではほとんど破砕率が変化していないことから，土粒子の緩衝作用は一定の混合率に到達した際に発揮されるものと考えられる．

4.3 pH 試験

表 2 に pH 試験の結果を示す．

表 2 から，発泡ガラス材および混合土の pH は，いずれも 10 以上で高いアルカリ性を示すことが分かる．また，混合率が増加し，発泡ガラス材の割合が減少するにつれて，若干ではあるが pH が減少することが確認できる．

水質汚濁防止法による排水基準の pH の許容限度は 5.8～8.6（海域 5.0～9.0）⁽⁷⁾と定められており，発泡ガラス材はこの許容値を超えている．したがって，河川，湖沼，下水道等の公共用水域および地下水に溶出水が流入する恐れのある場合には，覆土を施すなどの対策が必要であると考えられる．

4.4 透水試験

表 3 に透水試験の結果を示す．

表 3 から，発泡ガラス材の透水係数は締固め度 $D_c = 85\%$ で $4.25 \times 10^{-4}(\text{m/s})$ ， $D_c = 95\%$ で $1.09 \times 10^{-4}(\text{m/s})$ であり，良好な透水性を示すことがわかる．また，いずれの試料も締固め度が大きくなると透水性が低下していることがわかる．つぎに各材料の透水性の比較を行う．

a) アッシュストーンとの比較

締固め度 $D_c = 85\%$ においては，発泡ガラス材，アッシュストーンともに同程度の透水性を示しているが，締固め度 $D_c = 95\%$ においては，発泡ガラス材がアッシュストーンの約 2 倍の透水性を示している．また，締

表 2 pH 試験結果．

試料	pH
発泡ガラス材	10.73
混合土（混合率 30%）	10.39
混合土（混合率 70%）	10.13
細粒分質礫質砂	8.91

表 3 透水試験結果.

	試料	締固め度 D_c		
		85%	90%	95%
透水係数 k_{15} (m/s)	発泡ガラス材	4.25×10^{-4}	-	1.09×10^{-4}
	混合率30%	-	1.85×10^{-5}	2.59×10^{-6}
	混合率50%	-	4.30×10^{-5}	4.98×10^{-6}
	細粒分質礫質砂	-	3.83×10^{-7}	-
	アッシュストーン	4.70×10^{-4}	-	5.90×10^{-5}

固め度が 85% から 95% へ増加した際に、発泡ガラス材は透水係数が約 1/4 に減少したのに対し、アッシュストーンは約 1/10 にまで減少している。これらのことから、発泡ガラス材はアッシュストーンと同等以上の透水性を持つと考えられる。

b) 細粒分質礫質砂との比較

表 3 の締固め度 $D_c = 90\%$ の列から、発泡ガラス材の透水性改善効果が読み取れる。混合率 30% の透水係数が $1.85 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ 、混合率 50% の透水係数が $4.30 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ となっており、細粒分質礫質砂の透水係数 $3.83 \times 10^{-7}(\text{m/s})$ と比較して大幅に透水性が改善されていることがわかる。また、混合率 50% については、混合率 30% に比べて細粒分質礫質砂の割合が増加しているにもかかわらず透水係数が減少せず、むしろ増加していることが分かる。これは、2 つの混合土の破碎性の違いに起因するものと思われる。すなわち、混合率 30% の破碎率が 14.1% に対して混合率 50% の破碎率が 5.2% と小さく、破碎による透水性の低下が、混合率の増加による透水性の低下を上回ったものと考えられる。

c) 混合土との比較

表 3 の締固め度 $D_c = 95\%$ の列から、発泡ガラス材と混合土の透水性を比較すると、透水性は高い順に発泡ガラス材、混合率 50%、混合率 30% となっており、破碎率は最も高いものの、発泡ガラス材は単体で最大の透水性を示すことがわかる。混合土については、締固め度 $D_c = 90\%$ の時と同様、破碎性の影響で混合率 50% が混合率 30% より高い透水性を示している。

d) 透水試験のまとめ

発泡ガラス材と混合土について透水試験を行った結果、発泡ガラス材が高い透水性を示すことがわかった。また、混合土が土試料単体と比較して非常に大きな透水性を示したことから、発泡ガラス材が細粒質土の透水性を改善する効果があると考えられる。このとき、透水性の改善効果は発泡ガラス材の割合だけでなく、破碎の影響も受けることがわかった。

4.5 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験の結果を図 12 に、混合率と強度定数の関係を図 13 に示す。

図 12、図 13 から、発泡ガラス材および混合土は混合

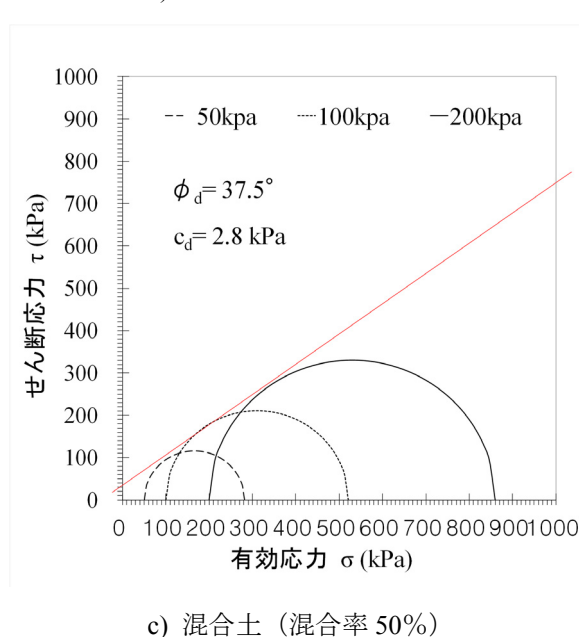
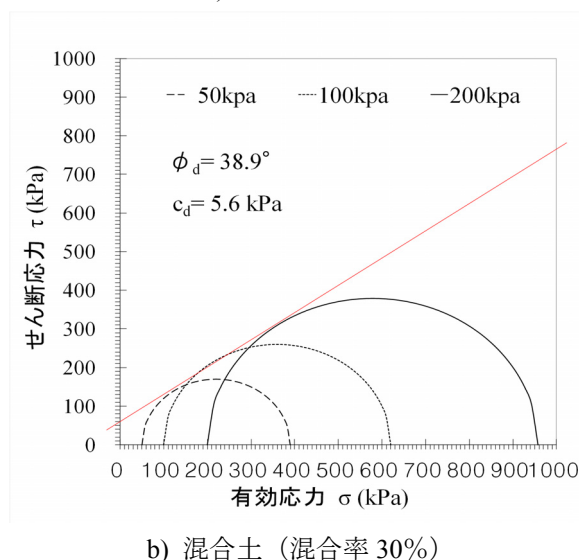
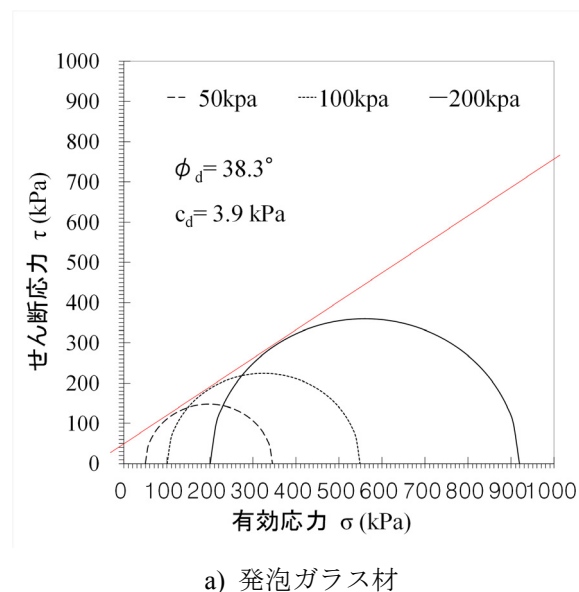
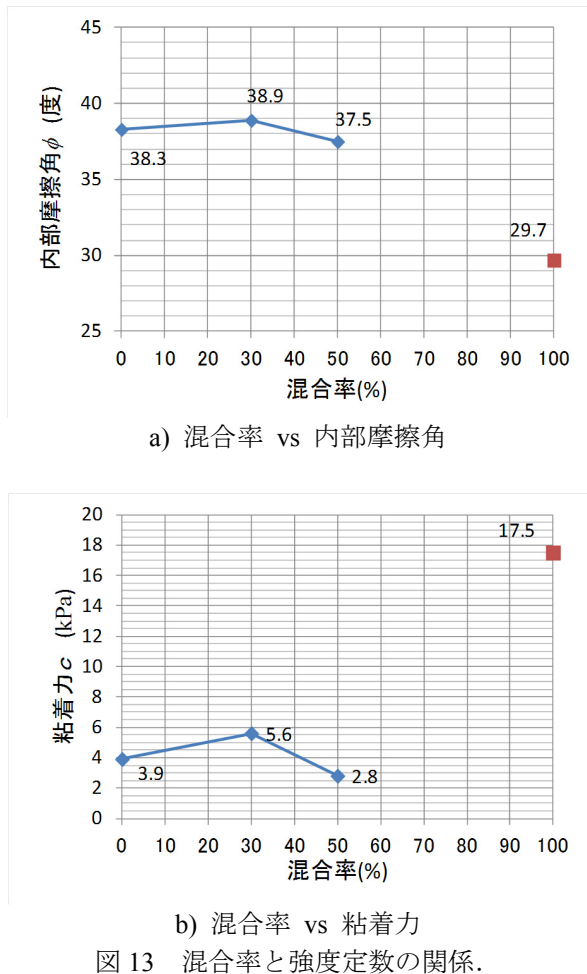


図 12 各試料の三軸圧縮試験 (CD) 結果.



比によらず 35 度以上の内部摩擦角を示し、砂礫と同等以上の強度を持つことがわかる。また、細粒分礫質砂と比較して内部摩擦角が大幅に増加していることが確認できる。混合率 30% のときに強度が最大となっており、混合率と強度の関係にピークがある可能性が示唆されるが、この点に関しては他の混合率についても試験を行い検証する必要があると考えられる。内部摩擦角は混合率 50% で最小となっているが、最大値との差は小さく、土を 50% 混合しても強度が維持されているといえる。また、粘着力に関しても混合率の違いによる差はあまり見られない。

これらのことから、発泡ガラス材は単体でも十分な強度を持ち、それ自身より強度の低い土を混合したとしても強度低下は小さく、地盤材料として単体での使用や、細粒質土の改良材として使用可能であると考えられる。

4.6 びんガラス製発泡ガラス材との比較

一連の実験からブラウン管パネルガラスから製造された発泡ガラス材の地盤工学的特性が明らかになった。本節では、ブラウン管パネルガラス製発泡ガラス材と既往の研究成果^{(3), (8)}から明らかになっているびんガラス製発泡ガラス材の地盤工学的特性の比較・考察を行

う。

a) 発泡ガラス材単体の比較

2 種類の発泡ガラス材の地盤工学的特性を表 4 に示す。

表 4 から、発泡ガラス材は原料によらずアルカリ性を示すことがわかる。ブラウン管パネルガラス製発泡ガラス材が細粒分を含んでいることと、びんガラス製発泡ガラス材が破碎により pH が増加していることから、発泡ガラス材は細粒分が多いほど pH が大きくなる傾向があるといえる。これは、細粒分が多いほど水と接触する面積が大きくなるためであると考えられる。透水係数は、いずれの試料も大きな締固めエネルギーを加えなかったときの値であるが、びんガラス製のもののほうが高い値となっている。これは、粒度の違いによるもので、びんガラス製のものは細粒分が少ないためであると考えられる。しかしながら、細粒分を含んでも発泡ガラス材は優れた透水性を示すことがわかる。破碎率については、びんガラス製のものの評価方法が記載されていなかったため比較はできないが、発泡ガラス材が破碎しやすい材料であることがわかる。強度特性については、ブラウン管パネルガラス製のものがびんガラス製のものに比べて大きな内部摩擦角を示すことがわかる。

b) 混合土の比較

表 5 に各種混合土の地盤工学的特性を示す。

表 5 から、発泡ガラス材に現地発生土を混合したとき、締固め特性は土の割合が増えるにつれて、混合した土のそれに近づく傾向が確認できる。このことから、原料によらず、発泡ガラス材混合土は発泡ガラス材と土の中間的な締固め特性を示すと考えられる。強度特性については、細粒分質礫質砂を混合したケースとロームを混合したケースでは、土単体と比べて内部摩擦角が著しく増加する点と、土の割合が増えるにつれて内部摩擦角が低下する点が一致している。一方、山砂と混合したケースではこれらの傾向は示さず、強度特性はほとんど変化していない。このことから、強度の改善効果は土により異なると推測される。透水性については、ブラウン管パネルガラスを原料とした発泡ガ

表 4 原料の異なる発泡ガラス材の地盤工学的特性の比較。

区分	原料	
	ブラウン管パネルガラス	びんガラス
粒度	アッシュトーンの粒度に調整(～25mm)	5～20mm
pH	10.73	8.0～11.0 (破碎により増加)
透水係数 k (m/s)	4.25×10^{-4} ($D_c=85\%$)	1.90×10^{-3} ($0.75E_c$)
破碎率(%)	14.2(B_M 値)	32.6
内部摩擦角 ϕ (度)	38.3($D_c=95\%$)	32.6($0.75E_c$)
粘着力 c (kPa)	3.9($D_c=95\%$)	7.7($0.75E_c$)

表5 原料の異なる混合土の地盤工学的特性の比較.

試験項目		混合した発泡ガラス材の原料										
		ブラウン管パネルガラス			びんガラス							
		混合率		細粒分質 礫質砂	発泡ガラス材:ローム(体積比)			ローム	発泡ガラス材:山砂(体積比)			山砂
		30%	50%		1:0.5	1:1	1:3		1:0.5	1:1	1:3	
締固め 特性	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	0.88	0.98	1.59	0.54	0.62	0.70	0.70	0.80	0.95	1.15	1.55
	最適含水比 $w_{opt}(\%)$	40.5	30.5	22.1	58.0	61.5	63.0	91.0	26.0	27.0	29.4	23.0
強度特性	種別	CD		CD	UU			UU	UU			CD
	内部摩擦角 ϕ (度)	38.9	37.5	29.7	16.7	21.5	9.7	5.3	27.2	31.6	29	33.3
	粘着力 c (kPa)	5.6	2.8	17.5	3.2	1.8	3.1	2.5	0.78	1.2	2.2	3.6
透水係数 $k(\times 10^{-6} m/sec)(D_c=90\%)$		18.5	43	0.38	0.8	0.28	0.38	0.1~0.2	9.1	4.4	3.2	1~5

ラス材は土の透水係数を著しく増加させているのに対し、びんガラスを原料とした発泡ガラス材は、透水性改善効果は小さかったといえる。このことから、排水材としてはブラウン管パネルガラスから製造された発泡ガラス材の方が優れていると考えられる。

5. まとめ

本研究では、ブラウン管パネルガラスから製造された発泡ガラス材の地盤工学的特性を調べるため、単体と混合土について各種土質試験を行った。その結果を以下に示す。

- ①本研究で使用した発泡ガラス材の土粒子密度は $2.500g/cm^3$ で一般的な土と比べてやや小さく、吸水率は 30~40% と高い。また、比重、吸水率については製造条件により調整可能である。
- ②締固め試験の結果から、発泡ガラス材および混合土の締固め曲線はなだらかな形状を示し、最適含水比の近傍以外では含水比によらずほぼ一定の乾燥密度となった。また、混合率が高くなるにつれて細粒分質礫質砂の締固め特性に近づく。
- ③締固め試験を行った後の試料を用いて粒度試験を行った結果、発泡ガラス材が破碎しやすい材料であることがわかった。細粒分質礫質砂を 30% 混合した場合にもこの傾向は変わらず、細粒分質礫質砂を 50% 混合した場合には破碎率が大幅に低下した。
- ④pH 試験の結果から、発泡ガラス材および混合土が pH 値 10 以上の高いアルカリ性を示すことがわかった。これは水質汚濁防止法における排水基準の pH の許容値を超過しており、地盤材料として使用する際には溶出水の処理が課題になると思われる。
- ⑤透水試験の結果から、発泡ガラス材はアッシュストーンと同等以上の透水係数を示し、良好な透水性を持つことがわかった。細粒分質礫質砂を混合しても

それほど透水性は低下せず、細粒分質礫質砂の透水性の向上が確認できた。また、透水係数は混合率だけでなく破碎の影響も受ける可能性が示唆された。

- ⑥三軸圧縮試験の結果から、発泡ガラス材は 35 度以上の内部摩擦角を示し、砂礫と同等以上の強度を持つことがわかった。混合土は、混合率 50% で内部摩擦角が若干低下したものの、細粒分質礫質砂より高い内部摩擦角を示した。これらのことから、発泡ガラス材は地盤材料として単体での使用や、現地発生土の改善材として使用できると考えられる。

謝辞

試験試料を提供していただいた清水美希様をはじめとする(株)ポーラステックの皆様、三軸圧縮試験を実施するに当たりご協力いただいた平野様をはじめとする財団法人地域地盤環境研究所の皆様には、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会電気・電子機器リサイクルワーキンググループ中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会家電リサイクル制度評価検討小委員会合同会合：家電リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書，pp.21-22，2008.
- (2) 独立行政法人物質・材料研究機構：鉛マテリアルフロー作成のための基礎調査，2004.
- (3) 例えば、鬼塚克忠，横尾磨美，原裕，吉武茂樹：発泡廃ガラス材の工学的特性と有効利用の一例，地盤工学会，土と基礎，47-4，pp.19-22，1999.
- (4) 稲野浩行，橋本祐二，工藤和彦：還元溶融による廃ブラウン管ガラスからの鉛分離，北海道立工業試験場報告，304，pp.71-77，2005.
- (5) Marsal, R.J. : Soil properties-Shear Strength and Consolidation, *Proceedings of 6th International Conference of SMFE*, III, pp.310-316, 1965.
- (6) 地盤工学会：土質試験－基本と手引き－（第二回

改訂版), pp.71-78, 2010.

- (7) 建設汚泥再生利用指針検討委員会：pH および悪臭に関する留意事項, 第1回検討委員会参考資料, p.11, 2005.
- (8) 岩間大輔, 浮田和俊, 水谷仁：廃ガラスを再利用した軽量混合土の工学的特性について, 第26回土木学会関東支部技術研究発表会, pp.528-529, 1999.

P-Δ効果が1自由度解析モデルの損傷度指標に与える影響

島袋武* 山下典彦**

Influence of P-Δ effect on Damage Index of SDOF Model

Takeshi SHIMABUKURO* Norihiko YAMASHITA**

ABSTRACT

Response of structures during earthquakes is complex. A damage index of inelastic structures was proposed to quantitatively represent the damage of structures threatened by earthquakes. However, it failed to consider the P-Δ effect that measures the decline of the restoration force that might cause structures to collapse. Thus, we analyzed the elasto-plastic earthquake response using five SDOFs of models and considered the influences of the P-Δ effect and the damage index by changing the yielding strength, the post yielding stiffness, and the differences of the each SDOF.

Keywords :damage index, P-Δ effect, yielding strength, ductility factor, post yielding stiffness

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震の発生を契機に、橋梁の耐震性能評価の必要性が認識された。翌年1996年12月の道路橋示方書・同解説、Ⅴ耐震設計編では、性能照査型設計が部分的に取り込まれた。さらに、2002年3月には、仕様規定型から性能規定型に改訂された。このように、現行の構造物の耐震設計⁽¹⁾は、性能照査型設計が採用されている。しかしながら、その具体的方法や性能の規定方法は、対象とする構造物により差異がみられるのが現状で、構造物に要求される性能水準の明確化及び構造物の保有する性能の評価手法の開発並びにそれらの具体的設計法への展開が必要となってきた。

一方、それは、塑性域の変形性能に期待しながらも、残留変位規定や慣性力の下限值規定によってある程度の変形性能と耐力を有するような橋脚が得られるようになっており、P-Δ効果の影響を無視できる領域で設計している。しかしながら、塑性応答は複雑であり、P-Δ効果の影響で構造物が倒壊する危険性がある。

そこで本論文では、地震時の構造物の損傷度を数値的に表現する損傷度指標へのモデル化の影響を検討す

る。まず初めに、損傷度指標と現行の耐震性能規定の関係について述べる。次に、損傷度指標などを算出するため、5種類の解析モデル(P-Δ効果の影響の有無を含む1自由度系)を設定し、弾塑性地震応答解析を行う。この解析結果を用いて、応答塑性率や損傷度指標が、降伏強度と解析モデルの差異によって、どのような影響を受けるかを検討する。また、2次剛性比と解析モデルの差異による影響も検討する。さらに、それぞれの過程で算出された損傷度指標の値が、目標値として設定された損傷度指標を満足するかについても検討する。

2. 損傷度指標と弾塑性地震応答解析

2.1 損傷度指標 本論文では、式(1)に示す家村ら⁽²⁾の損傷度指標 DI を用いた。

$$DI = \frac{\mu_d - 1}{\mu_u - 1} + \frac{\beta \cdot \mu_h}{\mu_u} \quad (1)$$

ここに、 μ_d 、 μ_u 、 μ_h はそれぞれ応答塑性率、終局変位靱性率、エネルギー靱性率であり、下式のように定義されている。また、 β は家村ら⁽²⁾によると、部材の断面特性等に依存した正の係数であり、広域な範囲を持つ値なので、その平均値 $\beta=0.15$ とした。

$$\mu_d = \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} \quad (2)$$

* 専攻科 都市工学専攻

** 都市工学科 教授

$$\mu_u = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3)$$

$$\mu_h = \frac{E_h}{P_y \cdot \delta_y} \quad (4)$$

ここに、 δ_{max} 、 δ_y 、 δ_u はそれぞれ最大変位、降伏変位、終局変位であり、 E_h 及び P_y は、それぞれ履歴吸収エネルギー及び降伏強度である。さらに、 μ_u は道路橋示方書における曲げ破壊型の許容塑性率の算定式⁽¹⁾から式(5)のように定義されている。ここでは、「橋脚の致命的な損傷に対しての安全性が確保される塑性率」を許容塑性率とするため、許容塑性率 μ_a は5.0と想定し、 $\mu_u=7.0$ を用いた。

$$\mu_a = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha \cdot \delta_y} = 1 + \frac{\mu_u - 1}{\alpha} \quad (5)$$

ここに、 α は安全係数で、 $\alpha=1.5$ とした⁽¹⁾。

式(1)の損傷度指標 DI の値と構造物の損傷状態及び構造物の被害の外観の関係は、Ghobarah ら⁽³⁾によって、実在する鉄筋コンクリート構造物の地震後の被害状況を鑑みて設定されている。さらに、道路橋示方書⁽¹⁾は、目標性能は想定地震動に応じて次の3段階に設定しており、①耐震性能Ⅰ：地震によって橋としての健全性を損なわない性能、②耐震性能Ⅱ：地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能が速やかに行い得る性能、③耐震性能Ⅲ：地震による損傷が橋として致命的とならない性能、としている。家村ら⁽²⁾は、これらの耐震性能とそれに対応する損傷度指標の値の関係を提案した。以上の損傷度指標と構造物の損傷状態及び耐震性能の関係を組み合わせたものが表1である。

表1 損傷状態と損傷度指標の関係

損傷状態	損傷度指標の値	耐震性能	構造物の外観
無損傷	0.00	耐震性能Ⅰ	ひび割れなし
使用可能	0.08		中程度のひび割れ
修復可能	0.18	耐震性能Ⅱ	かぶりコンクリートの剥離
修復不可能	0.36		鉄筋剥き出し
崩壊	0.60	耐震性能Ⅲ	せん断耐力・軸耐力の損失

2.2 解析モデル 解析モデル⁽⁴⁾は、図1に示す一般的な水平振動を扱った水平モデル(以下、水平モデルと呼ぶ。)、微小変形を対象とした回転近似モデル(以下、回転近似モデル(P-Δ効果なし)と呼ぶ。)と大変形を対象とした回転厳密モデル(以下、回転厳密モデル(P-Δ効果なし)と呼ぶ。)、そして、それぞれの回転モデルに質点の高さの変化に伴う復元力の低下を引き起こすP-Δ効果を考慮したモデル(以下、それぞれ、回転近似モデル(P-Δ効果あり)、回転厳密モデル(P-Δ効果あり)と呼ぶ。)の5種類とした。

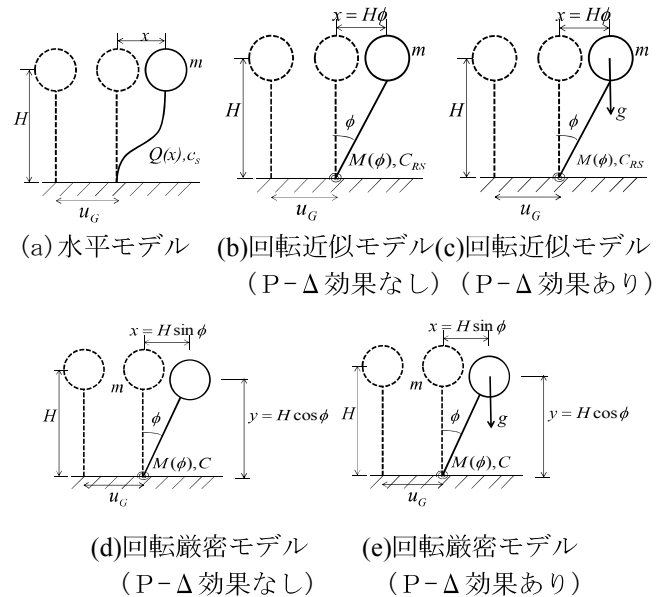


図1 解析モデル

2.3 損傷度指標を用いた弾塑性地震応答解析の流れ

損傷度指標を用いた弾塑性地震応答解析は、図2のような流れで行う。まず、5種類の解析モデルの構造パラメータの値を設定する。弾塑性地震応答解析によって与えた入力地震動に対する個々のモデルの挙動を解析する。解析時に応答塑性率なども算出し、それらの値から損傷度指標の値を求める。そして、求められた損傷度指標などの値を表1の値と比較し、目標(要求)性能を満足するかについて検討する。

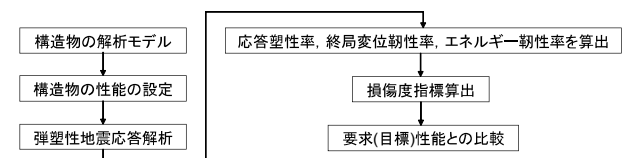


図2 損傷度指標を用いた弾塑性地震応答解析の流れ

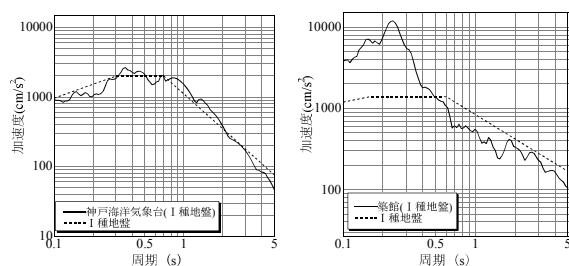
3. 弾塑性地震応答解析

3.1 構造パラメータ 降伏強度 P_y を0.2~1.0 gの0.2刻みで5通り、許容塑性率は2.1で述べた通り $\mu_a=5.0$ とし、減衰係数 h は0.05とした。2次剛性比 n は完全弾塑性型($n=0.0$)とし、2次剛性比 n の影響を検討するときのみ $n=0.05, 0.10, 0.15$ に変化させている。また、周期 T は0.1~5.0 sの範囲とし、高さ H は10 mに設定した。

3.2 入力地震動 ここでは、入力地震動として、現在の耐震基準への移行のきっかけとなった内陸直下型地震である兵庫県南部地震において最大加速度を記録した神戸海洋気象台の記録(以下、神戸海洋気象台と呼ぶ。)と、海溝型地震である東北地方太平洋沖地震において最大加速度を記録した築館の記録(以下、築館と呼ぶ。)を用いた。

図3に、 $h=0.05$ のときの神戸海洋気象台及び築館の絶対加速度応答スペクトルを示している。破線は、道路橋示

方書⁽¹⁾が設定した耐震設計のための絶対加速度応答スペクトルで、大型の内陸直下型地震を想定したレベル2・タイプIIのスペクトルと、大型の海溝型地震を想定したレベル2・タイプIのスペクトルである。ここで、I種地盤とは、道路橋示方書によって定義された地盤特性値 T_g によって地盤を区別したもので、 $T_g < 0.2$ の条件を満たす地盤である。図3(a)のI種地盤は、兵庫県南部地震において地盤上で観測された強震記録に基づいて設定されており、神戸海洋気象台に沿うような形になっている。図3(b)のI種地盤は、東海地震等の地震動予測結果等を踏まえて定められており、築館の短周期側にみられる非常に大きなピークよりはるかに小さい値が設定されている。



(a)兵庫県南部地震 (b)東北地方太平洋沖地震

図3 絶対加速度応答スペクトル

4. 解析結果

4.1 入力地震動と降伏強度が応答塑性率に及ぼす影響

神戸海洋気象台及び築館の応答塑性率のスペクトルをそれぞれ、図4(a), (b)に示す。

全ての図面で、降伏強度が大きくなるにつれて、応答塑性率が低減されていることがわかる。

図4(a)の周期－応答塑性率関係をみると、図3(a)の絶対加速度応答スペクトルのピークがある約0.3～0.5sにおいて、全ての解析モデルで降伏強度0.8, 1.0gの曲線は応答塑性率の値のピークを示している。0.2～0.6gでは、短周期側で応答塑性率の値が小さくならない結果が得られ、許容塑性率 $\mu_a=5.0$ を確保するためには、周期によりその値は異なるが、最大で0.7g程度の降伏強度が必要であると考えられる。

図4(b)の周期－応答塑性率関係をみると、周期が短くなるに従って応答塑性率が大きくなる傾向がみられた。これは、図3(b)の絶対加速度応答スペクトルの短周期側が非常に大きな値を示しているためであると考えられる。しかし、絶対加速度応答スペクトルのピークである周期約0.2～0.3sで、応答塑性率が最大になるような特徴はみられなかった。構造物の損傷への影響が大きい周期帯域である約1.0～2.0sでは、約0.2～5.0の応答塑性率を示しており、これは、落橋などの致命的な被害が少なかったことと一致している。

図5に、図4の応答塑性率について、それぞれの解析モデルの大小関係を把握するため、水平モデルの値と回転近似・厳密モデルの比のスペクトルを示す。

図5(a)において、回転近似(P- Δ 効果あり)/水平と回転

近似(P- Δ 効果なし)/水平では、周期約0.9sまでは、回転近似モデル(P- Δ 効果あり)の方が値が大きく、約1.4s以降では、回転近似モデル(P- Δ 効果なし)の方が大きくなる。回転厳密(P- Δ 効果あり)/水平と回転厳密(P- Δ 効果なし)/水平も同様に、回転厳密(P- Δ 効果あり)/水平の値が、周期約0.7sまで回転厳密(P- Δ 効果なし)/水平の値より大きく、約0.7sを超えると、逆になることがわかった。一方、回転厳密(P- Δ 効果あり)/水平と回転近似(P- Δ 効果あり)/水平の値を比較すると、短周期側で、回転厳密(P- Δ 効果あり)/水平の方が大きくなり、それ以降ではほぼ同値であった。

図5(b)において、回転近似(P- Δ 効果あり)/水平は、降伏強度0.2gを除いて、ほぼ1.0であった。回転厳密(P- Δ 効果あり)/水平の値は、短周期でどのモデルと比較しても大きくなっており、その周期範囲は、降伏強度が大きくなるに従って短くなっている。回転厳密(P- Δ 効果あり)/水平と回転厳密(P- Δ 効果なし)/水平では、短周期側では、回転厳密(P- Δ 効果あり)/水平の値が大きくなっており、それ以降はほぼ同値である結果が得られた。

4.2 入力地震動と降伏強度が損傷度指標に及ぼす影響

図6に5種類の解析モデルの損傷度指標の値のスペクトルを示す。

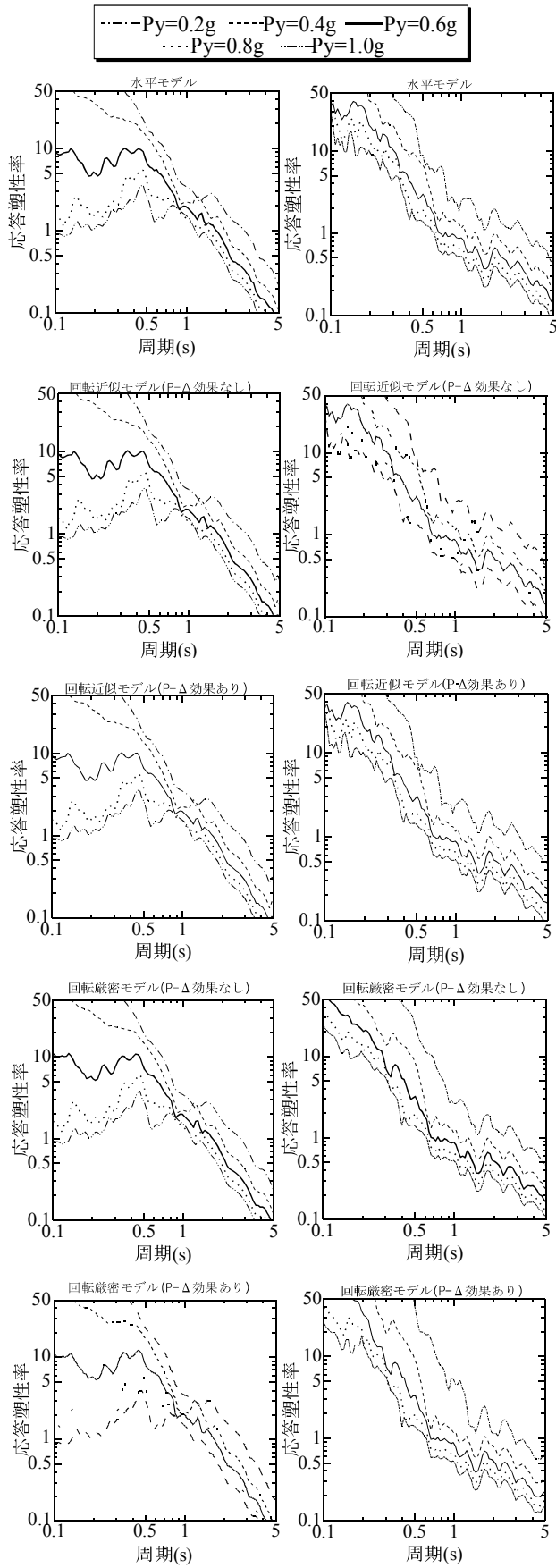
図6(a)において、降伏強度が小さくなるに従って、損傷度指標の値が小さくなっており、上に凸の曲線を描いている。表1の耐震性能Ⅲ($DI=0.6$)と比較すると、降伏強度1.0gの場合にはどの周期でも $DI < 0.6$ を満足しているが、降伏強度0.8gになると周期約0.35～0.5sの範囲において損傷度指標の値が0.6を超えている。さらに降伏強度の値が小さくなると、 $DI=0.6$ を超える周期が短周期側に増えてくることがわかる。

図6(b)において、短周期側でも損傷度指標の値が小さくならないことが読み取れる。これは、図6(b)の絶対加速度応答スペクトルの短周期側が非常に大きな値を示しているためであると考えられる。また、4.1で述べた構造物の損傷への影響が大きい周期帯域では、損傷度指標の値は、回転近似モデル(P- Δ 効果あり)と回転厳密モデル(P- Δ 効果あり)の降伏強度0.2gのときを除いて、耐震性能Ⅲ($DI=0.6$)以下であることを満足しており、落橋などの致命的な被害が少なかったことと合致する。

4.3 2次剛性比が損傷度指標に及ぼす影響

2次剛性比が損傷度指標に及ぼす影響を検討するため、降伏強度 $P_y=0.8$ gのときの2次剛性比ごとの損傷度指標の値をプロットしたものを図7、2次剛性比 $n=0.0$ に対する他の2次剛性比の損傷度指標の割合を図8に示す。

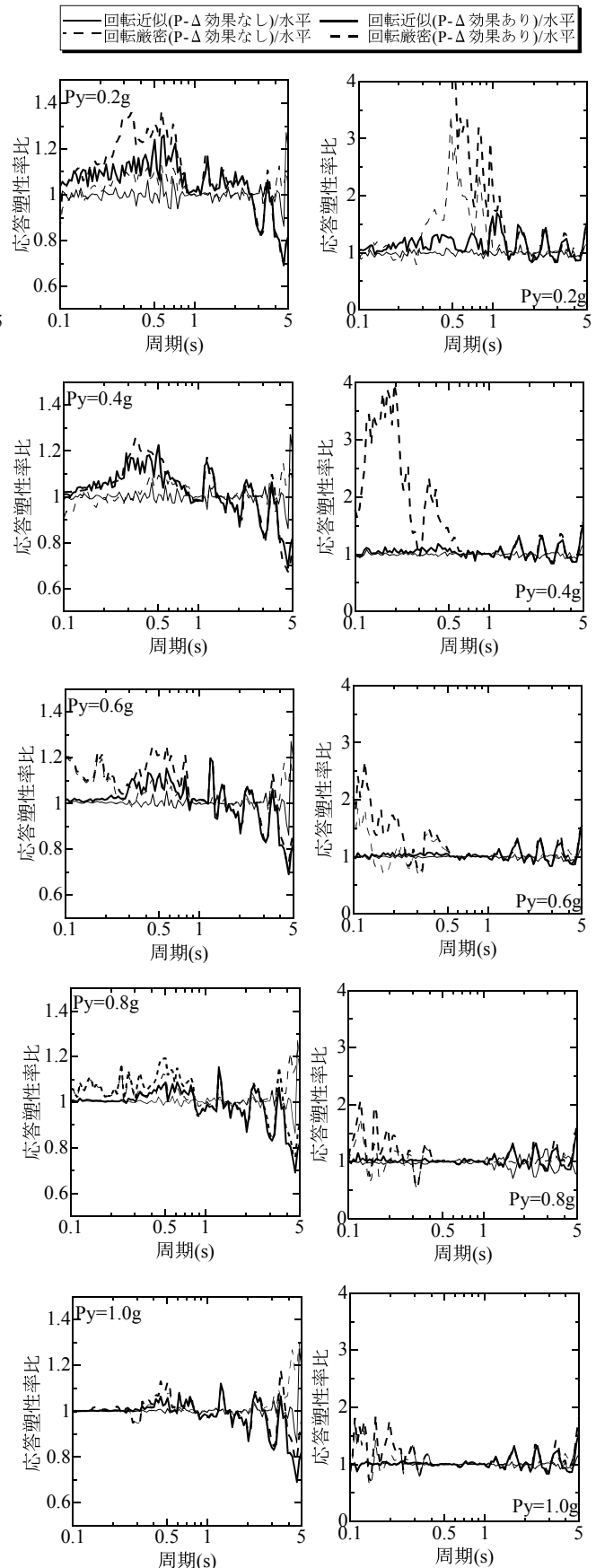
図7(a)の損傷度指標スペクトルにおいて、2次剛性比 n が大きくなると損傷度指標の値が小さくなっており、 $n=0.0$ では崩壊を表す $DI=0.6$ に達するものが、 n を大きくすると、周期により異なるが修復可能を表す $DI < 0.36$ に損傷度指標が低減されているのがわかる。図7(b)においても、2次剛性比 n が大きくなると損傷度指標の値が小さくなる傾向



(a)神戸海洋気象台

(b)築館

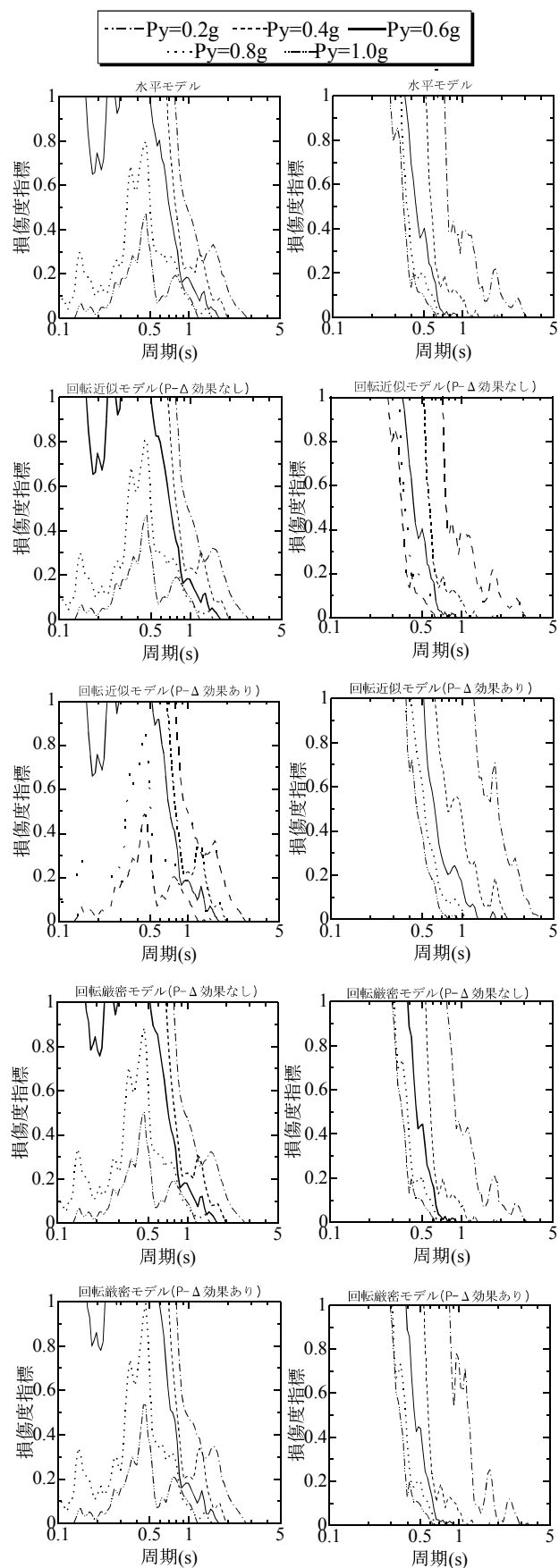
図4 周期－応答塑性率関係



(a)神戸海洋気象台

(b)築館

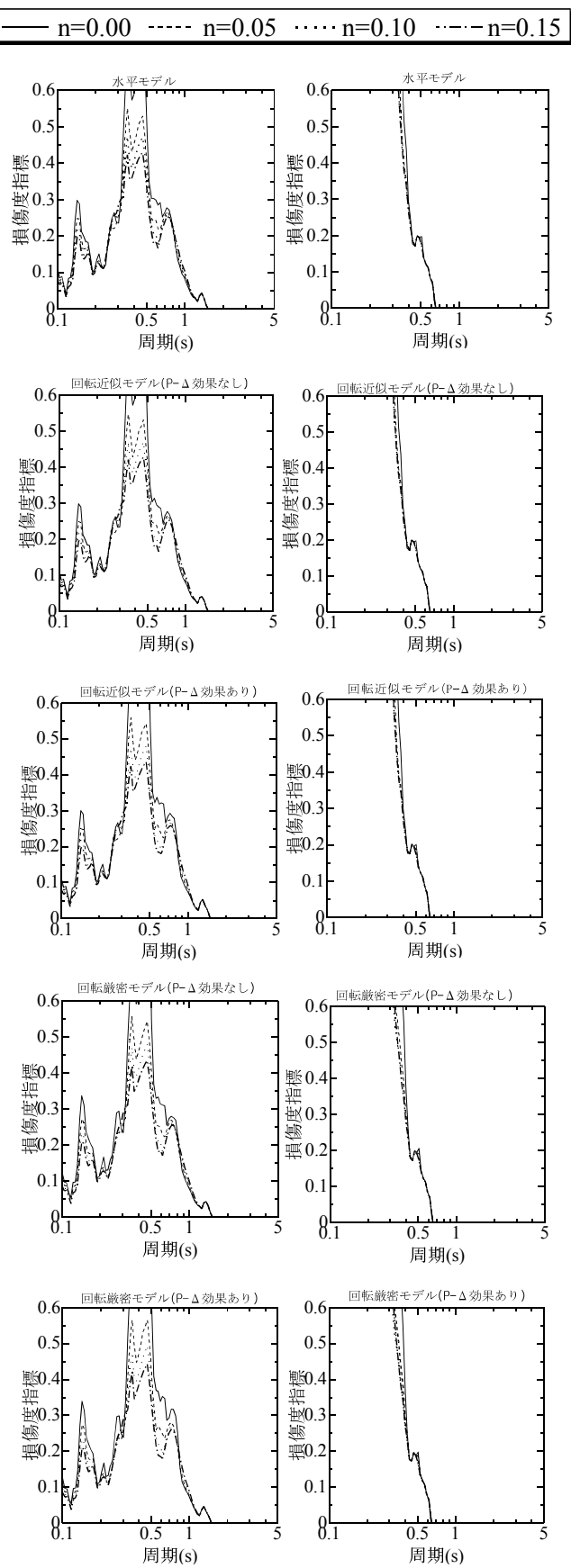
図5 周期－応答塑性率比関係



(a)神戸海洋気象台

(b)築館

図6 周期－損傷度指標関係



(a)神戸海洋気象台

(b)築館

図7 損傷度指標スペクトル

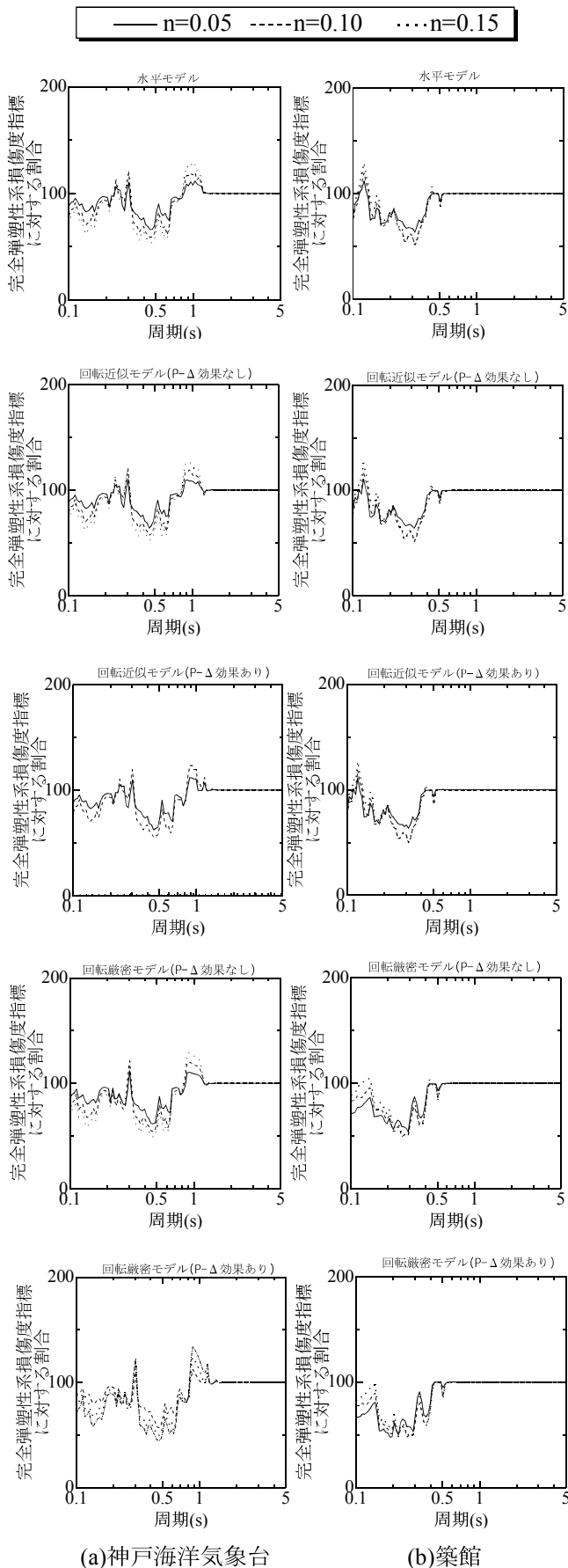


図8 完全弾塑性系損傷度指標に対する割合

がみられる。また、4.1 で述べた構造物の損傷への影響が大きい周期帯域では、損傷度指標の値が0となっていることがわかる。図7より神戸海洋気象台では周期約1.0 s以下、築館では約0.6 s以下の全ての周期域で、2次剛性比による損傷度指標の値の低減効果がみられる。

図8(a)において、完全弾塑性系損傷度指標に対する割合が100%以下のときは、 n が小さくなるに従って値が大きくなり、100%以上のときは、 n が大きくなるに従って値が大きくなる傾向がみられる。これは、図8(b)の築館の場合でも同様のことがいえる。

5. まとめ

本論文では、5種類の1自由度系の解析モデルを用いた弾塑性地震応答解析を行い、応答塑性率や損傷度指標が、降伏強度、2次剛性比及び解析モデルの差異によって、どのような影響を受けるのかを検討し、その過程で算出された損傷度指標の値が、耐震性能の目標値として設定された損傷度指標を満足するかについても検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 損傷度指標や応答塑性率の値は、解析モデルによって異なり、回転近似モデル(P- Δ 効果あり)と、回転厳密モデル(P- Δ 効果あり)では大きくなる傾向が得られた。さらに、回転厳密モデル(P- Δ 効果あり)が要求される耐震性能を最も満足しにくいモデルであるという結果が得られた。
- 2) 2次剛性比が大きくなるほど損傷度指標の値は低減され、その影響で周期によっては修復不可能であったものが修復可能となる場合もある。
- 3) 築館の最大加速度は非常に大きい、構造物の損傷に影響の大きい周期帯域では加速度は小さく、それに対応して応答塑性率、損傷度指標の値が小さくなっていることが確認できた。

謝辞

本論文には、防災科学技術研究所の強震ネットワークから提供された強震記録を使用させて頂いた。関係者に厚く敬意と謝意を表す次第である。

参考文献

- (1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 丸善, 2012.
- (2) 家村浩和, 三上卓:土木学会論文集, No.689/I-57, pp.333-342, 2001.
- (3) Ghobarah, A. and Aly, N.M.: Seismic reliability assessment of existing reinforced concrete buildings, Journal of Earthquake Engineering, Vol.2, No.4, pp.569-592, 1998.
- (4) 山下典彦, 原田隆典:P- Δ 効果が1自由度系の非線形応答に与える影響, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM, pp.1-8, 2003.

人口，土地利用変化からみた震災復興

市街地再開発事業に関する研究

橋本渉一* 大西千尋**

Urban Redevelopment of Earthquake Disaster from Population and Land use's point of view

Shoichi HASHIMOTO* Chihiro OHNISHI**

ABSTRACT

Hanshin-Awaji disaster occurred at Jan.17 1995, much damage resulted in Hanshin area and Kobe city. Shin-nagata and Rokkomichi area sub-center of Kobe were suffered severe damage. In both area urban redevelopment projects for the disaster recovery have been operated by Kobe city. In this study, change of Population and land-use situation in both disaster area were surveyed. Effects or influences of redevelopment projects in disaster area are declared. At several zones population and shops increased, however another zones did not reach population level before the disaster.

Keywords : Hanshin-Awaji disaster, redevelopment project, population, recovery

1. はじめに

1995年1月17日に阪神・淡路大震災が発生し、戦後最大の大都市災害となった。犠牲者が約6300名余に達し、被害を受けた住宅は約30万棟以上に達するなど、甚大な被害が生じた。震災後、六甲道駅南地区(約5.9ha)と新長田駅南地区(約20.1ha)という東西の副都心地域において、平成7年3月17日に震災復興市街地再開発事業の都市計画を決定した。都心機能の導入を図るとともに、道路・広場等の公共施設の整備とあわせて多様で良好な住宅の供給、商業・業務環境の改善を行い、災害に強い東西の副都心にふさわしい、安全・安心な防災拠点として早期に復興を進めることを目的として行われた。¹⁾

震災後、多数の市民が市の内外に移動するなど、被害を受けた地域は人口が激減した。しかし、震災から17年を迎えた現在、被災した地域では人口が震災前の水準にまで戻り、地域によっては震災前の人口を大きく上回っている地域もある。また、被災地の復興市街地再開発事業に

ついては、工事が完了し新しい生活が始まった地域、工事の完了までもう一息の地域など、復興の状況に差はあるがほぼ復興事業終了期を迎えている。

復興のシンボルとされてきた新長田地区の再開発事業は、復興災害とも言われることもある。復興事業による住宅再建などの制限がもたらす長期的な人口減少、地域の商業主など地域を主な商圏とする事業者に対するダメージなどの原因が指摘されている。²⁾³⁾

2. 研究目的

神戸市は、阪神・淡路大震災で焼失・倒壊など大きな被害を受けた地区の被災者への対応や市街地の復興と災害に強い安心のまちづくりを早急に進めていく必要があった。特に被害の大きい地域復興のための市街地再開発事業が実施された新長田駅南地区、六甲道駅南地区を対象に町丁別の人口変動を調査し、過去と現在を比較し考察する。

復興過程での人口変化と土地利用変化との関連を検証し、地域開発や主要駅周辺の開発が人口や土地利用の変化にどのような影響を与えたか分析し、震災復興市街地再開発事業の問題点を明らかにすることを目的とする。

* 都市工学科 教授

** 平成23年度 都市工学科卒業生

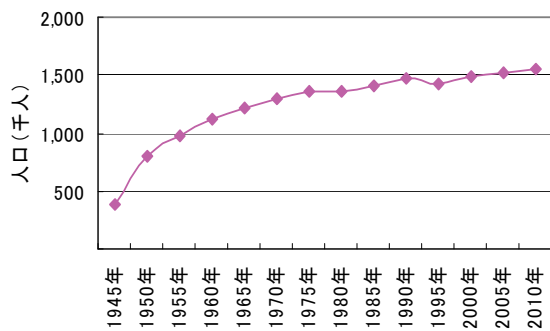


図1 神戸市の長期的な人口変化

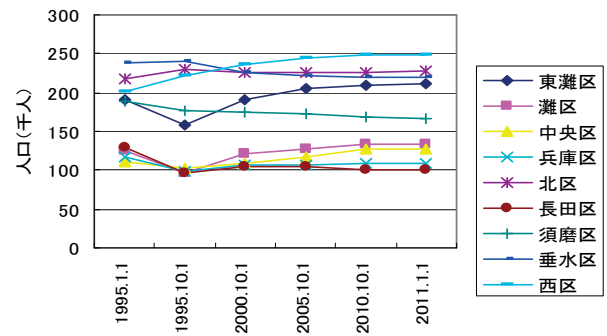


図2 区別の人口の動き

3. 神戸市の人口変化

3.1 長期的な変化 神戸市全体の1945年から2010年までの人口変化を図1に示す。第2次世界大戦後1945年に38万人にまで落ち込んでいた人口は、その後の大幅な経済発展に支えられて急速に増加し、戦前の水準を回復した。1960年代より、増加の速度は落ち着きを見せ始めるが、その後も増加が続き、1995年の震災直前には152万人を超えた。阪神・淡路大震災により、戦後初めての人口減少をもたらし、一時は142万人まで減少した。しかし復興の進展に伴って人口の増加が見られ、2004年に震災前の人口を超えた。その後も人口増加が続き、現在は最高人口を更新している。

近年は伸び悩みがみられる。人口減少の多くは、若い世代の流出によるもので、人口回復の遅れは、再建された住宅等への入居率、商業の再生にも大きく影響すると考えられる。

3.2 区別の変化 震災直前から現在までの区別の人口変化を図2に示す。震災直前と2011年時の人口は推計データで、2005年から2010年までの5年毎の人口は国勢調査データである。

震災後の人口推移の傾向は各区でばらつきがあり、東灘区は2000年に、中央区と灘区は2002年に、それぞれ震災直前人口を上回り、その後も神戸市全体の人口増加を牽引している。

長田区、兵庫区は2011年1月1日時点で震災発生直後の人口は超えているものの、震災発生前の人口には戻っていない。長田区においては、復興事業に巨額の費用が投じられながらも、計画通りの成果が得られていない。人口回復が遅れる理由として、働く場所の移転、借家層が戻らないことが原因と考えられる。

元々震災前から、市街地から郊外や東播磨海部などへ人口流出傾向にあり、震災直後はそれが拡大した。しかし、2000年頃を境にこれまでみられなかった郊外から市街地への人口流入いわゆる都心回帰現象もみられる。

震災前より人口増加しているのは西区、北区であり、これはニュータウン開発により順調に人口増加が続いたと考えられる。

3.3 復興市街地再開発事業地区における人口変動

地震により大きな被害を受けた新長田駅南地区、六甲道駅南地区において、被災市民の移転行動を、国勢調査人口と住民基本台帳人口に現れた町丁別の変動をもとに調査した。住民基本台帳人口は各年10月1日、国勢調査人口は1995年から2010年まで4回分のデータを使用した。町丁毎の人口変動率は式(1)で、下記の通り求めた。

・1994年10月1日の住民基本台帳人口を実人口とみなし、基準人口とする。

・その後は国勢調査人口を実人口とみなす。

・人口変動率 = (調査年国調人口 - 1994年住基人口) / 1994年住基人口 × 100 ……(1)

人口データには下記の誤差要因を含んでいる。市町村の推計人口は、直近の国勢調査結果を元に住民基本台帳および外国人登録の届出数を考慮して算出した値である。しかし、震災のような突発的な事態による人口の激変を通常の統計でとらえることは難しい。混乱の中で、届出せずに他地域に移動するケースが大量に生じたため、推計人口と住民基本台帳人口には差が出る。特に2000年頃までは実人口の他に地域帰還を希望する人たちが住民基本台帳人口に含まれていた。また、住民票を移さずに他地域に移った人が、国勢調査後に元に戻ってきても転入届は出されていないため人口増加としてカウントされないなど過小推計となることもある。このため国勢調査人口、住民基本台帳人口データを使用、比較することで人口変動要因を考察した。

新長田駅南地区、六甲道駅南地区の各町丁に対して人口変動率を求めた。その1例として新長田南地区日吉町1～3丁目の人口変動率を図3に示す。

日吉町1～3丁目では2000年頃に国勢調査人口と住民基本台帳人口はほぼ一致し、また人口もほぼ回復し、この時点で災害復興段階を終えたと考えられる。

また日吉町1丁目では地震後の住民基本台帳人口が急激に低下したがその後上昇に転じている。当初住民票を移し他地域に避難したが、復興事業の終了後に元の地域に戻ることを望んだ人々が多く存在していたと考えられる。

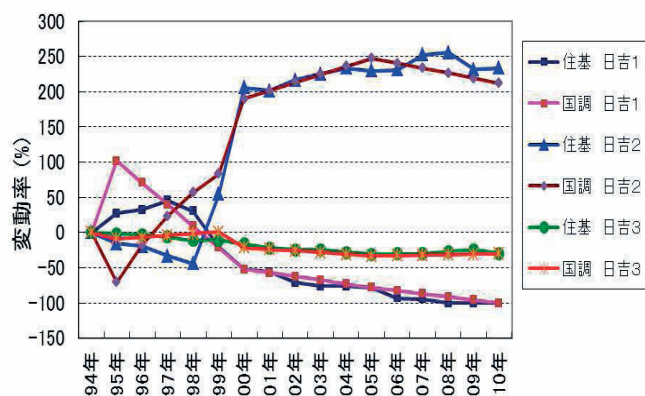


図3 日吉町1～3丁目人口変動
(国勢調査と住民基本台帳)

3.4 震災後の人口減少 震災後の1995年10月1日国勢調査で明らかになった人口減少は地震によって住居を失った被災者が地区外に当面の住居を求め、地区を去ったために発生した。図4に区別の人口減少と建物の全壊、全焼の関係を示す。

住民減少率と(全壊+全焼)率は式(2)、式(3)により算定した。

・住民減少率 = (1994年住基人口 - 1995年国調人口) / 1994年住基人口 × 100 ……(2)

・(全壊+全焼)率 = (全壊戸数+全焼戸数) / 全戸数 ……(3)

図4に示す通り(全壊+全焼)率と住民減少率は正の強い相関関係がみられる。この中で東灘区のデータのみ $y = x$ 直線より上に位置し、マンション・戸建住宅の全壊率より、人口減少率が高くなったことを示している。他区のデータはこの直線より下に位置し、人口減少率は全壊率より低くなっている。長田区においては(全壊+全焼)率が高いにもかかわらず、人口減少率は低い。これは被災し住居を失ったが、大量の仮設住宅などにより、地区外に移らず同地区に留どまったと考えられる。長田地区においては、若年層がニュータウンなど地域外に移り、高齢化が進んだとされている。灘区や兵庫区などは $y = x$ の直線に近似している。

これらの6区はいずれも被害が大きい地域であり、国勢調査時点での人口減少は大きなものとなった。

3.5 人口残存と人口回復 震災後の人口動態を表す指標として「人口残存率」と「人口回復率」を用いる。住民基本台帳の人口データを使用し、人口残存率と人口回復率は式(4)、式(5)で算定した。

・人口残存率 = (1995年の震災後人口 / 1994年の震災前人口) × 100 ……(4)

・人口回復率 = (2011年時点の人口 / 1994年の震災前人口) × 100 ……(5)

新長田駅南地区全体、六甲道駅南地区全体の人口残存率、人口回復率を表1に示す。新長田駅南地区、六甲道

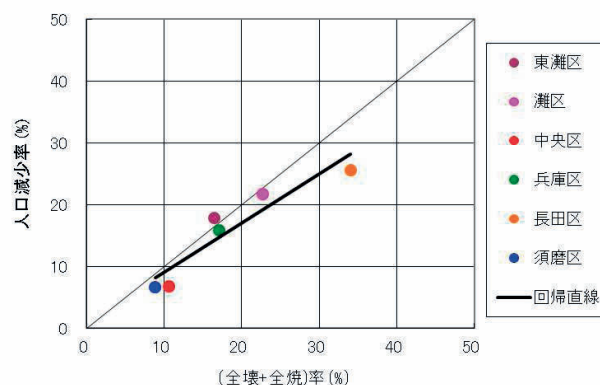


図4 (全壊+全焼)率と人口減少率

表1 人口残存率、人口回復率

地区	人口残存率(%)	人口回復率(%)
新長田南	88.4	105.0
六甲道南	85.0	115.4

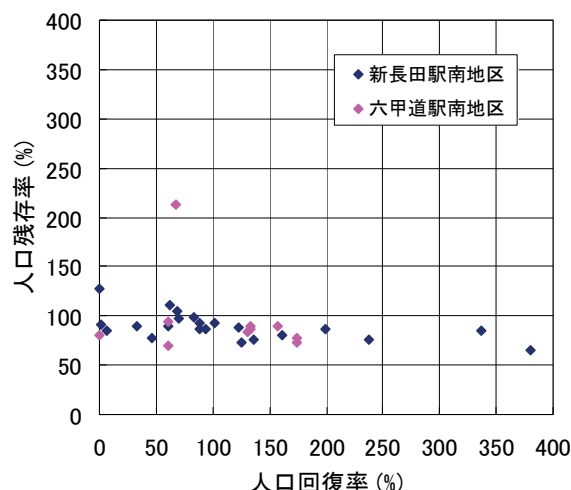


図5 人口残存率と人口回復率の関係

駅南地区はともに、多くの人が現地を離れたがその後は人口が回復し、現在では震災以前を上回っている。

2地区の町丁毎の人口残存率と人口回復率の関係を、図5に示す。両者の関係には明らかな法則性は見られない。震災で人口が激減したが、後に大幅な復興を遂げた町丁が存在している一方で、人口流出の規模は小さかったが、その後の回復が停滞している町丁もある。人口の推移は多様であり、町丁ごとの復興の様子は大きく異なっている。

震災から17年を迎え殆どの町丁で人口は震災前の水準に達しているが、震災前の水準に達していない町丁もいくつかある。この人口回復は、少数の地区のみの急激な人口増も大きく関係している。

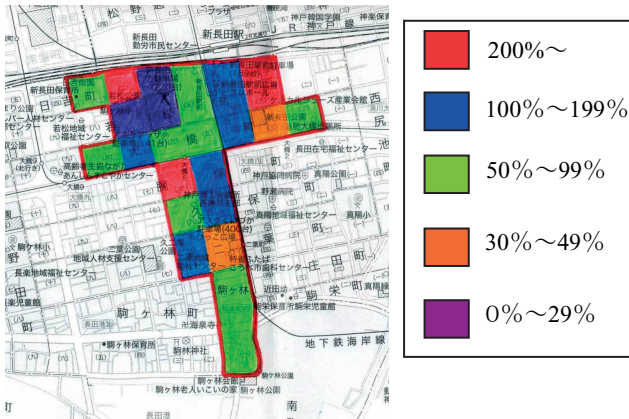


図6 新長田駅南地区—人口回復率



写真1 新長田駅前広場

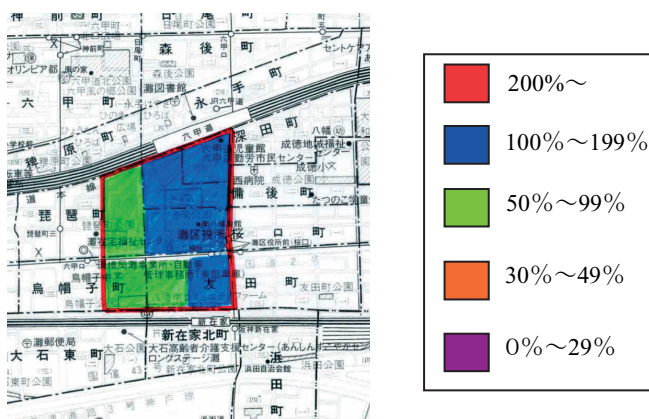


図7 六甲道駅南地区—人口回復率



写真2 空き店舗

町丁別人口回復率を示したものが図6、7である。新長田駅南地区において隣接する日吉町2丁目と3丁目を見ると、日吉町2丁目の人口回復率は336.1%と非常に高い値となったが日吉町3丁目は69.3%という値を示している。このように、各町丁の人口回復は地理的な規則性をもっていない。人口が震災前の水準以上にまで達した町丁と未だに50%に満たない町丁が隣接するというケースも見られる。震災後の新長田駅南地区、六甲道駅南地区は、人口動態に大きな格差のある町丁が不規則に分布した空間を形成している。これは、大規模な集合の建設位置により各町丁における人口回復率の差が生じている。

4. 土地利用変化

震災により壊滅的な被害を受けた新長田駅南地区、六甲道駅南地区は、災害の危険性の高い木造密集市街地を一掃し、建築物と道路、広場などの公共施設の整備を一体的に行うことにより土地の高度利用を図った。面的整備である土地区画整理事業に対し、立体的な整備を行う市街地再開発事業は、土地利用の変化は大きく、現在の土地利用を図8、9に示す。

震災前と現在を比較すると以下の通りである。

＜新長田駅南地区＞

- ・商業施設と住宅の複合的立地である高層の再開発ビルが多い。
- ・多くの一戸建て住宅が集合住宅へと変化した。
- ・駅周辺は、その利便性を活かし共同住宅や店舗など地域での生活利便施設が多く、居住機能と都市機能の複合化がみられる。(写真1)
- ・比較的狭いエリアに生活利便施設が密集している。
- ・道路をはさみ、市街地再開発事業が行われている地区と行われていない地区では、まちの雰囲気が大きく異なる。再開発エリア外の既存店舗の活性化が進まなかった。
- ・商店街の空き店舗が目立っている。(写真2)
- ・復興事業が進むなか、下町情緒を残す街並みと、再開発事業による新しい景観をそなえた地区がある。
- ・土地利用転換により、まとまった範囲で住宅地化が進んでいる。
- ・駐車場は、ビルや公園の地下に多く見られる。
- ・工場跡地に大規模なマンション等が立地した。
- ・震災前よりも未利用地が多く見られる。
- ・震災前には、一戸建て住宅の老朽化が進み、建て替え時期を迎えていたことから、震災後に建て替えが進んだことにより減少したが、代わりに大規模な集



写真3 六甲道駅南地区



写真4 地下駐車場

合住宅が建設されている。

〈 六甲道駅南地区 〉

- ・商業施設と住宅の複合的立地である高層の再開発ビルが多い。
- ・多くの一戸建て住宅が共同住宅へと変化した。
- ・駅周辺は、その利便性を活かし共同住宅や店舗など地域での生活利便施設が多く、居住機能と都市機能の複合化がみられる。(写真3)
- ・低層部を中心に商業業務施設等を配置することにより地上レベルでのにぎわいを演出し、住宅を中高層棟とし、まちのランドマークとなるよう配置されている。
- ・幅広い層を対象とし、誰もが住みやすく、質の高い中高層住宅が多く見られる。
- ・副都心の駐車場需要に対応するため、マンションや公園の地下空間等を活用して、適切な規模の駐車場がみられる。(写真4)
- ・新しい大規模な公園、道路が整備され、区役所等が設置された。

再開発事業を進めてきた結果、都市基盤が着実に整備されてきている。六甲道駅南地区はまちが活性化しており、復興は成功したと言える。しかし、新長田駅周辺では、多くの人が通りを行き交うといった、かつての賑わいが戻らず、神戸市における存在感が低下している。主要要因は、人

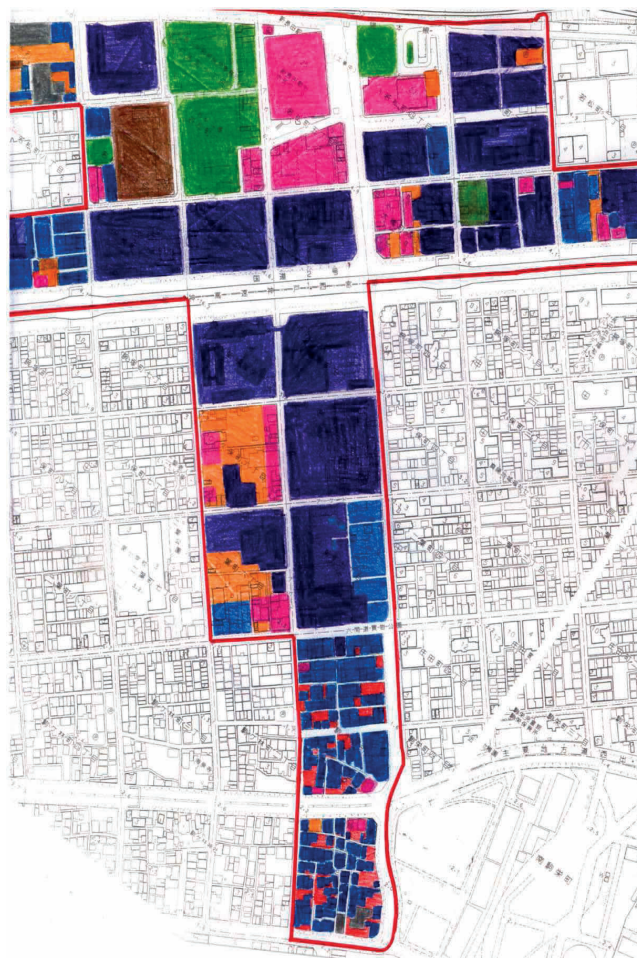


図8 新長田駅南地区一土地利用図(現在)

口、産業、商業が震災以前のレベルに回復していないことにある。また、空き床発生の実態として、中高層ビルにおいては路面に面した地下、1階、2階よりも中高層階において発生する傾向があり、外見以上にまちの空洞化が進行している状況である。

市街地再開発事業により、土地の高度利用を図り、再開発ビルが建設され、戸建て・低層住宅のまちから中高層住宅のまちへと変化した。また、駅周辺は、共同住宅や店舗など、地域での生活利便施設が多く、居住機能と都市機能の複合化がみられ、低層部を中心に、集客力の強化と回遊性を演出するため商業・業務・公共公益施設等である生活利便施設の集積を図るとともに中高層部に住宅を配置し、良好な住環境を確保している。駅前にはランドマークとしての超高層住宅を配置している。

駐車場の増加は、住居が増えたことによるものである。駐車場の需要を満たすため、マンションや公園の地下空間等を有効に活用している。

震災の教訓を活かし、大規模な公園がみられる。都市公園の面積を増やすことにより、災害時の情報案内、仮設トイレ、避難所、物資搬入などの拠点となっている。

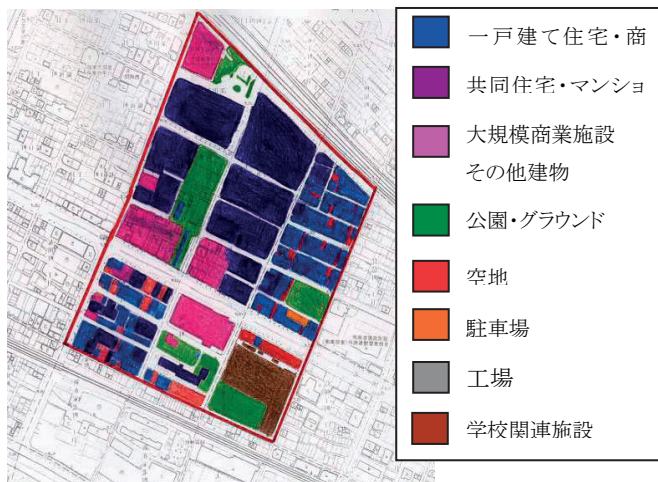


図9 六甲道駅南地区－土地利用図（現在）

5. まとめ

阪神・淡路大震災後からの神戸市内副都心地域の市街地再開発事業における復興過程における人口および土地利用の変化に関する諸データから、以下の事項が明らかになった。

1) 人口変化

日本の人口動態は、2005年に人口統計を取り始めて初の自然減となり、2006年は増となったものの2007以降を減少が続いている。兵庫県の人口動態は、2005年に初の自然減となり、2006年は増となった以降ほぼ横ばいの状態が続いている。

神戸市では震災によって人口分布は大きく組み替えられた。現在、神戸市は震災前の水準を上回り、人口が回復している。しかし、神戸市全体で均等に実現されたのではなく、特定の場所での人口の大幅な増加によって達成されたものである。

国勢調査人口と住民基本台帳人口を比較すると、地震直後は多くの町丁で住民基本台帳人口が国勢調査人口を大きく上回る傾向が見られた。これは、地震後に地域外に避難したが、後々は元の地域に戻るといふ思いから、住民票を移さなかった人たちが多くいたと考えられる。また、町丁によっては、国勢調査人口が住民基本台帳人口を上回るというケースもみられた。これは、地震発生後すぐに住民票ごと地域外に避難し、今後もとの地域に戻る意思のない人がいたこと、仮設住宅の設置などにより、他地域からの避難者が多くいたことが関係していると考えられる。

2) 土地利用変化

震災以後に住宅再建が着実に進んできたことは事実である。建物が再建されていない敷地は空き地のまま放置され、市街地の中に固定化する傾向がみられる。住宅再建のプロセスを経た市街地には、震災以前とは際立って異なる空間が形成されてきた。

3) 人口変化と土地利用変化の関係

人口は住宅数の増加には連動しない。復興政策が行わ

れると、人口の回復は遅れ、復興政策の途中段階では人口は減少し、ある程度期間が経ち復興政策が完了すると、人口は回復傾向をみせる。震災後の人口増加は集合住宅の増加が要因となる。また、防災機能や都市の大型商業施設の立地など、日常生活での利便性が高まり、地区が活性化することで、より魅力的な都市へと変化し、人口増加の要因になる。

4) 復興市街地再開発事業の課題

阪神淡路大震災後の震災復興市街地再開発事業により、駅周辺の高層ビルだけを見ると、復興政策は効果があったとみえる。しかし、事業が地区住民に与えた影響はプラスだけではなかった。

①失われた商業ストックの回復を主要な目的として、復興事業を進めた結果、再開発事業による商業床の供給では一定の成果をおさめたが、再開発ビルやその他の商店街でも空き店舗が目立っており、集客力が十分回復していない。これは、人口回復を売上の増加につなげられていないこと、空き店舗・空き床により商業集積地としての魅力が低下したことが原因である。

また、再開発エリアの賃料が周辺地域に比較して割高になるなど、必ずしも地元商業者のニーズに応じたテナント誘致策ができていなかったこと、再開発エリア外の既存店舗の活性化が進まなかったことなどが影響していると考えられる。今後は、空き店舗を解消し、魅力的な商業集積を形成するために、積極的に住民を店舗へ呼び込むなどといったソフト面の対策が求められる。

②再開発計画では、計画規模が過大に設定されるケースが多い。これは、商業ポテンシャルが高い地区でできごとであり、震災後の再開発で購買人口が戻らず、商業ポテンシャルがそれほど小さくなく、かつ規模の小さい商業店舗の多い新長田駅南地区では、過大であると考えられる。

この結果、十分な時間をかけず復興事業に着手すれば、社会構造面での問題を抱えた地域では、巨額の復興資金を投じた結果でも、復興は容易ではないと考えられる。

参考文献

- 1) 神戸市：「神戸市役所ホームページ」
<http://www.city.kobe.lg.jp/>
- 2) 安藤元夫：「阪神・淡路大震災 被災と住宅・生活復興」学芸出版社、pp. 215-232、2003年7月
- 3) 安藤元夫：「阪神・淡路大震災 復興都市計画事業・まちづくり」学芸出版社、pp. 113-166、2004年4月

大阪湾における水環境変化と水産資源の変遷

木下 歩* 宇野宏司**

Temporal Spatial Variation on Water Environment and Fishery Resources in Osaka Bay

Ayumi KINOSHITA* Kohji UNO**

ABSTRACT

The industrial development in high-growth period after WWII led to the environmental degradation of Osaka bay which is one of the typical semi-closed water areas in Japan. In this study, we tried to clarify the relationship between the temporal spatial variation on water environment in Osaka Bay and the variation of fishery resources and that of water quality. Using the official statistical data, we grasped the trend of water and sediment quality of Osaka bay and the amount of fishery resource, respectively. In addition, the relationship between water and sediment quality and fishery resources was examined by the correlation analysis. From our findings, it is important the water and sediment quality not only in caught year but also in birth year.

Keywords: Osaka Bay, the correlativity, fishery resources, correlation coefficient

1. 研究背景と目的

わが国有数の閉鎖性海域である大阪湾（図-1）は、古くは「茅渚（ちぬ）の海」とも呼ばれ、豊富な水産資源に恵まれた海であった。しかし、戦後復興から経済成長期にかけて、台風による高潮被害の軽減と物流・生産機能の強化を目的とした海岸保全施設が多く設置されたことにより、結果として水質悪化や水産資源の減少などの環境劣化をもたらした。

近年は、行政による海域環境を改善するための技術を導入した施策が大阪湾において実施され、様々な規制の実施や生活環境の改善がなされているが、その再生は依然として途上の段階にある。

本研究では、大阪湾内で行われている環境調査の中から、大阪府立水産試験場が実施している浅海定線調

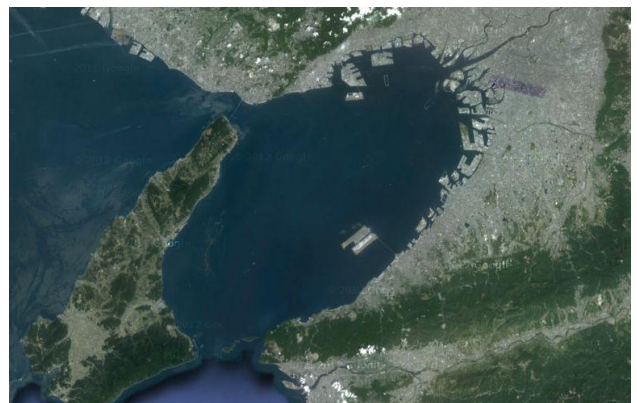


図-1 大阪湾（出典：google earth）

査⁽¹⁾の結果と大阪府が実施している大阪府公共用水域水質測定調査⁽²⁾の結果を用いて、水質・底質の経年変化を把握した。また、水質改善の効果を水産資源の回復という視点から検討するため、ガザミ（*Portunus trituberculatus*）とクロダイ（*Acanthopagrus schlegelii*）の漁獲の推移に着目し、大阪湾の水環境の変化と水産

* 専攻科 都市工学専攻

** 都市工学科 准教授

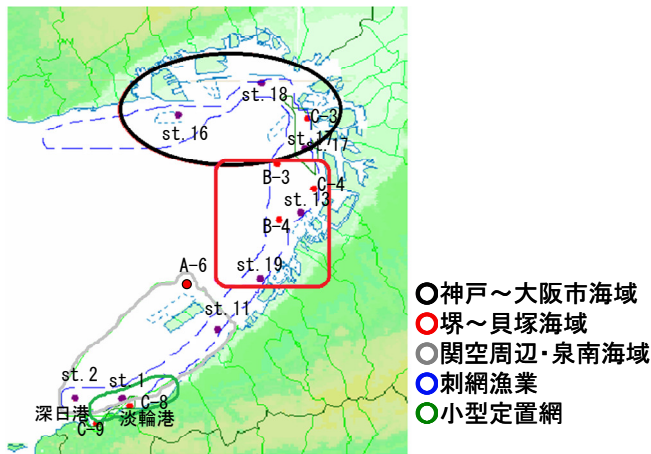


図-2 漁業範囲と調査定点

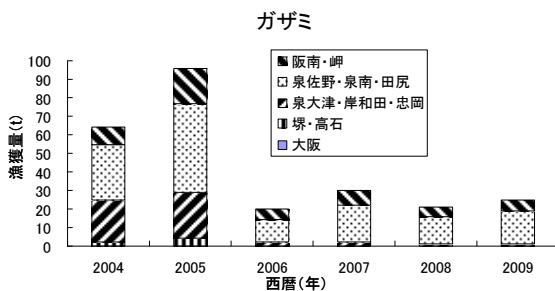
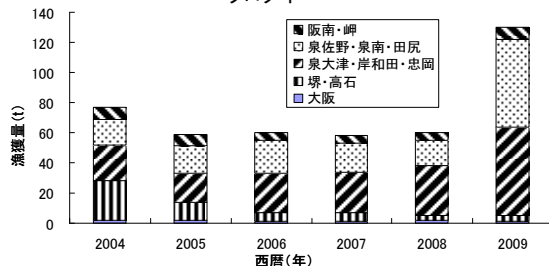
図-3 ガザミの漁獲量
クロダイ

図-4 クロダイの漁獲量

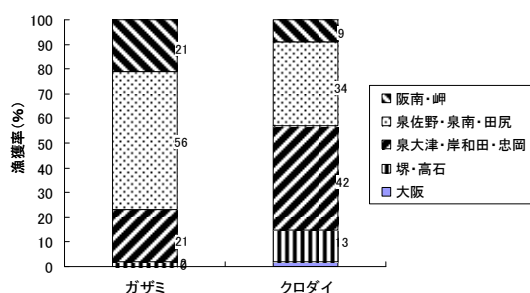


図-5 ガザミとクロダイの市町別漁獲率

資源の変遷との相関性をとらえることを試みた。

2. 調査方法

大阪湾では、現在、水質改善が一部の海域ではみられているが、淀川や神崎川などの河川からの流入負荷⁽³⁾や大規模な埋め立てによる流動環境の変化⁽⁴⁾、湾奥部から東部海域で多く発生している赤潮⁽⁵⁾など、依然と

して様々な環境問題を抱えている。そこで本研究では、まず、浅海定線調査と大阪府公共用水域水質測定調査の結果を用いて水質や底質の経年変化を把握した。また、これらの水質・底質データと海面漁業生産統計調査⁽⁶⁾による魚種別漁獲量とを用いて水質・底質と漁獲量との相関関係を調べた。図-2に漁業範囲と調査定点を示す。

2.1 使用データの概要 使用データの概要について以下に示す。浅海定線調査は、1972年度から旧大阪府立水産試験場（現在は大阪府環境農林水産総合研究所）が水質に関して年4回行なっている。代表的な測定項目として、健康項目の硝酸性窒素などや、生活環境項目のCODやDOなどがある。採取水深は、表層では海面下1m、底層では水深が20m未満の場合は海底面上2m、水深が20m以上の場合は海底面上5mである。

大阪府公共用水域水質測定調査は、1972年度から大阪府環境農林水産総合研究所が水質・底質に関して基準点により原則として年4回以上あるいは年2回以上行なっている。測定項目は浅海定線調査と同様である。採取水深は、表層では海面下0m、底層では、st.2～7は海底面上5m、st.8は海底面上2m、上記以外は海底面上1mとなっている。

海面漁業生産統計調査は、農林水産省が主体となっていて行っている。ただし、本調査の対象期間は年度単位ではなく、毎年1月1日から12月31日までである。

2.2 海域別の水環境と水産資源の変化 本研究では、底生水産資源の代表としてガザミを、回遊性水産資源の代表としてクロダイを取り上げ、海域ごとに漁業別漁獲量を集計した。ガザミの幼生はプランクトンとして浮遊生活を送るため、表層水質についても考慮する必要があると考えた。また秋季に浅海域に出現する⁽⁷⁾ことから、秋季の表層水質の経年変化と比較することとした。一方、回遊性のクロダイについては、夏季から秋季にかけて盛期である⁽⁸⁾ことから、秋季の表層水質と小型定置網による漁獲量とを比較した。次に、図-3、図-4に示す市町別の漁獲量（2004～2009年）をもとにガザミとクロダイの市町別漁獲率を算出した（図-5）。

2.3 水環境の変化と水産資源変動との相関性 大

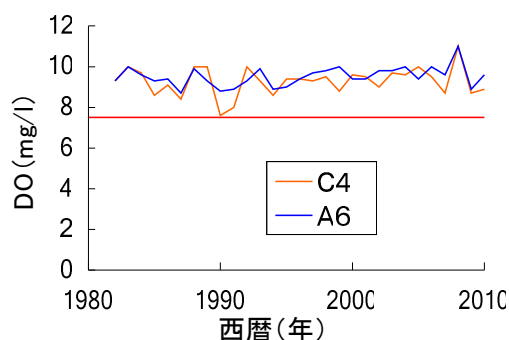


図-6 底層 DO の経年変化

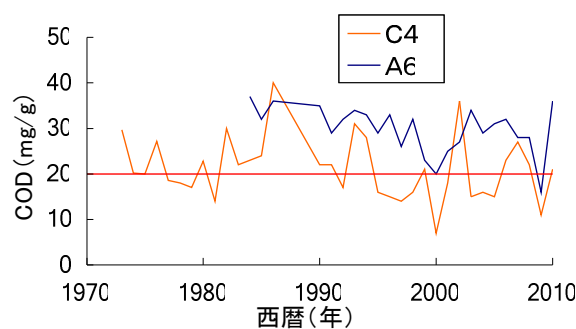


図-7 底質 COD の経年変化

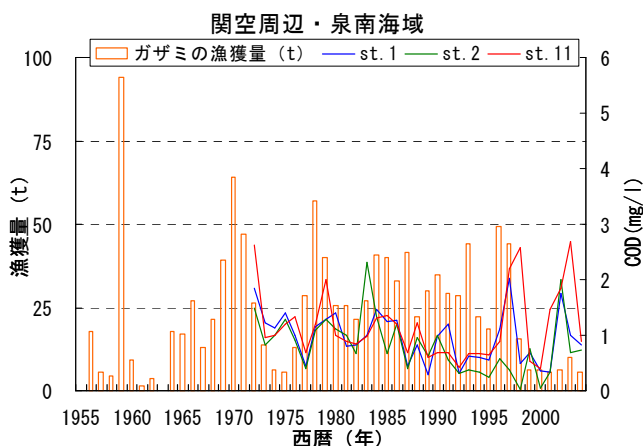
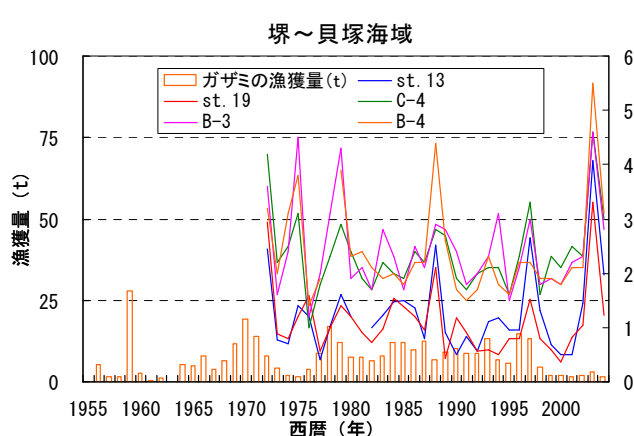


図-8 海域別ガザミの漁獲量と表層 COD の経年変化

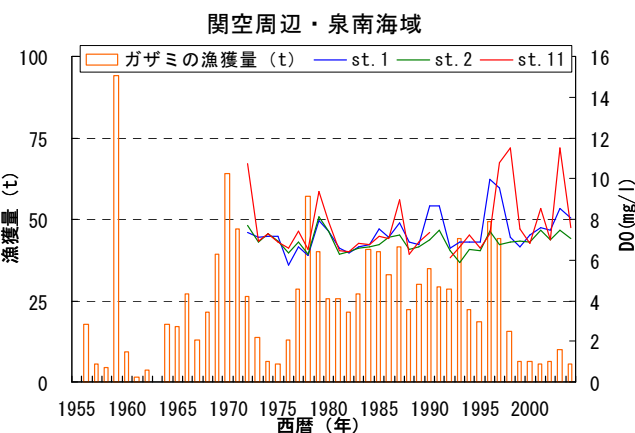
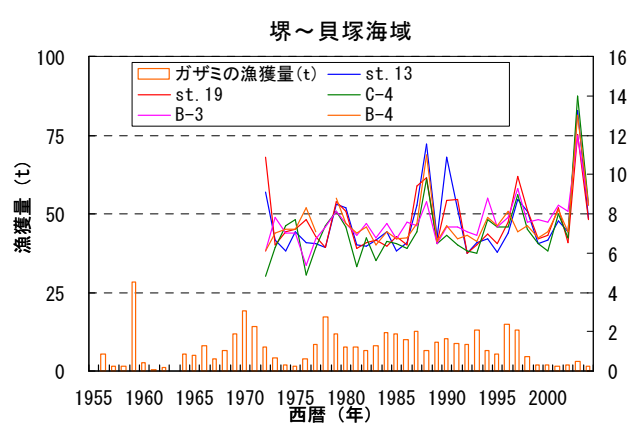


図-9 海域別ガザミの漁獲量と表層 DO の経年変化

大阪湾の水環境の変化と水産資源変動の相関性について検討するにあたり、漁獲されるまでの水環境が資源量に影響するものと考え、「遅れ年数」を考慮した。クロダイは出世魚であり、そのように呼ばれる体長 35 cm に達するまで 10 年かかるので遅れ年数を 0～10 年とした。一方、ガザミについては、寿命が 3 年であることから遅れ年数を 0～3 年と変化させて、各遅れ年に対する水質と漁獲された年の漁獲量との相関係数⁽⁹⁾を計算した。

3. 調査結果

3.1 海域別の水環境と水産資源の変化 2004 年からのガザミの漁獲量（図-3）をみると、2005 年以降に約 80 t も減少していた。底層 DO（図-6）については常に環境基準値を満たしているが、底質 COD（図-7）について、ガザミの主漁場である関空周辺・泉南海域（A6）での値が、2000 年以前には改善傾向にあったのが、2000 年を境に悪化しており、このことが漁獲量減少の一因であると考えられる。また、1990 年以降も基

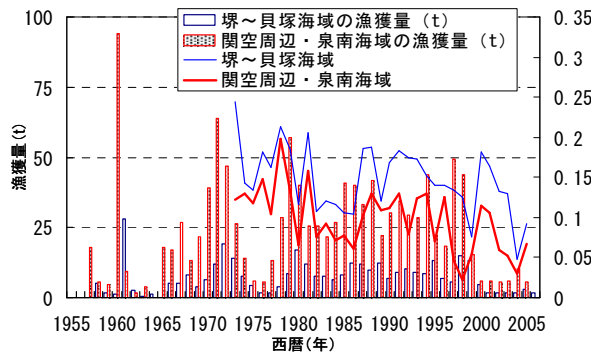


図-10 海域別ガザミ漁獲量と表層硝酸性窒素の経年変化

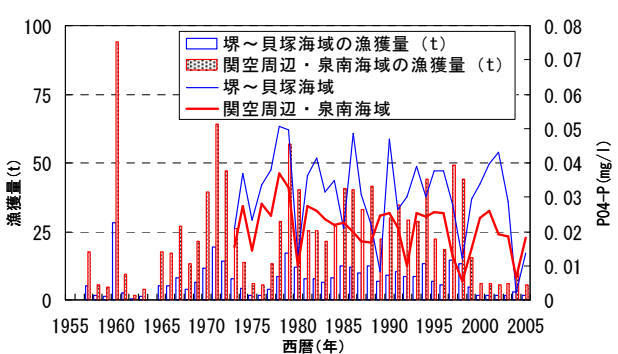


図-11 海域別ガザミ漁獲量と表層リン酸性リンの経年変化

準値を満たさない年が散見され、環境改善が十分にされていないとはいえない状況である。

図-8 に海域別のガザミの漁獲量と表層 COD の経年変化を示す。堺～貝塚海域では、例年 10t ほどの漁獲量しか見られないが、漁獲量が比較的多い 1980 年から 2000 年の表層 COD は低い値を示している。しかし、1995 年頃に漁獲量が激減した以降は、表層水質・底質とも改善が見られず、漁獲量は減少したままである。

一方、関空周辺・泉南海域においては、1990 年代後半以降の表層 COD は改善・悪化を繰り返しており、2000 年以降の漁獲量の大幅な減少に何らかの影響を及ぼしている可能性が考えられる。また前述の底質 COD の挙動とは差異が認められる。このことも漁獲量減少に何らかの影響を及ぼしている可能性がある。

図-9 に海域別のガザミの漁獲量と表層 DO の経年変化を示す。1980 年前半まで表層 DO は横ばいとなっており、漁獲量も安定傾向であった。近年は表層 DO の回復が見られるものの、2004 年のように一時的に急減する時期もあり、ガザミの漁獲量低下に何らかの影響を及ぼしている可能性が考えられる。

図-10、図-11 に赤潮の発生要因の栄養塩とされる硝酸性窒素・リン酸性リン（表層）の経年変化を示す。これを見ると、ガザミの漁獲量が大きく減少した 2000 年以降それぞれ値が増加している様子が見られる。しかし、漁獲量が多い 1980 年代と比べると値そのものは 2000 年以降も変わらないため、本データのみで漁獲量の増減への直接的な影響を結論づけることはできない。

図-12 に海域別のクロダイの漁獲量と表層 COD の経年変化

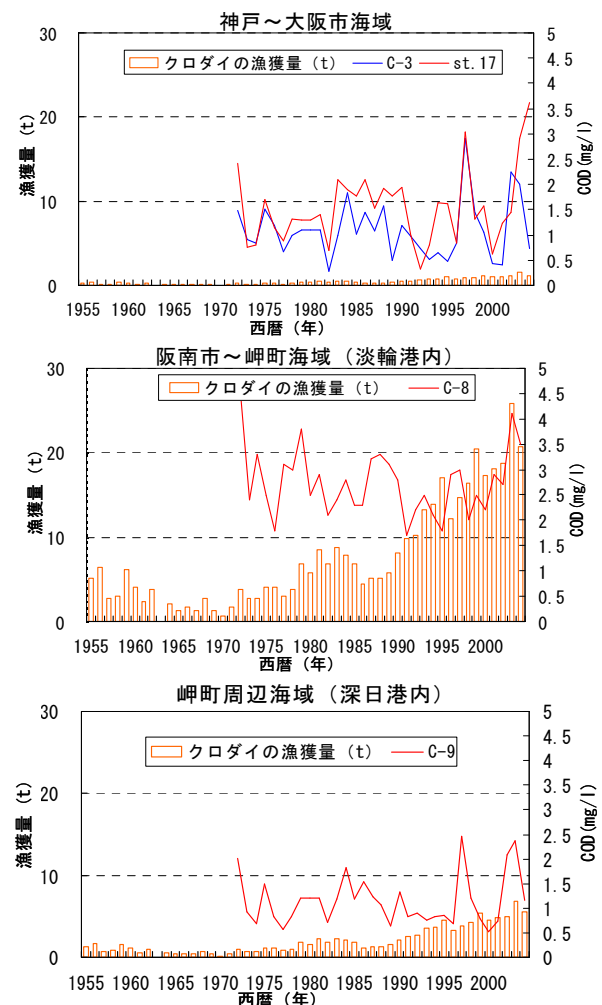


図-12 海域別クロダイの漁獲量と表層 COD の経年変化

年変化を示す。クロダイの漁獲量については、1990 年までは 10 t 前後であったが、それ以降徐々に回復の傾向にあり、2004 年には 20 t 前後まで回復している。一方、表層 COD については、1980 年から 1995 年にかけて増減を繰り返しながらも水質は改善傾向にあったが、1995 年以降は増加傾向に転じている。特に岬町周辺海

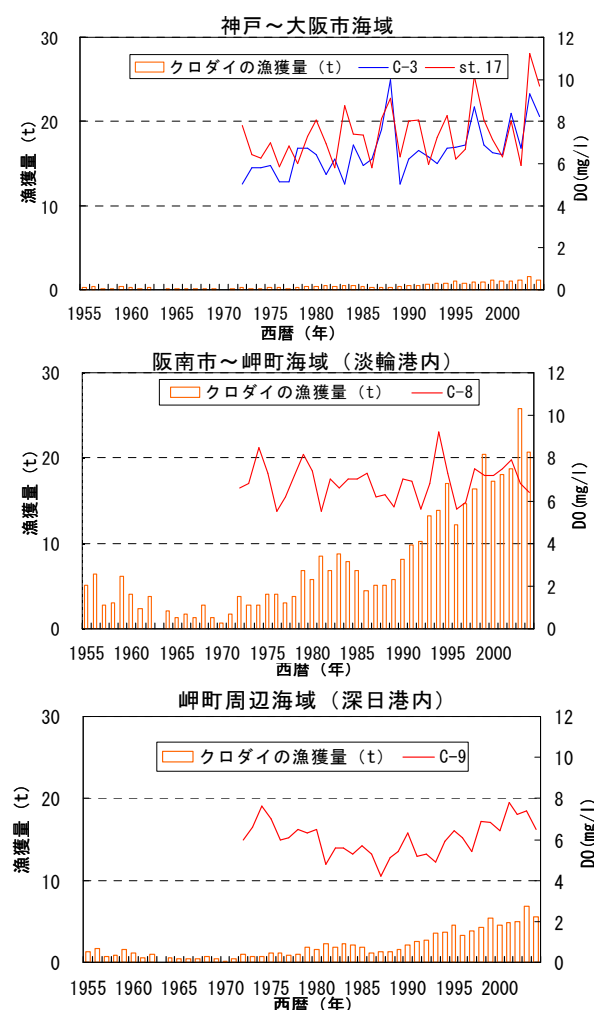


図-13 海域別クロダイの漁獲量と表層 DO の経年変化

域（深日港内）において表層 COD が 1998 年に示した 2.5 mg/L 以外低い値を示した。1990 年以降に漁獲量の増加が見られており、表層 COD が漁獲量に何らかの影響を及ぼしていることが考えられる。一方、表層 COD の増加によって漁獲量が増加している海域もみられ、漁獲量増加にはある程度の有機物流入も必要とも考えられる。なお、阪南市～岬町海域（淡輪港内）での表層 COD が他海域に比べて高い傾向を示すのは、強い閉鎖性地形によるものであると思われる。

図-13 に海域別のクロダイの漁獲量と表層 DO の経年変化を示す。表層 DO に関しては、多少の変動は見られるがどの海域も右上がり傾向であり、クロダイの漁獲量が増大するという傾向が示された。

3. 2 水環境の変化と水産資源変動との相関性

表-1 にガザミの漁獲量と水質・底質データの相関係数を示す。遅れ年数は漁獲年を基準として算出した。

表-1 ガザミの漁獲量と水質・底質データの相関係数

ガザミ					
解析対象 (年)	項目	遅れ年数			
	水質 (表層)	遅れ 0 年	遅れ 1 年	遅れ 2 年	遅れ 3 年
1973～2005	COD	-0.153	-0.083	0.242	-0.037
1973～2005	DO	-0.010	-0.107	0.053	-0.371
1995～2005	NH ₃ -N	0.399	0.436	-0.052	-0.277
1977～1986	NH ₃ -N	-0.376	-0.179	0.295	-0.007
1986～2001	PO ₄ -P	-0.208	0.206	-0.292	-0.119
1997～2005	T-N	0.442	-0.172	-0.645	-0.762
1997～2005	T-P	-0.185	-0.287	-0.407	-0.831
	水質 (底層)				
1981～2005	COD	-0.409	-0.055	-0.102	0.215
1981～2005	DO	0.253	-0.161	-0.114	-0.002
1994～2005	NH ₃ -N	0.331	0.264	0.324	0.161
1986～2001	PO ₄ -P	-0.521	0.480	0.014	-0.570
1997～2005	T-N	-0.747	-0.343	0.161	0.033
1997～2005	T-P	-0.593	-0.054	0.560	-0.099
	底質				
1984～2005	COD	0.053	0.007	-0.176	-0.224
1984～2005	強熱減量	0.327	-0.145	-0.120	0.261

色づけされたカラムは、水質改善に対する相関の最も強いものを示している。なお、相関係数の符号については水質項目によって意味が異なることに注意が必要である。例えば DO の場合は、漁獲量増加と DO 増加の組み合わせで得られた正の相関が高い場合に意味をなす。一方、COD 等その他の水質項目については、漁獲量増加と水質・底質減少の組み合わせによる負の相関が高い場合に意味をなす。

表層においては、COD や DO が遅れ年数が 2, 3 年のときに相関が強い傾向を示した。各 COD の相関係数を見ると、底層や底質に比べ、表層の方が正の相関が強く示された。また底層において、遅れ 0 年の相関が強い傾向にあることから、漁獲量の変化には漁獲された年の水環境が直ちに影響している可能性が高いものと推測される。

表-2 にクロダイの漁獲量と水質・底質データの相関係数を示す。表層水質について見ると、遅れ 0～5 年の

表-2 クロダイの漁獲量と水質・底質データの相関係数

クロダイ												
解析対象（年）	項目	遅れ年数										
	水質（表層）	遅れ 0 年	遅れ 1 年	遅れ 2 年	遅れ 3 年	遅れ 4 年	遅れ 5 年	遅れ 6 年	遅れ 7 年	遅れ 8 年	遅れ 9 年	遅れ 10 年
1973～2005	C O D	0.089	-0.060	-0.296	-0.357	-0.306	-0.269	-0.211	-0.245	-0.410	-0.331	-0.248
1973～2005	D O	0.372	0.221	0.143	0.122	0.120	0.147	0.145	0.234	0.212	0.196	0.171
1995～2005	N H ₃ - N	-0.266	-0.324	-0.408	0.056	0.276	-0.251	-0.198				
1977～1986	N H ₃ - N	-0.043	-0.319	0.298	-0.229	0.513	0.147	-0.030	-0.260	-0.220	-0.451	-0.395
1986～2001	P O ₄ - P	0.209	0.246	0.052	0.023	-0.031	-0.375					
	水質（底層）											
1981～2005	C O D	0.303	0.179	0.220	0.039	0.115	0.148	0.260	0.020	0.063	-0.032	0.134
1981～2005	D O	-0.063	0.223	0.379	0.380	0.271	0.303	0.163	0.242	0.226	0.091	-0.166
	底質											
1984～2005	C O D	-0.203	-0.159	-0.108	-0.217	-0.218	-0.353	-0.371	-0.706	-0.542	-0.538	0.029
1984～2005	強熱減量	-0.072	0.185	0.315	0.176	0.210	0.281	0.371	0.422	0.499	0.266	0.636

相関係数が高い傾向にあり、クロダイと呼ばれる成魚になるまでに 5, 6 年かかることから、仔魚期の水質がクロダイの漁獲に大きく影響していると考えられる。一方、底層水質に対しては相関係数 0.3 以下と表層に比べて相関が低いことから、クロダイの生態には表層水質がより重要であることが示唆された。

4. まとめ

本研究では、大阪湾の環境改善の進捗状況を把握するため、水質変化と水産資源との相関性について調べた。大阪湾では、表層 COD の低下傾向や表層 DO の増加傾向が各海域で伺え、水質は改善傾向にある。クロダイは、漁獲量年と水質・底質の測定年に遅れが見られ、近年の水質改善による漁獲量の増加する可能性が示唆された。一方、ガザミの漁獲量と表層の COD の経年変化を海域別に比較したところ、関空周辺・泉南海域は COD 値が比較的低く、堺～貝塚海域に比べガザミの漁獲量が高くなっていた。また、水質と漁獲高との相関係数を遅れ年数を考慮して求めた結果、ガザミの漁獲量は、産卵できる親ガニになるまでの 1 年間の水環境と密接な関連があることが示唆された。

参考文献

- (1) 大阪府水産試験場：大阪府水産試験場事業報告，1973～。
- (2) 大阪府：公共用水域水質等データベース
http://www.epcc.pref.osaka.jp/center_etc/water/data_bas/index.html
- (3) 大阪湾環境データベース：
<http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/>
- (4) 上嶋英機・田辺弘道・宝田盛康・山崎宗弘：大阪湾で構想されている大規模埋立による流動環境変化に関する研究，海岸工学論文集，第 45 巻，1998。
- (5) 城久：大阪湾に発生する赤潮の特性，生活衛生，29，pp.128～141，1985。
- (6) 農林水産省：海面漁業生産統計調査
http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html
- (7) 有山啓之：大阪湾におけるガザミの生態と資源培養に関する研究，大阪府水産試験場研究報告 第 12 号，99P.，2000。
- (8) 日本の旬魚のお話：
<http://www.maruha-shinko.co.jp/uodas/syun/89-kurodai.html>
- (9) 中野晋・片岡孝一・田所真路：徳島沿岸におけるアカウミガメ上陸頭数の減少要因の検討，環境システム研究論文集，Vol.30，pp.437-443，2002。

コウノトリが生息する豊岡盆地の環境変化

瀬崎 瑛* 宇野 宏司**

Environment change of Toyooka basin as stork sanctuary

Akira SEZAKI* Kohji UNO**

ABSTRACT

The number of the stork was continuing to decrease before World War II because of overhunting, felling of pine groves, use of agricultural chemicals, and the disappearance of swamps caused by river improvement and so on. And, at last, the stork disappeared from the skies of Japan in 1971 amid the rapid economic growth. When the ibis was considered to have been exterminated in Japan, six young stork were presented by Russia, and they arrived in Toyooka in Hyogo from Khabarovsk, in 1985. A long-awaited chick was born in 1989, 25 years after the start of artificial breeding. This study aims at analyzing the changes of land usage by using the water quality data of the public water area and aerial photographs in order to follow the environmental transformation of the Toyooka basin which storks inhabit. The study of water quality data at seven measurement points of public water areas of the Maruyama River valley indicates that there is correlativity between water quality and the numbers of ibises.

Keywords : stork, water quality data of the public water area, aerial photographs, Maruyama River valley

1. はじめに

兵庫県の豊岡盆地は水田の広がる豊かな穀倉地帯であり、その中央部を穏やかに蛇行するように円山川が流れている。中流域から河口まで高低差のあまりないこの川には流域にカシ原や河畔林があり、カモ類をはじめ多くの野鳥が集まる。かつて豊岡盆地に多数生息していたコウノトリ (*Ciconia boyciana*) は、明治期の乱獲や第二次世界大戦中の松林の伐採、そして戦後の環境破壊、とりわけ農薬の使用と圃場整備や河川改修による湿地の消滅などにより減少を続け、1971年にその姿を消した。その後、1985年にロシアのハバロフスクから6羽の幼鳥が贈られ、当時兵庫県から飼育の委託を受けていた豊岡市の飼育員がそれらを大切に育て、人工飼育の開始から実に25年目の1985年春、待望のひなが誕生した。⁽¹⁾

コウノトリが野生として暮らせる場所には、コウノトリの餌となるドジョウやフナなど、多種多様の生物

が存在するはずである。つまり、コウノトリが野に帰るには、豊かな自然環境の再生が不可欠である。

そこで、本研究ではコウノトリが生息する豊岡盆地の環境変化を捉えるために、公共用水域水質データをはじめとする種々の環境データならびに航空写真を用いた土地利用の変遷について分析した。

2. 調査概要

2.1 公共用水域水質データ⁽²⁾の概要 円山川は豊岡盆地の中心部を流れる1級河川で、その流域は豊岡市、養父市、朝来市の3市にまたがっている。このうち国の直轄管理区間は豊岡市のみに含まれる。

円山川の水質がどのように変化してきたかを把握するために、コウノトリが姿を消した1971年から、放鳥の翌年(2006年)にかけての公共用水域水質データの整理を行った。

図-1に豊岡市、養父市、朝来市の位置図、図-2～図-4に円山川流域における公共用水域水質測定点を

* 神戸市立工業高等専門学校 専攻科 都市工学専攻

** 神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 准教授

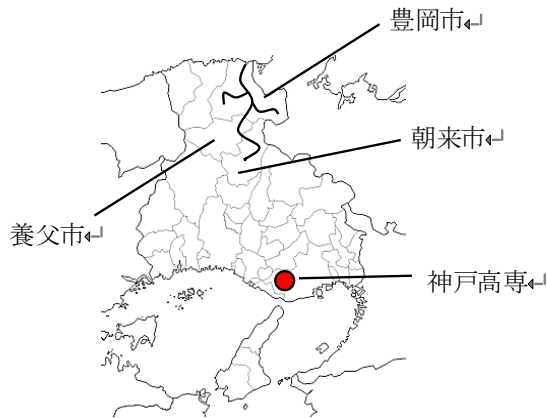


図-1 円山川流域図

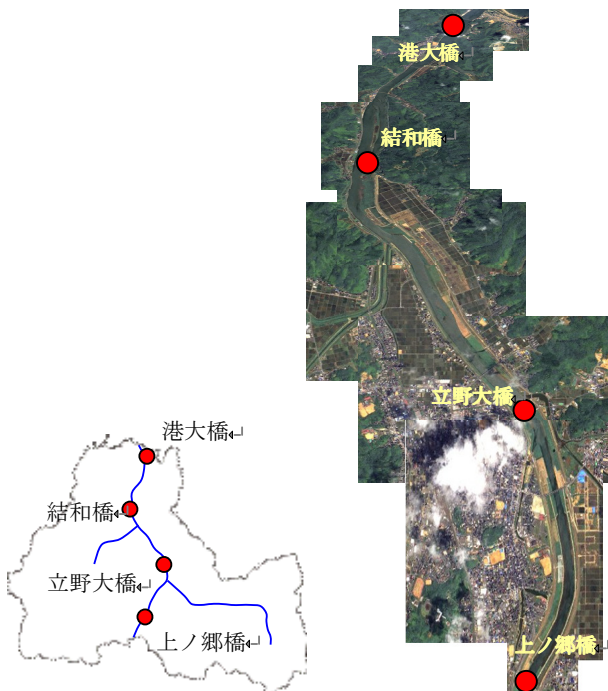


図-2 豊岡市の調査地点

示す。円山川には7つの水質測定点があり、上流に位置する上小田橋、上ノ郷橋、多々良木橋、玉置橋と下流に位置する立野大橋、結和橋、港大橋からなる。このうち上ノ郷橋と立野大橋は環境基準点に指定されている。

2.2 使用した航空写真⁽³⁾の概要 本研究では、国土地理院が保有する、航空写真を用いて豊岡盆地の土地利用形態変化を分析する。

ここでは、過去のコウノトリの生息状況と航空写真の撮影年を関連させ、コウノトリと人間が共生できていた年（1947年）、コウノトリを捕獲して人工飼育を始めた年（1964年）、コウノトリが日本の空から姿を消した年（1971年）、コウノトリ个体数が増え始めた

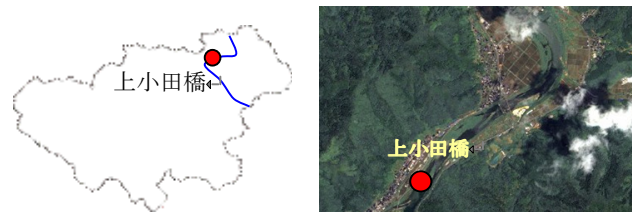


図-3 養父市の調査地点

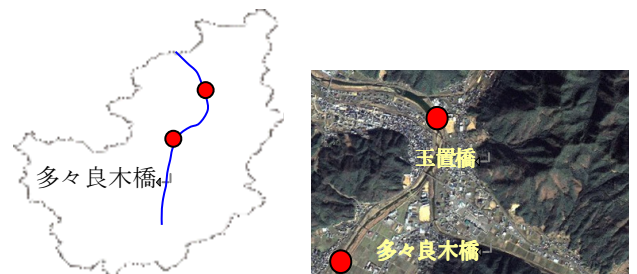


図-4 朝来市の調査地点

年（2006年）の4つの年に着目し、当時の地勢を国土地理院が保有する航空写真より捉えた。

2.3 コウノトリ飛来範囲・距離算出 豊岡市の飼育下に置かれているコウノトリの飛来範囲とその移動距離を調べるにあたって、兵庫県立コウノトリの郷公園のホームページに掲載されている4羽のコウノトリのデータ情報⁽⁴⁾を用い、それぞれの飛来範囲とその移動距離を調べた。

飛来距離については、兵庫県立コウノトリの郷公園公式ホームページで公開されているコウノトリの飛来情報をもとに、飛来地の庁舎の座標値を調べ、これを用いて以下の式で算出した。

$$\text{飛来距離 } d(\text{km}) = \sqrt{((N' - N) \times 1852)^2 + ((E' - E) \times 1509)^2} / 1000 \quad (1)$$

ここに、 d :コウノトリの飛来距離、 N :出発地点の緯度、 N' :飛来地点の緯度、 E :出発地点の経度、 E' :飛来地点の経度である。

3. 調査結果

3.1 円山川流域における水質の経年変化⁽⁵⁾ 円山川流域における水質の経年変化を分析するにあたり、ここでは公共用水域の水質汚濁に係る環境基準のうち、生活環境の保全に関する環境基準の定められている生活環境項目のデータを取り扱うこととする。

図-5～図-13にコウノトリ个体数の推移⁽⁶⁾とBOD、COD、DO、SS、pH、大腸菌群数、全窒素、全磷の過去の経年変化を示す。

全磷（図-5）・全窒素（図-6）は近年1999年から測定が始められた項目であり、他の生活環境項目と比較

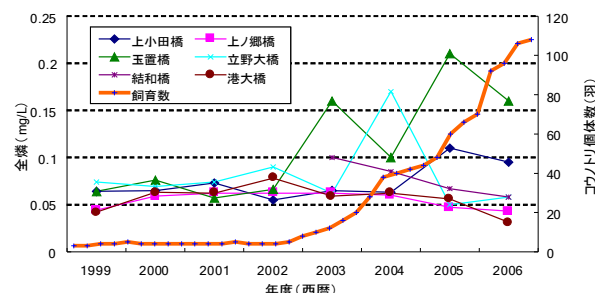


図-5 全燐の経年変化

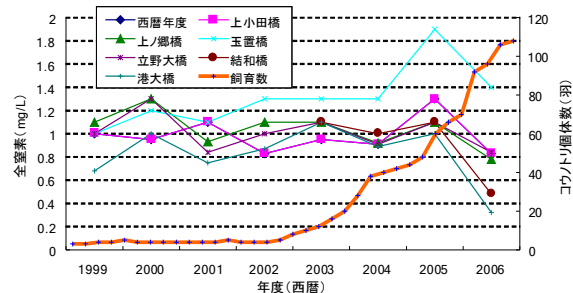


図-6 全窒素の経年変化

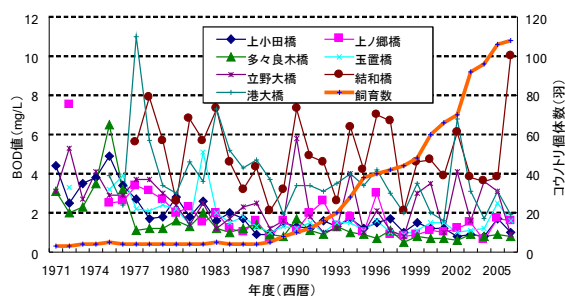


図-7 BOD の経年変化

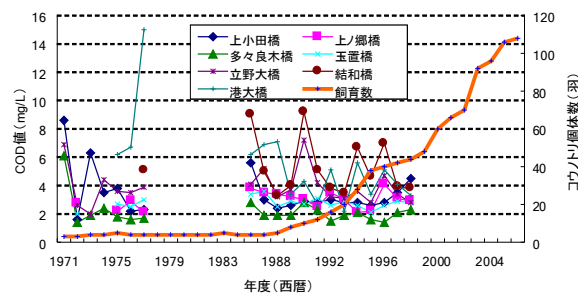


図-8 DO の経年変化

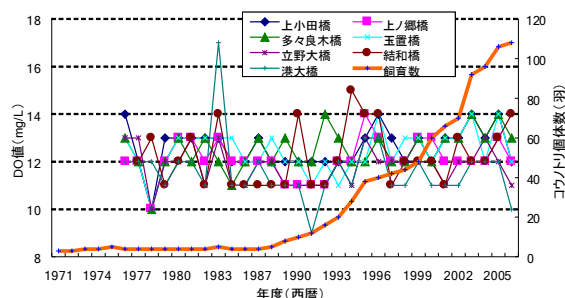


図-9 COD の経年変化

してデータの蓄積がないことに留意する必要がある。

全燐に関しては、最大値 0.21 mg/L、最小値 0.031 mg/L、平均値 0.075 mg/L が得られており、経年的には横ばいである。環境基準⁷⁾は 1.0 mg/L であり、これと比較すると、全体的に基準を満たしている結果となっている。グラフに示されている値はすべて年間最大値であるため、通常時の各測定点での全燐値はこれよりも小さいものと思われる。

全窒素に関しては、最大値 1.9 mg/L、最小値 0.32 mg/L、平均値 0.07 mg/L が得られており、経年的には全燐と同様に横ばいにある。環境基準は 1.0 mg/L であり、これと照らし合わせると、こちらは全体的に基準を満たさない値が検出されている。最上流地点の玉置橋に関しては過去 8 年全ての年で環境基準値を超過している。

水中での有機物量を示す指標である BOD (図-7) に関しては、最大値 7.9 mg/L、最小値 0.5 mg/L、平均値 2.5 mg/L が得られた。経年的には 1978 年から 1998 年にかけては概ね減少しており、水質は改善傾向にあり、環

境基準⁸⁾は 10 mg/L であり、これと比較すると、基準を満たしているといえる。BOD が比較的高い結和橋と港大橋の 2 地点は円山川の下流に位置し、図-2 に示すように他の測定点に比べると都市化が進んでいる。また、コウノトリの郷公園に最も近い立野大橋での BOD は下流の 2 地点と比較しても低い値となっており、特にコウノトリが放鳥された 2005 年以降減少傾向にある。一方、コウノトリの個体数は増加していることから、こうした水質の改善がコウノトリの生息にも良い影響を及ぼしているのではないかと考えられた。

BOD と同じく水中での有機物量を示す指標である COD (図-9) に関しては、最大値 9.2 mg/L、最小値 1.4 mg/L、平均値 3.6 mg/L が得られており、経年的には水質が改善傾向にあるといえる。環境基準は 8.0 mg/L であり、これと照らし合わせると、概ね基準を満たしている。本指標についても河川上流域で低く、都市化の進んだ下流域で高くなる傾向がうかがえた。

DO と BOD、COD との関係を見ると、中には当てはまらない箇所もあるが、DO が減少する一方で、BOD、COD が増加するという傾向がうかがえる。これは、栄養塩増加に伴うプランクトンの活性化により酸素が消費された結果であると考えられる。

大腸菌群数 (次頁図-10) に関しては、最大値 2,400 MPN/100mL、最小値 13 MPN/100mL、平均値 321 MPN/100mL が得られており、経年的には横ばいにある。環境基準は 5,000 MPN/100mL であり、これと比較すると、基準を満たしているといえる。水中から大腸菌が検出されるということは、その水が人または動

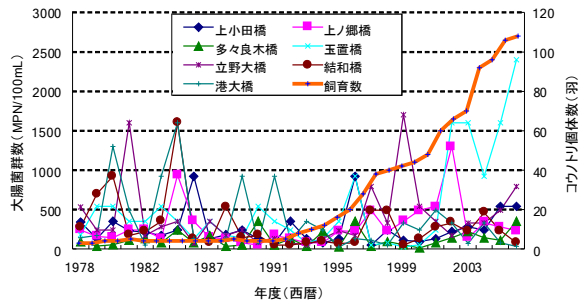


図-10 大腸菌群数の経年変化

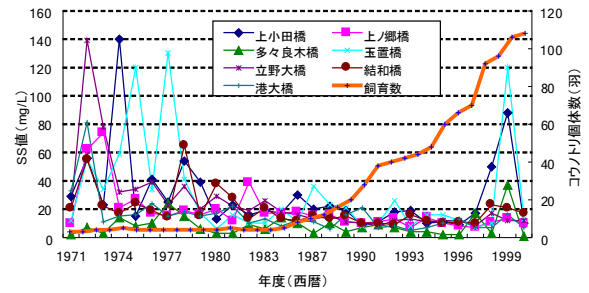


図-11 SSの経年変化

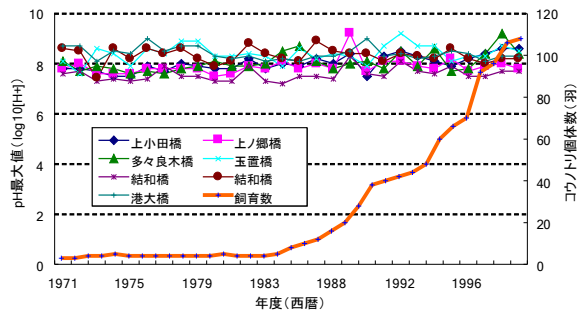


図-12 pH最大値の経年変化

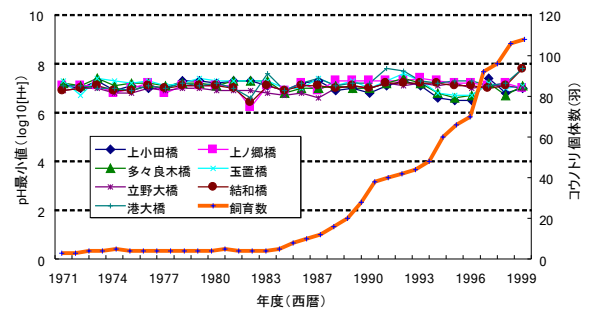


図-13 pH最小値の経年変化

物の排泄物で汚染されている可能性を意味し、赤痢菌などの他の病原菌による汚染が疑われるが、円山川水域においては、そのような汚染に至っておらず、良好な水質環境下にあると判断できる。

浮遊物量を示す指標であるSS(図-11)に関しては、最大値 140 mg/L、最小値 1.0 mg/L、平均値 21 mg/L が得られており、経年的には改善傾向にある。環境基準は 100 mg/L であるが、これと比較すると、概ね基準を満たしているといえる。しかし基準を満たしていないSSが検出された年が、多々良木橋を除く各測定点に数年見られた。水の濁りの原因となる浮遊物は、低濃度では影響は少ないが、高濃度では魚の呼吸障害、水中植物の光合成妨害等の影響が考えられる。また、沈殿物として底質への影響があり、SSが高い場合にはコウノトリの餌環境を壊してしまう恐れがある。

水の酸・アルカリ度を示す指標である pH (図-12, 図-13) については、その年間最大値として、最大値 9.2、最小値 7.2、平均値 8.0 が得られており、経年的には横ばいである。環境基準は 8.5 であるが、これと比較すると、概ね基準を満たしているといえる。円山川流域の pH は非常に高く、いずれも弱アルカリ性の値を示していた。

一方、pH の年間最小値に関しては、最大値 7.8、最小値 6.5、平均値 7.1 が得られているが、経年的に見ると、横ばいにある。環境基準と比較すると、全測定点において期間を通じて基準を満たしているといえる。pH 値としてはコウノトリにとって餌資源となる魚が



写真-1 1947 年



写真-2 1964 年



写真-3 1971 年



写真-4 2006 年

不自由なく生息できる中性に近い水質に保たれていることが望まれるが、円山川流域はほぼそれを満たしている環境となっている。

3.2 航空写真判断による豊岡盆地土地利用形態変化

写真-1～写真-4 に示す 4 枚の航空写真は、豊岡盆地の三開山付近上空からそれぞれ 1947 年、1964 年、1971 年、2006 年に撮影されたものである。

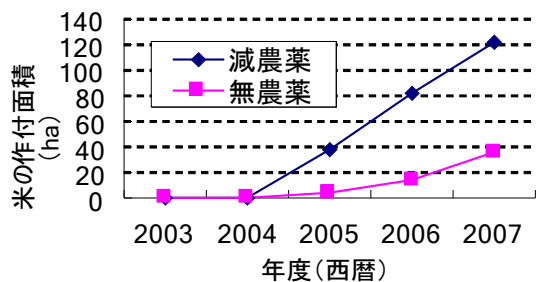


図-14 米の作付面積の推移

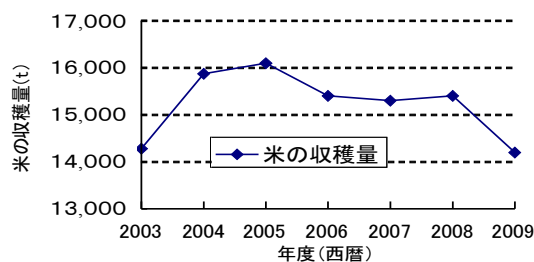


図-15 米の収穫量

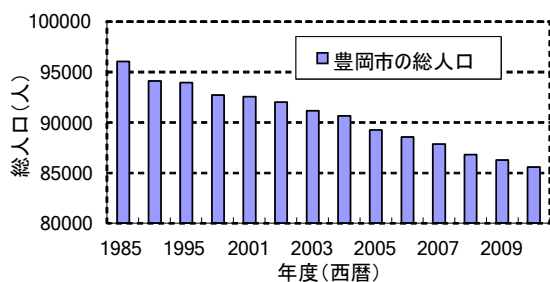


図-16 豊岡市総人口の経年変化

1947年当時、1964年、1971年、2006年の写真と比較して卓越して水田が多いことがわかる。1964年当時は、1947年の写真と比較すると大幅に土地利用形態が変化したとは言いがたいが、若干、水田が減少しているように見える。また、1971年の写真からは1964年当時より明らかに都市化が進んでいることがわかる。また、2006年の写真からは、1947年、1964年に比べると多少、都市化された部分が残っているように思われるが、1971年の土地利用形態と比較すると大幅な自然の回復傾向が見られる。

次にコウノトリ生息環境の維持・管理について考察するために、図-14に豊岡市の米の作付面積の推移、図-15に豊岡市の米の収穫量を、図-16に豊岡市の総人口の経年変化⁹⁾を示す。図-14、図-15より、2003年から2007年にかけて無農薬、減農薬での米の作付面積は増加しているにもかかわらず、米の収穫量は減少しているが、これは図-16に示す人口減少に伴い、稲作に従事する人が減ったためと思われる。人間が農業という

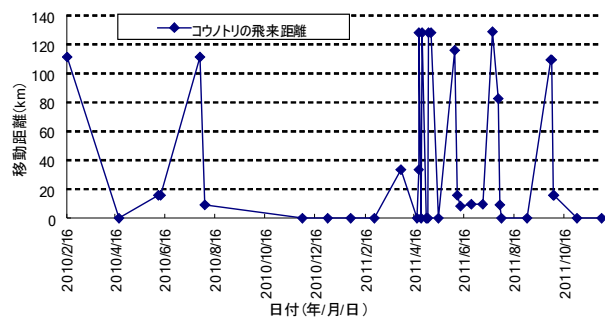


図-17 J0006の飛来距離

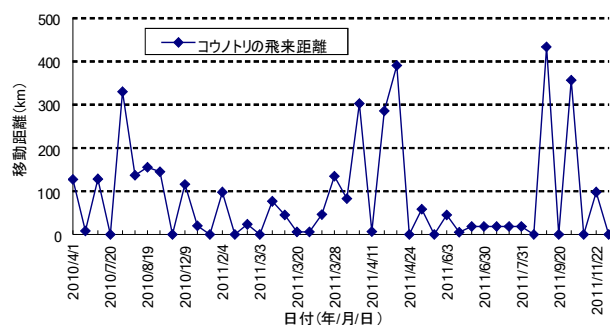


図-18 J0009の飛来距離

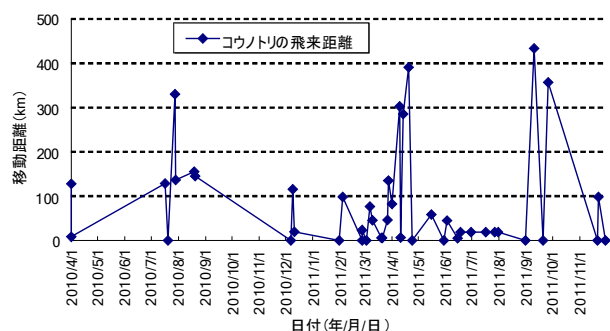


図-19 J0016の飛来距離

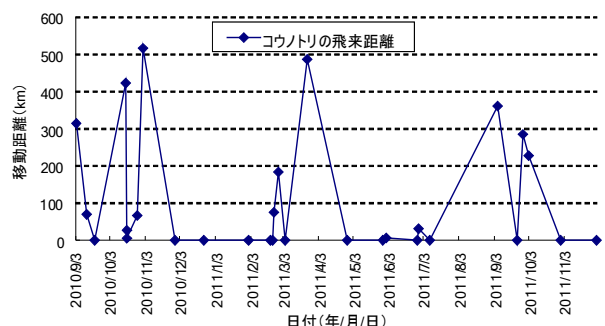


図-20 J0022の飛来距離

営みを通して農薬の使用を抑えるなどといった、ある程度手を加えた水田という場に水生昆虫などの様々な

生物が集まり、そこにコウノトリが餌を求めて舞い降りてくるため、コウノトリの生息環境を創るためには餌場だけでなく、それらを管理する里地の接続も必要であると思われる。

3.3 コウノトリの飛来範囲とその飛来距離 本研究では、コウノトリが一日に飛来するおよその距離を把握するために、兵庫県立コウノトリの郷公園の飼育下にある、福田地区人工巣塔から2008年6月22日に巣立ったJ0006（メス）、戸島地区人工巣塔から2008年7月2日に巣立ったJ0009（メス）、保護増殖センター電柱上から2009年6月29日に巣立ったJ0016（メス）、戸島地区人工巣塔から2010年6月11日に巣立ったJ0022（メス）の4羽のコウノトリの2010年～2011年までの目撃情報を調べた。これらの目撃情報の中には岡山県倉敷市や山口県光市から寄せられたものもある。これらの情報をもとに作成した各個体別の飛来距離図を図-17～図-20に示す。

飛来することに要した日数と移動距離との関連性についてみると、J0006が2011年4月24日～25日の1日間で128 km、J0009が2011年4月11日～4月14日の3日間で279 km、J0022が2010年10月26日～10月31日の5日間で450 kmとなっており、日平均で100 km程度の移動をしている。一方、J0016については2010年8月3日～8月4日の1日間で191 kmもの移動が確認されている。各グラフの横軸に示される日付が長らく空いている場合はその間に各個体がどのような行動をとっていたか不明であるが、4個体の1日に移動した最大距離を考慮すると、コウノトリ1羽が1日に飛来することが可能な距離として200 km以内がひとつの目安になる。つまり、コウノトリが広範囲にわたって生息できる環境を創るためには、コウノトリにとっての餌場となる場所を整備するなどして、現在コウノトリの主な生息地となっている豊岡盆地を中心に、コウノトリが一日に移動しうる半径約200 km圏内において生息地のネットワークの拡充を図っていくことが重要である。

4. まとめ

本研究の結果から、公共用水域水質データの値より、豊岡盆地の環境は項目ごとにみると改善傾向にあることがうかがえた。また、豊岡盆地の土地利用形態の変化という観点からみると、コウノトリが日本の空から姿を消した1971年以降大幅な自然回復傾向がみられるにもかかわらず、豊岡市における米の収穫量、総人口ともに減少傾向にある。このことから、現在コウノトリの野生復帰に向けて様々なプロジェクトが進められているが、水質の観点からは、コウノトリの生息環

境を創るためには餌場の確保のみならず、それらを管理する里地の接続も必要である。

参考文献

- (1) 鷺谷いづみ（編）コウノトリの贈り物，株式会社地人館，pp.43-44，2007.
- (2) 環境省：公共用水域/水質調査データ
http://www2.env.go.jp/water/mizu-site/mizu/kousui/kousui_top.asp
- (3) 国土交通省国土地理院：国土変遷アーカイブ空中写真閲覧
<http://archive.gsi.go.jp/airphoto/search.html>
- (4) 兵庫県立コウノトリの郷公園
http://www.stork.u-hyogo.ac.jp/how_ws/index.php
- (5) 国立環境研究所：公共用水域水質データ測定項目
http://www.nies.go.jp/igreen/explain/water/sub_w.html
- (6) 野生復帰への取り組み/コウノトリファンクラブ：コウノトリ羽数の推移
<http://www.tajima-portal.com/kounotori/yaseifukki/index.html>
- (7) 環境省：ダイオキシン類環境基準
<http://www.env.go.jp/kijun/dioxin.html>
- (8) おおさかの環境ホームページ：環境基準値一覧表
http://www.epcc.pref.osaka.jp/center_etc/water/etc/kijunchi.html
- (9) 豊岡市：豊岡市の世帯および人口の推移
<http://www.city.toyooka.lg.jp/www/contents/1115988120609/index.html>

東日本大震災における関西広域連合による広域支援活動

宇野宏司*

Human and Material Support by Union of Kansai Government after the Great East Japan Earthquake

Kohji UNO

ABSTRACT

In this paper, human and material support by Union of Kansai government after the Great East Japan Earthquake was examined. Just after the occurrence of the earthquake, supporters focused on the direct assistance for the disaster-stricken area and sent the advance team for volunteer. However, several months later, the mental healthcare became great need for the victims. The support for the rehabilitation and re-construction of town has been also important topics. On the other hand, material support was finished within several months after the earthquake, because infrastructures were revived and the consumption at local site should be promoted. It is important that not only to keep the human and material resource for the widespread disaster but also to transport surely them.

Keywords : Union of Kansai governments, the Great East Japan Earthquake, human and material support

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、岩手・宮城・福島県下に甚大な被害をもたらした。津波により面的な被害を被ったことや、庁舎自体が被災したことから、各方面からの支援を余儀なくされた。この大震災以降、関西広域連合（図-1、大阪府、兵庫県、京都府、滋賀県、和歌山県、鳥取県、徳島県の2府5県）は被災地への様々な人的・物的支援を行っているが、同連合にとって2010年12月の発足以来はじめての広域支援の実践であった。今回の東北地方の被災地支援に当たっては、1995年1月の阪神淡路大震災での教訓を活かした活動が展開された。今回の取り組みはきたる東南海・南海地震に向けた広域支援策のあり方を考える上で重要な知見を含んでいるものと思われる。

本報告では、まず関西広域連合の概要と阪神淡路大震災で関西の自治体が得た教訓についてまとめた後、今回の東日本大震災における関西広域連合による人的・物的支援の内容の推移について報告する。

2. 関西広域連合と阪神淡路大震災の教訓



図-1 関西広域連合

2.1 関西広域連合について 次頁表-1 に関西広域連合の概要を示す。2010年12月1日、「関西から新時代をつくる」を合言葉に、志を同じくする関西の2府5県が結集し、関西広域連合が設立された。複数府県により設立される行政機構としては、全国初の組織であり、府県域を越える広域課題に取り組むことはもとよ

* 都市工学科 准教授

表-1 関西広域連合の概要

項目	内容
設立年月日	2010年12月1日
構成団体	滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、和歌山県、鳥取県、徳島県（設立時）
実施事務	広域的な行政課題に関する事務のうち、府県よりも広域の行政体が担うべき事務 ・広域防災、広域観光・文化振興、広域産業振興、広域医療、広域環境保全、資格試験・免許等、広域職員研修の7分野の事務 ・国の出先機関からの事務・権限の移譲 ・将来的には、7分野の事務の拡充や新たな分野の事務（港湾・国道・河川の一体的な計画・整備・管理等も含む）

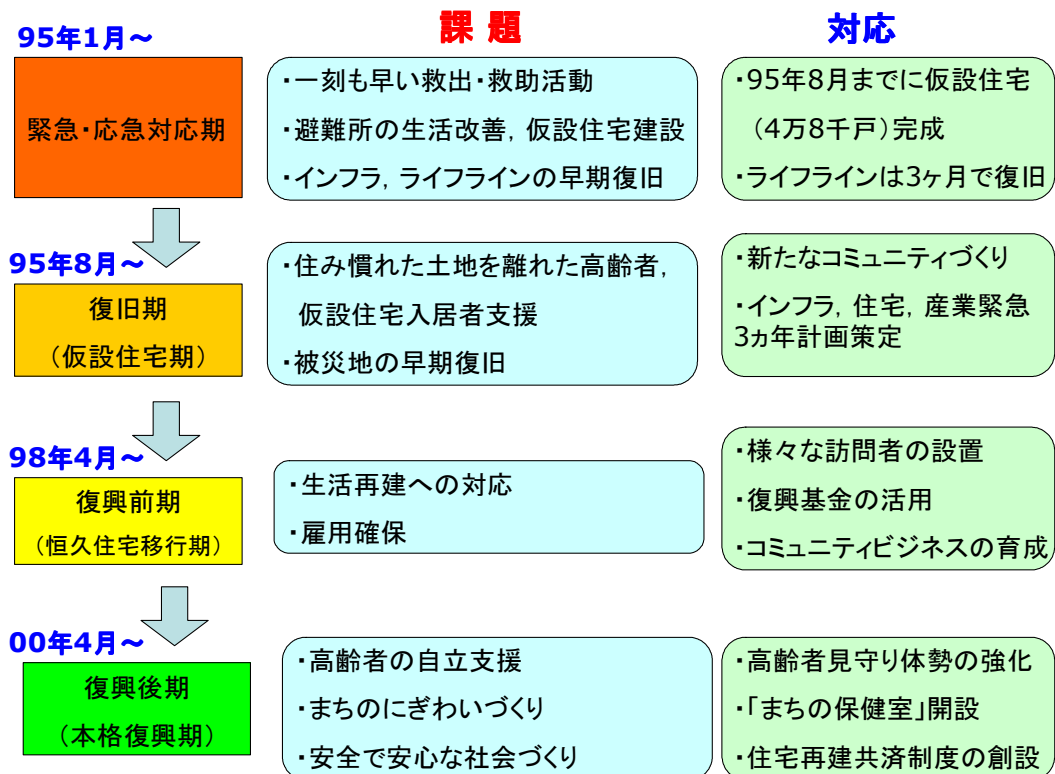


図-2 阪神淡路大震災の復旧・復興過程における課題と対応

り、地方分権の突破口を開き、我が国を多極分散型の構造に転換することを目指している。

発足以来、防災（兵庫県）、観光・文化振興（京都府、一部は鳥取県）、産業振興（大阪府）、医療（徳島県）、環境保全（滋賀県）、資格試験・免許等（現時点で不特定）、職員研修（和歌山県）の7分野において広域事務を進めているが、「成長する広域連合」として、将来的には港湾の一体的な管理や国道・河川の一体的な計画・整備・管理等に拡大していくことも視野に入れている。

このうち、兵庫県が担当する広域防災では、近い将来に起こるとされている東南海・南海地震をはじめ、大災害に備えた関西全域の防災力の向上のために、関西がとるべき対応方針や具体的な連携体制と、その体

制の構築のために関西広域連合が実施する事務を盛り込んだ「関西広域防災計画」を定め、これに基づいて業務を実施することとなっている⁽¹⁾。具体的には、関西広域応援実施要綱の作成・運用（災害発生時の応援体制の強化）、近畿府県合同防災訓練の実施、防災分野の人材育成、救援物資の備蓄等の検討・実施、新型インフルエンザ等の感染症のまん延その他の緊急事態における構成団体間の連携・調整を行うこととしている。

2.2 阪神淡路大震災の教訓

1995年1月の阪神淡路大震災で、兵庫県は死者行方不明者 6405 人、住家被害 538,767 棟（うち全壊 104,004 棟、半壊 136,952 棟）と甚大な被害を受けた⁽²⁾。当時の被災体験とその後の復旧・復興の実績から、

表-2 関西広域連合による対応状況

日 付	項 目
2011年3月11日	東日本大震災発生
3月13日	緊急の広域連合委員会開催 「支援対策に係る緊急声明」(第1次)を発表 ・被災地対策 ・支援物資等の提供 ・応援要員の派遣 ・避難生活等の受け入れ ◆カウンターパート式による応援担当府県を決定 ◆現地連絡所の開設を決定
3月29日	広域連合委員会を開催 「支援対策に係る緊急声明」(第2次)を発表 ・被災県・市町村への応援要員の派遣 ・阪神・淡路大震災の経験や教訓を生かした助言・指導 ・被災者受入態勢の充実 「東北地方太平洋沖地震に関する緊急提案」(第1次)を発表 「被災地域の産業活動支援に関するメッセージ」を発表
4月28日	広域連合委員会を開催 「被災地域の産業活動支援に関するメッセージ」を発表
2012年3月11日	「東日本大震災から1年を経過してー被災地へのメッセージー」を発表(兵庫県) ・住民主体のまちづくり、コミュニティ再生への支援 ・被災者のこころの復興への支援 ・兵庫県内に避難されている方々への支援

関西広域連合における役割分担で「広域防災」を担うに至ったことは容易に推察できる。

阪神淡路大震災の復旧・復興過程における課題と対応を図-2に示す。この図より、大規模災害からの復旧・復興に際して、以下の4つのポイントを挙げることができる。

まずは、課題の変化に沿った対応の実践である。被災地では時間の経過とともに現場の課題が刻々と変化する。そのため、課題の変化に応じた柔軟な対応が必要である。

2つ目のポイントは、復興基金による柔軟かつ現場のニーズに応じた対応である。ここでは、被災者のニーズを把握し、対策を生み出すしくみづくりとそれを支える復興基金による柔軟で現場の実情に応じたきめ細かい被災者生活対策が不可欠である。

3つ目のポイントは、コミュニティ対策である。阪神淡路大震災では「震災関連死」が話題となったが、仮設住宅での引きこもりや孤独死を防ぐためのコミュニティの立ち上げや運営支援が必要である。

4つ目のポイントは、こころのケアである。大規模災害からの復旧・復興には非常に長い時間を要する。がれきの除去や仮設住宅といった目に見える形での復旧・復興とは違い、被災者やご遺族の精神的な立ち直りには個人差があり時間を要する。そのため仮設住宅や教育現場での長期的なケアが必要となってくる。

阪神淡路大震災で得られたこれらの教訓は、今回の東日本大震災の支援にも活かされた。その特徴の最たるものが「カウンターパート方式」と呼ばれる現場対応型の支援である。これは、被災県ごとに支援担当府県を割り当て現地支援本部を開設するもので、前述の4つのポイントを満たす運営形態である。今回は、兵庫県・鳥取県・徳島県が宮城県を、大阪府と和歌山県が岩手県を、滋賀県と京都府が福島県をそれぞれ担当することになった。これにより、被災地のニーズをいち早く把握し、迅速かつ機動的で継続性をもった責任ある支援を実現することができた。

3. 関西広域連合による広域支援活動

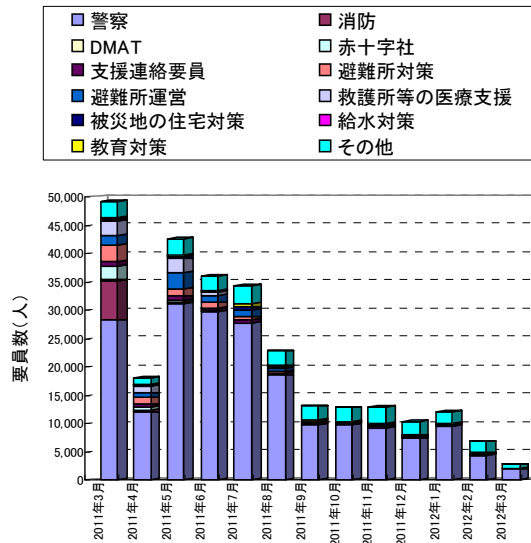


図-3 関西広域連合による人的支援の内容と推移

表-3 警察関係者の派遣状況

警察	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
刑事部隊													
警備部隊													
交通部隊													
地域部隊													
航空部隊													
生活安全部隊(パトカー部隊)													
車両部隊													
福島県災害本部要員													
健康管理チーム													
機動隊													
機能別部隊													
警護部隊													
機動捜査班													

■ 100以上 ■ 10～99 ■ 1～9 □ 変化なし

3.1 関西広域連合による対応状況 東日本大震災の被災地支援は、関西広域連合にとっても発足以降初めての広域支援となった。表-2 に東日本大震災以降の関西広域連合による対応状況の時系列変化を示す。関西各自治体での被害はほぼ皆無であったことから、比較的早い段階で支援活動に向けての動きが見られる。震災発生から2日後には緊急の広域連合委員会が開催され、「支援対策に係る緊急声明」(第1次)が発表され、今後の支援対策の方針が定められた。その内容は、「被災地対策」、「支援物資等の提供」、「応援要員の派遣」、「避難者生活等の受け入れ」となっている。また、前述したカウンターパート方式の採択についても、この委員会です承された。震災から1年後の2012年3月には広域防災担当県の兵庫県から、被災地へのメッセージが発せられた。その内容は、「住民主体のまちづくり、コミュニティ再生への支援」「被災者のこころの復興への支援」「兵庫県内に非難されている方々への支援」であり、阪神淡路大震災での課題を踏まえたものとなって

表-4 避難所への人的支援状況

避難所対策	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
歯科医師													
医師													
公衆衛生医師													
保健師													
保健師支援													
薬剤師													
看護師													
放射線技師													
臨床検査技師													
事務職													
調整員													
獣医師													
管理栄養士													
理学療法士													
作業療法士													
医師(こころのケア)													
精神科医(こころのケア)													
看護師(こころのケア)													
精神保健福祉士(こころのケア)													
ケースワーカー(こころのケア)													
事務職(こころのケア)													
連絡調整員(こころのケア)													
助産師(こころのケア)													
臨床心理士(こころのケア)													
作業療法士(こころのケア)													
保健師(こころのケア)													
薬剤師(こころのケア)													
児童心理司(こころのケア)													

■ 100以上 ■ 10～99 ■ 1～9 □ 変化なし

いる。

3.2 関西広域連合による東北地方被災地への人的・物的支援内容について

図-3 に関西広域連合による人的支援の内容とその推移を示す。本図以下の図表は関西広域連合広域防災局広域企画課(兵庫県企画県民部防災企画局防災計画課広域企画室)より毎月公表される記者発表資料⁽³⁾に記載されているのべ人数から月ごとの増員分を算出することによって作成した。

派遣要員のピークは震災直後の2011年3月であり、のべ5万人近くに達するが、1年後の2012年3月には3,000人以下にまで下がっている。なお、2011年4月に一時的に要員数が減少しているが、混乱期で精細な集計ができなかったものと考えられる。

最も派遣されたのは警察関係者であり、全体に占める割合は時間の経過とともに増加している。その内訳についてみると、表-3に示すように刑事・警備・交通・地域の各部隊でほぼ1年にわたって100人以上もの人員が派遣されている。被災地沿岸部では津波により職員や警察車両の多くを流出したため、治安維持や安全確保のための継続的な支援が広域的かつ長期的に必要とされたものと思われる。

また、カウンターパートとして現地のニーズ把握を行うための現地支援要員の派遣も年間を通じて継続的

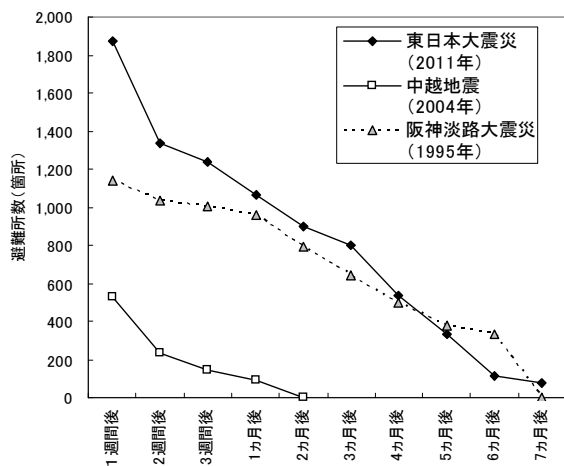


図-4 避難所開設数の推移 (4)

表-6 被災地住宅対策としての人的支援状況

被災地住宅対策	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
応急仮設住宅建設の支援													
家屋被害調査													
災害廃棄物処理の助言													
被災住宅地危険度判定士の派遣													
民間住宅借上事業事務支援													
災害公営住宅整備業務													

■ 100以上 ■ 10～99 ■ 1～9 □ 変化なし

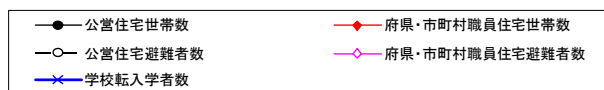


図-5 避難者受け入れの実績数

に行われていた（2011年3月；939人→2012年3月；669人）。

表-4に避難所への人的支援状況を示す。事務職を除いては、発災から7ヶ月後の2011年10月までに一応の区切りを見せている。これは、図-4に示すように公的な避難所（公民館や学校）からの引き上げがほぼ完了する時期と概ね対応している。避難所に派遣された人員の業種は多岐にわたり、その多くが被災者の「心のケア」を対象としていることも特徴として挙げられる。

表-5に表-4で「その他」として派遣された職員の項目別要員数の推移を示す。発災直後の2011年3月から100名以上の大規模な要員が投入されたのは、物資集積場所の担当要員の確保やボランティア先遣隊、被災

表-5 人的支援「その他」の項目別人数の推移

項目	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
し尿処理支援													
土木施設の復旧対策													
農林水産施設の復旧													
県有建築物の復旧													
上下水道施設の状況調査・復旧支援													
文化財レスキュー・文化財の復旧支援													
自然公園施設の復旧支援													
復興都市計画の決定に関する支援													
物資集積所担当要員等													
物資輸送(職員災害応援隊)													
ボランティア先遣隊													
被災市町への直接支援													
ボランティアに係る現地調整要員													
ボランティアインフォメーションセンター運営要員													
介護支援													
保健師(仮設住宅の訪問等)													
薬剤師(薬局等の体制整備等に係る業務)													
被災者のこころのケア													
児童福祉等関係職員													
手話通訳派遣													
災害救助事務支援													
都市計画事務支援													
病院・福祉施設への入院・入所が必要な方の県内受け入れに関するコーディネーター													
歯科医療													
監察医													
遺体身元確認支援(歯科医師派遣)													
検査支援(放射線)													
放射線技師の派遣(被爆スクリーニング等支援)													
環境モニタリング専門家													
植生現地調査指導													
動物愛護支援													
産業廃棄物計画策定支援(廃棄物処理支援)													
被災農業者支援													
水産業復興支援													
災害対策本部支援													
災害救助事務支援													
課税業務支援													
生活保護業務支援													
支援金申請書の審査支援													
獣医師・衛生技師派遣													
災害公営住宅整備に係る設計支援(電気職)													
市役所業務行政支援													

■ 100以上 ■ 10～99 ■ 1～9 □ 変化なし

市町への直接支援といった内容であった。また、瓦礫処理や復旧工事の進捗に応じるかたちで、土木施設や農林水産施設の復旧対策要員の需要も高くなっていることがわかる。特に社会基盤施設の復旧に関しては、2011年5月以降、毎月100人以上もの派遣が継続しておこなわれている。一方、瓦礫処理等の復旧作業が一段落した2011年夏ごろからは、支援内容にも質的な変化の兆しが見られる。すなわち、保健師による仮設住宅の訪問や被災者のこころのケアを目的とした専門職員の派遣といったソフトな行政支援に注力されるようになる。こうした取り組みは人数こそ多くないものの、今後も引き続き高いニーズが予想されることから、支援者の健康管理、継続した支援体制等の支援者側への配慮が必要である。また、原発事故を受けての放射線測定等環境モニタリングや被災者の生活保護についても、継続すべき重要な支援方策である。

表-6に被災地住宅対策としての人的支援状況を示す。

表-7 物的支援の項目別人数の推移

項 目	送付数 (11M時点)		A	M	J	J	A
アルファ化米	259,311	食					
乾パン	187,311	食					
即席麺	127,831	食					
飲料水	443,833	本					
その他の飲料	62,814	本					
簡易トイレ(屋外設置)	490	台					
簡易トイレ(簡易式)	20,632	台					
小児用おむつ	498,095	枚					
大人用おむつ	254,807	枚					
生理用品	625,572	枚					
マスク	3,175,830	枚					
医療品	3,478	箱					
医療資機材	11	箱					
乳児用調整粉乳	3,148	缶					
離乳食	34,860	食					
ほ乳瓶	2,204	個					
毛布	63,581	枚					
カイロ	285,553	個					
ブルーシート	4,890	枚					
飲料水用ポリ袋	20,525	袋					
飲料水用ポリタンク	51,850	個					
土嚢袋	74,620	袋					
文房具等	26,917	点					

■ 100以上 ■ 10～99 ■ 1～9 □ 変化なし

2011 年夏までは、応急仮設住宅建設への支援に毎月 100 人以上もの職員が派遣されていたが、それ以降は災害公営住宅の整備業務に人員が割かれることとなる。図-5 に関西広域連合に属する各県の避難者受け入れ状況の推移を示す。表-4 に示した現地への人的支援人数の推移や図-4 に示した避難所開設数の推移とは対照的にこちらは増加しており、柔軟な受け入れ体制の確立が求められている。

表-7 に関西広域連合による物的支援の内容とその推移を示す。アルファ化米等の食料、飲料水のほか、防災用品や生活用品などが被災地へ送られた。最も支援期間が長かった飲料水でさえ、半年での打ち切りとなっていた。水道施設が復旧したことと、現地物資を積極的に消費しようとする動きに合わせたためであると考えられる。このように物的な支援については、被災地の経済活動を停滞させないように短期集中で投資するにとどめ、被災地が自力再生できるように支援するのが望ましいと思われる。

4. まとめ

本研究の結果、東日本大震災以降の関西広域連合の人的・物的支援内容の推移から被災者ニーズやその変化をある程度捉えることができた。

「カウンターパート」方式に代表される阪神淡路大震災の経験を活かした広報支援活動は、被災地の復旧に大きな力を発揮した。一方で、被災地の行政機能低下など想定を超える災害発生時の対応や長期化する支援における人員配分、風評被害への対応、避難所での栄養管理といった新たな課題が見出されている。近い将来に起こるとされる東南海・南海地震を見据えて、これらの課題への対策が喫緊の課題である。また、東日本大震災のような広域大規模災害では、発災直後に人的・物的ともに莫大な量の投資が不可欠になることから、広域ネットワークを活かしてこれらの資源の確保に努めるとともに、人・モノ等の資源を確実に被災地に送り届けるロジックの構築も重要である。

参考文献

- (1) 関西広域連合：広域防災，
<http://kouiki-kansai.jp/contents.php?id=16>
- (2) 兵庫県：阪神・淡路大震災の復旧・復興の状況について(平成 23 年 12 月版)，15p，2011.
- (3) 関西広域連合：平成 23 年東日本大震災への関西広域連合の対応，
<http://www.kouiki-kansai.jp/contents.php?id=219>
- (4) 復興庁：避難所生活者・避難所の推移（東日本大震災、阪神・淡路大震災及び中越地震の比較）
<http://www.reconstruction.go.jp/topics/hikaku2.pdf>

英語学習に対しての動機づけの変化について

上垣宗明*

A Longitudinal Research of the Motivational Changes of the Students to English Learning

Muneaki UEGAKI*

ABSTRACT

This paper focuses on four-years of longitudinal research of changes in students' motivation for English, and its learning. During the years from 2009 to 2012, three questionnaires were administered to 120 first grade students, in April 2009, 3rd graders in February 2012, and 4th graders in September 2012. With statistic analysis, we analyze the relationship between the students' motivation and the students' English proficiency. Based on the 3rd graders' results, we have divided them into three groups, according to the results of the questionnaires. The mean score of the 1st graders' questionnaires is the lowest, but that of the 3rd graders' one is the highest of all. The findings are very complicated. The students in the highest motivated group are better in English proficiency, and their motivations are changeable. So, we could say that to arouse the students' interest in English, it is necessary to increase students' English proficiency.

Keywords : longitudinal study, motivation, English proficiency

1. はじめに

平成 23 年度に、小学校指導要領の改訂⁽¹⁾に伴い、小学校 5・6 年の高学年で、英語の授業が必修化され、更に英語教育に対しての関心が高まっている。児童、生徒、学生の英語能力の育成に関しては、指導者の指導能力や指導技術以外にも、児童や生徒、学生側の多様な要因によるものもかなり影響している。彼（女）らの学習能力や性格、英語に対する態度なども英語能力を伸長させる大きな要因の一つである。英語や英語学習に対しての動機づけも大きな要因を占めていると言っても過言ではない。

本稿では、神戸市立工業高等専門学校（以下、神戸高専）へ 2009 年 4 月に入学した 3 クラスを対象に、英語、もしくは英語学習に対しての動機づけの変化を調査した。英語教育は大学、高校、中学校、小学校 5・6 年等を対象に行われている。しかし、高等専門学校（以下、高専）以外に 5 年間を通して、同じ学生を対象調査を行うことができる教育機関は、存在しないのが現状である。著者にとっても、神戸高専で教鞭をとるよ

うになって 11 年になるが、同一の学生を 4 年間継続して担当できたのは今回が初めてである。そこで、このような利点をいかし、学生の英語や英語学習に対しての動機づけの変化を神戸高専に入学してから 4 年間継続して調査した。動機づけだけではなく、英語の成績との関連を統計的に分析し考察を加える。

2. 先行研究

英語あるいは英語学習に対しての学生の動機づけについては 1960 年代以降、多くの研究がなされている⁽²⁾。しかし、継続的な調査は少なく、本調査のように同じ学生を対象に 4 年間の継続的な調査はほとんど行われていない。

中井は、米子工業高等専門学校の新入生を対象にした学習動機の調査において、「英語学習の動機はやはりコミュニケーションの道具としての英語を学びたいという意識が強い。・・・新入生にとっての英語は実利的な手段というよりむしろ日本のものとは異なる異質なものに触れるための手段であるという意識が強い。」⁽³⁾と、述べている。

田村は釧路鉱業高等専門学校の 2009 年度に入学した学生の意識調査において、9 割の学生が英語を苦手と

* 一般科 准教授

しており、残り 1 割の学生が得意としているという調査結果を報告している⁽⁴⁾。

また、石川は苫小牧工業高等専門学校 3 年生を対象とした調査において、「英語の学習動機は、「興味関心」というよりは、「社会的・職業上役に立つこと」といった点にあるのが特徴的である。社会に出てからの必要性を意識しているものと考える。」⁽⁵⁾と述べている。

Kunishige 他は、“Roughly speaking, the ration of attainment of the target scores decreases as the students’ school year advances.”⁽⁶⁾と、徳山工業高等専門学校の学生を対象とした調査で述べている。

校種は異なるが、Nishida は、異なった学年の小学生を対象に 1 年間の生徒の動機や興味についての調査を行っている。その調査では、年齢が上がるにつれて生徒の動機や興味が減少する傾向にあるという結論に至っている⁽⁷⁾。この調査は英語学習をし始めた小学生を対象としており、その結果を高専の学生にそのまま当てはめて考えることはできない。しかし、高専の学生の学習動機を理解するうえでは参考になる。

中井や石川、田村、Kunishige 他は、同じ高専生を対象とした調査を行っているが学生の英語学習動機は明らかに異なっている事がわかる。その要因としては、対象となる学生には 5 年の年齢差があり、全国各地で調査が行われているために、その地域の特徴によって結果が異なっていることが考えられる。その学生の特徴を理解するうえでは、その地域での調査や研究が必要である。

3. 動機づけの調査について

先行研究の結果を踏まえると神戸高専生の英語や英語学習に対する動機づけを調査するためには、先行研究を参考にしながらも実際に神戸高専の学生を対象とする調査が必要である。

動機づけを調査するためのアンケート用紙を、『外国語教育リサーチマニュアル』⁽⁸⁾を参考にして著者が作成した（Appendix 1）。質問は 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。

1 回目のアンケートを平成 21 年 4 月に神戸高専の 1 年 3 クラス 121 名中 1 名欠席で 120 名を対象に記名式で実施した。それぞれ、神戸高専に入学して、2 回目の英語の授業中に実施した。

回答する前に「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所を○で囲んでください。」と教示した。

2 回目は、彼らが 3 年（平成 23 年度）の平成 24 年 2 月の最後の英語演習の授業中に 117 名中 107 名がアンケートに回答した。また、1 回目と同じ教示を行った。

3 回目は 4 年（平成 24 年度）の 9 月の夏休み明けの最初の英語演習の授業中に、117 名中 107 名がアンケートに回答した。1 回目と同じ教示を行った。3 回全てのアンケートに回答している 102 名を調査対象とした。

4. 調査結果

4.1. アンケートの結果

最初に、1 年のアンケート結果の統計処理を行った。本調査の統計処理は、「エクセル統計 2008(SSRI:社会情報サービス株式会社)」を使用した。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注意を払った。内的一貫性を測定するためのクロンバック α 係数という値を用いた。ゾルタイは、「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。」⁽⁹⁾と述べている。この指摘に沿うように、クロンバック α 係数が 0.8 に近づくように調整した。

まず、14 項目全てに対して、クロンバック α 係数を求めた。その結果、0.546 と数値が低かった。項目 6. 英語を勉強するのは嫌だ (-0.2894)、8. 高専では英語の勉強は必要ないと思う (-0.1741)、9. 今後、英語よりも数学のほうが大切だと思う (-0.0802)、14. 将来、エンジニアになりたい (-0.0412) が相関係数でマイナスの数値を示していた。これらの質問の内容については、項目 14 以外は英語や英語を勉強することについての動機づけを調査するうえでは、逆転項目である。そこで、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 α 係数は 0.766 となり、0.8 にかなり近づいた。更に、項目 7 だけを削除すると 0.779 となり、また、項目 14 だけを削除すると 0.784 となった。この 2 項目を削除すれば、0.801 となったので、残りの 12 項目で英語や英語学習への動機づけを測定する信頼度係数が十分に確保されていると思われる。今後は、項目 7 と 14 を除いた 12 項目を分析対象として、分析や考察を加えることにする。

同様の統計処理を 3 年と 4 年のアンケートに対しても行った。全てのアンケートの結果を表 1 に示す。クロンバック α 係数は、3 年のアンケート結果は 0.76 で、4 年のアンケート結果は、0.732 となった。信頼度係数が高いとはいえないが、12 項目で 102 名を対象とした調査であることを考慮すると、学生の英語や英語学習に対する動機づけを一貫して測定できているといえる。

表 1 アンケートの結果

	サンプル	平均	標準偏差	最大	最小
1 年	102	33.26	5.63	45	18
3 年	102	34.78	4.94	45	22
4 年	102	33.95	4.82	44	24

全学年のアンケート結果をクラスカル・ウォリス検定（多重比較検定：Scheffe 法）で分析した結果は、平均において、3 年が高く（1 年と比べて 1.52, 4 年と比べて 0.83）、1 年の平均値が低いという結果になったが、どの学年間においても有意差は見られなかった。その分析結果を表 2 に示す。

表2 アンケート結果の比較(Scheffe 法)

学年 (平均)	学年 (平均)	差	統計量	P 値	判定
1 年 (33.26)	3 年 (34.78)	1.52	2.23	0.11	
1 年 (33.26)	4 年 (33.95)	0.696	0.47	0.63	
3 年 (34.78)	4 年 (33.95)	0.83	0.65	0.52	

**:1%有意 *:5%有意

4.2. アンケート結果とテスト成績の関係

アンケートだけではなく、1 年の 4 月に受けた実力テスト、1 年で受けた 4 回の中間・定期テストの素点の平均、2 年で受けた 4 回の中間・定期テストの素点の平均、3 年後期に受けた 2 回の中間・定期テストの素点の平均、4 年前期に受けた 2 回の中間・定期テストの素点の平均点を利用し、動機づけと英語の学力の関係をアンケートの結果を含めて考察する。

アンケートを 3 回全て受けた学生のテスト結果の概要を表 3 に示す。

表3 試験の結果

	サンプル	平均	標準偏差	最大	最小
実力	102	83.05	9.56	98	59
1 年	102	70.56	11.39	96	46.75
2 年	102	71.6	14.04	98.5	38
3 年	102	66.69	14.64	96	33
4 年	102	71.57	16.47	99.5	30.5

これらのテストの点数に有意差が認められるかをクラスカル・ウォリス検定で分析した。その結果を表 4 に示す。

1 年の実力テストと他のテストの点数では、1%水準で有意差が認められたが、他のテストでは有意差がみられなかった。表 3 からわかるように、1 年実力テストのみ、平均点が 83 点と非常に高く、その他のテストは平均点が 70 点前後とあまり平均点に違いがないために、有意差が認められなかった。実力試験は、平均点が高すぎ、他のテストと明らかに異なっているために今後は、分析の対象外とする。

表4 試験のクラスカル・ウォリス検定の結果

		統計量	P 値	判定
実力	1 年	43.73	0	**
実力	2 年	34.55	0	**
実力	3 年	65.86	0	**
実力	4 年	33.62	0	**
1 年	2 年	0.54	0.97	
1 年	3 年	2.26	0.69	
1 年	4 年	0.67	0.96	
2 年	3 年	5.01	0.29	
2 年	4 年	0.01	1	
3 年	4 年	5.37	0.25	

**:1%有意 *:5%有意

次に、アンケートの評定値で特異な結果となった 3 年のアンケートの得点で、上位群、中位群、下位群の 3 群に分け、アンケート結果や試験成績の平均点で差が見られるのかを検討する。

表5 3 年のアンケートの総合点を基準として

	上位群	中位群	下位群
サンプル数	26 名	37 名	39 名
3 年のアンケートの平均	41.69	34.73	30.21
標準偏差	1.85	1.50	2.48
1 年のアンケートの平均	37.73	32.97	30.54
標準偏差	4.3	5.49	4.71
4 年のアンケートの平均	38.35	34.27	30.72
標準偏差	4.48	3.37	3.7
1 年試験の平均点	76.11	69.92	67.5
標準偏差	9.88	10.79	11.8
2 年試験の平均点	77.83	71.57	67.47
標準偏差	11.53	14.48	13.92
3 年試験の平均点	73.56	67.68	61.26
標準偏差	12.23	13.82	15.07
4 年試験の平均点	79.87	71.09	66.5
標準偏差	14.3	16.57	15.91

3 年のアンケート結果をもとに 3 群に分けたが、その結果から、動機づけの上位群の学生は、試験の平均点においても他の群よりも明らかに高い平均点である。また、アンケートの平均においては、上位群の学生は、37.73（1 年）から 41.69（3 年）と、約 4 点の違いがみられるが、中位群は約 0.8 点、下位群は 0.5 点と 1 年から 4 年まではほぼ同じような低い動機づけで勉強していることがわかる。

アンケート結果の上位群、中位群、下位群で、それぞれの学年のテストの平均に差がみられるのかをクラスカル・ウォリス検定で分析した。その結果を表 6 に示す。

表6 3群のアンケートの比較

学年:平均:SD	学年:平均:SD	X^2 値	P 値	判定
上位群 (26 名)				
1 年:37.73:4.29	3 年:41.69:1.85	13.37	0.01	**
1 年:37.73:4.29	4 年:38.35:4.48	0.75	0.69	
3 年:41.69:1.85	4 年:38.35:4.48	7.8	0.02	*
中位群(37 名)				
1 年:32.97:5.49	3 年:34.73:1.5	1.49	0.47	
1 年:32.97:5.49	4 年:34.27:3.37	0.22	0.89	
3 年:34.73:1.5	4 年:34.27:3.37	0.56	0.76	
下位群(39 名)				
1 年:30.54:4.71	3 年:30.21:2.48	0.12	0.94	
1 年:30.54:4.71	4 年:30.72:3.7	0.01	0.99	
3 年:30.21:2.48	4 年:30.72:3.7	0.21	0.9	

(SD : 標準偏差)

**:1%有意 *:5 有意差

表5と表6から、アンケートの結果の上位群の学生は3年と1年とを比較して、3年の方が1%水準で高い有意差がみられる。また、4年に比べると5%水準で高い有意差がみられた。中位群や下位群は、平均においては差があるが、有意差はみられなかった。

次に、アンケート結果と同様に3年の試験の平均を上位群、中位群、下位群、と3つのグループに分け、それぞれのアンケートや試験を分析した結果を表7に示す。

表7 3年の試験の結果を基準として

	上位群	中位群	下位群
サンプル数	34 名	34 名	34 名
3 年試験の平均点:	83.6	66	50.4
標準偏差	5.43	4.19	6.31
1 年のアンケートの平均	34.26	33.68	31.82
標準偏差	5.27	5.55	5.92
3 年のアンケートの平均	36.94	34.74	32.65
標準偏差	4.24	5.45	4.17
4 年のアンケートの平均	35.24	34.03	32.59
標準偏差	4.56	5	4.65
1 年試験の平均点	80.7	69.5	61.4
標準偏差	7.61	9.22	7.86
2 年試験の平均点	84.07	71.79	58.94
標準偏差	8.56	10.52	9.7
4 年試験の平均点	86.4	69.6	58.6
標準偏差	11.6	10.9	13.2

3年の試験の平均を基準として3群に分けたために、アンケート結果においては、表5と比べると、明らかに平均値の差は少ないが、上位群の学生は1年と3年

を比べると2.7の開きがある。中位群では、1年と3年では約1点、下位群では1年と3年では約0.8点の差しかみられた。

表5と表7から、動機づけが高い学生が試験でよい点数を得ており、また、試験でよい点数の学生の方が高い動機づけであると言える。

次に、クラスカル・ウォリス検定を用いて、3年の試験の平均点の上位群、中位群、下位群で、他の学年の試験の平均点において有意差があるのかを検定した。その結果を表8に示す。

表8 3群の試験の点数の比較

学年:平均:SD	学年:平均:SD	X^2 値	P 値	判定
上位群 (34 名)				
1 年:80.7:7.61	2 年:84.07:8.56	2.58	0.46	
1 年:80.7:7.61	3 年:83.63:5.43	2.36	0.50	
1 年:80.7:7.61	4 年:86.44:11.58	8.60	0.04	*
2 年:84.07:8.56	3 年:83.63:5.43	0.01	0.99	
2 年:84.07:8.56	4 年:86.44:11.58	1.76	0.62	
3 年:83.63:5.43	4 年:86.44:11.58	1.95	0.58	
中位群 (34 名)				
1 年:69.54:9.23	2 年:71.79:10.52	0.75	0.86	
1 年:69.54:9.23	3 年:66.01:4.19	2.29	0.51	
1 年:69.54:9.23	4 年:69.63:10.91	0.01	0.99	
2 年:71.8:10.52	3 年:66.01:4.19	5.68	0.13	
2 年:71.8:10.52	4 年:69.63:10.91	0.65	0.88	
3 年:66.01:4.19	4 年:69.63:10.91	2.48	0.48	
下位群 (34 名)				
1 年:61.45:7.86	2 年:58.94:9.69	1.50	0.68	
1 年:61.45:7.86	3 年:50.41:6.31	21.7	0.00	**
1 年:61.45:7.86	4 年:58.65:13.17	2.32	0.51	
2 年:58.94:9.69	3 年:50.41:6.31	11.8	0.01	**
2 年:58.94:9.69	4 年:58.65:13.17	0.09	0.99	
3 年:50.41:6.31	4 年:58.65:13.17	9.85	0.02	*

(SD : 標準偏差)

**:1%有意 *:5 有意差

この結果から、成績の上位群においては、5%水準で4年の試験の点が1年の試験よりも有意に高いことがわかる。中位群においては、どの試験においても有意差がみられない。下位群は特徴的で、3年の試験が1%水準で1年や4年の試験よりも低く、5%水準で4年の試験よりも低いことがわかる。

5. 考察

アンケートやテスト成績から考察すると、成績の上位群の学生は英語や英語学習に対しての動機づけは、アンケートの実施学年によって違いがみられる(表7)。

特に 3 年で受けたアンケートの結果は、1 年のアンケート結果に比べて 1 %水準で、4 年の結果に比べて 5%水準で高い有意差が認められた。つまり、試験の平均の上位群は、3 年で動機づけが他の学年よりも高いといえる。

表 2 より、3 年生全体のアンケート結果の平均値が他の学年と比べて有意差はないにしても、高いことがわかった。その要因として、表 6 より、試験平均の上位群の学生の動機づけが 1 年や 4 年の時と比べて高くなっている事があげられる。3 年の試験平均の上位群の動機づけが高いのは、アンケートを実施した時期も影響している。1 年や 4 年の時は学年末ではなく、4 月と 9 月なのでまだまだ成績が確定しない。しかし、3 年は、最後の授業中にアンケートを実施したので、テスト勉強をしなければならないと強く思ったことがアンケート結果にも反映したのだろう。

試験平均の中位群に関しては、アンケートや試験の結果は、1 年から 4 年までの全学年で全く有意差がみられないのが特徴的である。彼らは、1 年の時からずっと同じように、英語学習や英語に取り組んでいると言える。

試験平均の下位群は、1 年、3 年、4 年、と動機づけに関するアンケートでは、ほぼ平均値に変化がなく、有意差は認められない。しかし、試験の平均に関しては、102 名全体ではどの学年の試験においても有意差は認められないが、下位群では、3 年の試験が他の学年の試験に比べると有意に低かった。

今回の分析では、動機づけの信頼度を確保するために分析対象から除外したアンケートの質問項目 14. 将来、エンジニアになりたい、の回答を表 10 にまとめる。

表 10 “将来エンジニアになりたい”の結果

	平均	1	2	3	4
1 年	3.3 (120 名)	5 名	12 名	43 名	60 名
3 年	2.91 (107 名)	9 名	20 名	50 名	28 名
4 年	3.09 (107 名)	5 名	19 名	44 名	39 名

多くの新入生は、将来エンジニアになることを希望して神戸高専に入学したことが、120 名中 103 名が肯定的な回答をしていることからわかる (3. だいたいそう思う:43 名, 4. まったくそう思う:103 名)。そして、一般科目と専門科目の授業が半分ずつになる 3 年ではエンジニアになりたいと強く思う学生が減っており、専門科目が増える 4 年でエンジニアになりたいと思う学生が少しだが 3 年に比べて増えていることがわかる。石川の調査結果から、英語の学習動機は「興味関心」というよりは、「社会的・職業上役に立つこと」という見解を示している。神戸高専での調査結果も、1 年よりも 3 年の学習動機の方が高いという、この見解を支持す

る結果となった。しかし、Nishida や Kunishige の“学年が進むにつれて動機や興味が衰退する”という見解とは異なる結果になった。神戸高専の学生、特に成績の上位者は、学年が進むにつれて動機が衰退するとは言えない結果が得られた。

6. まとめ

今までの分析と表 10 から、神戸高専の学生は、1 年の時は、英語や英語学習に対する動機はあまり高くないといえ、先述した田村の新入生の 9 割は英語が苦手と感じているとの指摘と同じである。しかし、エンジニアになることを希望する学生が多いといえる。そして、3 年になると、エンジニアになりたいと希望する学生が少し減少するが、成績の上位群の学生は、英語の必要性を強く感じるようになる。そして、4 年になると、夏休みにインターンシップを多くの学生が経験するのでエンジニアになりたいと思う学生が 3 年に比べて増えてくるのではないかと推測できる。しかし、エンジニアになりたいと思うことと英語や英語学習への動機づけのつながりは非常に薄いといえる結果となった。

Kunishige 他徳山高等技術専門学校の調査において、“Since the students’ interest in English and their attitude to studying English are correlated with each other, we can say that to arouse the students’ interest in English successfully is the key to motivating them to study English.”⁽⁶⁾と述べているように、英語への興味と英語学習への姿勢はお互いが関連しあっており、英語への興味をたかめる鍵となるのが英語学習への動機づけである。

7. 今後の課題

平成 24 年 11 月に、神戸高専では 4 年生全員が TOEIC を受験することになっており、今回調査対象となった 3 クラスも全員受験する。本調査では分析対象とすることができなかったが、客観的に英語の能力を測定できる TOEIC の点数も分析対象に加えることで、より精緻な分析が可能となる。TOEIC と同様に、平成 25 年 1 月に 3 年生を対象とした TOEIC Bridge も全員受験することになっているために、今後は、担当教員が作成する試験や TOEIC、TOEIC Bridge の両試験のスコアを客観的な学生の英語力を測定している資料として利用し、学生の英語力と動機との関係をより詳しく調査していきたい。

参考文献

- (1) MEXT 新学習指導要領 第4章 外国語活動
http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/syo/gai.htm
- (2) Nishida, Rieko: “A Longitudinal Study of Motivation, Can-Do and Willingness to Communication in Foreign Activities among Japanese Fifth-Grade Students”, Language Education & Technology, Vol. 49, pp.23-45, 2012.
- (3) 中井大造：高専における新入生の学力と学習動機の相関について，全国高等専門学校英語教育学会研究論集，Vol. 30, pp.63-72, 2011.
- (4) 田村聡子：英文法の基礎力低下と英語嫌いの原因を探る：新入生アンケートと英語診断テストから分析される要因，全国高等専門学校英語教育学会 研究論集，Vol. 29, pp.9-16, 2010.
- (5) 石川希美：英語学習状況に関する調査－高専生の英語嫌いと学習意欲－，全国高等専門学校英語教育学会研究論集，Vol. 31, pp.41-50, 2012.
- (6) Kunishige Toru, Takahashi Ai, Harada Norihiko: “An Analysis of the Students’ Motivation for Studying English at Tokuyama College of Technology”，全国高等専門学校英語教育学会 研究論集，Vol. 30, pp.15-24, 2011.
- (7) Nishida, Rieko: “An investigation of Japanese public elementary school students’ perceptions on motivation and anxiety in English learning: A pilot study comparing 1st to 6th grades”, Language Education & Technology, Vol. 45, pp.113-135, 2008.
- (8) ハーバード・W・セリガー，イラーナ・ショハミー著，土屋武久他訳：「外国語教育リサーチマニュアル」，大修館書店，2001.
- (9) ゴルタイ・ドルニエイ著，八島智子，竹内理訳：「外国語教育学のための質問紙調査入門」，関西大学出版部，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

契丹陶磁の「周縁性」に関する検討（３） －遼代の都城・州県城制度との関連から－

町田 吉隆*

Examining on the Border Character of the Kitai Pottery in China(3) : To relate with the City Systems in the Liao Dynasty

Yoshitaka MACHIDA

ABSTRACT

We are able to find out an archaic style in the Kitai(契丹) Pottery. These styles are similar to the pottery in the Tang(唐) Dynasty rather than the pottery in the 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 in the ruins of the Liao(遼) Dynasty(Khitans) Metro City as well as the state, the county seat in Liaoning or Inner Mongolia, there were variety of ceramics and tiles. It has been reported that corresponds to the city to the kiln of ceramics and tiles. But these combined forms are not so simple. We will need to understand the actual usage of producing ceramics and tiles in the Liao Dynasty(Khitans).

Keywords : pottery, Kitai(契丹), Liao Dynasty(遼朝), China, history

1. はじめに

10世紀初めから12世紀初めにかけて華北の一部を含む北東アジアから内陸アジアにまたがる領域を支配した契丹国（遼朝，以下，契丹国と表記）の陶磁器のうち，その領域内で生産された陶磁器を，ここでは「契丹陶磁」と規定する。

契丹国の陶磁器には古風な特徴があることが指摘されている。それは10世紀から12世紀にかけて生産されたものであるにもかかわらず，むしろ唐代の陶磁器に類似しており，同時代の北宋時代の陶磁器とは異なる様式であることを意味する。そして，それはしばしば中心文化が地方へと波及する時差により遅れることを意味する「周縁性」として説明されてきた。⁽¹⁾⁽²⁾

この論考では前稿を受けて，契丹国の都城や州県城と窯業遺跡の関係について検討を行い，契丹陶磁を生産していた陶磁器窯が都城や州県城の需要にどのように応えていたかに注目して，その「周縁性」の多義的な側面を考察する。

*一般科教授

2. 契丹国の都城と州県城

契丹国には以下の「五京」が置かれていた。

- ①上京臨潢府（内蒙古自治区赤峰市巴林左旗）
- ②東京遼陽府（遼寧省遼陽市）
- ③中京大定府（内蒙古自治区赤峰市寧城）
- ④南京析津府（北京市）
- ⑤西京大同府（山西省大同市）

また，各地に州県城として城郭を有する都市が建設された。その中には陵墓に奉祀し，守護する機能を持つ奉陵邑とよばれる都市もあった。

10世紀以降，草原と森林が混在していたこの地域に多くの都市が現れることは，中国における唐宋変革とも関連する北東アジアにおける歴史的劃期として注目されてきた。⁽³⁾

一方，複都制は唐朝や渤海国にも見られた。この制度は契丹国と同時代の北宋も採用していた制度であるから，複都制そのものを以て，契丹国が前時代の制度を継承・残存させていた「周縁性」とみなすことはできないし，複数の都城が同時代の北東アジアに現れた

ことが、当該地域の経済構造に変化をもたらしたはずである。

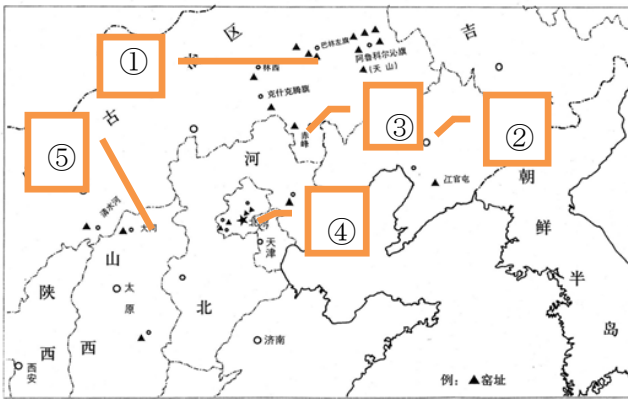


図1. 契丹国の「五京」と陶磁器窯址⁽⁴⁾

また契丹国における都城制、州県城制度には固有の特色が見られ、唐や北宋のそれとは異なる様相を示す。

まず第一に、建国の地に築かれた①上京臨潢府および③中京大定府以外の都城は、新たに編入した領域に設けられた都市である。②東京遼陽府は渤海国を滅ぼした後、一時的に形成された衛星国家の東丹国を編入した故地に置かれた。④南京析津府および⑤西京大同府は後晋より割譲を受けた、いわゆる「燕雲十六州」である燕州（現在の北京市）、雲州（現在の大同市）に設けられた。諸地方を統治するだけでなく、北宋と国境をはさんで対峙する要衝であった。自ずから各々の都城としての機能には相違が存在した。たとえば、①上京臨潢府の南方、シラムレン川支流の上流に設置された③中京大定府は都城プランが①上京臨潢府とは異なり、1004年の「澶淵の盟約」以降、頻繁に契丹国と北宋の間を往来するようになった外交儀礼の場としての役割を強め、契丹国の後半期には事実上の首都となった⁽⁵⁾。

それに関連して、第二には時代による都城そのもの変化がある。①上京臨潢府に代わり、③中京大定府の政治的役割が大きくなったことと同様に、当初は「南京幽都府」と名付けられた④南京析津府は人口も増え、経済的な要衝としての役割を強めた。後に金朝の中都、元朝の大都を経て、17世紀以降、現在まで継続する中国の首都「北京」の原型は契丹国時代に形成された⁽⁶⁾。つまり、同時代の北宋において、首都・「汴京」開封の地位が不動であったこととは大きく異なっていた。

第三には、北宋だけでなく、唐朝や渤海国とも異なる契丹国独自の制度としての「捺鉢（ナポ）」があげられる。遊牧民であった契丹人を支配者としていた契丹国では、皇帝は常に都城の宮廷において政務を執ったわけではなく、季節ごとに、移動を繰り返しており、大臣や役人の一部を含む政府も移動を繰り返していた。つまり、特定の都城に恒常的に政府たる「官」が存在していたわけではなかった。

以上のような特色を有する複都制に加え、契丹国の都市たる「州県城」には数多くの漢人や渤海人が移住させられ、また漢人やウイグル人の商人が各地に自ら移住していた。この徙民政策が契丹陶磁をはじめとする窯業など契丹国の経済活動に大きな影響を与えたことについては前稿でも触れたが⁽⁴⁾、唐朝時代の都市や北宋における「鎮市」などの経済的都市とは異なる性格を、契丹国の「州県城」に持たせることになったと考えられる。

3. 契丹国の都城と陶磁器窯

契丹国の陶磁器窯に関する調査、研究は20世紀前半に日本人研究者によって始められた。当時、現地で調査に当たった小山富士夫、黒田源次、田村實造、三上次男など各氏の研究からは今なお酌み取るべき情報が多い。20世紀後半から現在に至るまで、日本で形成されてきた契丹国の陶磁器窯に関する言説はそれらの情報を根幹として形成されてきた。

たとえば、三上次男氏は以下のように都城と陶磁器窯を結びつけている⁽⁷⁾。

- ①上京臨潢府（内蒙古自治区赤峰市巴林左旗）
 - 上京・城内窯（林東鎮の南約1.5km遼上京遺跡）
 - 南山窯（林東鎮南西、約1km丘陵上）
 - 白音戈勒（バインゴル）窯（林東鎮西約2.5km）
- ②東京遼陽府（遼寧省遼陽市）
 - 江官屯窯（遼陽市の東30km）
 - 大官屯窯（撫順市）
- ③中京大定府（内蒙古自治区赤峰市寧城）
 - 缸瓦窯（赤峰市の西70km赤峰市松山区）
- ④南京析津府（北京市）
 - 龍泉務窯（北京市門頭溝区）
- ⑤西京大同府（山西省大同市）
 - 大同青磁窯（大同市）
 - 渾源窯（渾源市介荘）

このように契丹国の陶磁器窯の立地を「五京」との関係から説明する記述は、第2次世界大戦後、中国で現地研究者による調査・研究が進むようになった過程でも見られる⁽⁸⁾。そこでは上京・城内窯、缸瓦窯、龍泉務窯を契丹国の「官窯」と規定している。

ただし、現地研究者による調査・研究が進むにつれ、「五京」と陶磁器窯をそのまま結びつける解釈では説明が難しい事例も見られるようになった。

たとえば、先に「官窯」と規定された上京・城内窯は契丹国晩期の陶磁器窯とされており、中にはこれを金朝治下の臨潢府で活動していた陶磁器窯と見る研究者もある。上京・城内窯を契丹国の陶磁器窯の中で、重く見てきた日本人研究者とは異なる見解である。

現在の遼寧省にあった江官屯窯、大官屯窯も、遡っても契丹国晩期、主には金代以降に陶磁器を焼成していた陶磁器窯との認識が、中国では主流となっている。

つまり、契丹国中枢の東半を占めた現在の遼寧省地域には契丹国時代に活動していた陶磁器窯が存在しなかったことになるわけであり、「五京」の成立と陶磁器窯の間には、少なくとも一対一で結ぶことができるような単純な関係は見られなかったことになる。

もっとも、現地研究者による陶磁器窯の本格的な発掘調査は近年まで数少なく、「官窯」と規定された陶磁器窯のうち、詳細な発掘調査報告がなされているのは、現時点では北京市の龍泉務窯だけである。各陶磁器窯での調査報告が待たれるところであるが、そもそも「都城」とその付近に立地していた陶磁器窯にはどのような関係があったのか、という問題はよく検討し直す必要があろう。

彭善国氏は近年、上京臨潢府付近にあった南山窯と白音戈勒（バインゴル）窯の踏査を行っている。発掘調査に基づく報告ではないものの、上京に隣接して設置された2つの陶磁器窯に関する最も詳細な報告である⁽⁹⁾。

それによれば、南山窯は林東鎮の南西側約1kmにあたる窯址は遼上京遺址内の南西部に位置する南塔がある丘陵の北西に位置している。

白化粧土を施した白釉が多く、緑釉、黄緑釉、醬釉などの碗の破片が主な残存遺物である。このような特色は過去にも報告されているが、陶磁器片と共に見いだされる窯具は三叉形窯具であるという。

一方、林東鎮の西約2.5kmに位置する白音戈勒（バインゴル）窯の窯址では鶏腿瓶（牛腿瓶）、卷唇罐、帯系罐など黒褐釉の陶磁器片が多く見られる。そして、ここでは“工”字形窯具が用いられていた。

生産活動を行っていた期間については、白音戈勒（バインゴル）窯の方が早く、10世紀から。南山窯は11世紀前半からと推測されている。

上京臨潢府の周辺にあった陶磁器窯はそれぞれ別のタイプの陶磁器を、異なる窯具を用いて生産していたことになる。おそらく2つの陶磁器窯の窯場では別系統の陶工集団がおり、各々は生産の面でも特化した陶磁器を焼成していた。現時点では遼上京の城内窯の実態は判明していないことが多いが、その規模が小さかったことは間違いない。つまり、遼上京の需要に応えた陶磁器窯はいずれも小規模であった。

契丹国の都城がそれぞれ近隣に特定の陶磁器窯を持ち、都城に必要とされる陶磁器を供給していたというイメージとは異なる状況が上京臨潢府にはあった。宋代以降の中国に現れる複数の窯場を持ち、大規模に焼成を行った定窯や磁州窯、龍泉窯などとは異なる、系統を異にする陶工たちが小規模の個性的な陶磁器を作っていた姿がそこにはあった。これを「周縁性」と呼

ぶかどうかはともかく、そのしくみを検討する必要があるだろう。

4. 契丹国の「官窯」

契丹国の葬墓や遺跡から底部分に「官」という文字を刻印した陶磁器が出土することはよく知られている。また缸瓦窯からは「官」字を器面に刻印されている窯具も出土している。

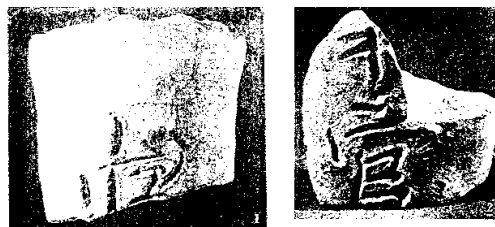


図2. 缸瓦窯出土「官」「新官」字印刻窯具⁽¹⁰⁾

馮永謙氏はこれらの「官」字が刻印される陶磁器や窯具を網羅的に集成した論考を発表している⁽¹⁰⁾。

その概要を記すと、

- ・「官」「新官」字が刻印される陶磁器はすべて白釉の陶磁器であること。
- ・最も早くに現れるのは晩唐、五代の10世紀前半であり、現在の河北省にあった定窯であること。
- ・契丹国出土の陶磁器においても「官」「新官」の刻印は10世紀より現れ、次第にその数は減少し後期になると見られなくなること。
- ・定窯と缸瓦窯の陶磁器に刻印された「官」「新官」の字体から両者を判別することは難しく、葬墓出土の陶磁器がどちらで生産されたものか判断する場合も、刻印字体での判別はできないこと。

以上から馮永謙氏は契丹国初期に定窯の工人集団が契丹国の缸瓦窯に連れて来られて、あるいは集団が移住して缸瓦窯そのものを開いたと推定されている。また「官」字が刻印された陶磁器には優品がおおいことから、これらが宮廷や支配層に用いられたことを指摘している。いずれも首肯すべき推論である。

ここでは契丹国の陶磁器窯の性格を検証する視点から、「官」字刻印の陶磁器について考察してみる。

缸瓦窯が契丹国建国当初から支配層に陶磁器を供給する役割を担っていたことは間違いないが、缸瓦窯では白釉の陶磁器以外にも三彩を含む低火度鉛釉陶磁器を焼成していた。これらには「官」字が刻印された事例は見られない。また缸瓦窯では定窯と異なり、おそらくはカオリンを含む磁土が得られなかったためであるが、白化粧土を施した白釉の陶磁器を焼成しているが、このタイプの陶磁器は北京市の龍泉務窯も含め、契丹国の陶磁器窯で契丹国後期に至るまで生産されているが、これにも「官」字刻印が付された事例が見られない。

つまり、缸瓦窯で生産されたと考えられる陶磁器のうち、「官」字刻印が付されるのは、宮廷に貢納された高級の白釉陶磁器のみであった。これは10世紀の定窯においても同様であったわけで、「官」「新官」は貢納品に対する一種の標識であって、定窯や缸瓦窯を五代諸王朝や契丹国が直接に管理、経営していたわけではなかった。この場合、南宋以降の「官窯」、特に元代以降の景德鎮窯の「御器廠」などのシステムとしての「官窯」とは区別しなければならない。

その一方で、缸瓦窯の成立過程は契丹国の陶磁器窯と契丹国の国家制度の関係について、1つの示唆を与える。先述したように契丹国では徙民政策により、各種の技術者が各都城や州県に集められ、文字通り、都市経営が行われていた。

筆者は2011年に内蒙古自治区巴林右旗で慶陵の奉陵邑であった慶州郊外で陶磁器窯を見学することができた。崩壊が進んではいたが直径5m前後の饅頭窯であることが確認できた。



図3. 崩落した窯室から見た窯口（2011年筆者撮影）

同様の州県に付随した饅頭窯はモンゴル国ボルガン県のチントルゴイ城郭都市址でも発掘調査が行われている⁽¹¹⁾。都城、州県などの付近数kmに陶磁器窯が設置されるという点では上京臨潢府における南山窯および白音戈勒（バインゴル）窯と同じであり、契丹国の遺跡では都城、州県など城郭都市に付随する小規模の陶磁器窯址の組み合わせはかなり普遍的に見られる。

缸瓦窯や龍泉務窯はこれらの付随した陶磁器窯が発展したものと推測できるが、都市経営のために設けら

れた各地の陶磁器窯が契丹国の「官窯」であったと考えられる。

5. むすびにかえて

今後の課題をあげて、むすびにかえる。

- ・各都城、州県に付随していた契丹国の陶磁器窯の生産の実態を明らかにすること。
 - ・契丹国の陶磁器窯およびそこで生産された契丹陶磁には異なる窯業技術が含まれるが、そこに従事していた陶工集団の性格を明らかにすること。
- 別稿で検討することとしたい。

謝辞

本研究の一部は平成24年度神戸高専共同研究費（一般研究）により進められました。ここに謝意を表します。

註

- (1) 町田吉隆「契丹陶磁の「周縁性」に関する検討ー唾壺と陶枕を例に」神戸高専紀要(48), 2010, pp.161-166.
- (2) 小川裕充「遼・西夏の絵画 総論」『世界美術大全集 東洋編5 五代・北宋・遼・西夏』1998, p.125.
- (3) 高橋学而「中国東北地方に於ける遼代州県一その平面構造・規模を中心として」『東アジアの考古と歴史ー岡崎敬先生退官記念論集ー』上, 同朋舎, 1987.
- (4) 町田吉隆「契丹国（遼朝）の陶磁窯とその特色」町田吉隆編『契丹陶磁ー遼代陶磁の資料と研究ー』朋友書店 2008, pp.6-11.
- (5) 武田和哉「契丹国（遼朝）の宮都に関する基礎的考察」『条里制・古代都市研究』21, 2006, pp.78-132.
- (6) 陳高華「遼代的燕京」『元大都上都研究』中国人民大学出版社, 2009, pp.7-13.
- (7) 三上次男「渤海・遼の陶磁」『世界陶磁全集 13 遼・金・元』小学館, 1981, pp.143-169.
- (8) 閻万章, 郭文宣「遼的陶瓷」中国珪酸盐学会編『中国陶瓷史』文物出版社 1982, pp.314-317.
- (9) 彭善国「内蒙古巴林左旗白音高洛, 南山窯址的調査」『草原文物』2011年2期.
- (10) 馮永謙「《官》和《新官》字款瓷器之研究」『中国古代窯址調査発掘報告集』文物出版社, 1984, pp.393-407.
- (11) 千田嘉博「モンゴル遼代城郭都市の構造と環境変動ーモンゴル国チントルゴイ遺跡 2009年調査報告」奈良大学『総合研究所所報』19, 2011. 臼杵勲「契丹の地域土器生産」『札幌学院大学人文学会紀要』91, 2012.

瞬間冷却剤に使用する無機塩の効果とその回収法

布浦博之* 伊藤健** 水流賢之郎*** 栗谷樹*
吉本隆光† 八木善彦‡ 大多喜重明‡ 福本晃造§

Effects and recycle methods of mineral salts used in a disposable coolant

Hiroyuki NUNOURA* Takeshi ITO** Kenshiro TSURU*** Itsuki KURITANI*
Takamitsu YOSHIMOTO† Yoshihiko YAGI‡
Shigeaki OHTAKI‡ and Kozo FUKUMOTO§

ABSTRACT

In the summer of 2012, the concern of electronic shortage caused the increase in demand of disposable coolant. To solve the problem, our group are tacking development of the sidposable coolant which is suatainable, cheap, usable and does not require electronicity. Here we report the chilling effects of cation and anion in salts, and the recycle method of salts. The high collecting rate of satls was attained using oven (over 90 %).

Keywords: mineral salt, cooling effect, recycle method

1. はじめに

2011 年夏には東日本大震災に由来する原子力発電所の停止に伴って、電力不足が懸念された。しかし節電を意識し、エアコンなどをあまり使用せず、暑さを我慢したことにより、政府が求めている節電要請期間の7月2日から9月7日の間、電力不足が起こる事はなかった⁽¹⁾。

先進国である日本でさえ電力不足が起こりかけた中で、恒常的に電力を十分調達できない国は世界中に数多く存在している。特に、夏でも夜の気温が25℃を超えるような熱帯夜が続く、パキスタンのような国で停電が起こった場合、扇風機などの電化製品が使えないため、暑さに弱い子供たちが体調を崩すことも珍しくない⁽²⁾。そこで、我々は暑い日にも電力を使わずに快適な暮らしを実現するため、手軽で安価な再生可能

瞬間冷却材の開発を目指して研究を進めている。前回の実験では、瞬間冷却材に使用する、試薬や水の配分について検討を行い、またその結果をもとに冷却材の試作品の製作も行った⁽³⁾。

今回の実験では冷却効果を使用した後にできる水溶液から、もう一度試薬を回収し、再利用することに焦点を置いた。

2. 結果と考察

2.1 各種試薬の冷却効果について 今回の実験検討の対象とした瞬間冷却材は、試薬と水を混ぜた際に起こる溶解熱が吸熱的に反応する現象を利用している。この溶解熱がマイナスを示す試薬を数種類集め、それぞれの冷却効果を調べる実験を行った。この実験では試薬と水を均等かつ効率良く混ぜるために、自動かく拌機⁽⁴⁾を使用した。手順は以下の通りである。

①試薬を入れた発砲スチロール製カップに、かく拌子を入れ、かく拌機の上に乗せる。

②カップに水を加えると同時にかく拌機を回し、ストップウォッチをスタートさせ開始時から30秒ずつ10分間、水溶液の温度を測定する。この時、かく拌機のスピードは一定とする。

* 本科都市工学科
** 本科電気工学科
*** 本科機械工学科
† 機械工学科教授
‡ 一般科教授
§ 一般科講師

市販の瞬間冷却材では硝酸アンモニウムが使用されている。そこで、硝酸アンモニウムに加え、類似のイオンを有する試薬を用い、冷却効果について検討を行った。使った試薬は次の9種類である。①硝酸アンモニウム(80.04 g/mol) ②硫酸アンモニウム(132.14 g/mol) ③酢酸アンモニウム(77.09 g/mol) ④塩化アンモニウム(53.49 g/mol) ⑤炭酸アンモニウム(96.09 g/mol) ⑥硝酸ナトリウム(84.99 g/mol) ⑦硝酸カリウム(101.10 g/mol) ⑧硝酸カルシウム(236.16 g/mol) ⑨硝酸マグネシウム(256.43 g/mol)。それぞれの試薬 0.10 mol に対して水 20 g を用意し、2.1 の手順で実験を行った。その結果を図1に示す。

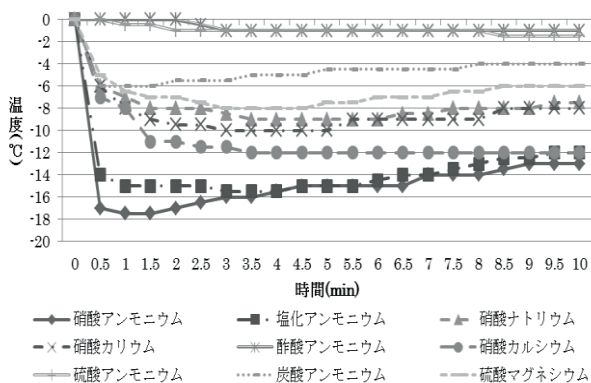


図1 9種類の試薬の温度変化

全ての水溶液において冷却効果がみられた。図1から、カップに水を入れてから1分が経過した時点で、硝酸アンモニウムは最初の温度より-17.5℃となっており、硝酸アンモニウムの次に温度が低かった塩化アンモニウムの-15.0℃よりも2.5℃も下回っている。

この実験を行った10分間の間ずっと、硝酸アンモニウムが最低温度を維持し続けた。これらより硝酸アンモニウムが、実験を行った9種類の試薬の中で、冷却効果と持続時間ともに最も優れている。

また試薬のイオンと冷却効果の関係についても注目してみた。アンモニウムに結合しているイオンの違いで冷却効果に違いが出ている。図1より炭酸アンモニウムと硫酸アンモニウムと酢酸アンモニウムで比べてみる。カップに水を入れてから1分が経過した時点で炭酸アンモニウムは最初の温度より6℃下がっているが、硫酸アンモニウムは0.5℃しか下がらず、酢酸アンモニウムは温度下らないという結果が読み取れる。これらの結果を元にアンモニウムに結合しているイオンを比べてみると、冷却効果が大きい順に $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{CH}_3\text{COO}^-$ という傾向がみられる。

同様に陽イオンについても調べたところ、冷却効果の大きい順に $\text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ のであることが明らかとなった。

2.2 試薬の回収 使用した後にできる水溶液から試薬を回収方法についてである。方法はガスバーナーを使った方法(以下A法とする)、オープンを使う方法(以下B法とする)、集光器を使う方法(以下C法とする)、の三つで実験を行った。なお、この実験で使う水溶液は硝酸アンモニウム 20 g と水 20 ml を混ぜ、溶かしきったものを使う。

2.2.1 ガスバーナーを用いた試薬の回収(A法) 次の手順に従い、ガスバーナーを用いた試薬の回収を行った。

- ①水溶液を蒸発皿に入れ、ろ紙をかぶせる。
- ②①を三脚あみにのせて、ガスバーナーであぶる。
- ③蒸発乾固後、蒸発皿を濡れ雑巾の上に置いて冷ます。
- ④冷ました蒸発皿とかぶせていたろ紙にこびりついている試薬を、スプーンで取り、重さを測る。

表1の火力強①、火力強②、火力強③、火力弱①、火力弱②は、2.4.1を5つ同時に行ったものである。なお火力弱①、火力弱②は火炎の強さを火力強①、火力強②、火力強③に比べて火力を弱くして実験を行った。

表1 硝酸アンモニウムの回収率

	火力強①	火力強②	火力強③	火力弱①	火力弱②	平均
回収量	9.572g	4.400g	8.231g	12.30g	13.07g	9.514g
回収率	47.64%	22.00%	41.16%	61.48%	65.35%	47.52%

数値にばらつきがある理由として考えられる原因として、まず火炎で熱したことにより急激に水溶液の温度が上昇し、水泡とともに蒸発皿とろ紙のすき間から外部へと出ていったと考えられる。次にかぶせたろ紙がこびっていることから、熱せられ蒸発した試薬がろ紙に接触した際にろ紙が試薬とともにこびて、回収できなくなってしまった。またガスバーナーでは火炎の量を均一に揃える事が出来ないため、熱した水溶液の温度上昇のしかたが変わり、それにより回収量に違いが出たと考えている。

この方法では白煙が出るので、換気をしっかりと行わないと危険であり回収率も低いいため、回収方法としては好ましくないと判断した。

2.2.2 オープンを用いた試薬の回収(B法) 次の手順に従い、オープンを用いた試薬の回収を行った。

- ①水溶液を発砲スチロール製のコップに入れ、そのコップをオープンに入れる。
- ②オープン内の温度は70℃に設定し、24時間置く。
- ③翌日にオープン内のコップを取り出して、コップ内の試薬を回収し、重さを測る。
- ④採取した試薬をもう一度水に溶かしきる。(試薬と水の割合は1:1とする。)

- ⑤もう一度溶かした水溶液をオープンに入れる。
⑥②から⑤を四回繰り返す。

回収率を求めたところ 93 % の回収率を得ることができたため、A 法よりも優れていると判断した。そこで、回収した試薬をもう一度水に溶かし(試薬と水の割合は 1:1 とする)、それをオープンに入れて 2.4.3 を繰り返した。その結果を図 2 に示す。いずれも 90 % 以上の回収率が示されている。次に回収した試薬が、毎回、同じ冷却効果を示すかを確認するため、2.1 の手順に従い、温度変化を測定した(図 3)。

冷却効果、持続時間ともに多少違いはあるが、平均をとると一回目のグラフと類似しており、回収した後も問題なく使用できることが明らかとなった。

また B 法に限り 2.1 で行った、イオンの違う 9 種類の試薬についても実験をした。硝酸ナトリウム、塩化アンモニウム、硝酸カリウムを使用した実験では、右上の図 4 より硝酸アンモニウムと類似の結果が得られた。また、酢酸アンモニウム、硝酸カルシウム、硫酸アンモニウム、硫酸マグネシウムでは、水和物を形成してしまい、無水和物の回収を行うことはできなかった。また炭酸アンモニウムは完全に蒸発しており、容器内には何も残っていなかった。

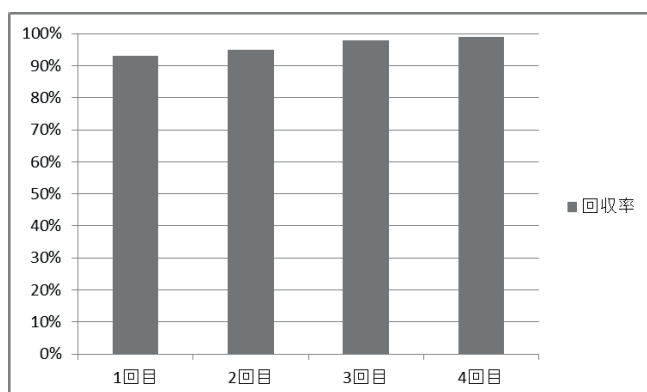


図 2 硝酸アンモニウムの回収率

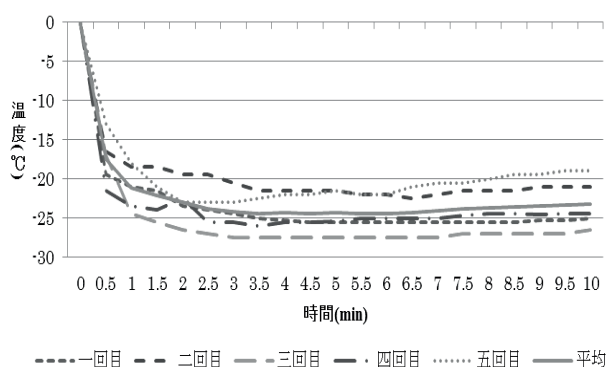


図 3 硝酸アンモニウムの温度変化

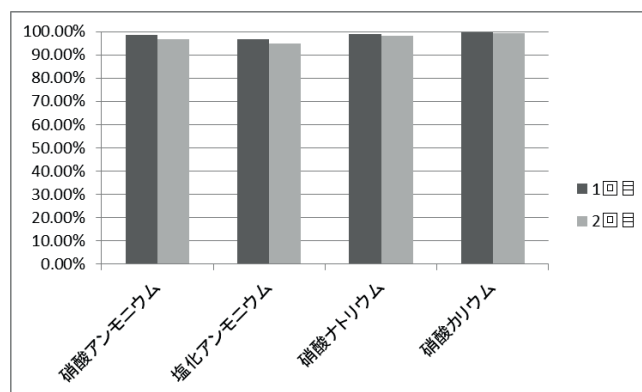


図 4 類似した回収率

B 法の硝酸アンモニウムの回収率が A 法の回収率を上回った結果について、A 法では発生した水泡によって、試薬が容易外部へと飛び散ったためと考えられる。A 法では火炎で容器の底を熱するため、底と水面で温度差ができるが、B 法では全体的に容器が熱され、緩やかに水が蒸発するため、水泡が発生しにくい。また温度が徐々に上がるため、突沸が起こらないことに起因すると考えている。

2.2.3 水和物の生成 B 法による試薬の回収を硫酸アンモニウム、硫酸マグネシウムに対して行ったところ、見かけ上の回収率が 100 % を超えた。一般に、硫酸アンモニウム、硫酸マグネシウムは十二水和物、七水和物を生成するため、ここでも水和物を形成していると考えられる。そこで、設定温度を 70 °C にしたオープンに 24 時間入れた後に重さを測定し、水和物の量を見積もった。

表 3 水和物の重さ

	硫酸アンモニウム12水和物	硫酸マグネシウム7水和物
理論値(十分の一モル)	33.21g	24.65g
オープンに入れた後の重さ	25.63g	13.41g
塩に付着した水の割合	60.80%	10.80%

表 3 よりオープンに入れた後の硫酸アンモニウム 12 水和物と硫酸マグネシウム 7 水和物は、それぞれ平均して 7.3 水和物と 0.76 水和物を形成していることが明らかとなった。

さらにこれらをもう一度、設定温度 70 °C のオープンに入れ、三か月放置したところ、酢酸アンモニウム 3 水和物は全て蒸発し、無水硫酸アンモニウムが 92 % で回収できた。しかし、硝酸カルシウムはゲル化してしまい、無水物を得ることはできなかった。

2.2.4 太陽光を用いた試薬の回収 (C 法) A 法, B 法は回収時のエネルギー源として化石エネルギーを利用している。C 法では、再生可能エネルギーである、太陽エネルギーを利用した試薬の回収を試みた。効率良く蒸発させるためには、たくさんの太陽エネルギーを集め、中の水溶液の温度を上昇させなければなら

い。そのために容器の素材の違いと集光能力の違いで、どれだけ中の水溶液の温度が変わるのかを調べるため、実験をした。容器の種類はペットボトルとアルミ缶を2本ずつ用意し、どの容器も黒のスプレーで外側を黒く塗った。なお容器の口はそのまま狭く水溶液を入れるのが難しいため、カッターで容器を切断し口径を広げた。口径はどれも同じようになっている。作り方は次の通りである。

- ① 段ボールを正八角形に1枚、等脚台形に8枚に切る。寸法は次の図4の通りである。なお、等脚台形の縦の高さは25 cm とする。
- ② 等脚台形を4枚つづりで横につなげ、それを2組作り、アルミニウム箔をのりで貼る。
- ③ 2組の段ボールをつなげて、アルミニウム箔が貼られている面を内側にして、皿状の輪を作り、底に①で作っておいた正八角形の段ボールをガムテープでくっつけて完成。

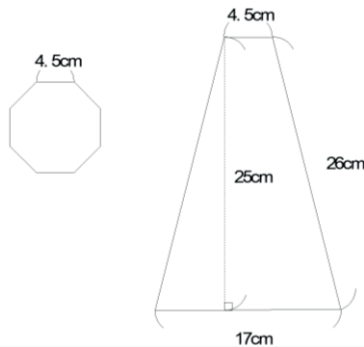


図5 集光器寸法



図6 完成写真

神戸高専校内に実験器具を設置し、2012年10月16日、午前9時から午後3時までの温度変化、および実験後の水の蒸発量を測定した。

6時間放置した後に回収したところ、完全に水が蒸発した水溶液は無かった。しかし、水分はある程度蒸発している事が考えられるため、どの程度蒸発しているかを、事前に量っておいた容器に水溶液を入れた重さと、回収した後の容器に水溶液が入ったままの重さの差で、比べたところ表2のようになった。

表2 C法による重さの変化

	全体の重さ	終了後重さ	全体の重さ－終了後重さの差	回収率
①缶	51.44g	40.60g	10.84g	27.10%
②缶+集光器	53.03g	43.87g	9.166g	22.92%
③ペットボトル	49.66g	40.73g	8.935g	22.34%
④ペットボトル+集光器	50.38g	43.43g	6.954g	17.39%

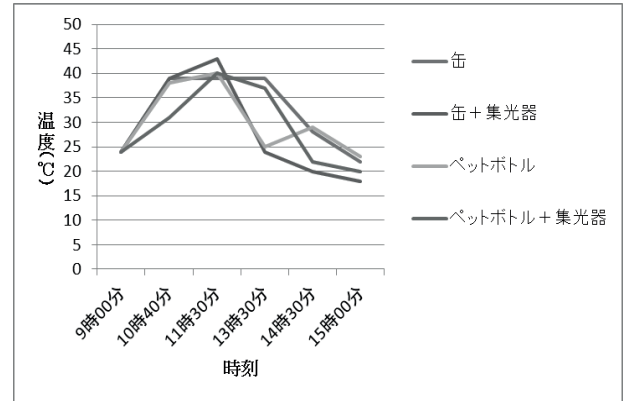


図7 C法による水溶液の温度変化

表2でまず注目すべき点はペットボトルとアルミ缶の容器の違いで蒸発量が変化する事である。図6より金属の方が、プラスチックより熱が伝わりやすいため、このような結果になっている。

次に注目すべき点は集光器に容器を入れた方より、容器単独で放置した方がたくさん蒸発した点である。上の図7を見るとわかるように、太陽高度がある程度低くなっている14時30分のところで、容器のみの温度は緩やかに下がっているが、集光器を使っている容器の温度は急激に下がっている事が分かる。これは太陽高度が低いときは集光器が容器の陰になってしまうため、そこで太陽が当たらなくなったため、温度が急激に下がったと考えている。

3. まとめ

本研究では、冷却材に使用する試薬について、構成するイオンと冷却効果の関係性について検討を行った。冷却効果の大きい陽イオンは順に、 $Mg^{2+} > NH_4^+ > Ca^{2+} > K^+ > Na^+$ であり、陰イオンは $NO_3^- > Cl^- > CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > CH_3COO^-$ であることを明らかにした。

また、再利用の方法としては、温度を安定させる事ができ、急激な温度上昇が発生しないオープンを使った方法が適している事が分かった。硫酸アンモニウム水溶液を70℃、24時間加熱を行っても、無水物は回収されず、約三か月という長い期間加熱を行うことで無水物が回収できることを明らかにした。

参考文献

- (1) 朝日新聞、2012年9月8日朝刊、「節電期間終了 電力不足なし」。
- (2) 朝日新聞、2012年7月30日朝刊、「パキスタン電力不足深刻」。

- (3) 難波真大, その他:「手作り瞬間冷却材の製作」,
神戸高専研究紀要, 第 50 号, pp. 177-180, 2012.
- (4) 株式会社日伸理化, 超強磁カスターラーRS シリーズ, SW-RS077.

産学官技術フォーラム20年の歩み

大淵真一* 小林滋** 赤対秀明**

The Course of the Technical Forum on the Governmental-Academic-Industrial Collaboration for Twenty Years

Shinichi OHFUCHI* Shigeru KOBAYASHI** Hideaki SHAKUTSUI**

1. はじめに

1991年(平成3年)6月、神戸高専産学官技術フォーラム(以下フォーラムと省略)の前身となる「CAD システムの展示と講演会」を神戸高専で開催してから20年が過ぎ、2011年11月に第20回フォーラムを開催した(1994年は未開催)。2002年4月神戸高専に地域協働研究センター(以下センターと省略)が設立され、それ以降センター第1部会(その後産学連携部会と名称変更)が中心となってフォーラムを開催・運営するようになった。センターは第10回までのフォーラム開催の中心であった研究振興委員会と学校の広報を担当していた広報委員会を母体として設立された。フォーラムのテーマは、その年度にふさわしいテーマを取りあげてきた。

本報はこの20年の歩みの中で第10回以降を資料としてまとめた。なお、第1回フォーラム開催の経緯、第1回から第9回の実施内容等は「産学官技術フォーラム10年の歩み」として報告している⁽¹⁾。また、第10回から第20回までの詳細は各年度の地域協働研究センター年報等⁽²⁾⁽⁴⁾と講演要旨集⁽⁵⁾に報告されている。

2. 第10回記念フォーラム

神戸市医療産業都市構想のもと、神戸市機械金属工業会会員企業と医療機器分野における産学官連携の推進を図ることを意図し「医療機器技術の現状と将来」というメインテーマで2001年11月14日、神戸市産業振興センターで実施された。この年は神戸商工会議所が主催者として新たに加わった。

基調講演は帝人(株)在宅医療企画部研究部長妹背和男氏による「在宅医療事業における研究開発について」であった。パネルディスカッションはコーディネータとして神戸大学工学部長機械工学科教授森脇俊道氏、パネリストとして(財)先端医療振興財団医療機器開発支援担当ディレクター神戸高専電気工学科教授山本誠

一氏、(株)神戸工業試験場取締役副会長鶴井孝文氏、シスメックス(株)取締役開発部長大東重則氏の3氏で、「医療機器分野における技術開発動向と産学官連携」というテーマで議論された。

3. 初代センター長時代

2002年より神戸高専にセンターが設立された。2002年から2005年の4年間、センター長は機械工学科赤対であった。フォーラムの中心である第1部会長は機械工学科中辻武教授、機械工学科吉本隆光教授、都市工学科橋本渉一教授であった。

3.1 第11回(2002年) 神戸市はRT(ロボットテクノロジー)構想を進めていた。阪神・淡路大震災の経験を踏まえ、レスキューロボットを中心にRTの一大研究・開発拠点としてRTの集積地を目指すものであった。このRT構想に関連付け「新しいロボットワールドの創造に向けて」というメインテーマで2002年11月6日、神戸市産業振興センターで実施された。この年は主催者として(財)阪神・淡路復興推進機構が加わった。

基調講演は神戸大学教授高森年氏による「都市の知能化とロボット技術の融合」であった。パネルディスカッションはコーディネータとして神戸大学助教授田所諭氏、パネリストとして姫路工業大学教授服部正氏、神戸高専機械工学科教授小林滋、立命館大学助教授手嶋教之氏、京都大学助教授大須賀公一氏、大阪大学教授浅田稔氏の5氏で、「ロボット技術の最新事情を語り合おう」というテーマで議論された。

3.2 第12回(2003年) 持続可能な開発を掲げたリオでの地球サミットから10年がたち地球環境問題はむしろ深刻化しているという認識から2002年に持続可能な開発に関する世界首脳会議(地球環境問題に関する国際会議)が開催された。我々は開発と環境問題を再認識することとなり、「環境、経済、エネルギーのトリレンマ～新たな環境ビジネスの創出に向けて～」というメインテーマで2003年11月12日、神戸市産業振興センターで実施された。

* 応用化学科 教授

** 機械工学科 教授

基調講演は姫路工業大学学長鈴木胖氏による「化石燃料に依存しない新しいエネルギーシステムの構築」であった。パネルディスカッションはコーディネータとして姫路工業大学学長鈴木胖氏、パネリストとして神戸高専電気工学科教授藤井富朗氏、川崎重工業(株)地球環境室長・理事大山正俊氏、阪神機器(株)代表取締役山田勝也氏、神戸市環境局局長熊取谷護氏の4氏で、「新たな環境ビジネスの創出に向けて」というテーマで議論された。

3.3 第13回(2004年) この年は阪神・淡路大震災から10年目であった。市内産業のものづくりやまちづくりの復興の歩みを振り返りながら神戸の展望につなげていこうという趣旨から「震災から復興そして未来に向けて」というメインテーマで2004年11月16日、神戸市産業振興センターで実施された。

基調講演は神戸市長矢田立郎氏による「大震災から10年、神戸市の軌跡と展望」であった。パネルディスカッションはコーディネータとして神戸高専都市工学科教授橋本渉一氏、パネリストとして明興産業(株)代表取締役社長下土井康晴氏、新星電気(株)代表取締役社長津田久雄氏、神戸市産業振興局工業課課長松田高明氏、三ツ星ベルト(株)総務部部长・理事保井剛太郎氏の4氏で、「神戸の復興“ものづくりとまちづくり”」というテーマであった。

3.4 第14回(2005年) 産学官連携の推進が叫ばれて5年が経った。相思相愛で始まったはずの産学連携であったが、全てがうまくいったわけではなかった。これまでの連携事業の具体的な体験談、成功例、失敗例を改めて見つめ直してみようという趣旨から「産学官の連携、結実のハードルは？」というメインテーマで2005年11月9日、学園都市大学共同利用施設UNITY(以下UNITYと省略)で実施された。

基調講演は新産業創造研究機構専務理事(兵庫県立工業技術センター所長)松井繁明氏による「兵庫県における産学官連携と地域振興」であった。パネルディスカッションはコーディネータとして新産業創造研究機構専務理事松井繁明氏、パネリストとして(株)マツキ代表取締役松木真志氏、明興産業(株)下土井康晴氏、神戸高専機械工学科教授赤対秀明の3氏で、「産学官の連携—成功と失敗から学ぶ—」というテーマであった。

なおこの年の予算的な問題から会場をこれまでの産業振興センターからUNITYに変更した。ポスター発表とオーラル発表を同時に開催するのはスペース的に苦しかったので、ポスター発表のみを第I部と称して2005年10月30日、神戸高専小体育室で実施した。

4. 第2代センター長時代

2006年から2009年の4年間、センター長は応用化学科大淵であった。フォーラムの中心である第I部会長(2008年より産学連携部会長と名称変更)は都市工学科

橋本渉一教授、電気工学科津吉彰教授であった。

4.1 第15回(2006年) 兵庫工業会が管理法人となり、兵庫県内にある神戸高専・明石高専と共同で経済産業省の補助事業である「高専等を活用した人材育成事業」に申請し、採択されたことから、産学官連携で人材を育てる事を意図し「ものづくり、ひと創り」というメインテーマで2006年11月15日、UNITYで実施された。

基調講演はミツ精機(株)取締役相談役三津啓祐氏による「これからのものづくりと人材育成」であった。パネルディスカッションはコーディネータとして神戸高専名誉教授日下部重幸氏、パネリストとして近畿経済産業局産業人材政策室室長山崎健司氏、ミツ精機(株)取締役相談役三津啓祐氏、(社)兵庫工業会課長綱崎光信氏の3氏で、「高専を活用した中小企業人材育成について」というテーマであった。

なお前年に引き続き、第I部は2006年10月28日、神戸高専小体育室で実施された。

4.2 第16回(2007年) 経済産業省の補助事業である「高専等を活用した人材育成事業」の採択2年目を迎え、昨年と同様に産学官連携で人材を育てることを意図し「ものづくりとひと創りのコラボレーション」というメインテーマで2007年11月7日、UNITYで実施された。

基調講演は(財)兵庫工業会会長山口喜弘氏による「これからのものづくりとひとづくり」であった。特別講演は旭光電機(株)技術部長和田貴志氏による「ロボットとマンマシンインターフェース」であった。パネルディスカッションはコーディネータとして神戸高専機械工学科教授中辻武氏、パネリストとして神戸市産業振興局工業課課長三谷陽造氏、アワレイジ(有)取締役会長竹村元宏氏、第一熱研(株)代表取締役中川啓之氏、和田金型工業(株)代表取締役平瀬清氏の4氏で、「ものづくりと人材育成」というテーマであった。第I部は2007年10月28日、神戸高専小体育室で実施された。

4.3 第17回(2008年) ひょうご神戸産学学官アライアンスが立ち上り(神戸大学、兵庫県立大学、甲南大学、神戸高専、明石高専)共催として加わった。便利になることだけを求めて技術を磨き、便利なものだけを作る社会から、地球環境との共生を求める社会へと変化してきた。3R(Reduce, Reuse, Recycle)が持続性社会として必要となってきた。このような社会情勢の下「ものづくりと環境」というメインテーマで2008年11月12日、UNITYで実施された。

これまで第I部のポスター発表を高専祭初日に実施していた。発表会場の準備等は大変であったが、会場スペースには余裕があるので発表件数に制限が無いという利点もあった。一方、学生主体の祭典である高専祭中に教員主体のフォーラムを実施し、学生に参加(半

ば強制的に)させることに反対を唱える声も少なくなかった。そこでこの年から開催日を1日とし、少し狭かったが、オーラル発表とポスター発表を同時に行った。

基調講演は佛教大学教授内藤正明氏による「自然共生的な持続可能社会への転換を目指して」であった。特別講演はビーエルオートテック(株)津村稔氏による「ロボット力覚センサーの研究開発事例」であった。パネルディスカッションではコーディネータとして神戸高専電気工学科教授津吉彰氏、パネリストとして阪神機器(株)会長山田勝也氏、神戸市環境局地球環境課主幹佐藤孝介氏、神戸高専機械工学科教授森本義則氏、神戸高専学生小林悠節君、山下高広君の5氏で、「環境活動に取り組む社会の実現」というテーマであった。

4.4 第18回(2009年) 神戸高専がNHK高専ロボコンの近畿地区大会主管校の年であり、ロボットに関わる教職員、学生が盛り上がっていたこともあり、「ロボットと情報技術」というメインテーマで2009年11月4日、UNITYで実施された。

この年は新たな試みとして近隣小学生にロボット工作教室を実施した。東町小学校4年生二クラスを対象としていたが、インフルエンザによる学級閉鎖というアクシデントがあり、一クラスでの実施となった。このイベントには(有)ピノキオ井邊氏から多大な協力をいただいた。工作教室に加えて遊戯ロボットの展示もあり、参加した小学生は時間も忘れてロボットに触れていた。

基調講演は神戸大学大学院教授塚本昌彦氏による「ロボティクスとウェアラブル」であった。特別講演は(株)山城機工岡西栄作氏「学のロボット作りと産でのロボット作りの現状」であった。パネルディスカッションではコーディネータ神戸高専応用化学科教授大淵、パネリスト(株)村元工作所取締役村元四郎氏、神戸市産業振興局工業課課長三谷陽造氏、神戸高専機械工学科教授小林滋の3氏で、「ロボットに期待すること」というテーマであった。

5. 第3代センター長時代

2010年から2011年の2年間、センター長は機械工学科小林滋であった。フォーラムの中心である副センター長は機械工学科宮本猛教授であった。

5.1 第19回(2010年) この年から産学連携に関する協定を締結した神戸信用金庫および関連企業との連携が新たに加わった。あと1年で20周年を迎えるフォーラムであったが、産学官の三者がそれぞれにマンネリ化を意識していた。フォーラムを通じての共同研究への発展を期待していた初期に対して結果が伴っているのかという自問自答する中で、「産学官連携の現状と課題」というメインテーマで2010年11月10日、UNITYで実施された。

基調講演は(財)新産業創造研究機構糸賀興右氏による「産学官連携における支援機関の役割」であった。特別講演はリバティプランニング仲西律子氏による「産学連携における中小企業のあり方」であった。パネルディスカッションはコーディネータとして神戸高専機械工学科教授小林滋氏、パネリストとして(財)新産業創造研究機構糸賀興右氏、藤製作所(株)仲西律子氏、(財)新産業創造研究機構産学連携推進コーディネータ永井千秋氏、神戸高専電子工学科教授橋本好幸氏の4氏で、「産学官連携の現状と課題」というテーマであった。

第1部は2010年10月31日、神戸高専専攻科棟大講義室で企業紹介ポスター展示と相談コーナー(11社)を実施した。これは新たな取り組みであり、キャリア教育の一環とした。

5.2 第20回(2011年) いよいよ20周年を迎えた。阪神・淡路大震災の復興とともに歩んできたフォーラムが20周年を迎えたこの年の3月11日、東日本大震災が起こったのも不思議な縁を感じた。地震に伴った福島原子力発電所の事故は我々のエネルギーに対する意識を一変させた。技術者教育においても同様であった。この20年を振り返るとともに、この先10年、20年に何ができるのかを意識し「産学官連携の未来に向けて～日本の未来に我々は何ができるか?～」というメインテーマで2011年11月9日、新たな会場として神戸市立人材支援センターで実施された。

基調講演は三菱重工業(株)常務執行役員相模原製作所長前川篤氏による「エネルギーとものづくりに対する一考察」であった。特別講演は日工(株)事業開発本部研究開発センター長蓬萊秀人氏による「ガレキ処理とエネルギー利用について」であった。パネルディスカッションはコーディネータとして神戸高専機械工学科教授宮本猛氏、パネリストとして三菱重工業(株)常務執行役員前川篤氏、日工(株)事業開発本部研究開発センター長蓬萊秀人氏、大阪大学大学院工学研究科教授赤松史光氏、兵庫医科大学医療情報学主任教授宮本正喜氏の4氏で、「産学官連携の未来に向けて～日本の未来に我々は何ができるか?～」というテーマであった。第1部は2011年10月30日神戸高専専攻科棟大講義室において、企業紹介ポスター展示と相談コーナーを実施した。

6. まとめ

第10回から第20回のフォーラムの概要を表1にまとめた。発表件数の年度による差は会場の大きさとプログラムの内容によると思われる。特に最近のオーラル発表は専攻科生の発表の機会として取組まれているようだ。専攻科生にとっては良い機会であるが、参加される企業にとっては専攻科生より、教員の研究内容を聞きたいようで、若干のミスマッチが存在している。

表1 フォーラムの概要（第10回から第20回）

回	開催場所*	メインテーマ	発表数(件)	参加者(名)*
10	神戸市産業振興センター	医療機器技術の現状と将来	オーラル：27 ポスター：82	**
11	神戸市産業振興センター	新しいロボットワールドの創造に向けて	オーラル：27 ポスター：100	約 600
12	神戸市産業振興センター	環境、経済、エネルギーのトリレンマ～新たな環境ビジネスの創出に向けて～	オーラル：27 ポスター：150	約 400
13	神戸市産業振興センター	震災から復興そして未来に向けて	オーラル：33 ポスター：114	(1)160 (2)300
14	(1)神戸高専 (2)UNITY	産学官の連携、結実のハードルは？	オーラル：32 ポスター：80	(1)200 (2)299
15	(1)神戸高専 (2)UNITY	ものづくり、ひと創り	オーラル：34 ポスター：80	(1)180 (2)262
16	(1)神戸高専 (2)UNITY	ものづくり と ひと創り のコラボレーション	オーラル：25 ポスター：56	(1)200 (2)295
17	UNITY	ものづくりと環境	オーラル：38 ポスター：47	**
18	UNITY	ロボットと情報技術	オーラル：20 ポスター：48	**
19	(1)神戸高専 (2)UNITY	産学官連携の現状と課題	オーラル：28 ポスター：67	(1)225 (2)**
20	(1)神戸高専 (2)人材支援センター	産学官連携の未来に向けて～日本の未来に我々は何ができるか？～	オーラル：53 ポスター：73	**

*：(1)は第Ⅰ部、(2)は第Ⅱ部を示す。 **：データ無

開催場所も予算の問題から変わってきた。

参加者(第Ⅰ部、第Ⅱ部も含めた延べ人数)は第11回の600名が最高であり、その後400名から500名前後で推移しているが、大きな変化はないようである。

高専というあまり大きくない組織でこのような取り組みを20年間続けたことは非常に素晴らしいことと思っている。2009年受審した機関別認証評価において、フォーラムの取り組みはかなり高い評価を受けた。

2002年のセンター設立当時、経済産業省、文部科学省など国を挙げての産学官連携が叫ばれていた。大学・高専等の高等教育機関は、教育、研究に加えて社会貢献・地域貢献を担う中心とならなければいけないムードであった。フォーラムはこの掛け声が叫ばれる10年も前から実施していたことは誇らしいことである。当時の村尾校長を筆頭とする管理職および実行委員の方は先見の明があったと思う。これを継続できたのは、主催、共催、後援していただいた(社)神戸市機械金属工業会、(公財)神戸市産業振興財団、産学官技術交流懇談会(神戸テクノサロン)、明石高専、ひょうご神戸産学官アライアンス、神戸信用金庫、神戸市、神戸市教育委員会、神戸商工会議所、(公)新産業創造研究機構、(公社)兵庫工業会、兵庫県工業技術センター等の皆様の協力があったからと感じている。

センター設立後のフォーラム運営は実施委員長である第1部会長(後の産学連携部会長あるいは副センター長と名称変更)を中心に行われている。5月から11月ま

で毎月1回フォーラム実行委員会が神戸高専で開催されてきた。委員会には神戸高専、神戸市機械金属工業会、神戸市産業振興財団の担当者が出席し、実施に向けての議論がなされてきた。フォーラム開催のために、センターの中でも実施委員長および主担当者はかなり苦勞されていた。センター長を経験した筆者としてはここで実施委員長に改めて御礼を述べたい。

高専制度は2011年で50周年を迎えた。神戸高専も2012年に設立50周年を迎えた。2012年フォーラムも第21回を迎える。「フォーラム30年の歩み」がどなたかの手によって資料として執筆されるのを期待する。

参考文献

- (1) 赤対秀明, “産学官フォーラム 10年の歩み”, 神戸高専研究紀要, 第39号, pp.113-118, 2001.
- (2) 大淵真一, 東京高専教員FD報告 2007.
- (3) 地域協働研究センター編, 地域協働研究センター年報, 第1号, 2-5(2003), 第2号, 5-7(2004), 第3・4号, 1-6(2006), 第5号, 6-8(2007), 第6号, 8-10(2008), 第7号, 9-10(2009), 第8号, 7-8(2010).
- (4) 広報室編, 神戸高専年報, 第1号, 9-10
- (5) フォーラム実行委員会編, 神戸高専産学官技術フォーラム講演論文集, (2001), (2002), (2003), (2004), (2005), (2006), (2007), (2008), (2009), (2010), (2011).

地理情報で表す神戸高専の50年間の変遷

中尾幸一*

The Transition of Kobe City College of Technology Represent Geographical Information in 50 Years

Kouichi NAKAO*

Keywords : geographic, represent

1. はじめに

神戸高専は2012年度で創立50年を迎える。舞子で27年間、学園都市に移転して23年間、校地、施設など様々な変化があり現在に至っている。本文は、50周年を機に、今日までの校地、施設の変遷を、記録として残すことを願って地理情報を中心としてまとめたものである。

2. 六甲工業高校に関する記録

神戸高専は、六甲工業高校を母胎としている。神戸高専の歴史を語るときには、まず、その歴史を述べなければならない。

2.1 六甲工業高校の誕生 六甲工業高校は1957年に、電子工業科、精密機械科、原動機械科、工業化学科の4クラスでスタートし、1962年に建設工業科が設置され、5クラスとなった。



図1 伯母野山周辺地図

当初は神戸大学西側の伯母野山(図1参照)に校地を求めたが、不調に終わり、他の候補地を探し、最終的には舞子の地に校地を確保した。設立して、舞子の学舎が完成するまでの二年間は兵庫区吉田町にあった神戸工業高校(図2参照)の敷地内の仮校舎であった。

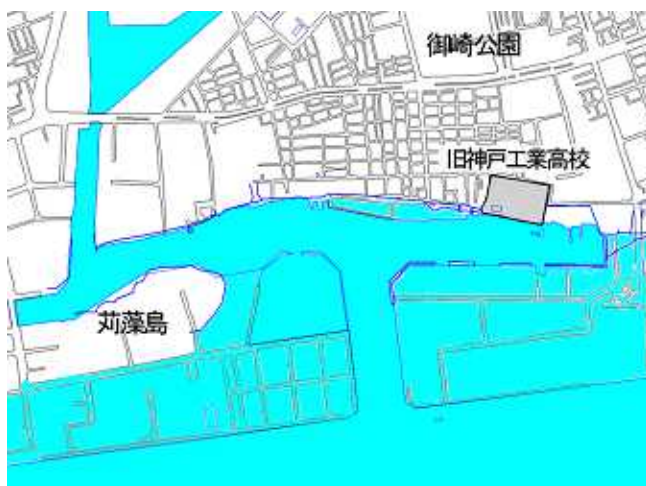


図2 兵庫区吉田町周辺地図

2.2 舞子学舎の竣工と移転 1959年4月から舞子の地に移転し、3学年もそろい充実期を迎えた。移転時は、中央実験室のみが堅牢建物で、他は木造平屋であったことが写真1からわかる。



写真1 移転当時の全景⁽¹⁾

2.3 舞子学舎 1960年には東西実験室が完成した。1966年には平池の埋め立てが終わり、グラウンドとし

* 都市工学科 教授

て使用できるようになった。この舞子の校地は図3のような丘陵地の端部を造成したものであった。後に北実験室、体育館が建設されたところは谷であったことがわかる。写真2は、図3と近い方向から撮影された1960年の空中写真である。当時の様子がよくわかる。

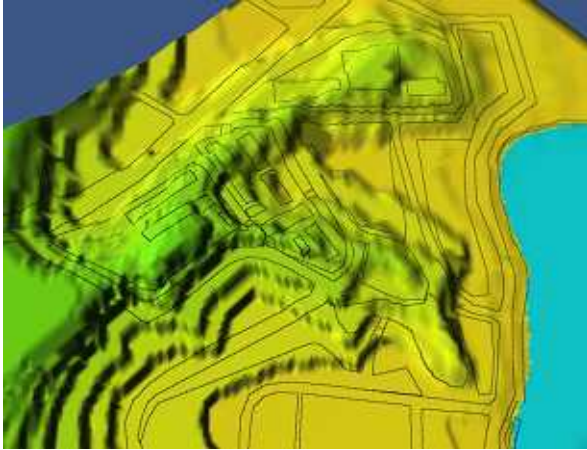


図3 舞子学舎の原地形



写真2 1959年12月の空中写真⁽²⁾



図4 1960年3月の実測図（兵庫工業高校測量）⁽³⁾

図4は、兵庫工業高校土木学科が測量実習で作成した図の一部である。これも当時を知る貴重なものである。この図から、校内に一般道が通っていることがわかる。これは高専となってからもしばらく続く状態である。

3. 神戸高専の設立と移転までの経過

神戸市立六甲工業高等専門学校は1963年4月に第1回生が入学しスタートした。当然ながら六甲工業高校の2年、3年生と同居であった。六甲工業高校の生徒が卒業し、高専単独となった3年後の1966年4月から現在の神戸市立工業高等専門学校に名称を変更された。

3.1 舞子学舎の敷地面積について 高専としての創立時の記録では、 40786m^2 （道路を含むと 42770m^2 ）⁽¹⁾であると記されている。また、高専となった初年度の1964年1月に、面積測定を目的として作成された実測図によると校地 19247.14m^2 、グラウンド 20788.79m^2 である。合計すると 40035.93m^2 となる。これには校内の一般道は含んでいない。1989年の学校要覧には 46000m^2 とあり、グラウンドは 26700m^2 となっており数千 m^2 の差がある。20年の間に敷地に変化があったものと思われるが詳細は不明である。

3.2 高専としての舞子学舎 図5は、前述の1964年1月に、作成された実測図を基に作成したものである。北実験室、1号館ができているが、一般道は校内を通り抜けている状態に変わりはないことがわかる。また、ここには表されていないが、他に木造等の教室が存在していた。



図5 1964年1月の舞子学舎実測図

写真3は高専として10年が過ぎた頃の空中写真である。グラウンドにはプールがあり、2号館、体育館、食堂・学生ホール、保健室ができていたことが読みとれる。しかし、精密実験研究センターはまだできていないことがわかる。私の記憶では、体育館は1967年、プールは1970年に完成している。食堂・学生ホールの完成は1972年頃である。

写真4では舞子での最後の状態を見ることができる。神戸高専はこのような施設を最後として1990年4月に学園都市キャンパスに移転することとなった。



写真3 1973年の空中写真（国土地理院発刊の一部）



写真4 1984年の空中写真（国土地理院発刊の一部）

4. 第2グラウンドについて

高専として開校当時の敷地面積では基準を満たしていなかったため、1963年8月に垂水区舞子町細道石ヶ谷（図6 第二校地A）を取得した。その面積は10721.36m²であった。その後1967年頃には図6の第二校地Bに換わっていた。第二校地Bは、創設期のサッカー部の練習場として使用され、初期のサッカー部員の人たちにとっては思いで深い場所だと推測する。私自身も測量実習で平板測量によりその面積の測定を行った思い出がある。



図6 神戸高専舞子学舎の敷地

5. 学園都市キャンパスへの移転

5-1 校地の原地形 学園都市キャンパスのある地域は、神戸層群が広がる丘陵地帯である。図7の白線に囲まれたところが神戸高専のあるところである。谷を含んで山の部分は削って校地としている。その様子を図8に示している。グラウンドの中央を谷底が走っていて盛土となっているが、他の区域は切土であることがわかる。



図7 開発前の学園都市キャンパス付近の鳥瞰図



図8 神戸高専キャンパスの造成区分

図9は、1985年の空中写真を基に作成した東から見た鳥瞰図である。まだ神戸高専の区域の掘削はなされていない様子を示している。



図9 造成工事中の風景

5-2 移転時のキャンパス 学園都市の新キャンパスは、敷地面積85,500m²あり、南北400m、東西300mである。しかも舞子に比べ、高低差がほとんどなく、敷地を有効に使えるという好条件の地である。グラウンドは南北方向の長辺206m、短辺165mであり、東西方向の長辺130m、短辺56mである。その面積は約23700m²あり舞子のグラウンドより500m²程広く、しかも舞子はテニスコート、弓道場、プールを含んでいたため、はるかに広がっている。写真5はその様子を伝えるものである。



写真5 1990年の神戸高専キャンパス

5-3 阪神淡路大震災後の神戸高専 移転から5年後の1995年1月に神戸を大地震がおそった。神戸市での被害は甚大で、その後の復興に多大の力が必要であった。神戸高専においても様々な対応を余儀なくされたが、比較的早い時期に授業を開始し徐々に平静を取り戻した。写真6は、グラウンドに被災者のための仮設住宅が建っている様子を伝えるものである。また、専攻科棟の建設中の様子もここに写っている。

5-4 現在の神戸高専キャンパス 図10は2012年

の神戸高専の平面図である。専攻科棟ができていること以外、移転時とあまり変わらないことがわかる。



写真6 1998年の神戸高専(国土地理院発刊の一部)

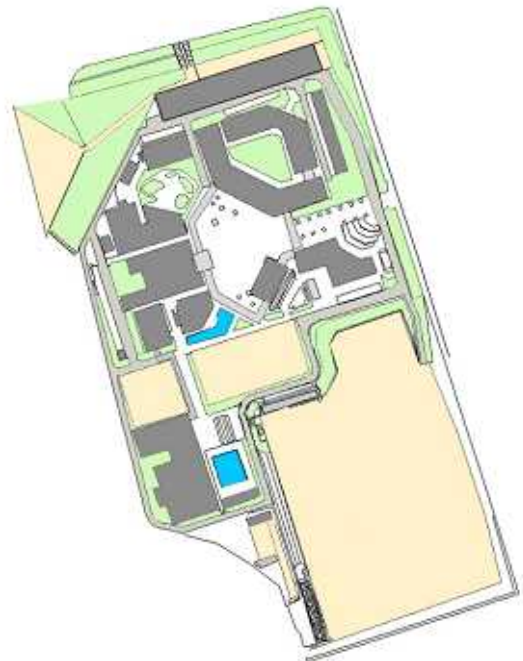


図10 2012年の神戸高専キャンパス

6. まとめ

神戸高専が50周年を迎える2012年に、地理情報としての記録を残したいと考えていた。過去の記憶と資料をたよりに本文をまとめ、一つの記録として研究紀要に掲載することができた。

参考文献

- (1) 近藤泰夫：「神戸市立六甲工業高等学校創立五周年誌」，神戸市立六甲工業高等学校，1963.
- (2) 神戸市立工業高等専門学校体育科：「神戸高専体育のあゆみ」，神戸市立工業高等専門学校体育科，1984.
- (3) 神戸市立工業高等専門学校情報教育センター：「神戸市立六甲工業高等学校附近実測平面図の電子ファイル化」，神戸市立工業高等専門学校情報教育センター広報，第17号，pp.37-40，2005.

仮想陰極発振器を用いた滅菌用大電力マイクロ波発生 における発振条件の考察

橋本好幸*

Some Conditions of High Power Microwave Generation in a Virtual Cathode Oscillator for Sterilization

Yoshiyuki HASHIMOTO*

ABSTRACT

Biological applications with a high-power pulsed microwave(HPM) produced by VIRCATOR has been studied. A coaxial compact Marx generator (-180kV,16Ω,50ns) and a point pinch diode are used for the generation of a relativistic electron beam. From calculation results, the HPM frequency was found to be dependent on diode gap length. In case of a cathode radius of 10 mm and a diode voltage of 100-300kV, HPM frequency was calculated to be about 18 GHz.

Keywords : High-Power Microwave, Virtual Cathode Oscillator, Coaxial Marx Generator, Sterilization

1. はじめに

近年，生体に対するパルス高電界の印加やプラズマの照射によって，細胞に刺激を与えることで，生体の活性化やガンの抑制を行う研究が行われ，その成果に期待が寄せられている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

一方，パルスパワー装置を用いた仮想陰極発振器で発生するマイクロ波（High Power Pulsed Microwave: HPM）は，短パルス（数十ナノ秒）・大電力（数十MW）という特徴を有するため，加速器や宇宙からの無線送電等の応用を想定し研究されてきた^{(4),(5)}。

そこで，我々はこのHPMを生体に照射することで，パルス高電界やプラズマ照射と同様に，生体の活性化が可能ではないかと考えた。また，HPMは高周波であるために，細胞膜の内部（細胞質）にまで浸透するので，生体刺激の効果が大きいことが期待される。その上，HPMのパワーを大きくすることで，細胞の死滅も可能であると予想され，滅菌等への応用も考えられる。

本論文では，仮想陰極発振器を用いたHPM発生方法の概要および，本実験で使用する同軸マルクス電におけるマイクロ波の発生条件を算出した結果について報告する。

2. 仮想陰極発振器によるマイクロ波の発生

図1に仮想陰極発振器(Virtual Cathode oscillator: VIRCATOR)の概略図を示す。高電圧パルスをダイオードに印加すると，陰極から相対論的電子ビーム(Relativistic Electron Beam: REB)が発生する。そのREBが陽極を通り抜けて，ビーム電流が空間電荷制限電流

$$I_{SC} = \frac{2\pi\epsilon_0 mc^3}{e} \left(\frac{r_c}{d_g} \right)^2 (\gamma_0^{1/2} - 0.8471)^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

を超えると仮想陰極が形成される⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。ここで， ϵ_0 は

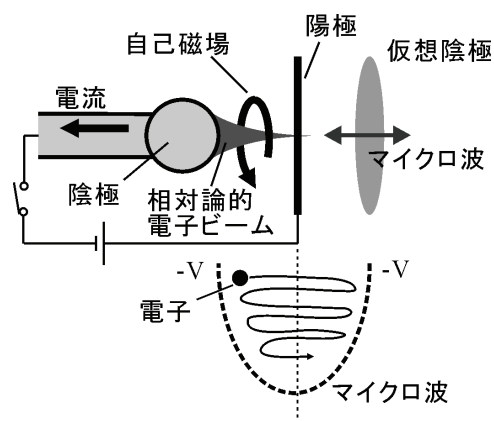


図1 仮想陰極発振器の原理

* 電子工学科 教授

真空の誘電率, m は電子の質量, c は光速 e は電子の電荷, r_c は陰極の半径, および d_g はダイオードのギャップ長を示す。また, γ_0 は相対論的因子で,

$$\gamma_0 = 1 + \frac{eV}{mc^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。ここで, V は電子の加速電圧である。

また, 電極間にイオンビームが存在した場合の空間電荷制限電流 (バイポーラ空間電荷制限電流) は,

$$I_{BSC} = 1.86 I_{SC} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

次に, ビーム電流がさらに増加すると電子ビームがピンチを始める。この時のビーム電流は,

$$I_C = \frac{2\pi mc}{\mu_0 e} \left(\frac{r_b}{d_g} \right) (\gamma_0^2 - 1)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。上式で μ_0 は真空の透磁率, また, r_b は電子ビームの半径である。

仮想陰極が生じると, 図1に示すようにポテンシャルの井戸が形成され, その井戸内を電子が往復運動する。この往復運動によって, 周波数が

$$f_{ref} \propto \frac{V^{1/2}}{d_g} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となるマイクロ波は発生する。また, 仮想陰極は REB によって維持されるため, 電子ビームの流入量が増加すると, 仮想陰極自身が時間的にも空間的にも振動し, この振動からもマイクロ波が発生する。この場合, 発生するマイクロ波の周波数は,

$$f_{osc} = \frac{c}{2\pi d_g} \ln \left\{ \gamma_0 + (\gamma_0^2 - 1)^{1/2} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる⁽⁹⁾⁻⁽¹³⁾。

3. 実験方法および装置の概要

図2に実験装置の概略図を示す。REB を生成する電源には, 小型の同軸マルクス装置を用いる。小型同軸マルクスは, コンデンサーバンクユニットと充電抵抗の6組を円筒容器に縦方向に並べて構成する。コンデンサーバンクユニットは, セラミックコンデンサ (村田製作所 DHS-N4700, 40kV, 2nF) 2個を直列接続したもの26組を, 並列に接続して構成し, 耐圧は80kVで合成容量は26nFである。

ダイオードには, ポイントピンチダイオードを用いる。陰極はステンレス球(直径10~20mm程度)を用い, 陽極はアルミ箔, ステンレス金網または穴あき板を使用する。真空容器は, ロータリポンプとターボ分子ポンプにより 10^{-4} Pa 程度まで排気する。同軸マルクスを高電圧充電器で充電し, 高電圧パルサーでギャップスイッチをトリガーすると REB が生成されマイクロ波が発生する。発生したマイクロ波は, 円筒導波管を通過してその先端に取り付けられたホーンアンテナによって金網シールドされたマイクロ波照射室へと導かれる。

発生したマイクロ波は, 円筒導波管に設置したピックアッププローブでその信号を検出する。ピックアッププローブは, SMA コネクタと探針で構成され, その出力を, マイクロケーブルを経て分波器に導き2つの信号に分割する。一方の信号は, 同軸アッテネータで減衰させた後にクリスタルディテクターで検波し, その信号をオシロスコープで観測する。また他方の信号は, 同軸導波変換機で信号変換を行い, 矩形導波管を伝播させた後に, クリスタルディテクターで検波し, オシロスコープで観察する。長さ L の矩形導波管を通過するに要するマイクロ波の伝播時間 t は,

$$t = \frac{L}{c \{1 - (f_c/f)^2\}^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。ここで, f_c は導波管の遮断周波数, f

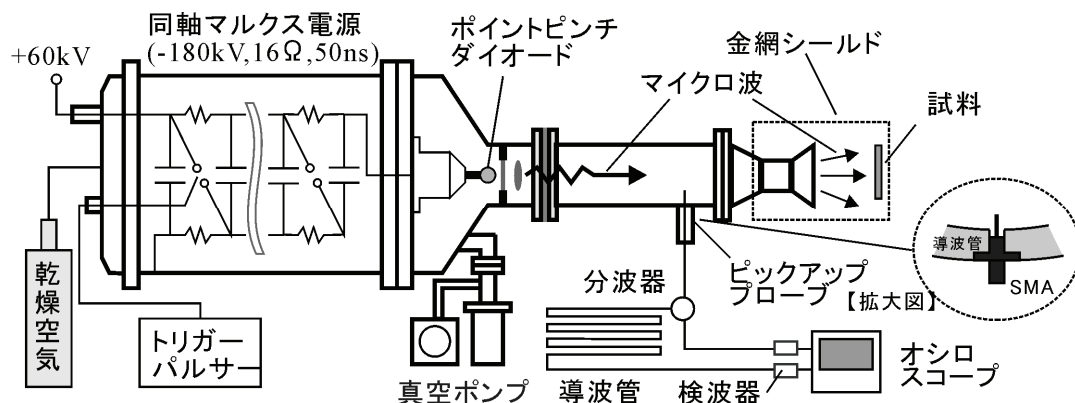


図2 実験装置の概略図

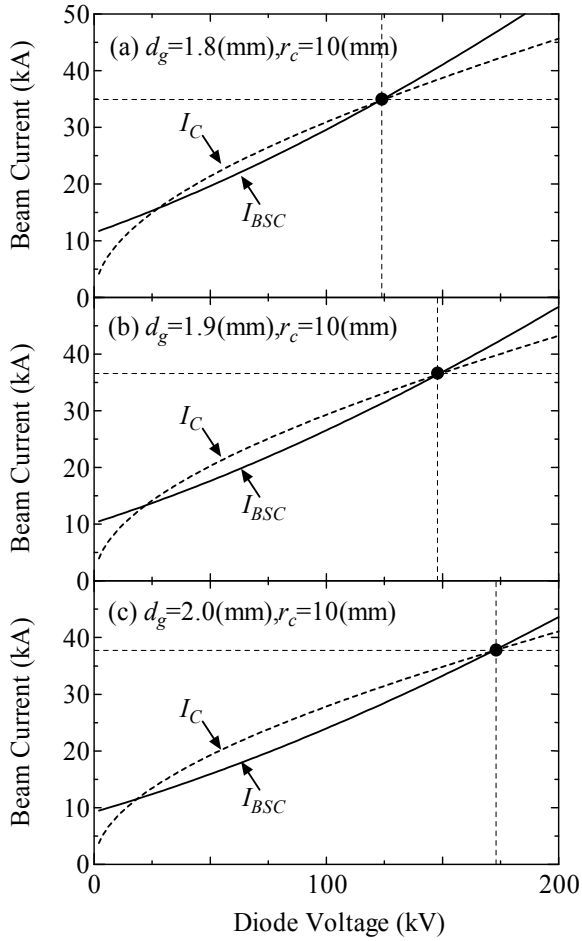


図3 陰極半径 $r_c=10\text{mm}$ と固定した場合のダイオード電圧とバイポーラ空間電荷制限電流 I_{BSC} および臨界電流 I_C の計算結果で(a) はギャップ長 $d_g = 1.8\text{ mm}$, (b)は $d_g=1.9\text{ mm}$ および(c)は $d_g = 2.0\text{ mm}$ の場合

はマイクロ波の周波数である。よって、(7)式とオシロスコープで観測した導波管通過前と導波管通過後の検出時間差から、仮想陰極発振器で発生したマイクロ波の周波数を算出することができる。

4. マイクロ波発生条件の算出およびその考察

ダイオードの陰極半径およびギャップ長の概算を求めるために、理論式を用いて、マイクロ波の発生条件を算出した。

図3および図4は、 $r_b=r_c$ として(3)式および(4)式から求めた各ダイオード電圧における I_{BSC} および I_C の計算結果である。図3は、陰極半径 $r_c=10\text{mm}$ と固定し、(a) はダイオードのギャップ長を $d_g=1.8\text{mm}$, (b)は $d_g=1.9\text{mm}$, そして(c)は $d_g=2.0\text{mm}$ とした場合のそれぞれの算出結果を示す。過去の実験結果より、仮想陰極発振器でのマイクロ波が発生するポイントは、 $I_{BSC}=I_C$ であった。そこで、図3の結果において $I_{BSC}=I_C$ となるダイオード電圧 V_D とビーム電流 I_B をマイクロ波発

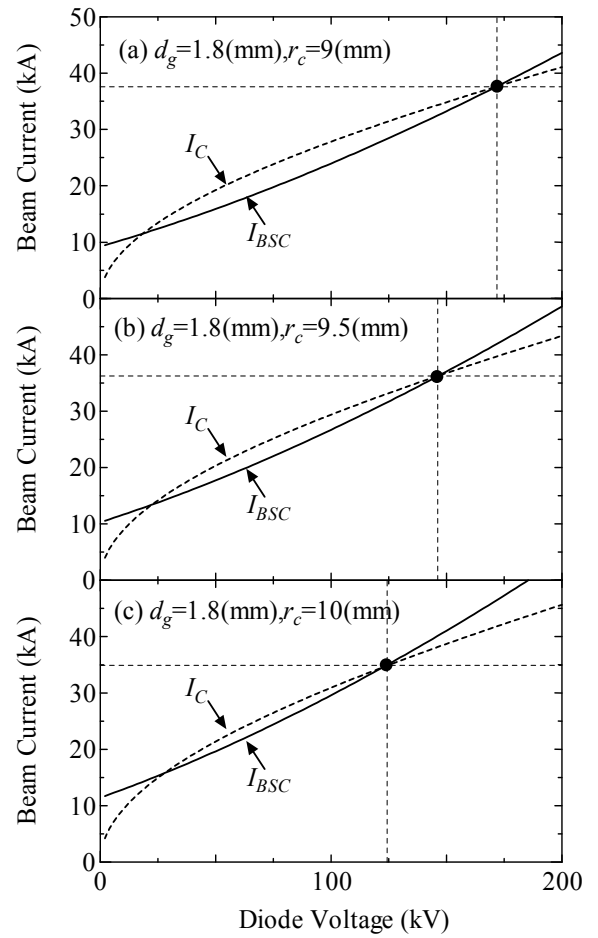


図4 ダイオードギャップ長 $d_g = 1.8\text{ mm}$ と固定した場合のダイオード電圧とバイポーラ空間電荷制限電流 I_{BSC} および臨界電流 I_C の計算結果で(a) は陰極半径 $r_c=9.0\text{mm}$, (b)は $r_c=9.5\text{mm}$ および(c)は $r_c=10.0\text{mm}$ の場合

生の閾値と仮定すると、(a) $d_g=1.8\text{mm}$ のとき $V_D=124\text{kV}$ で $I_B=35\text{kA}$, (b) $d_g=1.9\text{mm}$ のとき $V_D=148\text{kV}$ で $I_B=37\text{kA}$, (c) $d_g=2.0\text{mm}$ のとき $V_D=174\text{kV}$ で $I_B=38\text{kA}$ であることが分かる。この結果より、ダイオードのギャップ長が短い方が、マイクロ波を発生するダイオード電圧およびビーム電流の閾値は下がることがわかる。また、ダイオード電圧の閾値は、ギャップ長の変化に大きく依存していることもわかる。

次に、図4は、ダイオードのギャップ長 $d_g=1.8\text{mm}$ と固定し、(a)は陰極半径を $r_c=9.0\text{mm}$, (b)は $r_c=9.5\text{mm}$, そして(c)は $r_c=10.0\text{mm}$ とした場合のそれぞれの算出結果を示す。図4においても図3と同様に $I_{BSC}=I_C$ をマイクロ波発生の閾値と仮定すると、(a) $r_c=9.0\text{mm}$ のとき $V_D=172\text{kV}$ で $I_B=37\text{kA}$, (b) $r_c=9.5\text{mm}$ のとき $V_D=146\text{kV}$ で $I_B=36\text{kA}$, (c) $r_c=10.0\text{mm}$ のとき $V_D=124\text{kV}$ で $I_B=35\text{kA}$ であることが分かる。この結果より、陰極半径が大きい方が、マイクロ波を発生するマイクロ波

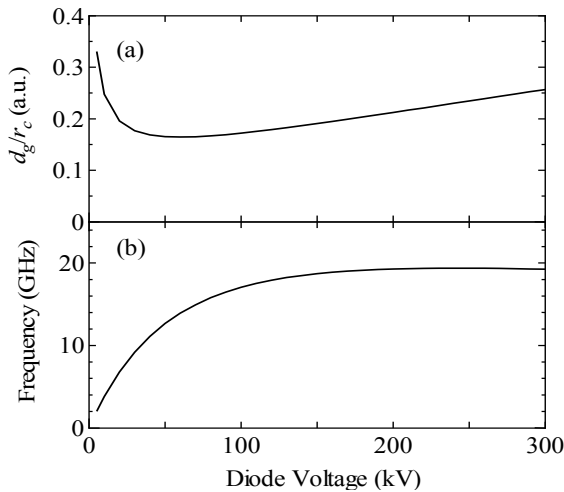


図5 $I_{BSC}=I_C$ とした場合のダイオード電圧に対する (a) d_g/r_c の計算値および (b) マイクロ波の発振周波数の計算値（導波管 WRJ-10 の場合）

を発生するダイオード電圧およびビーム電流の閾値は下がることがわかる。以上の結果より、マイクロ波の発振条件は、ダイオードのギャップ長および陰極半径の微小な変化に大きく依存することがわかる。

次に、図5は、 $r_b=r_c$ と仮定して(3)～(5)式から、ダイオード電圧を変化させて $I_{BSC}=I_C$ となるギャップ長 d_g と陰極半径 r_c の比を計算した結果である。図5(a)より、本実験で実現可能なダイオード電圧が 100～300kV の領域では、 d_g/r_c の値は 0.2～0.25 となることがわかる。

図5(b)は、陰極半径 $r_c=10\text{mm}$ として図5(a)の条件を満足するようにギャップ長 d_g を選んだ場合に、仮想陰極で発生する HPM の周波数を(7)式より算出した結果である。図5(b)より、ダイオード電圧が 100～300kV では、HPM の発振周波数はあまり変化がなく、18GHz 付近であることがわかる。

5. まとめ

パルスパワー装置を用いた仮想陰極発振器で発生する短パルス・大電力マイクロ波を用いた生体の活性化および滅菌処理について研究を行っている。研究を始めるに際して、同軸マルクス出力電圧、陰極半径およびギャップ長の概算を求めるために、理論式を用いてマイクロ波の発生条件を算出した。それらの結果を以下にまとめる。

- 1) 陰極半径を固定した場合、仮想陰極発振器によるマイクロ波発生の閾値となるダイオード電圧およびダイオード電流は、ダイオードギャップ長を短くすると小さくなることがわかった。また、ダイオードギャップ長を固定した場合は、マイクロ波発生の閾値電圧と電流は、陰極半径が大きくなると小さくなることがわかった。

- 2) ダイオード電圧が 100～300kV の領域では、マイクロ波が発振する d_g/r_c の値は 0.2～0.25 となることがわかった。
- 3) 陰極半径 $r_c=10\text{mm}$ とした場合、ダイオード電圧が 100～300kV の範囲でマイクロ波の発振周波数は約 18GHz であることがわかった。

謝辞

本研究は科研費(23560350)の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) 勝木 淳他：「パルス高電界の生体作用と先端的医療応用」、プラズマ・核融合学会誌, Vol.87(10), pp.710-714, 2011.
- (2) 吉野 功他：「銀電極を用いた高電圧パルス殺菌装置による種々の菌に対する不活性化効果」、静電気学会誌, Vol.34(2), pp.81-86, 2010.
- (3) 勝木 淳他：「バイオエレクトリクスー パルス高電圧の生体作用とバイオ・医療応用」、静電気学会誌, Vol.33(4), pp.142-147, 2009.
- (4) M. Yatsuzuka, Y. Hashimoto, M. Sato, I. Ohta, T. Kaneko, S. Nobuhara and T. Tazima : “High-Frequency, High-Power Microwave Generation by a Virtual Cathode Oscillator”, J. Phys. Soc. Jpn., Vol.60, No.2, pp.352 -355, 1991.
- (5) M. Yatsuzuka, K. Nagakawa, Y. Hashimoto, O. Ishihara and S. Nobuhara : “Electron Beam Behavior in an Axially-Extracted Virtual Cathode Oscillator”, IEEE Trans. Plasma Science, Vol.22, No.5, pp.939-944, 1994.
- (6) H. R. Jory and A. W. Trivelpiece : “Exact Relativistic Solution for the One-Dimensional Diode”, J. Appl. Phys., Vol.40, No.10, pp.3942-3926, 1969.
- (7) R. B. Miller : “An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams”, Plenum Press, New York and London, pp.31, 1982
- (8) J. Benford, J. A. Swegle and E. Schamiloglu : “High Power Microwaves”, Taylor and Francis, New York, 2007.
- (9) W. Woo : “Two-Dimensional Features of Virtual Cathode and Microwave Emission ”, Phys. Fluids, Vol.30, pp.239-244, 1987.
- (10) J. Benford, H. Sze, W. Woo, and B. Harteneck : “Virtual-cathode oscillator emission by a pinched diode”, Phys. Rev. Lett., vol.56, No.4, pp.344-346, 1986.
- (11) H. Sze, J. Benford and W. Woo : “High-power Microwave Emission from a Virtual Cathode Oscillator”, Laser and Particle Beams, Vol.5, Part 4, pp.675-681, 1987.
- (12) S. Burkhart : “Multigigawatt microwave generation by use of a virtual cathode oscillator driven by a 1–2 MV electron beam”, J. Appl. Phys., vol. 62, No. 1, pp.75 - 78, 1987.
- (13) D. Price, D. Fittinghoff, J. Benford, H. Sze and W. Woo : “Operation Features and Microwave Characteristics of the Vircator II Experiment”, IEEE Trans. Plasma Science, Vol.16, No.2, pp.177-184, 1988.

数学記号

八木善彦*

Mathematical Symbols

Yoshihiko YAGI*

Keywords: mathematics, education, symbols

1. はじめに

$\sqrt{a}$ は英語では square root of a と読み⁽¹⁾、訳すと a の平方根になる。 a の平方根は $\sqrt{a}$, $-\sqrt{a}$ との2つであり、 $\sqrt{\quad}$ は根号 (radical symbol, root sign) という。平方根は $a = b^2$ となる b のことである。一意性のないため「平方根の記号」はない。根号を使って2つある平方根を表すことになる。ただし、この概念が意味を持つかどうかということを含め、さまざまな点で差異が生じるということに注意が必要である⁽²⁾。

数学で使用される記号は、記号の見た目やその文脈における意味、あるいは記号の由来など様々な状況で決まり、使用される人の集団によって、異なるものが用いられたりする。「記号」と「読み」との間には相関性を見いだせず、分けて考えるのが妥当である。

学習指導要領には、数学学習における用語・記号の重要性として

用語・記号は、社会・文化で共通に認められた内容を簡潔に表現し、それらを的確に使うことによって、思考が楽になり、コミュニケーションが能率的になる。数学においては、特に記号が大きな役割を果たしている。記号は抽象的で形式的であるだけに、操作がしやすく、しかも、より一般性を持っている。上手に記号体系を作ることにより、現実の意味を離れて形式的な操作が可能になり、思考を能率的に進めることができるようになるのである。このように、数学において用語や記号の使い方に慣れることによって、思考を、より正格に、よりの確に、より能率的に行うことができ、社会や文化の発展に貢献する人間を育てることができる。

とある⁽³⁾。

用語・記号は意味、簡潔さ、明瞭さが十分である必要がある。特に、日常生活で使われる用語と同じ言葉であるのに、数学で使用する場合には意味が異なることもある。

数学記号が用いられたときその式をどう読むか、数学記号の名は何かということが、それを慣用的に用いる世界によって異なるのである。高等学校 (高専低学年) の授業で用いられる数学記号とその呼び名や使い方に関する話題等についてまとめる。

2. 数学記号について

2.1 意味を使う

数式を読み下す場合、その意味を使う場合がある。以下は、意味で読み下す例をあげる。この場合、記号名は意識されない。

$a \times b$	a かける b	$\times$	乗算記号
$a \cdot b$	a かける b	$\cdot$	乗算記号, 中点
$a \div b$	a わる b	$\div$	除算記号
a/b	a わる b	$/$	除算記号, スラッシュ
$n!$	n の階乗	$!$	階乗記号, 感嘆符
$\log_a b$	a を底とする b の対数	$\log$	対数記号
$a \in A$	a は集合 A の要素	$\in$	要素記号
(英語では a is an element of A)			
$A \ni a$	a は集合 A の要素	$\ni$	要素記号
(英語では A contains a)			

$\in, \ni$ の記号名は, Mathematica^(4, p.972) では

$\in$ element, $\ni$ reverse element とよぶ。

$A \subset B$ A は B の部分集合 $\subset$ subset

$B \supset A$ A は B の部分集合 $\supset$ superset

ただし、部分集合の記号は、部分集合・真部分集合の記号で混乱がある。さらに $\subset, \supset, \subseteq, \supseteq, \subsetneq, \supsetneq$ など使用するテキストの流儀によるので、注意が必要である。

$\sqrt{a}$ は、最初に述べたように、英語では square root of a と読み直訳すれば a の平方根となるが、平方根と $\sqrt{a}$ は異なる概念なので日本ではルート a とよぶ。した

*一般科 教授

がって、 $\sqrt[n]{a}$ は、the n th root of a の直訳 a の n 乗根ではなく、 n 乗根ルートとよぶ。教科書には、このような記述はない。

2.2 読み方の違い

分数は英語では分子から分母と読んでいくが日本では分母から分子へ読む。

$$\frac{a}{b} \quad a \text{ over } b \quad b \text{ ぶんの } a$$

微分記号では日本でも上から下へ読み下す。

$$\frac{dy}{dx} \quad dy \text{ over } dx \quad \text{ディ } y \text{ デイ } x$$

なお、偏微分の ∂ は通常ディと読む。偏微分を強調するときはラウンド ディ、パーシャル ディとよぶ。

$$\frac{\partial y}{\partial x} \quad dy \text{ over } dx \quad \text{ディ } y \text{ デイ } x \text{ (通常)}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} \quad \text{round } dy \text{ over round } dx, \\ \text{ラウンド } dy \text{ ラウンド } dx$$

意味で読み下せば「 y の x による偏微分」となり記号で読むより長くなる。

(the partial derivative of y with respect to x)

記号で読んだ場合は、聴いている人が同じ数式を見ている条件が無いと意味が曖昧になる可能性がある。

さらに ∂ でも境界を表す場合もある。

$$\partial D \quad D \text{ の境界} \quad \text{boundary of } D$$

2.3 記号の違い

同じ意味の記号でも教科書により表記の異なるものがある⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

逆三角関数

$$\sin^{-1} x, \quad \text{Sin}^{-1} x, \quad \arcsin x \quad \text{など三角関数すべて}$$

行列

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \quad \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$$

転置行列

$${}^t A, \quad A^t, \quad A^T$$

同値

$$\leftrightarrow, \quad \rightrightarrows, \quad \Leftrightarrow, \quad \text{iff}$$

不等

$$\neq, \quad \neq, \quad \neq, \quad <>$$

記号が同じようであっても意味の異なる場合がある。ならば

$$\rightarrow, \quad \Rightarrow, \quad \implies$$

「 p ならば q ($p \rightarrow q$)」が真のとき「 $p \Rightarrow q$ 」と表す⁽⁶⁾。

「 p ならば q 」を「 $p \implies q$ 」と表す⁽⁵⁾⁽⁷⁾。

ランダウの O -記法も関数を級数展開したときの値の変動のおおよその評価を与えるための記法であるが、 o , Ω , ω , Θ といった類似記法が定義され、教科書により微妙な問題となる。

3. ブラックボード・ボールド

ベクトルを表すときに $\vec{a}$ のように文字の上側に矢印をつけるが⁽⁵⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、 $\mathbf{a}$ のように太字にする⁽⁵⁾ 流儀がある。

この太字を黒板に書くときにチョークで塗りつぶすのが面倒なため黒板用に太字を表す表記ができた。それを黒板太字体 (ブラックボード・ボールド) とよぶ。その書体は整数の集合 ($\mathbf{Z}, \mathbb{Z}$) や実数の集合 ($\mathbf{R}, \mathbb{R}$) を表すシンボルとして使われるようになり新しく記号となった。

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ

もともとは省力化のために作られた記法のため、二重線にする部分や二重線にする位置をめぐって異字体が出現することになる。ベクトルを表す場合の小文字のブラックボード・ボールドは AMSFonts package (AMS. アメリカ数学会 American Mathematical Society) にも含まれていないため、なおさらである。

abcdefghijklmnopqrstuvwxyz

斜体や筆記体になれば、誰が定義するのでしょうか。

数学の世界ではこのように日々、新しい記号が発明されている。

4. 記号の抽象性

記号を使用することで抽象化が促進される。それは、操作がしやすくなり、しかも、より一般性を持っているからである。

関数 $y = f(x)$ において、 $f(a)$ は関数の $x = a$ のときの値として定義される。ところが、いつのまにか定数 a は変数に変じて

$$\text{偶関数} \Leftrightarrow f(-x) = f(x) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &x \text{ 軸方向 } p, y \text{ 軸方向 } q \text{ の平行移動} \\ &\Leftrightarrow y = f(x - p) + q \end{aligned} \quad (2)$$

のように使用され、概念は抽象性を獲得していく。2 次関数 $y = f(x)$ であったものが、4 次関数 $y = f(x^2)$ になったり、 $y = f(x)$ のときの $f(y)$ のような再帰的定義を考えたりできる。定理や命題をすべて論理記号で表し、論理記号を素数に置き換えて関数計算を行うことにより、論理の完全性を証明したり、(有限の公理からは) 証明不可能な定理が存在することが証明できる。

$$\sum_{n=1}^{\infty} n = 1 + 2 + 3 + \cdots \quad (3)$$

は無限大に発散する。ところが、ゼータ関数

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = 1 + \frac{1}{2^s} + \frac{1}{3^s} + \cdots \quad (4)$$

を使って $s = -1$ や $s = 0$ を計算すると、

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{-1}} = 1 + 2 + 3 + \cdots = -\frac{1}{12} \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^0} = 1 + 1 + 1 + \cdots = -\frac{1}{2} \quad (6)$$

となる。これは荒唐無稽な話ではなく、朝永 振一郎博士がノーベル賞をもらった、無限大の繰り込みという操作にあたる。繰り込みは、相対論・場の量子論とならぶ現代物理学が満たすべき基本原理となっている。抽象化が進むと一見関係のないことの間につながりができ、あらたな関係が明らかになる。

5. まとめ

高専の教科書間でも、記号の使用法が異なる例が見された。高等学校までの教育のように、国の学習指導要領で教えるべき記号や用法が設定され統一されればこのようなことは無いのかもしれないが、“ $\geq$ ”、“ $\leq$ ”のように外国と異なる記号で統一し国内で用いるのも、国際化がさげられる昨今には問題となろう。不等の記号のように斜線の向きが異なるのも、困ったことである。気になり出すと夜も眠れなくなる。高等学校の教育課程と同じ内容の分野でも記号や定義のぶれがあることが判明した。本来、記号の違いは、物理と数学など分野が違えば当然あるわけで、専門書のテキストが異なれば記号表記も異なることになる。多数の専門教科に分

かれていく高専の教育では、色々な記号を場合場合で使い分けできるほうが有用であるのかもしれない。

6. おわりに

数学の教育は、記号を用いることによって抽象的思考の訓練を行う。抽象的思考の中には、いままで前提としていた枠を超えて概念を適用し、整合性を持つように調整する機能が含まれる。その意味では、現在の数学の教育内容は不十分である。本来、解析学の分野では複素数を用いた計算が主流である。電磁気学や量子力学でも複素関数を扱うのが普通である。一方、整数論などのように強い制限をかけて、その中で成立する真理を発見するのも数学である。記号を用いて、思索をめぐらせる人間を思い浮かべるとき、人間の思考の不思議な側面を覗いたような気分になる。

サイエンス・ライターのマット・リドリーが「アイデアが交わる時」⁽¹²⁾で述べているように 1 人では作れないプロダクト、1 人の頭の中に入りきらない複雑な知識が、分業化された個々の知識を共有することで生み出され、その世界全体の情報になっていく社会が生み出されようとしている。役割分担・専門性ができて、1 人の人間の頭では作れない複雑な概念が複数の人間の協働によって生み出せるというコンセプトだ。記号というのは、この複雑な概念を複数の人間の協働によって生み出すことにおおきくかかわっている。

参考文献

- (1) 小松勇作編:「数学 英和・和英辞典」, 共立出版株式会社, 1996.
- (2) ウィキペディア:「平方根」
<http://ja.wikipedia.org/wiki/平方根>
- (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) S.Wolfram:「The Mathematica Book, Fifth Edition」, Wolfram Media, 2003.
- (5) 田代嘉宏, 難波完爾編:「新編 高専の数学 1,2,3 (第 2 版)」, 森北出版株式会社, 1990.
- (6) 高遠節夫, 斉藤斉編:「新訂 基礎数学」, 大日本図書株式会社, 2003.
- (7) 岡本和夫監修:「新版 基礎数学」, 実教出版株式会社, 2010.
- (8) 矢野健太郎, 石原繁編:「基礎の数学 (改訂版)」, 裳華房株式会社, 1989.

- (9) 高遠節夫, 斉藤斉: 「新訂 線形代数」, 大日本図書株式会社, 2003.
- (10) 岡本和夫: 「新版 線形代数」, 実教出版株式会社, 2011.
- (11) ウィキペディア: 「朝永振一郎」
<http://ja.wikipedia.org/wiki/朝永振一郎>
- (12) Matt Ridley : TED 「アイデアが交わるとき」
<http://www.nhk.or.jp/superpresentation/backnumber/121029.html>

兵庫県南東部の金環日食北限界線調査

木村優友* 江副真悠* 服部誠一朗** 吉本隆光† 八木善彦‡ 大多喜重明‡ 福本晃造§

Study of the Northern Limit of Observable Places of an Annular Solar Eclipse in the Southeast of Hyogo Prefecture

Yuu KIMURA* Mayu EZOE* Seiichirou HATTORI** Takamitsu YOSHIMOTO†
Yoshihiko YAGI‡ Shigeaki OHTAKI‡ Kozo FUKUMOTO§

ABSTRACT

An annular eclipse of the sun could be seen throughout Japan for the first time in 282 years. We proposed to Kobe City College of Technology students that they should observe the annular eclipse using special glasses for seeing a solar eclipse which were distributed to them beforehand. As a result, we found that there was a difference of northern limit boarder-line between the official announcement of the National Aeronautics and Space Administration and that of Kobe City College of Technology.

Keywords : northern limit boarder-line , solar eclipse

1. はじめに

2012年5月21日、約282年ぶりに全国で部分日食を見ることができたほか、九州地方南部、四国地方南部、近畿地方南部、中部地方南部、関東地方など広範囲で金環日食が見られた。兵庫県南部には金環日食が北側で見える限界の位置に線を引いた北限界線が通っていた。神戸高専は兵庫県南部から登校している生徒が多く、北限界線近くでの観測も可能ではないかと考えた。日食グラスを用いて日食を観測して、北限界線を作成し、公式発表の北限界線と比較した。

2. 方法

2.1 日食グラスの作成 学生や保護者、教員に観測してもらうために日食グラスを製作した。日食グラスは方眼画用紙を長方形(10mm×15mm)に切り、その半分(5mm

×15mm)のところに折り目を入れた。目の位置に合わせて図1のように2つの穴(1mm×3mm)をくり抜いた。くり抜いた穴よりも少し大きめ(2mm×4mm)にBaader社のアストロソーラーフィルターを切っておき、セロテープが穴からはみでないようにアストロソーラーフィルターをセロテープで内側に貼り付けて穴を塞いだ。穴を塞ぎ終わったら、つけておいた折り目に沿って画用紙を半分に折り、穴の周りの数箇所をステープラーで留めた。最後は、図2のようにして光が漏れていないか、レンズに傷が入っていないかを専門的知識を持った者が点検した。



図1. 日食グラス作成(穴をくり抜いた後)

* 機械工学科

** 都市工学科

† 機械工学科 教授

‡ 一般科 教授

§ 一般科 講師



図 2. 日食グラスの点検

今回使用したアストロソーラーフィルターは双眼鏡用日食グラス（図 3）、望遠鏡用日食グラス（図 4）にも使用した。



図 3. 双眼鏡用日食グラス



図 4. 望遠鏡用日食グラス

双眼鏡用日食グラスは、日食グラスよりも太陽の詳しいところを手軽に観測するために作成した。望遠鏡用

日食グラスは、金環日食の開始時間、金環日食の終了時間を観測するために作成した。

2.2 アンケート 調査方法は、神戸高専の学生に協力してもらい、登校中に観測して貰うように呼びかけた。呼びかけと同時に、アンケート用紙、観測についての注意書き、作成した日食グラスを配布した。アンケート用紙には、金環日食の様子（A：繋がっていた、B：繋がっていなかった、C：どちらとも言えない、の3択）、観測場所、観測時間、感想、氏名、を記入する欄を設け、各自で観測後に記入してもらい、5月21日の昼休みにアンケート用紙を回収した。

アンケート用紙回収後、およその観測場所別に仕分けた。次に、観測場所の住所から細かく仕分け、用意しておいた地図に金環日食の様子別にカラーシール（黄：繋がっていた、青：繋がっていなかった、緑：どちらとも言えない）を貼った。

貼り付けたカラーシールの結果から北限界線を引き、決定した。そして、NASAの公表発表の北限界線と神戸高専作の北限界線を比較した。

2.3 観測 1学年、2学年の全学生、希望者の学生や教員、保護者が予想されていた金環時間の7時28分前後の5分の間に日食グラスで観測し、太陽の光がリング状に繋がっているかを調査し、観測地を記入してもらった。この時間帯は登校中の学生が多かったので、人や車との接触など、周りの迷惑にならないように注意して観測するように呼びかけた。生徒に配布した観測についての注意書きには、銀色部分を触らない、必要以上に力を加えない、日食グラスを外して太陽を見ない、穴のあいた日食グラスは使用しない、危険な場所で観察をしない、の5つの注意事項を記入した。

3. 結果

観測場所は、神戸高専校内が1番多く、学園都市駅、総合運動公園駅の他に、西神中央駅、明石駅、自宅前などが多かった。そのため、広範囲での観測に成功した。データ総数は384だった。同じ場所で観測したが、観測者によってはリング状に見えた人と見えなかった人がいた。その場合の結果は、多数決で多い方の結果で導き出した。神戸高専校内では、繋がっていた：25人、繋がっていなかった：5人、どちらとも言えない：6人という結果になった。学園都市駅では、繋がっていた：6人、繋がっていなかった：9人、どちらとも言えない：15人という結果になった。総合運動公園駅では、繋がっていた：7人、繋がっていなかった：1人、どちらとも言えない：3人という結果になった。観測ポイントについては、緯度/経度では求めることが出来ないで平面直角座標5系を使用した。

表 1. 観測者の多かった場所別の観測結果

観測地	繋がっていた	繋がっていなかった	どちらとも言えない
神戸高専校内	25 人	5 人	6 人
学園都市駅	6 人	9 人	15 人
総合運動公園駅	7 人	1 人	3 人

明石駅付近で観測していた人が多かったが、曇っていたため、見えない人が多かった。

また、神戸高専校内で観測していた自然科学部員の 17 人中 16 人は金環になったことを観測できたが、1 人だけ確認できなかった人（視力 0.5）がいた。

神戸高専の北限界線の導き方は、最西部でリング状に見えた 8 箇所の緯度と経度を調べだし、座標地に変えて、最小二乗法で切片 (C) と傾き (K) を導き、一次方程式の公式に数値を代入した。神戸高専が出した北限界線は下の式から導いた。

$$y = Kx + C \quad (1)$$

$$C = -214401.5121$$

$$K = 1.148583663$$

そして図 5 が神戸高専が完成させた北限界線マップである。

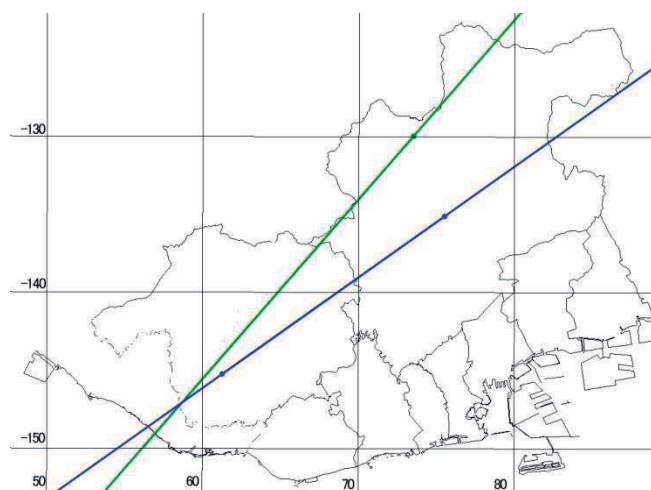


図 5. 作成した北限界線と NASA の北限界線との比較
(作図協力：中尾幸一)

4. 公式データとの比較

NASA の公式発表の北限界線と神戸高専作の北限界線を比較すると、少しずれていることが分かった。

神戸高専が作成した北限界線（図 5 の緑の線）と NASA の公式発表の北限界線（図 5 の青の線）のずれの原因として、神戸高専で作成した限界線の精度、観測者の人数、天候、建造物、観測方法が上げられる。

3.でも述べたように、観測時には神戸市全体に厚い雲がかかっており観測できない地域や観測しにくい地域があったので、金環日食のように見えたりしたのではないかと思われる。

次に、多数の観測者から、建造物が邪魔で観測できなかったという意見があった。神戸市、明石市、特に駅前には高く大きい建造物が多く、通勤通学時に観測している人もいたため観測できない人が多くなったと考えられる。

最後に、神戸高専校内にいた人以外は日食グラスで観測していた。日食グラスで観測すると小さいので、金環日食になっているか、なっていないかが判断しにくかった。また、朝の忙しい時間帯だったので、落ち着いて観測できなかったりしたのが観測誤差を生み出したのではないかと考えられる。

5. まとめ

目標としていた広範囲での観測が成功し、とても多くの人に参加してもらった。しかし、太陽に雲がかかっていたために、金環日食を観測できない人がいた。曇っていたために、日食グラスを使用せずに観測した人がいたので、危険行為としてもっと厳重に注意を促すべきである。

金環日食当日、望遠鏡での観測が可能ということを学生に公表していたために、神戸高専校内で学生が集団で観測していた。また、予想限界線周辺や学生が少ない地域では当日の協力者とは別に、予め約 10km 四方ごとに人員を配置し、観測していれば、より広範囲で、より詳しいデータが収集できたと思われる。

参考文献

- (1) 国立天文台：「2012 年 5 月 21 日 金環日食」
<http://naojcamp.mtk.nao.ac.jp/phenomena/20120521/>
- (2) 2012 年金環日食日本委員会：「金環日食を迎え撃つ」,
<http://www.solar2012.jp/asj2012a/fig.html>.
- (3) NASA：「NASA Eclipse Web Site」,
<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/eclipse.html>

神戸高専研究紀要 投稿規定（投稿の手引き）

1. まえがき

本誌は、神戸市立工業高等専門学校の研究紀要として毎年発行する。

2. 編集委員会

『研究紀要』の編集、発行は、研究紀要編集委員会（以下、編集委員会と称する）がその任にあたる。編集委員会は、情報委員会により組織される。

3. 投稿資格

原稿の内容は学術に関する未公開の論文、または、資料とする。投稿者は、神戸市立工業高等専門学校の教職員、前教職員、非常勤講師および在学生とする。共著論文または共著資料は、少なくとも前記1名を共著者として含まなければならない。

4. 投稿方法

投稿者は、後述の「投稿上の注意」を熟読の上、本規定に適う形式で原稿を作成し、投稿すること。

原稿は、ワードプロセッサなどで作成したA4サイズのPDF形式ファイルを提出すること。フォーマットが投稿規定に準拠していること、図表が十分な品質であること、全てのフォントが埋め込まれていることを確認し、別途案内する方法で提出すること。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、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、ランニングヘッドおよびページ番号は、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

(b) 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ページ	文字の大きさ	制限枚数
1. 和文（横書）	2 段組, 24 文字×50 行	10 ポイント	原則として, <u>6 ページ</u> 以内でまとめること. 超過の場合は10 ページ以内とし, それを超えることは認められない.
2. 英文	2 段組, 48 文字×50 行	10 ポイント	
3. 和文（縦書）	2 段組, 33 文字×32 行	10 ポイント	
4. 和文, 英文(横書特例)	(和)1 段組, 50 文字×46 行 (英)1 段組, 100 文字×46 行	10 ポイント	

<6-2> 表題ページ

(a) フォント・フォントサイズ

表題ページのフォント, フォントサイズについては, 表2を参照すること. なお, 表2では, フォントを明朝体, Times などに指定しているが, それに酷似した他のフォントを使用しても構わない. また, 英語以外の外国語（独語, 仏語など）を使用する場合は, 表2の英文に準じるものとする. ただし, この場合, 英語表題は必要となるので注意すること.

表2 表題ページに使用するフォント・フォントサイズ

フォーマット	表 題	著 者 名	英語表題	英語著者名	英文要旨	本 文
1. 和文(横書)	ゴシック体 18 ポイント	明朝体 12 ポイント	Times 14 ポイント	Times 12 ポイント	10 ポイント ・見出しの「 Abstract 」はゴシック ・要旨本体は Times	明朝体 10 ポイント
2. 英 文	ゴシック体 18 ポイント	Times 12 ポイント				Times 10 ポイント
3. 和文(縦書)	ゴシック体 18 ポイント	明朝体 14 ポイント	Times 10 ポイント	Times 10 ポイント		明朝体 10 ポイント
4. 和文, 英文 (横書特別)	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)は頭文字のみを大文字とし, 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・前置詞は除く.
- 著者名は, 表題の後に1行あけて記入すること. 名(First Name)は頭文字のみを大文字とし, 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等の記号を上付きで「*」、「**」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、英文要旨を必要としない。また、英語以外の外国語(独語、仏語など)で本文を書く場合でも、論文であるならば英語による英文要旨は必要である。

- ・ 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(Normal)を用いること。
- ・ 各キーワードは、名詞形で記述し、それぞれをカンマ(,)により区切ること。また、特に意味がある場合を除き、全て小文字で示すこと。尚、文字の大きさは10ポイントとする。
- ・ 英文キーワードが2行にわたる場合は、適切に配置し見やすいものにすること。本文が英語以外の外国語の場合、本文と同じ外国語を用いても構わない。
- ・ 和文(縦書)、資料に関しては、キーワードは必要としない。

(f) 本文

上述のキーワードから1行あけて2段組となる本文を書き出すこと。特例を除き、本文は2段組とする。

※ 英語表現、英文要旨、キーワード、および英文論文など、外国語で記述する文章、単語は、それを読んだ国内外の読者が「正確明快に理解できる」ということに注意して執筆すること。

<6-3> 本文

本文は、章(チャプター)、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(チャプター)について

本文中の各章の始めには、例えば、「**1. はじめに**」、「**2. 実験操作**」、等々の章番号と適当な見出しを付け、改行してから文章を書くこと。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、文章が若干しか書けない場合など). セクションの区切りは、行をあけないこと。

※ 節をさらに細かく分ける場合も、適当な見出しは必要となる。このとき、細節番号の決め方やフォントなどは著者の見識にゆだねることとする。例えば、「2. 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載すること。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, No.5, pp.555-561, 1999.
- (8) Taro Kobe: "Design Considerations for New Circuit Topology", Proceedings of IEEE-International Symposium on Power Electronics Circuit (SPEC'98), Vol.1, pp.23-28, 1998.

英文の場合、「Conference」や「Symposium」、「International」等を「Conf.」、「Symp.」、「Int.」と略しても構わない。また、「Proceedings」や「Transactions」等も「Proc.」、「Trans.」と略しても構わない。

上記の文献(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 (SPEC' 98), Vol.1, pp.23-28, 1998.

(b) 本文中での引用

本文中に引用する場合は、その文章や項目の終わりに、「⁽¹⁾」, 「^{(1),(3)}」, 「⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾」のように、文末に挙げた参考文献の文献番号を上付で記入すること。また、参考文献中の文章等をそのまま引用する場合は、引用符「」や“ ”, で括るか、横書の場合は左端に、縦書の場合は上端に、本文より2～3文字(4～6文字)多めに余白を取り、引用箇所が明確に識別できるようにすること。本文と引用箇所の間に1行空白を入れても構わない。

一般に公開されていない委員会報告等は参考文献としてあげないようにすること。また、掲載は決定しているが未発行の論文等は、巻、ページの代わりに「印刷中」もしくは「in press」と書くこと。

尚、ページのレイアウトに関する詳細は、本規定の末尾に添付した『神戸高専の紀要に関するフォーマット』を参照すること。

7. 著作権

神戸高専研究要に掲載された論文、資料の著作権(著作財産権, Copyright)は神戸市立工業高等専門学校に帰属する。

尚、本投稿規定は、平成24年8月に改正され、平成24年度から施行されるものとする。

(平成18年3月改訂)

(平成21年3月改訂)

(平成22年12月改訂)

(平成24年8月改訂)

【テンプレート中の青文字は全て削除して下さい】

rev. 20120808

25 mm

(1行空ける)

神戸高専の紀要に関するフォーマット (18 pt, ゴシック)

(1行空ける)

神戸太郎* 高専次郎** (12 pt)

(1行空ける)

Format for Memoirs of Kobe City College of Technology (14 pt)

(1行空ける)

Taro KOBE* Jiro KOSEN** (12 pt)

(1行空ける)

ABSTRACT (10 pt, Sans-serif)

(1行空ける)

行頭は字下げせずに、150 ワード程度の英文要旨を、10 ポイント、Times 系書体で書く。この時、左右にはそれぞれ 2 文字程度の余白を取ることを忘れないようにする。十分に推敲した英文要旨を記載すること。また、要旨は改行せずに一段落で書き、引用番号を付けての文献引用はしない（必要であれば要旨中に記述する）。

(1行空ける)

Keywords : format, reference (Times 系 10 pt, “Keywords”のみ斜体, 5 件以内, 左に 2 文字程度余白)

(1行空ける)

1. はじめに

このファイルは投稿規定の中で特に重要と思われる部分および補足説明を記したものである。詳細については、

<http://www.kobe-kosen.ac.jp/activity/publication/kiyou/> を参照すること。なお、このファイルは Windows 版 Microsoft Word (2003 以前) で作成しているため、これ以外の環境では適宜調整すること。

見出し、本文とも 10 pt とし、章と節の見出しのみゴシック/Sans-serif 体にする。本文は、和文は明朝体、英数字は Times 系とする。和文中に混在する英数字も Times 系とすること。

(章の間は 1 行空ける)

2. 章の分け方

章と章の区切りは上記のように改行し、必ず 1 行空ける。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。(↓節の間は改行しない)

2.1 節について 節 (セクション) の見出しには、左記のように「.」で区切った節番号をつける。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 文字分あけて書き始めること。ただし、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。(↓節の間は改行しない)

2.2 節を更に細かく分ける場合 (サブセクション)

更に細かく分けられた節 (サブセクション) には、適当な見出しは必要であるが、その記述方法や使用書体は著者に委ねる。例として、「2.2.1」、「2.2.2」や (a) (b) (c) など。

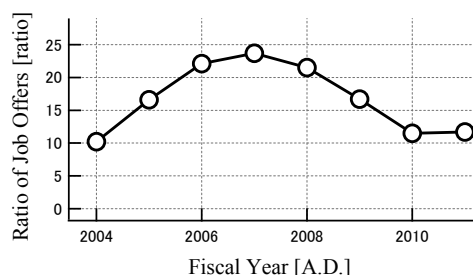


図 1 神戸高専本科の求人倍率の推移。

(図表の下は 1 行空ける)

表 1 投稿紀要のフォーマット。

フォーマット	段組・文字×行数	文字	制限枚数
1. 和文	2 段, 24 字×50 行	10 pt	原則 6 ページ以内。超過の場合も 10 ページ以内。それ以上は認めない。
2. 英文	2 段, 48 字×50 行		
3. 和文(縦書)	2 段, 33 字×32 行		
4. 横書 (和) 特例 (英)	1 段, 48 字×46 行 1 段, 96 字×46 行		

(図表の下は 1 行空ける)

3. 原稿の記述について

下記の指針に従って原稿を作成すること。

3.1 図や表について

図や表は、図 1 や表 1 のように

* 一般科 教授

** 専攻科 電気電子工学専攻

24 mm

通し番号を付けて掲載すること。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。

3.2 単位について 数値と単位の間には空白を入れ、変数を表す文字は斜体（イタリック体）、数値と単位は正立（ブロック体）で記述すること。例：左右マージンは $d = 16 \text{ mm}$ とする。

3.3 参考文献について 参考文献は末尾のフォーマットを参考に引用順に列挙すること⁽¹⁾。引用は上付き、丸括弧で番号を記すこと⁽²⁾⁽³⁾。

3.4 投稿ファイルについて 投稿は PDF ファイルとする。その際、図表が十分なクオリティであることと、全てのフォントが埋め込まれていることを確認すること。印刷工程上、フォントが埋め込まれていない原稿は処理できない。フォントが埋め込めているかどうかについては、Adobe Reader であれば、[ファイル]-[プロパティ]-[フォント] で全てのフォントが図2のように「(埋め込みサブセット)」と表示されていることを確認すればよい。



図2 フォント埋め込みの確認。

（図表の下は1行空ける）

なお、オンライン公開なので必要であればカラー図版を使用しても差し支えない。また、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。

（章の間は1行空ける）

4. まとめ

投稿者が提出した PDF 原稿がそのまま印刷原稿として用いられるため、決められた規定には充分注意を払って原稿を作成して頂きたい。神戸高専研究紀要をより充実したものにするため、みなさまのご協力をお願いする。

（謝辞の前は1行空ける）

謝辞

本研究の一部は〇〇の支援を受けて進められました。ここに謝意を表します。

（参考文献の前は1行空ける）

参考文献

- (1) 研究振興委員：「神戸高専研究紀要 投稿規定」，神戸高専研究紀要，第 37-2 号，pp.75-78，1999.
- (2) Hanako Kosen, Taro Kobe *et al.*: “A Novel Scheme for Kosen System”, IEEE Trans. on Kosen Education, Vol.12, No. 3, pp.456-789, 2012.
- (3) 高専次郎：「高専紀要執筆学概論」，神戸高専出版，2012.

神戸高専研究紀要第 51 号 編集委員

笠井 正三郎（総合情報センター長）	小林 洋二（副センター長）	戸崎 哲也（副センター長）
児玉 宏児（副センター長）	一瀬 昌嗣（副センター長）	東 義隆（機械工学科）
赤松 浩（電気工学科）	長谷 芳樹（電子工学科）	九鬼 導隆（応用化学科）
高科 豊（都市工学科）	菅野 聡子（一般科）	今村 一博（一般科）
岡田 和正（総合情報センター）	横部 保美（学生係）	萩庭 恵美（図書館）
児玉 紫乃（図書館）		

研 究 紀 要 第 51 号 （非売品）

発 行 日 平成 25 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 24 年度 第 318 号（広報印刷物規格 A-6 類）