Research Reports of Tokyo National College of Technology

東京工業高等専門学校



第 45(2) 号

2014.1

東京工業高等専門学校研究報告書 第45(2)号 目次

Mathematicaを活用した数学の授業について	清	藤		晃	1
長期休暇における数学の学力維持と学力不振学生の学力向上への取り組み	安 市 小中	富川澤 型	義裕聖	泰 子 肇	9
数学における定期的演習による効果と学生のニーズ	安	富	義	泰	15
紙飛行機作りから学ぶ小学生向け技術教育の実践	堤新北安三	國越田谷	博広大利知	貴 幸 輔貴世	21
波型突き合わせ接着継手の接合部の応力集中抑制と引張強度向上の試み	志川黒林	村瀬崎	遥 丈	穣 平茂晴	27
水撃ポンプの性能および流動状態に及ぼす寸法効果	斉越佐塚志	藤智藤原村	純啓敬	夫 文 侍 望 穣	31
表計算ソフトによる鉛フリーはんだのAnandパラメータ決定	林高海志	部原村	丈真理	晴 彰 穣	39
波動逆解析による内部欠陥の可視化システムの構築	福西鈴福	田村木田	勝良隆昌	己 弘 之 了	47
円周方向溝付管を通した間欠振動流と 呼気・吸気用ツインピストン式人工呼吸器による生体外換気実験	清内清菅	水田水原	昭敦優路	博 士 史 子	53
モータの駆動領域におけるインバータノイズ低減法のシミュレーション評価	綾村松	野上井	秀昂義	樹 平 弘	57

有効電力損失低減効果に基づく無効電力の価値評価手法	土橋	井本	拓	淳 郎	63
フォトリソグラフィを用いたMOEMS技術の教材開発 一「第3報,マイクロ光電子デバイスの設計及び基礎特性の評価—	新伊	國藤	広	幸 浩	73
光ファイバを用いた偏光干渉型光マイクロホンの感度向上に関する研究	新	威	広	幸	81
Silicon Nanostructure Formation by Hydrogen Radical	永	吉		浩	85
魚眼カメラを用いた移動ロボット向け全方位障害物検知システムの基礎実験	山 青	内木	宏	索 之	97
3次の統計量を用いたパタン類別法に関する検討	鈴 北	木越	雅大	人 輔	105
体験・分析・表現の3段学習成長プロセスによる 主体的思考力を涵養する早期技術者教育	小大清木新一西城藤羽永雉新	坂塚水村國戸村石野鳥吉賀田	敏友昭知広隆 英 広真章武	文彦博彦幸久亮伸宏範子浩父…	109
ヘテロジニアスマルチホップ通信と探索連接ロボット制御への応用	Ξ	中		且 明	113
電子透かしコンテストの紹介	小	嶋	徹	也	119
東京高専低学年学生を対象とした「観る」生物学実習の構築	伊城衣雑石庄三	藤石笠賀井司谷	篤英 章宏 知	子伸巧浩幸良世	125

Research Reports of Tokyo National College of Technology No. 45 (2) CONTENTS

Akira SEITOH ·····	On a Mathematics Class with <i>Mathematica</i>	1
Yoshiyasu YASUTOMI Yuko ICHIKAWA Seiji KONAKAZAWA Hajime NAKAZATO	·Approaches to Keeping the Scholastic Ability in Mathematics during Long Vacations and Helping Unprepared Students	9
Yoshiyasu YASUTOMI	Effects of Regular Math Practice and Needs of Students	15
Hirotaka TSUTSUMI Hiroyuki NIKKUNI Daisuke KITAKOSHI Toshitaka YASUDA Tomoyo MITANI	•Trial of Technology Education that Make the Paper Air Craft for Elementary School Students	21
Jyo SHIMURA Yohei KAWASE Shigeru KUROSAKI Takeharu HAYASHI	A Trial on Improvement of Tensile Strength and Decreasing Stress Concentration at Bonded Parts of Adhesively Waved Butt Joints	27
Sumio SAITO Hirofumi OCHI Keiji SATO Nozomi TSUKAHARA Jyo SHIMURA	Scale Effects on Performance and Flow Behavior of Water Hammer Pumps	31
Takeharu HAYASHI Masaaki TAKABE Yoshinori EBIHARA Jyo SHIMURA	Determination of Anand Parameters to Lead-Free Solder Alloy using Spreadsheet Software	39
Katsumi FUKUDA Yoshihiro NISHIMURA Takayuki SUZUKI Masatoshi FUKUTA	Construction of a System of Making to Internal Defect by Inverse Problem Solving	47
Akihiro SHIMIZU Atsushi UCHIDA Masashi SHIMIZU Michiko SUGAWARA	In Vitro Ventilation Experiment by Intermittent Oscillatory Flow through a Pipe with Circumferential Grooves and a Respirator with Twin Pistons for Inspiration and Expiration	53
Hideki AYANO Kouhei MURAKAMI Yoshihiro MATSUI	Simulation of the Reduction Technique of a Noise Generated by an Inverter in Motor Driving Range	57

Atsushi DOI ····· Takurou HASHIMOTO	•Evaluation Method for Reactive Power Pricing Based on Effect of Active Power Loss Reduction •••••••••••••••63	3
Hiroyuki NIKKUNI ····· Hiroshi ITO	 Development of Teaching Materials for MOEMS Technology by Using Photolithography - 3rd Report, Design and Evaluation of Basic Characteristics for Micro-Opto-Electro Device	3
Hiroyuki NIKKUNI ·····	Research on Sensitivity Improvement of a Polarimetric Optical Microphone Using an Optical Fiber 82	1
Hiroshi NAGAYOSHI ······	Silicon Nanostructure Formation by Hydrogen Radical	5
Saku YAMAUCHI Hiroyuki AOKI	Fundamental Experiments for Omnidirectional Obstacle Detection System for Autonomous Robots Using Fish-Eye Cameras 97	7
Masato SUZUKI Daisuke KITAKOSHI	A Study on Pattern Categorization Method Using the Third Statistics Value	15
Toshifumi KOSAKA ······ Tomohiko OTSUKA Akihiro SHIMIZU Tomohiko KIMURA Hiroyuki NIKKUNI Takahisa ICHINOHE Makoto NISHIMURA Hidenobu SHIROISHI Hiroshi FUJINO Hironori HATORI Machiko NAGAYOSI Akihiro SAIGA Takenori NITTA	Early Engineering Education To Cultivate the Independent Intellectual Power by 3-stage Learning Growth Process	9
Akira TANAKA	A Study on Heterogeneous Multihop Communications Applied to Group Robot Exploration 11	3
Tetsuya KOJIMA	Introduction to Digital Watermarking Competition11	9
Atsuko ITOH ····· Hidenobu SHIROISHI Takumi KINUGASA Akihiro SAIGA Hiroyuki ISHII Ryo SHOJI Tomoyo MITANI	Implementation of a Biological Observation for the Early Undergraduate Students at TNCT12	5

Mathematicaを活用した数学の授業について

清藤 晃*

On a Mathematics Class with Mathematica

Akira SEITOH

We introduce the 2D or 3D graphics and movies generated by Mathematica to our mathematics class for our students to understannd various mathematical concepts better.

Keywords : Students' Better Understanding, Mathamtica.

1. はじめに

工業高専や大学工学部で数学の授業を担当する 場合に考慮しなければならない第1の問題は,学 生たちが数学を専門とするのではなく数学を使 う立場だということである。したがって、定理・ 公式の厳密な証明よりは, 定理・公式の意味を理 解(納得)してもらうための合理的な説明が求め られるはずである。ところが、微分積分学に例を とれば、一変数関数の場合は比較的厳密な証明を 述べておきながら,応用上より重要なはずの多変 数関数の場合は一転して単なる計算法の例示に終 止し、意味を説明することはほぼ放棄されている ことが多い。一方で、21世紀に入って10年以上 を経た現在から数学教育の地平を見渡せば、教授 内容の更新も必要なはずだが、微分方程式では相 も変わらず求積法による解法、複素関数では留数 を用いた定積分の計算に終始する。最近、出版が 相次いでいる新しい高専用の教科書でも、たとえ ば力学系の初歩、カオスやフラクタルについての 解説を発見することはできない。これらは何も一 部数学者の興味に留まるものではないにもかか わらずである。欧米では新しい内容が盛り込まれ た (数学科の学生対象とは限らない) 数学書の出 版が相次いでおり、焦りさえ感じる。高専数学カ

リキュラムの内容が変わらない原因のひとつは, 出題内容が 50 年前と大差ない大学編入学試験の 存在かもしれない。あるいは,編入学試験問題の 出題者が高専で使用されている教科書の内容を調 べ,それに沿った出題しかできないと考えている のか。そうだとすれば,これはまさに負のスパイ ラルそのものである。

2. 数学を研究する立場と使う立場

数学を研究する立場の人と数学を使う立場の人 の間には、様々な誤解がある。そのような誤解が 生ずることになった原因は、研究する立場の人間 が孤高を守り啓蒙を怠ったことと、使う立場の人 間が(現代)数学は抽象的でわかりにくい(役に立 たない)といって食わず嫌いをしてきたことにあ ると思う。それについて、数学を研究する立場か ら思うところを述べてみたい。

数学者が書いた数学書では,難解で応用する立 場の人間には不要な定理の証明が延々と述べら れ,それを読み終わらないとその定理の応用(問 題の解法)の説明にならない,などと言う人がい る。Fields 賞受賞者の小平邦彦先生がおっしゃ るように,数学書に書いてある定理の証明はその 定理が正しいことを検証するためにあるのではな い。それは過去にその定理を発見した数学者自身 が行っていることである。現代の学習者が証明を たどるのは、その定理の意味や考え方を追体験し て理解するためである。ただ、初学者にはいきな り証明を始めるのではなく、全体像を見渡すため にかいつまんで概要を述べるのが親切だと思う。

有名な ε - δ 論法を例にとってみる。微分積分学 の導入で,高専用の多くの教科書では,極限値に ついて,

が成り立つとは、次のことだと説明されている。

x を aに限りなく近づけるとき,

関数 f(x) の値は b に限りなく近づく。②

それに対し、数学における厳密な定義は次のよう なものである。

任意の $\varepsilon > 0$ に対し、ある $\delta > 0$ をとれば、

どの x に対しても,

 $0 < |x-a| < \delta$ ならば

 $|f(x) - b| < \varepsilon \& \& \& \& \Im_{\circ} \quad \dots \dots \Im$

東京高専を卒業後大学に進学されたある卒業生に 言われたことがある。「 ε - δ 論法,いったいあれは 何ですか!」高専では楽しく数学を学んで優秀な 成績を収め希望をもって大学に編入学したのに, 大学で教えられる数学に裏切られたという気持ち だったのだろう。その卒業生の顔には、 ε - δ 論法 というか,数学(と数学研究者)というものに対 する憤りが溢れていた。 ε - δ 論法が工学部の学生 には必要のないものと言われて,講義では取り上 げられないことが多くなったのはいつ頃からだろ うか。これに対しては、上野¹⁾から引用しよう。

> 製品を製作するとき,ある工程での制作物 の誤差をある範囲にとどめるためには,最 初の誤差の許容範囲をどこまでにしたらよ いか,そもそもそのようなことが可能であ ることはどのようなことを意味するか,こ のような観点から連続性の説明をすること も可能であろう。

上野先生は,数学者たちが講義でこうした工夫を していたら,多くの人にもっと好ましい数学観を もってもらえていただろうと続けられていた。最 近は,そのような配慮がされた数学書,講義も多 いことは申し添えておきたい。

一方で,20世紀に得られた新たな知見を高専 や工学部における数学の講義に反映させることに ついては,未だに感情的な拒否反応が大きい。数 学科の学生向けの導入ではなく,実際の計算に習 熟することを通じて数学的対象に対する実在感を 獲得してもらうような講義は可能であろう。たと えば,ベクトル解析に微分形式を導入し,公式の 導出や計算を省エネルギー化し線積分や面積分を 見通しよく解説することを試みているので,清藤 ²⁾を参照していただきたい。

3. 定理・公式の意味を理解させる

合成関数の微分法を例にとり上げる。関数

$$x = \varphi(u), \quad z = f(x)$$
 $u \xrightarrow{\varphi} x_{f \circ \varphi} \int_{z}^{x} f$

の合成関数 $f \circ \varphi$ の微分法の公式は,

$$(f \circ \varphi)'(u) = f'(\varphi(u))\varphi'(u) \qquad \dots \qquad 4$$

で与えられる. 高専で使用されている多くの教科 書では多くの場合,次のように証明というか説 明されている。uの増分 Δu に対し,それに応じ たxの増分,zの増分をそれぞれ Δx , Δz とす ると, $\Delta u \rightarrow 0$ のとき $\Delta x \rightarrow 0$ である。よって, $\Delta u \rightarrow 0$ とすると,

$$\frac{\Delta z}{\Delta x} \to \frac{dz}{dx}, \quad \frac{\Delta x}{\Delta u} \to \frac{dx}{du}$$
だから,等式

$$\frac{\Delta z}{\Delta u} = \frac{\Delta z}{\Delta x} \frac{\Delta x}{\Delta u} \qquad \dots \dots$$

 \dots (6)

において $\Delta u \to 0$ とすると, $z = (f \circ \varphi)(u)$ も微 分可能で,

が成り立つ。この一見もっともらしい「説明」に は大きな欠陥がある。それは、つぎのようなこと である。 $\Delta u \rightarrow 0$ とするとき、関数によってはま だ $\Delta u \neq 0$ であっても、 $\Delta x = 0$ となってしまう ことが起こる。すると、⑥ のように表記するこ とができないのである。そもそも、これらの関数 が多変数関数で、 Δx がベクトル値を取る場合に 拡張しようとすると、⑥ の右辺はベクトル Δx で割る割り算を行っていることになってしまう。 一変数関数における議論を多変数関数へ拡張する 場合、もっとも納得しやすい説明方法は、議論・ 形式が多変数関数の場合も一変数関数の場合とパ ラレルに行われることを示してやることだろう。 そのためには線型代数学の知識・形式が有効であ る。簡単のために、関数

$$z = f(\boldsymbol{x}), \quad \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{y} \end{bmatrix} = \varphi(\boldsymbol{u}) \qquad \begin{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{v} \end{bmatrix} \xleftarrow{\varphi} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{y} \end{bmatrix}$$

について考える.ただし,

$$oldsymbol{u} := egin{bmatrix} u \ v \end{bmatrix}, \quad oldsymbol{x} := egin{bmatrix} x \ y \end{bmatrix}$$

とおいた。それぞれの関数の増分の線型近似は

$$\Delta \boldsymbol{x} \coloneqq \varphi'(\boldsymbol{u}) \Delta \boldsymbol{u}, \qquad \cdots \cdots \odot$$

$$\Delta z \coloneqq f'(\boldsymbol{x}) \Delta \boldsymbol{x} \qquad \dots \dots \otimes$$

と表される。ただし,

$$arphi'(oldsymbol{u}) = egin{bmatrix} x_u & x_v \ y_u & y_v \end{bmatrix}, \quad f'(oldsymbol{x}) = egin{bmatrix} z_x & z_y \end{bmatrix}$$

はそれぞれの関数の Jacobi 行列であり, それぞれ の線型近似 (線型写像) の標準基底に関する表現 行列である。⑦, ⑧ より直ちに

を得る。⑨ は、関数 $z = (f \circ \varphi)(u)$ の増分 Δz の線型近似が行列 $f'(x)\varphi'(u)$ で表されることを 表している。つまり、これが $z = (f \circ \varphi)(u)$ の Jacobi 行列である:

$$(f \circ \varphi)'(\boldsymbol{u}) = f'(\boldsymbol{x})\varphi'(\boldsymbol{u}).$$

一変数の場合は、線型近似とは比例関数による近 似のことであり、比例定数が表現行列にあたる。 数式を使わずに表現すれば、「合成関数の線型近 似はそれぞれの関数の線型近似の合成関数で与え られる」となる。そして、⑪を具体的に成分表 示すれば、

$$\begin{bmatrix} z_u & z_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_x & z_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u & x_v \\ y_u & y_v \end{bmatrix}, \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

または
$$\begin{cases} z_u = z_x x_u + z_y y_u, \\ z_v = z_x x_v + z_y y_v \end{cases} \qquad \dots \dots \dots \square$$

となり, ⑫ が旧来の 19 世紀風教科書に述べられ ている合成関数の微分法の公式 (チェイン・ルー ル) である。① のように Jacobi 行列のかたちで 取り扱った大学編入学試験問題も現れるように なった (たとえば, 電通大・平成 24 年度第3 問)。 微分とは関数の増分の線型近似のことであり, このような形で微分係数, 導関数あるいは微分 dz = f'(x) dxを説明することは本質的である。 一変数関数のときからこの方式の説明を行えば, 多変数に移行する場合も変数をベクトル値に変え るだけで、形式的には一変数関数の場合と全く同 一である。一変数関数の場合と形式的に同一であ るということは、一変数関数のときの類推が直感 的に可能だということであり、それを議論の抽象 化と言うこともできる。つまり、「抽象化 = わか りにくい」ではなく、「抽象化 = 見通しの良い議 論」なのである。もちろん、厳密には線型近似の 合成を行った場合の誤差評価を ε-δ 論法で行う必 要があるが、微分法の導入にあたってその議論を 省略しても全く問題はない。

4. Mathematica による画像・動画の 活用

しかしながら,数式を用いた論理展開のみで数 学的概念をよく理解することは容易ではない。そ のような場合,人間は昔から概念を分かりやすく 表す図を活用してきた。コンピュータが発達し, *Mathematica*のような作図機能あるいは動画作 成機能を備えた高機能の数式処理ソフトが利用 できる現代では,数学の学習に動画を含めた画像 を活用することは,非常に魅力的なチャレンジで ある。数学においては,議論の本質に集中するた め,実例を構成する場合でも必要な少ない条件の みを要請する。

実例を挙げよう。 $0 < \varepsilon < 1$ とする。 C^{∞} 級関数 α : $\mathbb{R} \to \mathbb{R}$ であって, 次の条件をすべて満たすものが存在する。

- (1) $-\varepsilon < \forall t < \varepsilon$: $\alpha(t) = 1$.
- (2) $\alpha(1) = 0.$
- (3) $\forall t > \varepsilon$: $\alpha'(t) < 0$.

たとえば、次のように定義すればよい。

実際に ⁽³⁾ とすれば, 条件 (1), (2), (3) がすべて 満たされることの長い証明は省略するが, それを 注意深くたどることによりなぜ ⁽³⁾ と定義すれば よいのかに気づくことができる。さらに, そのよ うな関数の実在を実感するために *Mathematica* によるグラフィックは非常に有効である。それを 図 1 に示そう。



図1 α のグラフ.

図 1 は $\varepsilon = 10^{-3}$ とした場合のグラフである。 図 1 を観察する限り, ε の値がもっと大きいように思われるだろう。証明をたどったり定義式 ③ を眺めただけではそのあたりを感覚的に理解 するのは難しい。しかし, $\alpha(t) = 1$ となるのは $-10^{-3} \le t \le 10^{-3}$ のときだけなのである。 次の例は、トーラス $T^2 \cong \mathbb{R}^2/\mathbb{Z}^2$ 上の C^{∞} 級 完備ベクトル場

$$X(e^{2\pi ix}, e^{2\pi iy}) := \frac{\partial}{\partial x} + \alpha \frac{\partial}{\partial y}, \quad \alpha \in \mathbb{R}$$

が定める微分方程式の軌道の挙動の観察である。 $\alpha \in \mathbb{Q}$ ならば、全ての軌道は S^1 に位相同型でコ ンパクトである。 $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ ならば、全ての軌道 は \mathbb{R} に位相同型になり、しかも T^2 において稠密 になる。 $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ でも、 α が代数的無理数であ るか Liouville 数であるかによって、稠密になっ ていく様子が異なることを観察できる。代数的無 理数とは、 $\sqrt{2}$ のように整数係数方程式の解にな る無理数であるから、有理数に近い性質をもつよ うに思われる。一方、Liouville 数は超越数で、た とえば

$$\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{n!}}$$

のように、有理数で非常によく近似される。した がって、位相空間 ℝ においては、Liouville 数は 非常に有理数に近い数である。上記の例では、部 分和

$$\alpha_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{2^{k!}}$$

が, n = 5 で既に誤差 $|\alpha_5 - \alpha|$ が 10^{-22} 未満に なる. $p, q \in \mathbb{Z}$ とするとき, α が有理数 $\frac{p}{q}$ に 非常に近い無理数とする。もしも $\alpha = \frac{p}{q}$ ならロ ンジテュード方向に q 回まわると元の位置に正確 に戻ってくるが, α が有理数 $\frac{p}{q}$ に非常に近い無 理数ならば q 回目に最初の点の"非常に近い 反って来る。しかし,"非常に少し"ずれている わけなので,ぼやけた目で観ていると最初のうち はほとんど周期軌道のような感じに見えていてそ れが次第にぶれていき,最後には S^1 全体に稠密 にはびこっていくという感じになる。 S^1 が均等 に埋まっていくというようなこととは程遠いと予 想される。それを Mathematica のグラフィッ クスで観察してみた。本来ならば動画で観てもら うのがよいのだが、紙の上では静止画にせざるを 得ない。

図2 $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$ の場合。



図 3
$$\alpha = \sum \frac{1}{2^{n!}}$$
の場合. 第8部分和で近似

5. 到達度試験の解答解説

私は, 高専 IT 教育コンソーシアムでの数学自学 自習用 e-learning 教材の開発プロジェクトに参 加し,初年度から学習到達度試験の解答解説作り を行ってきた。ここで紹介するのは,昨年度 (本 年1月)に行われた試験の私が担当した解答解説 の一例である。

2次関数

$$y = x^2 - x + 1 \qquad \dots \dots \dots \dots \square 5$$

のグラフが直線

$$y = ax - a = a(x - 1)$$
 ……… (6)
(定点 (1,0) を通ることに注意。)

と接するのは, ⁽¹⁵⁾, ⁽¹⁶⁾ から y を消去して得られる 2 次方程式

$$x^2 - x + 1 = ax - a,$$

すなわち $x^2 - (a+1)x + (a+1) = 0$
.....①

が重解をもつとき, つまり ① の判別式を *D* とすると,

$$D = (a+1)^2 - 4(a+1) = (a+1)(a+1-4)$$

のときである。したがって, a = -1またはa = 3となる。

参考. 放物線 ⁽⁵⁾ と直線 ⁽⁶⁾ との共有点の個数は, 実数 a の値が変化するにつれて変化する。本問 は,共有点が1点の場合の a の値を求める問題で あった。もっと一般に,判別式 D の符号を調べ れば,放物線 ⁽⁵⁾ と直線 ⁽⁶⁾ は

となることがわかる。この様子をアニメーション で観察しよう。問題の原形のまま,放物線 ⑤ と 直線 ⑥ の位置関係を観察するには図 4 (赤で描 画)を,これらの方程式から y を消去した 2 次方 程式 ⑦ の実数解の個数を観るには図 5 (青で描 画)の放物線

$$y = x^{2} - (a+1)x + (a+1)$$

= $\left(x - \frac{a+1}{2}\right)^{2}$
+ $\left\{-\left(\frac{a+1}{2}\right)^{2} + 2\left(\frac{a+1}{2}\right)\right\}$
....(18)

と x 軸との共有点を観ればよいが,これらはどち らも状況が分岐する a = -1, a = 3の場合を識 別しづらい欠点がある。a の値の変化につれて直 線 ⁽¹⁾ は点 (1,0)を中心に回転し,放物線 ⁽²⁾ は 頂点が放物線 $y = -x^2 + 2x$ に沿って移動するの が見づらい原因である。観察をもっと容易にする ためには,すこし工夫が必要でになる。方程式 ⁽¹⁾ を変形すると,

$$x^2 = (a+1)(x-1)$$

となる。ここで、仮に x = 1 とすると $1^2 = (a+1)(1-1) = 0$ となり、矛盾を生ずる。よって、両辺を $x - 1 \neq 0$ で割ることができて、

= (a+1)(a-3) = 0

との共有点を観察する。これが図 6 (**黒**で描画) である。ここでは x 軸に平行な直線 ② が上下に 平行移動するだけなので観やすい。アニメーショ ンは、コマ送りが自由にできる QuickTime ムー ビーの形式にして Web 上では参照可能である。 なお、図 4, 5, 6 すべてをまとめて表示したのが、 図 7 になる。



図 5 放物線 ⁽³⁾ と *x* 軸との共有点。アニメー ションはここをクリック!



図 4 放物線 ⁽¹⁾ と直線 ⁽¹⁾ との共有点。アニ メーションはここをクリック!



図 6 分数関数 20 のグラフと直線 y = a+1 と の共有点。アニメーションはここをクリック!



図7 図4,図5,図6を同一平面上にまとめて 表示。図を見やすくするために,原点Oのラベ ルは書き入れていないが,座標軸の交点が原点 Oである。アニメーションはここをクリック!

当初は、図7のみだったのだが、初学者は一度 に沢山のものを見せられても混乱するだけだ。図 4, 5, 6 を観せた上で, 図 7 も見せるのが教育的 だという指摘を受けた。それで思い出したことが ある。微分積分学や微分方程式の授業で、数学単 独でなく物理の内容も一緒に教えるべきだ、たと えば物理現象を解釈して微分方程式を作り、それ から解き方を教えるのが本校の学生のような数学 を使う立場の人間には最適だという少なくない専 門教科の教員から指摘を受けたことがある。確か に、それも一理あると思い、自分が高校生のとき も微分積分学を使って物理学を学ぶことに興味が あったなあと思い、物理の本を読んで上記のよう な授業を試みたことがある。ところが、それは効 果が上がらなかったばかりでなく、成績が中位以 下の学生はかなり強い反感を持ったようだった。 教員室にやって来た学生たちは、次のように言っ たものである。色々なことが一度に襲いかかって きて、何が何だか分からない。初めはまず、計算 の仕方、解き方をていねいに説明してほしい。応

用は基礎的計算力がついてからにしてほしい。こ れでは,数学も物理もどちらも分からなくなって しまう。なるほどと思った。どの科目もよくわか る学生には興味深く思えても,そうでない学生に は,苦痛になるだけだ。その後は数学の授業で, ある一区切りの内容を学んだ後で,専門教科の先 生に来ていただき,学んだことを専門でどのよう に活用するのかお話ししていただいた。学生たち は非常に喜んでいた。そのときのことは,以前に 研究報告書に発表した。その際,お世話になった 電気工学科松井教員,電子工学科小池教員,物質 工学科土屋教員には改めて御礼申し上げたい。

6. おわりに

筆者の教材研究の旅は, Mathmatica 1.2 の頃か ら少しずつ形になってきた。現在, TFX で組版 し、Mathmatica による静止画、動画などをリン クさせて PDF 化し, Xythos³⁾ 上に公開してい る。微分積分学 I, II, 線型代数学 I, II, 解析学 A, B, 微分方程式, 線形空間論の解説, および 教科書のすべての演習問題の詳しい解答解説など 総容量 1GB 超になる。以前からこれをまとめて 出版し広く成果を問いたいと思っていたところ, 2009 年 112 月,当時の水谷校長と三谷副校長か ら出版の援助の申し出を受けた。水谷校長はあり がたくも「情報工学科卒業生の谷合君や物質工学 科の菊池先生のように本を作ったらどうです。私 でもそのくらいのことはできますよ。後任の校長 にもちゃんと話をしておきますから頑張ってくだ さい」とおっしゃってくださった。私もこれは頑 張らなければと著書を形にする作業を続けていた。 2010年に着任された後任の古屋現校長も水谷前 校長の思いをどう形にするか考えているとおっ しゃったいただいた。3年間辛抱強く待ったが, それ以来何の音沙汰もない。本年5月,兼業申請 (学習院大学理学部数学科)を行った際、そこでの コンピュータ活用の経験を授業や高専 IT 教育コ ンソーシアムでの活動に生かしてきたことを書い たが、成果を発表しろという。それで今回研究報 告書に投稿したのだが、約束通り成本の形で出版 させていただいていたら、それを観ていただくの が一番なのにと思った次第である。いまもお待ち していますので、よろしくお願いいたします。

参考文献

- 上野健爾, 誰が数学嫌いにしたのか, 2001, 日本評論社.
- 2)清藤晃,置換積分から線積分,面積分へ, 日本数学教育学会高専・大学部会論文誌, 2008.
- (1) 清藤晃, https://xythos.tokyo-ct.ac. jp/web/g/usr/seitoh/

(平成 25 年 10 月 31 日 受理)

長期休暇における数学の学力維持と学力不振学生の学力向上への取り組み

安富義泰*, 市川裕子*, 小中澤聖二*, 中里 肇*

Approaches to Keeping the Scholastic Ability in Mathematics during Long Vacations and Helping Unprepared Students

Yoshiyasu YASUTOMI, Yuko ICHIKAWA, Seiji KONAKAZAWA, Hajime NAKAZATO

The Department of Mathematics has opened the Self-Learing Classes for unprepared first-year students and the Mathematical Counseling room for unprepared second-year students since 2012. And then we have given them tests to see their achievement after long vacations. The tests are partially used for evaluating their final grades. Because of these efforts, the number of students who fail to earn a credit in mathematics in the first semester went down in 2013, compared with 2011.

Keywords : Basic Mathematics, Unprepared Students, Self-Learning

1. はじめに

東京高専では、各学科により 22 単位から 29 単位 の数学科目が開設されているが、全ての学科におい て 20 単位が 1 年次から 3 年次に重点的に配置され ている.これは、専門科目において使用される数学 の知識を早い段階で与える事により、専門科目の理 解をスムーズに行える様にする為の配慮であり、1 年次前期に代数 I (2単位)・幾何 I (2単位), 1年 次後期に代数Ⅱ(2単位)・幾何Ⅱ(2単位),2年次 前期に微分積分学 I (2単位), 2年次後期に微分積 分学Ⅱ(2単位),2年次通年で線形代数I(2単位) が開設されている. これらは概ね高校数学の大部分 と大学初年次の数学の一部に相当する.また、3年 次通年で解析A(2単位)・線形代数Ⅱ(2単位),3 年次前期に解析 B(1単位),3年次後期に微分方程 式(1単位)が開設されており、これらは概ね一部 の高校数学と大学初年次から2年次の数学に相当す る([1] 図1・[2] 表2 参照).

一方,1年次の全開設科目 34 単位のうち数学科目 が8単位開設されており、その全てが半期科目であ る為、学生の進級条件に多大な影響を与えている. 仮に進級できたとしても、前年度の数学科目の学習 内容の理解度が十分でない為に、積み上げ学習が基 本である数学では次年度に大変苦労する学生も多い. この様な状況を生み出した要因の1つとして、学生 の自主的な学習法が確立していない事が挙げられる. 中学の時には特に勉強しなくても十分理解できてい た学生が高専に入り、その授業のスピードおよび難 易度のギャップに戸惑いながらも学習する習慣を身 に付けないまま前期中間試験を迎えてしまい、D評 価を取ってしまうというものである.多くの学生は 危機感から自力で学習法を改善し、前期期末試験で は C 評価以上に回復するものの,そのまま学習する 習慣が身に付かなかったり,学習する習慣は身に付 いたものの時すでに遅く理解が追い付かないために D 評価から抜け出せない学生も存在する.これらの 学生,特に低学年学生の学習環境を整え,原級留置 者・退学者を減らす為の対策の1つとして,平成22 年度重点配分経費「低学年数学学習法指導プログラ ム」により「数学相談室」を開室し数学学習法の指 導を行った([1]参照).

2. 自学自習室と数学相談室

当初の数学相談室は、大学等での数学相談室がそ うである様に、放課後に学生のあらゆる質問に対応 できる様な非常勤講師等を雇用し, 個別の学生に応 じた学習法指導や主に定期試験の答案の間違った箇 所の問題解説などを行っていた. 数学相談室に来室 した学生には好評で、特に定期試験前後は多数の来 室者がいたが、来室は学生の自由意思に任されてお り、開室日によっては学生が全く来ない日も存在し た. また、学校のシステムとして自学自習室が用意 され、学生が気軽に質問できる様に専攻科生が TA として毎日1人ずつ配置されていたが、ほとんど利 用されていなかった. 学習法を教わり自ら学習する 事の重要性を学生は認識しているものの、学習習慣 を身に付けさせるという点では不十分であった為, 平成 24 年度からは定期試験等の成績に応じて担当 数学教員とクラス担任から数学相談室や自学自習室 に行く様に促し, ある一定の期間, 継続的に通わせ る事とした.

1 年生に対しては、定期試験等における成績不振 者を各クラス 15 名程度選び出し、月曜日は1組、火 曜日は2組, という様にクラス単位で週に1回自学 自習室に行く様に促した.毎週専任教員が作成した 課題をTAが学生に配布し,採点・解説もTAが行った.

2年生に対しては、1年生と同様に定期試験等にお ける成績不振者を各クラス10名程度選び出し、毎週 水曜日に全学科まとめて数学相談室に行く様に促し た.講師には本校名誉教授の齋藤四郎先生を特別客 員教授として迎え、学習法指導や専任教員が作成し た課題の問題解説を行った.受講人数が多いため常 勤講師も参加してチームティーチングを行った.

また,前期期末でD単位を取得した1年生・2年 生に対しては,通常の夏休み課題の他にD評価学生 用の課題を別途配布し,夏休み期間中の3日間の臨 時登校日に問題解説および演習を行った.その他, 長期休暇課題の類似問題から作成した春休み明け試 験・夏休み明け試験・冬休み明け試験やゴールデン ウィーク明け試験・学園祭明け試験を全1・2年生に 向けて実施し,自学自習室・数学相談室へ行く様に 促す判断材料の1つとして使用した([2]参照).

3. 学生の評価

現行の自学自習室・数学相談室を実施して3学期 (1年半)経過した平成25年10月に全1年生・2 年生を対象として(別紙)の様なアンケートを実施 した.

3.1. 自学自習室に対する1年生の評価

自学自習室を利用した事があるかという質問に対 しての1年生の回答は以下の通りである:

自学自習室を利用した事が

	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	計
ある	30	29	26	18	17	120
ない	13	13	15	24	22	87
Ħ	43	42	41	42	39	207
						(表 1)



各クラスに自学自習室の開室カレンダーを掲示し, 担当数学教員とクラス担任から自学自習室に行く様 に促した結果,クラスによってばらつきはあるもの の(表1)1年生における自学自習室の認知度が向上 し,全体の約5分の3の1年生が利用した(図1).

自学自習室利用者からの評価は以下の通りである:

自学自習室は

	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	計
とてもよい	7	8	7	2	3	27
まあまあよい	14	11	8	8	8	49
どちらでもない	6	9	6	5	5	31
ちょっとヤダ	3	1	3	2	1	10
やめて欲しい	0	0	2	1	0	3
Ħ	30	29	26	18	17	120

(表 2)



(図2)

自学自習室に対する1年生の評価は全てのクラス において概ね良好であり(表2),全体として「とて もよい」と「まあまあよい」を合わせた評価が全体 の約3分の2を占めた(図2).評価の理由として,

- ・分からなかった所が分かる様になった
- ・集中が出来,勉強がはかどる
- ・気軽に質問できる
- ・自分のペースで勉強できる

などの意見が多く見られた.一方で,

- ・TAの人数を増やして欲しい
- ・教員も配置して欲しい
- ・曜日を自分で選べる様にして欲しい
- ・問題演習の前に講義をして欲しい

などの意見も見られた.

自学自習室へ行く様に促す判断材料の1つとした 休み明け試験についての評価は以下の通りである:

(図1)

休み明け試験は

	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	計
とてもよい	7	3	9	5	6	30
まあまあよい	18	12	23	19	17	89
どちらでもない	16	11	4	10	5	46
ちょっとヤダ	2	8	3	5	8	26
やめて欲しい	0	8	1	3	3	15
計	43	42	40	42	39	206
						(表 3)



(図3)

休み明け試験に対しても1年生の評価は全てのク ラスにおいて良好であり(表3),全体として「とて もよい」と「まあまあよい」を合わせた評価が全体 の約5分の3を占めた(図3).評価の理由として,

- ・自分の実力・弱点・理解度が分かる
- ・いい復習の機会になる
- ・休み中も勉強する習慣が付く
- 勉強する意欲を保てる
- などの意見が多く見られた.一方で,
 - ・成績に入れて欲しくない
 - ・1回あたりの内容を減らし回数を増やして欲しい
 - ・(学園祭の実行委員などをやっているので)学園
 祭明け試験はやめて欲しい
 - ・(長期休暇課題の分からなかった所を質問して理解してからがいいので)休み明け直後の授業時間ではなく1~2回後の授業時間内で試験を実施して欲しい
- などの意見も見られた.

3.2. 学相談室に対する学生の評価

数学相談室を利用した事があるかという質問に対しての2年生の回答は以下の通りである:

T	[H - A ' T ' A . + I]	
· ·		

	2M	2E	2D	2J	2C	랆
ある	30	18	12	15	22	97
ない	13	18	28	27	18	104
탋	43	36	40	42	40	201
						(表 4)



各クラスに数学相談室の開室日を掲示し,担当数 学教員とクラス担任から数学相談室に行く様に促し た結果,クラスによってばらつきはあるものの(表 4)2年生における数学相談室の認知度が向上し、全 体の約半分の2年生が利用した(図4).

数学相談室利用者からの評価は以下の通りである:

数学相談室は						
	2M	2E	2D	2J	2C	ti.
とてもよい	6	2	2	1	2	13
まあまあよい	18	6	5	6	8	43
どちらでもない	4	7	4	5	9	29
ちょっとヤダ	1	2	1	2	3	9
やめて欲しい	1	1	0	1	0	3
Ħ	30	18	12	15	22	97

(表5)



(図 5)

数学相談室に対する2年生の評価も全てのクラス において概ね良好であり(表5),全体として「とて もよい」と「まあまあよい」を合わせた評価が全体 の約5分の3を占めた(図5).評価の理由として,

11

- ・説明がとても分かりやすかった
- ・たくさん勉強できた
- ・プリントが復習に便利
- ・強制的に勉強するのはよい
- などの意見が見られた.一方で,
 - ・学生の数に比べ教員の数が少なく,解き終わっ てから採点して貰うまでの時間がもったいない
 - ・D単位取得者の補習というイメージが強い為, 聞きに行きづらい.D単位取得者用補習と(本 来の)数学相談室を分離して欲しい
 - ・水曜日固定だと他の予定が入れられない
 - ・行きたい人だけ行けばよい
- などの意見も多く見られた.

数学相談室へ行く様に促す判断材料の1つとした 休み明け試験についての評価は以下の通りである:

休み明け試験は

	2M	2E	2D	2J	2C	랆
とてもよい	5	7	5	2	6	25
まあまあよい	17	9	18	15	9	68
どちらでもない	10	13	13	15	17	68
ちょっとヤダ	8	4	0	6	5	23
やめて欲しい	3	3	4	4	3	17
計	43	36	40	42	40	201
						(表 6)



(図 6)

休み明け試験に対する2年生の評価は多くのクラ スにおいて良好であり(表6),全体として「とても よい」と「まあまあよい」を合わせた評価(46%) が「ちょっとヤダ」と「やめて欲しい」を合わせた 評価(20%)を大きく上回った.一方で,「どちらで もない」が全体の約3分の1を占めた(図6).評価 の理由として,

- ・自分の実力・弱点・理解度が分かる
- ・いい復習の機会になる
- ・学力向上・維持が期待できる

・休み中も勉強するきっかけになる などの意見が多く見られた.一方で,

- ・成績に入れて欲しくない・成績における配点を 低くして欲しい
- ・1回あたりの内容を減らし回数を増やして欲しい
- ・(学園祭の実行委員などをやっているので) 学園 祭明け試験はやめて欲しい
- (他の課題も多いので)試験そのものをやめて欲しい

などの意見も多く見られた.

4.まとめ

自学自習室・数学相談室ともに1年生・2年生に は好評であり、学生のニーズは高いと言える.また、

「気軽に質問でき」「自分のペースで勉強できる」な ど,自学自習室開室の目標もある程度達成している と言える.

一方で、学生の数に対する TA・教員の数が少ない 事に対しての不満も多く見られた為、今後は自学自 習室の TA の人数を増やす・数学相談室の開室日を 増やして1日あたりの学生数を減らす事により学生 1人1人にかける時間を増やす事が今後の課題であ る.

休み明け試験については、1年生・2年生ともに「自 分の実力がわかる」「復習になる」など、長期休暇中 も継続的に勉強し、その成果を確認できるという点 で好意的に捉えられている様であるが、2年生の夏 休み明け試験の試験範囲が代数 I・代数 II・幾何 I・ 幾何 II・微積 Iと広範囲である事に対する不満や、 実施時期(学園祭明け試験の是非や長期休暇明け直 後の授業時間に実施する事)に対する不満が数多く 見られた為、休み明け試験の実施回数や実施時期な どについては今後も検討していく必要がある.

5.謝辞

この報告書をまとめるにあたり,色々とご指導を いただいた樫村真由先生・関根紳太郎先生・長井佳 海さん・鎌形周平君に感謝致します.

参考文献

- [1] 波止元仁,齋藤四郎,原井敬子,藤川卓也,"低 学年数学学習法指導プログラム",東京工業高等 専門学校研究報告書, Vol. 43, No.2 (2012), pp.45-49.
- [2] 赤池祐次、"東京高専と呉高専の数学カリキュラム比較"、東京工業高等専門学校研究報告書、 Vol.44, No.2 (2013)、pp.11-16.

(平成25年10月31日 受理)

授業改善アンケート

- 1. 自学自習室について教えて下さい.
 - 1. 1. 自学自習室を利用した事がありますか?

あるない

- 1. 2. 自学自習室についてあなたの評価を教えてください.
- 5 (とてもよい) 4 (まあまあよい) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい) 1. 3. その理由を教えて下さい.
- 1. 4. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?
- 2. 学年全体の休み明け試験について教えてください.
 - 2.1. 学年全体の休み明け試験についてあなたの評価を教えてください.
 5 (とてもよい) 4 (まあまあよい) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい)
 - 2. 2. その理由を教えて下さい.
 - 2.3. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?

ご協力ありがとうございました.

授業改善アンケート

- 1. 数学相談室について教えて下さい.
 - 1. 1. 数学相談室を利用した事がありますか? ある ない
 - 2.数学相談室についてあなたの評価を教えてください.
 5 (とてもよい) 4 (まあまあよい) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい)
 - 1. 3. その理由を教えて下さい.
 - 1. 4. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?
- 2. 学年全体の休み明け試験について教えてください.
 - 2.1. 学年全体の休み明け試験についてあなたの評価を教えてください.
 5 (とてもよい) 4 (まあまあよい) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい)
 - 2. 2. その理由を教えて下さい.
 - 2. 3. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?

13 (別紙)

数学における定期的演習による効果と学生のニーズ

安富義泰*

Effects of Regular Math Practice and Needs of Students

Yoshiyasu YASUTOMI

The Department of Mathematics has given the first and second-year students assignments during long vacations and tests to see their achievement after long vacations since 2012. They are well-received by students, because they know that assignments and tests in math classes are effective in developing their skills in maths. For the same reason, they request more math quizzes and simulated tests in regular math classes.

Keywords : Regular Math Practice, Development of Mathematical Skills, Needs of Students

1. はじめに

東京高専では、自主的に学習する習慣が身に付い ていない学生、特に低学年学生の原級留置者・退学 者を減らす為の対策として、平成22年度重点配分 経費「低学年数学学習法指導プログラム」により「数 学相談室」を開室し、数学学習法の指導を行ってい る([1] 参照). 平成 24 年度からは数学相談室の主 対象を2年生とし、定期試験等における成績不振者 を各クラス 10 名程度選び出し、毎週水曜日に全学 科まとめて,ある一定の期間,継続的に通わせて, 学習法指導や専任教員が作成した課題の問題解説を 行っている.専攻科生を TA として毎日1人ずつ配 置した自学自習室も主対象を1年生とし、定期試験 等における成績不振者を各クラス 15 名程度選び出 し、月曜日は1組、火曜日は2組、という様にクラ ス単位で週に1回通わせて,専任教員が作成した課 題をTAが学生に配布し、採点・解説もTAが行って いる.また、長期休暇課題の類似問題から作成した 春休み明け試験・夏休み明け試験・冬休み明け試験 やゴールデンウィーク明け試験・学園祭明け試験を 全1・2年生に向けて実施し、自学自習室・数学相談 室へ行く様に促す判断材料の1つとして使用してい る ([2] 参照).

学生は学習法を教わり自ら学習する事の重要性を 認識しており、その1つのきっかけとなる自学自習 室・数学相談室に対する評価は1年生・2年生の全 てのクラスにおいて概ね良好である.また、長期休 暇課題および休み明け試験に対する評価も1年生・2 年生のほとんどのクラスにおいて良好である([2] 参照).

すなわち,学習法・学習習慣を身に付け,継続的 に課題に取り組み,試験によって自分の実力や弱点 を確認する事によって,自身の学力向上に繋げたい という意識は高いと言える.

2. クラス内テストと補習

平成25年10月実施の授業アンケート([2]参照) の以前から,成績に入りさえしなければもっと小テ スト・模擬テストをして欲しいという学生のニーズ があり,また,演習中心の数学相談室や自学自習室 の他に講義形式の補習を要望する学生もいた為,1 年生前期の代数I・幾何I・1年生後期の代数II・ 幾何II・2年生前期の微分積分学I・2年生後期の微 分積分学IIの担当クラスにおいて,独自に以下の様 な小テスト・公式テスト・模擬テストと補習・追試 を実施した:

- ・単元が終わる毎に小テストを行う
- ・小テストの一部分に公式テストを含む
- ・小テストの点数が6割に満たない学生に対して 日を改めて6割を超えるまで再試を行う
- ・小テストの点数が6割に満たない学生は次週の 自学自習室(1年生)・数学相談室(2年生)に 通う
- ・定期試験の試験範囲が終わった後は試験範囲全
 範囲の模擬テストを行う
- ・小テスト・公式テスト・模擬テストは点数に応 じて提出課題の量に差をつけるが,期限内に提 出した場合は成績に含めない
- ・講義形式の補習は基本的には任意制だが,再々 試以降の学生は必ず参加する

以上の様な小テスト・公式テスト・模擬テストを 1クラスあたり平均で約5回,補習を1クラスあた り平均で約6回ずつ行った.そのうち,模擬テスト の平均得点率の推移を表したのが次の表である.た だし,授業により模擬テストの実施回数に差がある

ため, 定期試験から遡って1回目の模擬テストをE, 2回目の模擬テストをD,という風に表示してある:

	模擬A	模擬B	模擬C	模擬D	模擬E
2012代数 I		47%	53%	66%	73%
2012幾何 I			44%	54%	67%
2012微積 I	39%	49%	49%	54%	61%
2012代数Ⅱ			68%	72%	83%
2012幾何Ⅱ			70%	78%	83%
2012微積Ⅱ			45%	58%	72%
2013代数 I		52%	64%	73%	75%
2013幾何 I	44%	51%	59%	64%	72%
2013微積 I		52%	64%	73%	75%
-					(表 1)



学年・開講学期・開講年度に関わらず、模擬テス トの平均得点率は右肩上がりで推移しており(図1), 1回の模擬テストを経る毎に平均得点率は約8%上 昇している.この事より、少なくとも短期的には、 数学において定期的演習を行う事は学力向上に効果 があると言える.

同科目の年度別の比較では、1年生の代数Iにお いては、2012年度が模擬B(47%)から模擬E(73%) までに+26%であるのに対し、2013 年度が模擬 B

(52%)から模擬 E(75%)までが+23%となって おり、ほぼ同水準の上昇になっている.1年生の幾 何 I においても、2012 年度が模擬 C(44%)から模 擬E(67%)までに+23%であるのに対し,2013年 度が模擬 C (59%) から模擬 E (72%) までが+23% となっており、同水準の上昇になっている(表 1). 以上の2科目の模擬B・模擬Cにおける差異につい ては,2012 年度に比べ2013 年度の方が自学自習室 開始時期を早めた事による効果を示唆しているが、 今後更なる情報を元に考察する必要があると思われ る.

2 年生の微積 I においては, 2012 年度が模擬 B (49%)から模擬 E(61%)までに+12%であるの に対し、2013年度が模擬B(52%)から模擬E(75%)

までが+23%となっており、2012 年度に比べ 2013 年度の方がほぼ2倍の上昇になっている(表1).東 京高専では1年生は学科未分別の混合学級で行い成 績に応じて2年生から正式に学科配属される為,2 年生4月の段階で学科間に数学の学力差が存在する. この事と今回のデータは、「通常の授業時における理 解度には学科間に余り差異はない」が「試験勉強に よる理解度の向上・試験への適応力には学科間に差 異がある」事を示唆しているが、これも今後更なる 情報を元に考察する必要があると思われる.

3. 学生の評価

長期休暇明け試験と並行して担当クラス内で独自 の小テスト・公式テスト・模擬テストを実施して 3 学期(1年半)経過した本年度7月に担当クラスの1 年生・2年生を対象として(別紙)の様なアンケー トを実施した. 自学自習室・数学相談室に対する評 価と学年全体の休み明け試験に対する評価について は, [2] を参照されたい.

3.1. クラス内小テストに対する評価

単元が終わる毎にクラス内で独自に実施した小テ ストに対しての評価は以下の通りである:

クラス内小テス	⊦¦t						
	2012代数Ⅱ	2012幾何Ⅱ	2012微積Ⅱ	2013代数 [2013幾何 I	2013微積 I	탉

 \vee

	20121\31	ZUIZ成門Ⅱ	ℤℿℤ陬惧Ⅱ	20131(数1	ZUIS成門I	ZUIJ版俱I	ā
とてもよい	5	13	8	21	25	22	94
まあまあよい	21	23	16	17	14	12	103
どちらでない	13	4	7	3	2	5	34
ちょっとヤダ	2	3	5	0	2	3	15
やめて欲しい	1	0	1	0	0	0	2
ilia	42	43	37	41	43	42	248

(表 2)



クラス内小テストに対する学生の評価は実施した 全てのクラスにおいて良好であり(表 2),全体とし て「とてもよい」と「まあまあよい」を合わせた評 価が全体の約5分の4を占めた.2013年度前期に限っては約9割を占めた(図2).評価の理由として,

- ・単元毎に細かく自分の実力・弱点・理解度が分 かる
- ・授業に区切りが付き、少しずつ定期的に復習で きて、単元毎の理解に役立つ
- ・回数が多く、 色々な問題が解けるのがよい
- ・何回も行う事により、自分の実力が伸びていくのを実感できる
- ・課題を提出すれば減点なしなのがよい

などの意見が多く見られた.一方で,

- ・点数によって課題を増やすのはやめて欲しい
- ・回数が多すぎる
- ・後半はテストの間隔が短く,課題が大変 などの意見も見られた.

3.2. 公式テストに対する学生の評価

小テストの一部分として実施した公式テストに対しての評価は以下の通りである.ただし、公式テスト自体は2012年度より実施していたが、アンケートを実施したのは2013年度のみである:

公式テストは

	2013幾何 I	2013微積 I	計
とてもよい	12	15	27
まあまあよい	20	21	41
どちらでもない	11	5	16
ちょっとヤダ	0	1	1
やめて欲しい	0	0	0
計	43	42	85
			(表 3)



(図3)

公式テストに対する学生の評価も実施した全ての クラスにおいて良好であり(表3),全体として「と てもよい」と「まあまあよい」を合わせた評価が全 体の5分の4を占めた(図3).評価の理由として,

- ・公式を覚えるのに役立つ
- ・公式を覚えていないと何もできないので必要

- ・何回も行う事により身に付く
- ・必死に公式を覚えるきっかけになった

・最初は疑問があったが、ちゃんと効果が表れた などの意見が多く見られた.一方で、

・公式を覚えているかだけを問うのではなく、公
 式とそれを使う問題をセットにして出して欲し
 い

・課題の出し方を見直して欲しい

などの意見も見られた.

3.3. 模擬テストに対する学生の評価

定期試験の試験範囲が終わった後に実施した試験 範囲全範囲の模擬テストに対しての評価は以下の通 りである.ただし、模擬テスト自体は2013年度も実 施したが、アンケートを実施したのは2012年度のみ である:

模擬テストは

	2012代数Ⅱ	2012幾何Ⅱ	2012微積Ⅱ	計
とてもよい	25	36	18	79
まあまあよい	11	6	17	34
どちらでもない	5	0	2	7
ちょっとヤダ	0	0	0	0
やめて欲しい	0	0	0	0
計	41	42	37	120

(表 4)



(図 4)

模擬テストに対する学生の評価も全てのクラスに おいて良好であり(表4),全体として「とてもよい」 と「まあまあよい」を合わせた評価が全体の9割以 上を占めた(図4).評価の理由として,

- ・自分の実力・弱点・理解度が分かる
- ・テスト勉強に役立つ
- ・問題がたくさん解けてよい
- ・解説プリントがよい

・(点数が悪ければ)補習をやってくれるのがよい などの意見が見られた.一方で,

・本番のテストより少し難しくするとなおよい

・正答率の低い問題を重点的にやるとなおよい

・もっと回数を増やして欲しい などの意見も見られた.

3.4. 補習に対する学生の評価

一部の学生を除き任意制で実施した補習に対して の評価は以下の通りである:

補習は

\geq	2012代数Ⅱ	2012幾何Ⅱ	2012微積Ⅱ	2013代数 I	2013幾何 I	2013微積 I	
とてもよい	6	25	13	19	16	6	85
まあまあよい	11	10	8	20	14	13	76
どちらでない	16	7	7	1	9	20	60
ちょっとヤダ	2	1	2	0	0	1	6
やめて欲しい	1	0	1	0	0	0	2
	36	43	31	40	39	40	229





補習に対する学生の評価は多くのクラスにおいて 良好であり(表 5),全体として「とてもよい」と「ま あまあよい」を合わせた評価が全体の7割を占めた (図 5).評価の理由として,

- ・授業よりも少人数で質問しやすい
- ・短時間でまとめて復習できる
- ・定期的に講座として開設して欲しい
- ・分からなかった所が集中的に学べて分かる様に なる

・遅れている分を取り返す事ができる

- などの意見が見られた.一方で,
 - ・土日や放課後だと行きたくても行けない
 - ・補習に行けない人用にプリントを配布したりホ ームページ上にアップして欲しい
 - ・半強制的なのはやめて欲しい
- などの意見も見られた.

4. まとめ

学習法・学習習慣を教え自分のペースで自主的に

学習する事のできる演習中心の自学自習室・数学相 談室だけでなく,講義形式で通常の授業では分から なかった所を集中的に質問でき短時間で効率的に復 習できる補習も1年生・2年生には好評であり,学 生のニーズは高いと言える.

一方で、補習は通常の時間割には組み込まれてい ない為、放課後や土日での開催では都合が合わず参 加したくても参加できない学生も見られ、今後の開 催方法については検討の余地がある.また、補習が 当たり前になってしまうと通常の授業に対する学生 の緊張感が薄れてしまうのではないかという指摘も ある為、今後はなるべく講義形式の補習(復習)は 通常の授業内で定期的に実施する事とし、放課後は 再試の必要がある学生に限定して開催する方がより 多くの学生のニーズに対応できると言える.

クラス内テストについては、長期休暇明け試験と 同様に自分の実力・弱点が分かり、しかも回数を多 くこなす事で自分の学力向上を実感できるという点 で好意的に捉えられている.また、長期休暇明けテ ストと違い、期限内に課題を提出すれば成績に影響 しないという点で長期休暇明け試験よりも好評であ る.すなわち、学生は成績に入らない試験を数多く こなす事を望んでいる.

一方で、実施間隔・課題の出し方・公式と問題を セットにするなどの出題方法についての不満が見ら れた為、今後も検討していく必要があると言える.

参考文献

- [1] 波止元仁,齋藤四郎,原井敬子,藤川卓也,"低 学年数学学習法指導プログラム",東京工業高等 専門学校研究報告書, Vol. 43, No.2 (2012), pp.45-49.
- [2] 安富義泰,市川裕子,小中澤聖二,中里肇,"長期休暇における数学の学力維持と学力不振学生の学力向上への取り組み",東京工業高等専門学校研究報告書, Vol.45, No.2 (2014), pp.9-14.
 (平成25年10月31日 受理)

授業改善アンケート

- 1. 自学自習室・数学相談室について教えて下さい.
 - 1.1.自学自習室・数学相談室についてあなたの評価を教えてください.
 5 (とても良い) 4 (まあまあ良い) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい)
 - 1. 2. その理由を教えて下さい.
 - 1. 3. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?
- 2. 学年全体の休み明け試験について教えてください.
 - 2.1. 学年全体の休み明け試験についてあなたの評価を教えてください.
 5 (とても良い) 4 (まあまあ良い) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい)
 - 2. 2. その理由を教えて下さい.
 - 2. 3. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?
- 3. クラスだけの小テストについて教えて下さい.
 - 1. クラスだけの小テストについてあなたの評価を教えてください.
 5 (とても良い) 4 (まあまあ良い) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい)
 - 3. 2. その理由を教えて下さい.
 - 3. 3. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?
- 4. 公式テストについて教えて下さい (2013年度のみの質問).
- 4. 1. 公式テストについてあなたの評価を教えてください.

5 (とても良い) 4 (まあまあ良い) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい)

- 4. 2. その理由を教えて下さい.
- 4.3. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?
- 5. 模擬テストについて教えて下さい (2012年度のみの質問).
 - 5.1. 模擬テストについてあなたの評価を教えてください. 5 (とても良い) 4 (まあまあ良い) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい)
 - 5. 2. その理由を教えて下さい.
 - 5.3. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?
- 6. 補習・追試について教えて下さい.
 - 6.1.補習・追試についてあなたの評価を教えてください.
 5(とても良い)4(まあまあ良い)3(どちらでもない)2(ちょっとヤダ)1(絶対やめて欲しい)
 - 6. 2. その理由を教えて下さい.
 - 6.3. 今後より良くするには、どう改善したらいいと思いますか?

紙飛行機作りから学ぶ小学生向け技術教育の実践

堤 博貴*, 新國広幸**, 北越大輔***, 安田利貴****, 三谷知世*****

Trial of Technology Education that Make the Paper Air Craft for Elementary School Students

Hirotaka TSUTSUMI, Hiroyuki NIKKUNI, Daisuke KITAKOSHI,

Toshitaka YASUDA, Tomoyo MITANI

This study deals with the technology education using the paper aircraft for elementary school students. In this project, it was combined with technology education and PBL education based on try and error.

The problem-decisional education to children is tried, and the technique systematically done the problem solving is learned by the utilization of knowledge and communication. It was designed and was produced, though the theme is the paper airplane make, and though children do trial and error, and it experimented, and it was supposed to put the result of the best out. In the paper airplane make, the worksheet for clarifying approach and thought process of the self was prepared. The project was evaluated on the basis of the questionnaire from children.

1. はじめに

近年,大学や高等専門学校等の高等教育機関にお いて初等・中等教育向けの体験講座・技術教育が活 発に行われている^{1)~6)}.こうした取り組みは小・中 学生へ工学への関心を促し,地域連携・地域貢献な ど様々な成果を上げている.筆者らが勤務する東京 工業高等専門学校(東京都八王子市)においても, 八王子市科学教育支援の一環として小・中学校向け の化学実験・ロボット製作¹⁾などの技術教育を実施 してきた.その経験から児童らにもののしくみやメ カニズム,問題解決の方法論を教えるには体験的な 学習をベースとした指導方法や工夫が不可欠である と考えられた.また,失敗やトライアンドエラーの 経験をしながら教育⁷⁾⁸⁾していくことも重要ではな いかと考えられる.

一方で,近年,PBL (Project-Based Learning) 教育 が実践されるようになった.これは,問題解決型教 育であり,具体的な課題を設定するため,課題解決と いう目標に向かって学生は意欲的に取り組むことが でき,その過程で自分の方法論を獲得するものであ る.さまざまな工学教育機関でPBL 教育が導入され ており,今後とも発展が期待されている.こうした 考え方は工学系学生の自主性,コミュニケーション 力などを向上させる手法として有効であるが,小・ 中学生向けにこうした考え方を導入した事例は少な いと考えられる.

本取り組みはPBL教育と小学生向けの体験教育と

を有機的に結合したものである.児童らに問題解決 型の教育を試み,知識やコミュニケーションを駆使 して,計画的に問題解決する手法を学習する.テー マは紙飛行機作りであり,児童がトライアンドエラ ーをしながら設計・製作・実験し,最善の結果を出 すものとした.これにより児童らは工学でよく用い られる理論などを駆使しなくとも体験的かつ体系的 に問題解決の方法や飛行機のしくみを学ぶことがで きる.

紙飛行機作りにおいて,自分の考え方や思考プロ セスを明確にするためのワークシートを用意した. 児童からのアンケートをもとに本取り組みを評価し たので報告する.

2. 紙飛行機つくりの進めかた

2.1 講座の実施要領

本講座は平成23年9月10日(土),11日(日) の2日間において、八王子市技術教育センターの活 動と連携して取り組んだ。午前・午後のそれぞれ約 50分にて八王子市内の6年生約35名の児童を1ク ラスとして4クラス合計131名を対象とした。東京 高専のマルチメディア教室で紙飛行機を製作した。 同教室はプロジェクタやAV機器が整備されており、 これらを利用して円滑に児童を指導することができ る.

図1に児童による紙飛行機製作の様子を示す.製作を円滑にするために、東京高専の5年生10名が TA(ティーチングアシスタント)を担当した.児童 3 名に対して1名の割合で配置し,紙飛行機製作の 手伝いやその他のサポートをした.はさみ,のり, セロハンテープ,色鉛筆,ホッチキスなどの文房具 は児童らに持参してもらった.

紙飛行機の性能としては,飛行距離・速度・時間 などがあげられるが,ここでは飛行距離をもとに性 能評価することとし,床にメジャーを置いて距離測 定した.風の影響を避けるために飛行は体育館内で 行った.

2.2 紙飛行機の製作

紙飛行機は一般的な折り紙でつくることとした.



図1 紙飛行機製作の様子

その理由は次に示すとおりである.

- 製作において自由度が高く、多種多様な創意工 夫を凝らすことができる.
- ② 一度に多くの児童が作ることができ、工具や特殊な加工方法を必要としない。
- ③ 簡単につくることができ、何度もトライアンド エラーをすることができる.
- ④ 安価で入手しやすく、つくったものを持って帰ることができる.

作り方は自由であり,のり・セロハンテープ・ホ ッチキスなどを使ってもよいこととした.また,必 要に応じて折り紙を配布することとした.

2.3 紙飛行機作りの作業の流れ

図2(a)に児童による紙飛行機作りの流れをフロ ーチャートに示した.作業の順序は次のとおりであ る.紙飛行機の絵を描く→作る→紙飛行機を投げて 距離測定→どうしたらよく飛ぶかを考える.その後, 何度か紙飛行機を作っては投げてみるというトライ アンドエラーを繰り返した.児童は失敗を繰り返し ながら,何度もリトライすることで紙飛行機の問題 点を探りながら改善点を見出しては紙飛行機の性能 向上を図り,その都度性能向上を試みた.

図2(a)の作業と対比した作業概念のフローチャ



ートを図2(b)に示す.上述の作業はそれぞれ,概念 設計・製図→製作→実験→結果・考察となり,一連



図3 紙飛行機を投げる様子



図4 製作用ワークシート

の作業は工業的なものづくりの流れによく一致して いることがわかる.また,図2(c)は教員と TA の指 導の流れを示した.図2(a)の流れに合わせて児童に 指示,アドバイスを与えることとした.

図3に児童が紙飛行機を飛ばしている様子を示す. 2.4 ワークシート

図4に配布したワークシートを示す.このシート には、児童が構想した紙飛行機のアイデアやその飛 行結果・考察を記入するようにした.このシートは 図2の流れに沿って作業を進めることを手助けする ものである.児童の創意工夫や考え方を記録しつつ、 児童のアイデアや思考プロセスがわかるように、2 回の飛行距離を記入するようにした.

3. 教育方法と教育プロセス

3.1 トライアンドエラー

本プロジェクトにおいては小学生の考え方を引き 出すことが重要となる.そのためには,小学生自ら が施行錯誤を繰り返し,失敗と独自の工夫を重ねる 必要がある.

これまでにも失敗をすることを前提とした工学教 育の取り組みはいくつか事例がある.児童らがトラ イアンドエラーのなかで,問題解決策を考えること が有効と考えられた.そこで,ここでは,トライア ンドエラーを柱として,図2(a)のフィードバックに より試行錯誤することを基本とした.

3.2 児童によるプレゼンテーション

図5に児童によるプレゼンテーションの様子を示 す.プレゼンテーションは紙飛行機を飛ばす事前・ 事後の2度行い,事前の構想と事後の飛行結果がど のような違いがあったかを考察することを促した. 事前のプレゼンテーションでは紙飛行機の構想図を

表1	児童による工夫と予想される飛行効果

工夫の内容	予想される飛行効果
・先端になるほど細くなるような三角形状にする	・飛行時の安定性向上
・長細い形にする.	・空気抵抗の低減
・翼を大きくする	・翼面積増加による飛行時間の向上
・紙飛行機の先端を折る・ハサミで切る.	・重心位置を前方へ移動
・先端に重り(紙やホッチキス)をつける	・重心位置を前方へ移動
・翼をたくさんつける	・飛行の安定性向上
 ・2枚の折り紙を重ねて紙飛行機を作る, 	・重量の増加
・斜め上方向に投げる	・発射角度変更による飛行距離の向上
・4枚の折り紙をつなげて大きい紙飛行機を作る.	・重量の増加と翼面積の増加
・尾翼を付ける	・飛行時の安定性向上
・左右対称形状にする	・飛行時の安定性向上

説明し,着想に至った経緯や理由などについて児童 に質問した.

児童の代表者に Web カメラを用いて,紙飛行機の 飛行距離や特徴をプレゼンテーションしてもらった. プレゼンテーションは他の人と意見を共有する場で あり,児童が考えた紙飛行機を作るに至った考え方, 発想や着想点を引き出すことを目的とした.そのた め,教員らは「なぜこのような形にしましたか?」 「どうしてよく飛んだと思いますか?」といった質 問をし,可能な限り児童の発想や考え方を引き出す ように促した.質問に対する回答として,児童らは 「空気の流れを良くすること」「先端を重くするこ



図 5 児童によるプレゼンテーション

と」といった回答をしている.

3.3 コミュニケーション力の向上

紙飛行機の製作は一つのテーブルに3名が座って 行った(図1参照).できる限り同じ小学校の児童が 隣り合うようにし,相談しながら製作するようにし た.また,東京高専の TA 学生が机に一人ずつ配置 されており,彼らとコミュニケーションを図りなが ら作ることもできる.

4. 教育効果および考察

4.1 紙飛行機の製作事例

図6には児童が作った紙飛行機の事例を示した. (a)は長細くして空気抵抗を減らしたものであり,最 も多く見受けられた.(b)は翼面積を大きくして飛行 時間を長くしたものである.(c)は補助翼を付けて飛 行の安定性を狙ったものである.また,(d)は先端を 折って重心位置を前方にしたもの,(e)4枚の折り紙 をつなげて大型化したものなどがみうけられた.

これらの工夫の内容と予想される飛行効果をまと めたものを表1に示す.児童が作った紙飛行機はお おむねこれらの中に分類されるが,そのやり方は多 種多彩であり,同じ翼面積を大きくする方法でも, いろいろなアプローチがあることがわかる.

図4はワークシートの記述例であり,空気抵抗や



(a) 胴体を細くした事例



(b) 翼を広くした事例



(c) 補助翼をつけた事例



(d) 先端を折った事例図 6 児童に



列 (e)4枚の折り紙で大型化した事例 児童による紙飛行機の製作事例



図7 教員による飛行機についての解説





尾翼による効果をトライアンドエラーの中で考案して,飛行距離の向上につなげていることがうかがえる.

4.2 教員による解説と紙飛行機の事例提示

教員が解説する様子を図7に示す.ここでは飛行 機の写真や図を取り上げて,空気抵抗を減らす,翼 を大きくするといった紙飛行機作りで行った工夫が 実際の飛行機ではどのように応用されているかを解 説した.

紙飛行機作り終了後に,教員が児童らに提示した 紙飛行機(飛行物体)の一例を図8に示す.これは フライングリングと呼ばれるものであり,折り紙で 簡単に作ることができる.児童らの発想しないよう なものを見せることで,今回の取り組みの答えが1 つではないことを示すためである.このフライング リングに興味を示し,提示した直後に作りたいとい う児童が多数みうけられた.

4.3 アンケート結果と考察

図9に児童へのアンケート内容とその結果を取り

- Q1. 作った紙ひこうきは、はじめからうまく飛ば すことができましたか?
 - 1. 最初からよく飛んだ.
 - 2. 最初はだめだったけれど、工夫したら飛ぶ ようになった
 - 3. 最後までうまく飛ばなかった
- Q2. 紙ひこうきを飛ばしてみて、うまく飛ぶ紙ひ こうきの形やうまく飛ばす方法はわかりま したか?
 - 1. うまく飛ぶひこうきの形もうまく飛ぶ飛ば しかたも、両方わかった
 - 2. うまく飛ぶひこうきの形はわかった
 - 3. ひこうきがうまく飛ぶ飛ばし方はわかった
 - 4. どちらもわからなかった
- Q3. 皆さんのグループで, 手伝いをしてくれたお 兄さん, お姉さんについてどう思いました か?
 - 1. 質問しなくても教えてくれた
 - 2. ていねいに質問に答えてくれた

3. 面白い話をしてくれた



図9 児童へのアンケート内容とその結果

まとめたものを示す. Q1では多くの児童が2と答 えており,試行錯誤により児童が飛行距離を伸ばし ていることがわかる. Q2では多くの児童が1もし くは2と答えており,よく飛ぶ飛行機の形状を理解 できたことがわかる.また,Q3より指導したTA学 生とのコミュニケーションは良好であることがわか る.

5. まとめ

PBL 教育の考え方を小学生の体験教育に導入し, よく飛ぶ紙飛行機の製作をテーマとした技術教育を 実践した.小学生自らが製作や実験の中でトライア ンドエラーを繰り返し,何度もフィードバックしな がら再設計・再製作・再実験し,最善の結果をする ことを前提として教育を行った.ワークシートやア ンケート結果から取り組み内容を評価したところ, 児童たちは試行錯誤しつつ,知識やコミュニケーシ ョンを駆使して実験・結果・考察をし,時間内で計 画的に問題解決する手法を学習しており,本プロジ ェクトが一定の成果を上げていることが分かった. 児童らは既存の考え方にとらわれない発想力があり, 友達と相談して良いと思われるアイデアを取り入れ る一方,他の人とは違う方法で飛距離を伸ばすなど, 問題に対する解決方法も多種多様であることもわか った.

参考文献

- 小学校科学教育支援と工学系学生のキャリアア ップを意識した PBL 教育の試み, Vol. 60, No. 2, pp. 34-38, 2012
- 2) 佐藤清忠,藤原康宣,向山 宙:競技ロボット製 作授業による教育効果,高専教育,30,pp.1-6, 2007
- 野口昭治:小学校低学年を対象としたトライボ ロジー教育の試み、工学教育、Vol. 56, No. 4, pp. 15-20, 2008
- 4) 伊藤伸英ほか:児童のための機械的ものづくり 教育の実践,工学教育, Vol. 54, No. 4, pp.55 -60, 2006
- 5) 引地力男:出前授業を利用した離島中学校への ものづくり教育支援の検討,工学教育, Vol. 57, No. 1, pp.93-98, 2009
- 6) 山城友栄、川田和男ほか:小学校段階における 「レスキューロボットの製作」を題材としたも のづくり教育の実践、日本機械学会論文集(C 編)、Vol. 77, No.776, 1465-1476,2011
- 小池清之:小さな失敗の積み重ねを経験させる ものづくり教育の試み,工学教育, Vol. 59, No. 1, pp. 93-99, 2011
- 8) 佐藤清忠: 失敗学を基礎にした産学連携による 問題解決型教育の試み,工学教育, Vol. 57, No. 4, pp. 76-81, 2009

(平成25年10月30日 受理)

波型突き合わせ接着継手の接合部の応力集中抑制と引張強度向上の試み

志村 穣*, 川瀬遥平**, 黒崎 茂***, 林 丈晴*

A Trial on Improvement of Tensile Strength and Decreasing Stress Concentration at Bonded Parts of Adhesively Waved Butt Joints

Jyo SHIMURA, Yohei KAWASE, Shigeru KUROSAKI, Takeharu HAYASHI

In this study, we have suggested the new joint configuration, which has scarf angle and a wave-shaped surface at a bonding part. At first, mechanical property in the presented joint subjected to static tensile load is analyzed, using finite element method (FEM). FEM analyses to clarify the stress field at the bonding part are carried out. To confirm the reliability of the analytical results, experiments for strain distribution measurement by using strain gauges are performed. In addition, effects of curvature radius of waved surface at bonding part on stress distribution were examined. As a result, stress concentrations at edges of the bonding part of the presented joint were expected to decrease lower than the conventional waved butt joint. Furthermore, it was thought that the stress concentration decreased at center of bonding part as the curvature radius increased.

Keywords : Adhesively Waved Butt Joint, Stress Distribution, Stress Concentration, Finite Element Method

1. 緒言

近年,接着接合法が溶接などの冶金的接合法やね じなどの機械的接合法に代わり,航空機や自動車, スポーツ用具の構造部分,ICに代表される電子・電 気部品の製造など幅広い分野で使用されている.接 着接合は,ねじやリベットなどの締結に比べ軽量, 異種材料の接合が可能という利点があり,今後も適 用分野の拡大が予想される.著者らは新しい継手形 状として波型突き合わせ接着継手を提案し,従来の 突き合わせ接着継手に比べ破断荷重が向上すること を示した¹⁾.また,FEM 応力解析により,各諸因子 が波型突き合わせ接着継手の力学特性に及ぼす影響 を明らかにした^{2,3)}.

本報では、接合部の応力分布を均一にできるスカ ーフ接着継手と継手強度の向上を可能にする波型突 き合わせ接着継手のそれぞれの利点を組み合わせた 新たな接着継手形状の提案を目的とする.そのため にまず、様々な継手モデルのFEM応力解析を行い、 接着層付近の応力場および変形状態を把握すること で、接合部の最適な幾何条件を調査する.くわえて、 解析の妥当性を確認するためのひずみ分布測定実験 および各継手の破断実験よる継手強度評価を行う.

2. 解析方法

FEM 応力解析には解析ソフト Femap with NX Nastran を用いた. Fig.1 は本研究で対象とする継手の解析モデルである. 平面応力状態を仮定し, プレート要素を用いて有限要素モデルを作成した. 座標軸は荷重の作用する方向(継手の長手方向)を x 軸とする x-y 直交座標を用い, 原点をoとする. 被着体



Fig.1 Model for analysis

Table 1 Material properties of adherend and adhesive

	Young's modulus E [GPa]	Poisson's ratio v
Adherend A6063	68.9	0.33
Adhesive SW 1838 B/A	3.40	0.39

の中心部の長さを L,幅を W,継手接着部の波の曲 率半径をr,スカーフ角度を θ, x 軸方向の接着層の 厚さ tx, 拘束および荷重を与える面の x 軸方向の長 さを S とする. また, 被着体の縦弾性係数, ポアソ ン比を E_1 , v_1 , 接着剤のそれらを E_2 , v_2 とする.本 解析モデルの各部寸法はL=150 [mm], W=25 [mm], $\theta = 58$ [°], $t_x = 0.1$ [mm], S = 26 [mm]とし, 波の曲率半 径 r を最小 3.1250 [mm], 最大 7.5000 [mm]の間で 0.4375 [mm]毎に変化させて解析を行った. なお,ス カーフ角度 θ=58 [°]は、事前のスカーフ接着継手の FEM 応力解析により得られた値である. 材料定義は 接着剤にエポキシ系構造用接着剤(住友スリーエム 製, Scotch-Weld 1838B/A), 被着体材料にアルミニウ ム合金(A6063)を想定し、Table 1 の材料定数を用い た.荷重条件として,x軸方向に引張荷重F=1000[N] を Fig.1 の右側斜線部に付与し、拘束条件として、 Fig.1の左側斜線部における x, y, z 軸方向の並進拘束 ならびに x, y, z 軸中心の回転拘束を与えている.メ



Fig.2 An example of mesh divisions in FEM analysis

ッシュ生成は Fig.2 のように三角形要素を用い,接 着部周辺が細かくなるように設定した.なお,この モデルの場合の総要素数は 50134,総節点数は 100879 である.

3. 実験方法

3.1 試験片

本研究では解析結果の妥当性を確認するためのひ ずみ分布測定ならびに継手の引張強度を明らかに するための継手強度測定実験を行った.被着体材料 であるアルミニウム合金 A6063 を所定の寸法,形状 にワイヤーカットで切り出し加工し,接着面の算術 平均粗さ Raが 2[µm]程度になるようサンドペーパー で研磨した後,エポキシ系構造用接着剤(住友スリー エム製, Scotch-Weld 1838B/A)を塗布し,突き合わせ て接合した.Fig.3 に被着体試験片の寸法および形状 を示す.これらの幾何条件は Fig.1 の解析モデルの それと対応させている.

表面粗さ測定にはミツトヨ製小形表面粗さ測定機 サーフテスト SJ-201 を用いた. 接着剤は主剤 (1838-B)と硬化剤(1838-A)を重量比 1:1 で混合し, 接着面をアセトンで脱脂,乾燥させた後に塗布した. ここで,専用の特殊治具を用いて接着層厚さが 0.1[mm]になるよう調整している. その後,24 時間 常温で硬化させ,ヤマト科学製定温乾燥機 DVS402 を用いて 80[℃]で2 時間,加熱養生を行った.

3.2 ひずみ分布測定実験

ひずみ分布測定実験では,波部の曲率半径が 7.5000[mm]の継手試験片を対象とし,接合部付近に ひずみゲージ(KFG-02-120-C1)を貼り付けて実施し た.なお,実験回数は5回である.Fig.4(a)にひずみ ゲージの貼り付け位置を,図Fig.4(b)にひずみゲージ 貼り付け後の継手試験片を示す.Fig.4(a)中の数字1 ~8 はそれぞれのひずみゲージの位置を意味する. ひずみゲージを貼付した継手試験片を精密万能試験 機オートグラフ AG-Xplus(100kN)に取り付け,変位 制御 0.3[mm/min]の引張負荷を与え,継手試験片が 破断するまでの荷重およびひずみを測定し,任意荷







srtain gauges i jointing part Fig.4 Detail of state glued strain gauges to jointing part

ずみ分布を解析結果のそれと比較した. なお, ひず み測定には共和電業製センサインタフェース PCD-300A を用い,本器を介しパーソナルコンピュ ータに測定データを記録した.

3.3 継手強度測定実験

実験対象とする継手試験片形状は波部の曲率半径がr= 3.1250,5.3125 および7.5000 [mm]の3 形状とし,前節の ひずみ分布測定実験と同様に,精密万能試験機オー トグラフ AG-Xplus(100kN)に取り付け,変位速度 0.3[mm/min]の引張負荷を作用させ,継手試験片が破 断に至るまでの荷重とクロスヘッド変位のデータか ら,荷重-変位線図を作成した.なお,実験回数は 各継手3回ずつである.

4. 結果および考察

4.1 ひずみ分布測定実験結果

Fig.5 にひずみ分布に関する解析結果と実験結果 との比較を示す.実験結果は、Fig.4 に示すひずみゲ ージが貼付されたの波部の曲率半径 r = 7.5000[mm] の接着継手試験片を 5 本用意し、引張荷重 1000[N] を負荷させた時の弾性ひずみを測定したものである. なお、図中のプロットは 5 回の平均値を示す.解析 結果は、有限要素モデルにおいて、ひずみゲージが 貼付された箇所に対応する x 軸方向の要素ひずみ ε_x を意味し、x 軸方向引張荷重 F=1000[N]の時の値を 用いた.図の縦軸は、x 軸(継手の長手)方向のひずみ



Fig.5 Comparison between analytical and experimental result concerning strain distribution



(c) r = 5.3125 [mm] (d) r = 7.5000 [mm] Fig.6 Contour of mises stress σ_m at bonded part

 ε_x [μ strain], 横軸は位置y[mm]を, 図中の1と8はFig.4 における1と8のひずみゲージの貼付位置を表して いる.これより,解析結果と実験結果の両ひずみ分 布は概ね一致しており,本解析結果が妥当性を有す るものと考えられる.

4.2 接合部の応力状態

Fig.6 に既存の波型突き合わせ接着継手および本 提案継手のうちの3形状のミーゼス応力コンター表 示を示す.紫から赤になるにつれ応力値が大きくな ることを示し,最大で9[MPa],最小で5.5[MPa]を意 味する.図のy軸方向が継手幅方向,x軸方向が継 手長手方向となっている.Fig.6(a)の既存の波型突き 合わせ接着継手では,接合部端部において赤色領域 が見られ,応力集中箇所と推察される.この事は, 既往の研究成果¹⁾による破壊起点の推測と一致して おり,この部分の応力集中の抑制が継手強度向上に 寄与するものと考えられる.

このような背景のもと、本研究では接合部端部に 直線的な傾斜、すなわち、スカーフ角度を付与する ことを試みた. Fig.6(b)~(d)は、接合部端部にスカー フ角度、接合部中央に波型形状を有する場合のミー ゼス応力コンター表示である.いずれの場合もスカ ーフ角度を設定することで,接合部端部の赤色領域 が消失しており,応力集中が抑制されると考えられ る.また,波の曲率半径 r を大きくすると接合部中 央付近の応力集中が減少する傾向が見受けられる.

4.3 応力集中係数

接合部形状と引張強度との関係性を調査するため, 接着層および接着層近傍被着体の応力集中係数 α を 算出した.算出式を以下に記すが,ここで, σ_{xmax} は 継手長手方向応力成分の最大値であり, σ_0 は引張荷 重F=1000[N]を継手の断面積 $A=150[mm^2]$ で除した値 を示し,これを基準応力とした.

$$\alpha = \frac{\sigma_{x \max}}{\sigma_0}$$

Table 2 に各継手の接着層および被着体における 応力集中係数 α を示す.参考に,従来型の波型突き 合わせ接着継手のそれらを併記している.本提案継 手の場合,被着体の応力集中係数 $\alpha_{adher.}$ は曲率半径 rが小さくなるにつれて増加することがわかる.後述 の継手強度測定実験結果より確認済みである,継手 の破断が接着層から生じることを踏まえると,接着 層の応力集中係数 $\alpha_{dhes.}$ が最も大きい継手が破断しや すいと考えるのが自然である.しかしながら,三継 手の解析結果を見る限り,曲率半径 r が接着層の応 力集中係数 $\alpha_{dhes.}$ に及ぼす影響は小さい.これより, 被着体の応力集中係数 $\alpha_{adher.}$ と併せて評価すると,最 小曲率半径 r = 7.5000 [mm]の場合が最も継手強度が 高くなると推測される.

また,従来型の波型突き合わせ接着継手の応力集 中係数と曲率半径 r = 7.5000 [mm]の継手のそれらを 比較すると,接着層と被着体の応力集中係数の差が 少ない後者の方が継手強度に優れると考えられる.

4.4 継手強度測定実験結果

Fig.7 に継手強度測定実験により得られた実験デ ータをもとに,近似曲線で示した本提案接着継手 3 種類の荷重-変位線図を示す.FEM応力解析結果に よる応力集中係数が最も小さい曲率半径 r = 7.5000

Table 2 Stress c	concentration	factor of	f each joint
------------------	---------------	-----------	--------------

Curvature radius	Stress concentration factor		
<i>r</i> [mm]	Adhesive layer $\alpha_{dhes.}$	Adherend $\alpha_{adher.}$	
3.1250	1.020	1.400	
5.3125	1.019	1.259	
7.5000	1.019	1.193	
Conventional type, "waved"	0.953	1.478	





Fig.8 Averaged value of joint strength and rupture load

[mm]の継手の最大荷重が最も大きくなっていることから、曲率半径 r が大きいものほど継手強度が向上することがわかる.

Fig.8 に既存の突き合わせ接着継手,波型突き合わ せ接着継手および本提案接着継手(r = 7.5000[mm]) の平均継手強度と平均破断荷重を示す.なお,継手 強度は破断荷重を接着面積で除した値と定義した. 本提案接着継手(r = 7.5000[mm])の平均継手強度な らびに平均破断荷重は,他の継手のそれらを凌駕し ており,引張強度特性の向上を確認できる.

5. 結言

小生らが提案した波型突き合わせ接着継手の力学 特性を改善するため,接合部に波型形状およびスカ ーフ角度を有する突き合わせ接着継手を提案し, FEM 応力解析ならびに継手強度測定実験によりそ の有用性を検討した.以下に得られた知見を示す.

- (1) ひずみ分布に関する解析結果と実験結果との比 較から、本解析方法の妥当性を確認した.
- (2) 波の曲率半径を大きくすると,接合部の応力集 中係数が減少すると推察される.
- (3) 継手強度測定実験結果から,波の曲率半径が最 も大きい r =7.5000[mm]の継手が最も破断荷重 が大きくなる.このことは,FEM 応力解析によ る応力集中係数の評価と一致する.
- (4) 既存の突き合わせ接着継手,ならびに,先に小 生らが提案した波型突き合わせ接着継手との比 較より,本提案接着継手(曲率半径 r=7.5000[mm]) が最も継手強度が向上することを示した.

参考文献

- 志村 穣,秋山和徹,黒崎 茂,宮川睦巳,"波型 突き合わせ接着継手の引張強度特性",材料試験 技術, Vol.54, No.3 (2009), pp.183-189.
- 志村 穣,米満駿介,黒崎 茂,宮川睦巳,"波 型突き合わせ接着継手の力学特性に関する有限 要素応力解析による検討",材料試験技術,Vol.56, No.3 (2011), pp.115-122.
- 志村 穣,加賀見拓磨,黒崎 茂,宮川睦巳,"各 種波型突き合わせ接着継手の力学特性に関する 解析的研究",日本機械学会 2011 年度年次大会講 演論文集(DVD-ROM)No.11-1,(2011),G030072.

(平成25年10月31日 受理)

水撃ポンプの性能および流動状態に及ぼす寸法効果 _{斉藤純夫*,越智啓文**,佐藤敬侍***,塚原 望****,志村 穣*****}

Scale Effects on Performance and Flow Behavior of Water Hammer Pumps Sumio SAITO, Hirofumi OCHI, Keiji SATO, Nozomi TSUKAHARA, Jyo SHIMURA

Water hammer pumps, taking advantage of the water hammer effect that can cause problems in fluid pipeline networks, are capable of pumping water without any outside power source; therefore, the pumps can provide an effective means of fluid transportation even in regions where social infrastructure, such as energy and power networks, has not yet been well developed. To explore the performance of water hammer pumps in comparison with the characteristics of general turbo pumps, our previous paper focused on understanding the basic hydrodynamic characteristics of water hammer pumps by experimentally examining the effects on the hydrodynamic characteristics by representative geometrical form factors, including the internal diameters of the drive pipe and the lift pipe, the form and the capacity of the air chamber, and the drive pipe tilt angle. The previous paper also focused on the form and specifications of each essential component of a water hammer pump main body. In order to explain the flow behavior in the valve chamber and the air chamber, the authors further clarified the effects on the water hammer pump performance by the length of the spring attached to the drain valve and the drain pipe angle, including the effects on the pump performance upon changing the air volume within the air chamber. Furthermore, the previous papers focused on the form of the lift valve to examine the effects of the size of the valve seat opening area of the lift valve on the pump performance and flow behavior within the valve chamber during operation of the water hammer pump. However, the previous studies set the basic form of the water hammer pump and examined the effects on the pump performance for each individual component. Thus, further examination is necessary in order to establish a design method for water hammer pumps and develop optimal designs. This paper aims to move toward the establishment of a water hammer pump design method, and clarifies the scale effects on performance and flow conditions by presenting comparative examinations of the performance of various similar water hammer pumps in different sizes, taking the overall water hammer pump system from the drive pipe to the lift pipe into consideration.

Keywords : Water Hammer Pump, Scale Effect, Fluid Transients, Pump Performance, Pressure Fluctuation, Velocity Fluctuation, Flow Visualization

1. 緒 言

水撃ポンプは流体管路網で問題となる水撃現象 を逆に有効利用して,電動機等の駆動源を必要と せずに無動力で揚水を行うことができるため,エ ネルギや電力網などの生活関連分野の社会的基盤 整備が十分でない地域においても有用な流体輸送 手段として活用できるものと考えられる.

従来の研究^{(1)~(5)}では,水撃ポンプの幾何学的形状について,主要諸元の影響を実験的に検討しているものの,揚程と流量との関係を表すポンプ性能を一般的な形で評価するには十分とは言えない.

前報⁽⁶⁾⁽⁷⁾では,水撃ポンプの性能を一般的なタ ーボ形ポンプ特性と対比して把握するため,水撃 ポンプの基本的な流体力学的特性の把握に主眼を 置き,代表的な幾何学的形状因子である入力管と 揚水管の内径,圧力タンク形状とその容積および 入力管傾斜角度が流体力学的特性に及ぼす影響に ついて実験的に検討した.また,水撃ポンプ本体 における主要構成要素である各部の形状や諸元に 着目し,弁室および圧力タンクまわりの流れの挙 動を解明するため,圧力タンク内空気量を変化さ せた際のポンプ性能に及ぼす影響や⁽⁸⁾⁽⁹⁾,排水弁 まわりの形状因子のうち,排水弁に付帯のばね長 さと排水管角度が,水撃ポンプ性能に及ぼす影響 についても明らかにした⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.さらに,揚水弁 部の形状に着目し,揚水弁の弁座部開口面積の大 小が,水撃ポンプの性能および水撃ポンプ作動時 の弁室内流れの挙動に及ぼす影響についても検討 を加えた⁽¹²⁾⁽¹³⁾.

しかしながら,これらの研究では,水撃ポンプ の基本的な形状を設定し,それを構成する個別の 要素ごとに水撃ポンプの性能に及ぼす影響を検討 しているため,水撃ポンプの設計法を構築し,最 適設計へと展開するためにはさらなる検討が必要 である.

そこで、本報では、水撃ポンプ設計法の確立を めざし、入力管から揚水管までを含めた水撃ポン プシステム全体について、大きさの異なる相似の 水撃ポンプを設計製作し、それらの性能を比較検

* 早稲田大学(前 東京工業高等専門学校 機械工学科)
 ** 東京工業高等専門学校 専攻科
 *** (株) NTT ファシリティーズ
 **** 京王電鉄(株)
 **** 東京工業高等専門学校 機械工学科
討することにより,水撃ポンプ性能および流動状 態に及ぼす寸法効果の影響について明らかにした.

2. おもな記号

A_l	:揚水弁の弁座部開口面積	$[mm^2]$
A_{v}	: 弁室部の断面積=π·dv ² /4	$[mm^2]$
α	: 圧力波の伝播速度	[m/s]
С	:水擊回数	[count/min]
D	:入力管内径	$[mm \phi]$
d	: 揚水管内径	$[mm \phi]$
dv	: 弁室部内径	$[mm \phi]$
Η	: 落差	[m]
h	:揚程	[m]
L	:入力管長さ	[m]
ℓ_s	: ばね長さ	[mm]
P_a	: 圧力タンク内圧力	[kPa]
P_{v}	: 弁室内圧力	[kPa]
Q_d	: 排水量	[ℓ/min]
Q_i	:入力量	$[\ell/min]$
Q_u	: 揚水量	[ℓ/min]
ΔT	:水擊発生周期	[sec]
Δt	: 揚水時圧力保持時間	[sec]
V	: 圧力タンクの容積	[ℓ]
V_a	: 圧力タンク内空気量	[ℓ]
θ	:入力管傾斜角度	[°]
η	: ポンプ効率 (式(1)参照)	[%]
η_v	:体積効率 (式(1)参照)	[%]

添字

peak: 圧力波形の最高値

3. 実験装置の諸元と実験方法

3·1 実験装置

図1は本実験に用いた水撃ポンプ装置の全体図 を、また、図2は弁室および圧力タンクまわりを 含む水撃ポンプ本体の詳細図を示す.

主要機器は水槽(1)からばね(8)までの部品で 構成されており、入力管から揚水管までを含めた 水撃ポンプシステム全体について、図3に示す大 きさの異なる相似の水撃ポンプを設計製作し、水







Fig.2 Main parts of water hammer pump

撃ポンプの性能および流動状態に及ぼす寸法効果 について検討した.

この中で Type[2]は,前報⁽¹²⁾⁽¹³⁾で使用した実験 装置で,この形状諸元を基準として,寸法比で 0.44 倍の Type[1]と 2 倍の Type[3]の相似形状の水撃ポ ンプについて実験的に検討した.

水槽(1)から弁室(3)へ水を供給する入力管(2) については、Type[2]は塩ビ製で、Type[1]とType[3] はアクリル樹脂製とした.また、弁室(3)と圧力タ ンク(6)は、アクリル樹脂素材で製作し、内部の流 れの可視化ができるよう配慮した.さらに弁室(3) の壁面には、流速測定用の電磁流速計を取り付け られる座を設け、また、弁室内の流れを可視化す るため、インクを注入できる構造とした.



Fig.3 Tested three types of water hammer pump

表1はこれら3種類の水撃ポンプシステムの詳 細な諸元を示す.

Coom	atrical form fact	Experimental condition			
Geom		Type[1]	Type[2]	Type[3]	
	Inner diameter	$D [mm\phi]$	11	25	50
Drivanina	Length	<i>L</i> [m]		4	
Divepipe	Angle	θ [°]		7	
	Mater	rial	Acrylic	PVC	Acrylic
Drain pipe	Angle		0		
Lift pipe	Inner diameter	$d [\operatorname{mm} \phi]$	8	18	36
Lift valve	Total hole area	$A_1 [\mathrm{mm}^2]$	58.7	190	656
Water	level	<i>H</i> [m]		0.5	
Air chamber	Capacity	$V\left[\varrho ight]$	0.485	3.85	32.1
(Spherical type)	Air Volume	$V_a \left[\emptyset \right]$	0.243	1.94	16.1
Valve chamber	Inner diameter	$d_v [\mathrm{mm}\phi]$	32.6	74	150
Spring	Length	ℓ_s [mm]	46	5.7	93.0
Spring	Constant	<i>k</i> [N/mm]	0.1	22	0.280

 Table 1
 Experimental factors of water hammer pump

3・2 実験条件および実験方法

3・2・1 実験条件

水撃ポンプの流体力学的特性に影響を与える寸 法効果の影響を検討するため、3 種類の装置とも、 入力管内径 D,揚水管内径 d および圧力タンク等 については、相似の幾何学的形状寸法とした.こ の他の諸元である入力管長さは L=4[m],入力管傾 斜角度は $\theta=7[\circ]$ とし、また、水槽(1)から弁室(3) までの水位である落差は H=0.5[m]一定とし、どの タイプの場合とも同じ状態に設定した.

さらに, 圧力タンク内の空気量は, 各タイプと も圧力タンク容積の半分の状態に保持して実験を 行った.

3・2・2 実験方法

水撃は弁室(3)の下流側に取り付けた排水弁 (4)を急閉止させることにより発生させた.

水撃ポンプに流入する入力量 Q_i は,水槽(1) の水位を H=0.5[m]一定に保つように,水槽(1) に注水する流量を調整することにより設定した. また,規定の揚程になるよう揚水管出口部高さ を設定し,その箇所から流出する揚水量 Q_u を重 量法により測定した.さらに,排水弁から流出 する排水量 Q_d についても直接,重量法により測 定した.

水撃ポンプの性能については,前報^{(6)~(13)}と 同様,一般的なターボ形ポンプの性能表示にな らって,揚水量 Q_u と揚程 h との関係で表示し, また,ポンプ効率 η は,水撃ポンプの入力量と 揚水量を用いて次式により算出した.

$$\eta = \frac{Q_u \times h}{Q_i \times H} = \frac{Q_u}{Q_d + Q_u} \times \frac{h}{H}$$
$$= \eta_v \times \frac{h}{H} \qquad [\%] \qquad (1)$$

ここで、 η_v (= Q_u / ($Q_d + Q_u$))は、一般のタ ーボポンプの場合の体積効率に相当する.

水撃ポンプ本体部である弁室および圧力タン ク内の流れの挙動を解明するため,図2に示す 弁室(3)内の圧力 *P*_vと,圧力タンク(6)内の流体 部分の圧力 *P*_aの時間的変化を歪ゲージ式圧力変 換器(PGM-1KG,共和電業製)を用いて測定し た.

弁室内の流速分布は、入力管から流入する流れ 方向の流速 v_x とそれに直角の揚水方向の流速 v_y の二方向の同時測定が可能な電磁流速計 (VM-801H,ケネック製)を弁室部の垂直方向の 中心位置で、かつ揚水弁の中心位置にセンサ部分 がくるように設定して測定した.

また,弁室内の流れの挙動は,弁室上流部より インクを注入することにより可視化して観察した.

4. 実験結果および考察

4・1 水撃ポンプの性能に及ぼす寸法効果

図4は表1に示した3種類の水撃ポンプについ て、ポンプ性能を有次元表示したものである.第 二象限には水撃ポンプ特有の物理量として、揚程 *h*と排水弁の作動回数から求めた水撃発生回数*C*



Fig.4 Change in water hammer pump performance due to scale effect

との関係を、第四象限には揚水量 Q_u と排水弁からの漏れ量である排水量 Q_d との関係を示した.

図中には式(1)より算出した効率 η の曲線についても併記したが、最高効率点は水撃ポンプの大きさによらず、ほぼ揚程 h=2[m]付近に現れている.

第一象限の揚程hと揚水量 Q_u の関係をみると, 一般的なポンプ性能の場合と同様,右下りの曲線 を示しており,形状寸法の大きいポンプほど,揚 程と揚水量が大きくなっている.

第二象限に示した水撃発生回数 Cは, 各タイプ によって異なり, 排水弁部付帯のバネの影響によ り,約30~42[count/min]の範囲で, 揚程 h によら ずほぼ一定の値で変化している.

また,第四象限の排水量は,ポンプ形状が大き くなるほど排水量も大きくなっているが,各タイ プとも揚水量が増えるにつれて排水量は小さくな る傾向を示している.

4・2 水撃ポンプの弁室内と圧力タンク内圧力 の時間的変化および弁室内流れの挙動

4・2・1 水撃ポンプの弁室内と圧力タンク内 圧力の時間的変化

図5は3種類の相似形状の水撃ポンプについて, 弁室内の流速の時間的変化と弁室内および圧力タ ンク内圧力の時間的変化を,一例として最高効率 点近傍の揚程 h=2[m]の場合について示したもの である.図中には前報^{(8)~(13)}で明らかにした水撃 ポンプの作動状態を表す各フェーズを記載した.

3 種類のどの水撃ポンプの場合とも、圧力変動

の瞬時値は, 排水弁が閉止した瞬間にあたる Phase[2]の状態において, x方向流速 v_xの減速に 伴いy方向流速v_yが揚水方向に変化していること に対応して現れている.すなわち後述するように, 水撃発生時の瞬時圧力値は, 弁室の流路断面積に 基づく流速値の変化に依存して発生しているもの と言える.

また,水撃ポンプ作動時の v_x および v_y の時間的 変化は、弁室内圧力の変化が規則的であるのに対 し、明瞭な規則性が少ないことがわかる.

4・2・2 水撃ポンプの弁室内圧力の揚程によ る変化

図6は3種類の相似形状の水撃ポンプについて、 水撃発生時の弁室内圧力の時間的変化の波形より、 圧力の瞬時値 *P_{v,peak}*と揚水時の圧力値 *P_{v,lift}*が、各 揚程によりどのように変化するかを示したもので ある.図中には両者の圧力値と揚程の値が同じに なる点を一点鎖線で表示した.

3 種類の相似形状の水撃ポンプの場合, 弁室内 圧力の瞬時値 $P_{v,peak}$ は, 大きさによって多少の違 いはあるものの, すべてのタイプで揚程の値より 大きく現れている.

また, 弁室内圧力の揚水時における値 *P_{vlift}*は, 各タイプの大きさの水撃ポンプとも, 揚程の値よ り多少大きな値を示している. これは揚水管内の 流動損失分だけ, 揚程の値より大きな値を示して いるものと考えられる.

次に,図7は揚程の変化による揚水時圧力保持 時間を3種類の相似形状の水撃ポンプの場合につ いて示したものである.



Fig.5 Pressure and velocity fluctuations (h = 2[m])

どのタイプとも揚程の増加に伴い揚水時圧力 保持時間は減少しており,全体的に寸法形状の小 さい水撃ポンプほど,揚水時圧力保持時間は短く



Fig.6 Pressure peak value $P_{v.peak}$ and holding pressure value $P_{v.lift}$ due to pump head h





なっている.

4・2・3 可視化手法による弁室内流れの挙動 の把握

図 8 は大きさの異なる 3 種類の相似な水撃ポン プについて,一例として,弁室内流量の最も大き い揚程 *h*=1[m]の場合の弁室内流れの可視化写真 を示す.

緑色インクの動きから判断すると、弁室内の流 れは極めて不規則な挙動を示しており、図5に示 した水撃発生に伴い発生するv_xとv_yの時間的変化 が明確な規則性を有していないこととも対応して いる.

4・3 水撃ポンプの性能に及ぼす寸法効果

4・3・1 入力管内の圧力波の伝播速度

入力管内の圧力波の伝播速度 a を測定するため, Type[2]の水撃ポンプシステムを用い,図9の上部 に示したように,塩ビ製の入力管長 L=4[m]の中で, 3[m]離れた上流側と下流側の2箇所の位置に圧力 変換器(PGM-1KG,共和電業製)を取り付け,排 水弁を急閉させることにより,入力管からの流入 流れを急停止させた時の各箇所の圧力の時間的変 化を同時に測定した.

図9下の波形はその時の圧力の時間的変化を示 したもので、それぞれ圧力波のピークを表す時点 に着目して圧力波の伝播速度を求めるとα=610 [m/s]となった.

また,入力管の寸法諸元と管の縦弾性係数およ び水の体積弾性係数等の特性値を用いて算出し た圧力波の伝播速度αは,以下の式で算出した⁽¹⁴⁾.

$$\alpha = \alpha_{\circ} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{DK}{bE}}}$$
(2)

ここで, *a*₀: 水中の音速, *b*: 入力管の厚さ, *D*: 入力管内径, *E*: 入力管の縦弾性係数, *K*: 水の体



Fig.8 Flow visualization in valve chamber (h=1[m])



Fig.9 Pressure fluctuations in drive pipe

積弾性係数である.

その結果, Type[2]の場合, 圧力波の伝播速度の 計算値は α = 618[m/s]となり, 実験値とほぼ同じ値 を得た.

以上の結果を踏まえ,入力管がアクリル樹脂製 の Type[1]と Type[3]については,Type[2]の場合と 同様,式(2)を用いて算出した圧力波の伝播速度 の値である α = 878[m/s]と 511[m/s]をそれぞれ後 述する無次元性能の検討に用いた.

4・3・2 水撃ポンプの無次元性能表示による 相似則

水撃発生時の瞬時圧力 P_v は、弁室内の流速 v_v を用いることにより、次式により求められる⁽¹⁵⁾.

$$P_{v} = \rho \cdot \alpha \cdot v_{v} \tag{3}$$

ただし, ρ : 流体の密度 α : 入力管内の圧力波の伝播速度

v,::弁室内の平均流速

である.

ここで、揚程係数 ϕ は揚程hを圧力表示し、弁 室内の流速 v_v に関連して発生する水撃発生時の 瞬時圧力 P_v に対する比で表すことにより無次元 化した.すなわち、揚程係数 ϕ は、

$$\phi = (\rho \cdot g \cdot h) / P_{\nu}$$
$$= (\rho \cdot g \cdot h) / (\rho \cdot \alpha \cdot \nu_{\nu})$$
$$= (g \cdot h) / (\alpha \cdot \nu_{\nu})$$
(4)
で表すことができる.

ここで、gは自由落下の加速度である.

次に, 揚水量 Q_uと排水量 Q_dは, 弁室の管内径 dv と水撃発生回数 C を用いて無次元評価し, 以下



performance

のように揚水量係数 ϕ_u と排水量係数 ϕ_d として表 す.

$$\phi_u = Q_u / (C \cdot dv^3) \tag{5}$$

$$\phi_d = Q_d / (C \cdot dv^3) \tag{6}$$

図 10 は上記の式(4)(5)(6)を用いて水撃 ポンプの性能を無次元表示し、寸法効果による相 似則を評価したものである.

揚水量係数 φ_uに対する揚程係数 φ の変化は, 3 種類の相似形状の水撃ポンプの場合で多少の違い はあるものの,ある程度の幅をもってポンプ性能 を評価することができる.

また、無次元化した排水量係数 ϕ_d の変化については、形状寸法が大きくなるほど ϕ_d は小さくなっているが、どのタイプとも ϕ_u の変化に対してほぼ一定の値を示している.さらに揚水量と排水量の関係は、 ϕ_u の大きい領域では、 ϕ_d は ϕ_u の約 3~6 倍、また、 ϕ_u の小さい領域では、 ϕ_d は ϕ_u の約 15~20 倍程度の値となっている.

5. 結 言

入力管から揚水管までを含めた水撃ポンプシ ステムについて、大きさの異なる相似の水撃ポン プを設計製作し、それらの性能を比較検討するこ とにより、水撃ポンプ性能および流動状態に及ぼ す寸法効果の影響について明らかにした.

その結果,明らかになった点は以下のとおりで ある.

(1) 揚程 h と揚水量 Quの関係は,一般的なポンプ の場合と同様,右下りの性能曲線を示しており, 形状寸法の大きいポンプほど、揚程と揚水量が大 きくなっている.また,排水量はポンプ形状が大 きくなるほど、排水量も大きくなり、各タイプと も揚水量が増えるにつれて排水量は小さくなる傾 向を示している.

さらに、水撃発生回数 Cは、各タイプによって 異なり、排水弁部付帯のバネの影響により、約30 ~42[count/min]の範囲の値を示し, 揚程 h にはよ らずほぼ一定の値となっている.

(2) 揚水量 Q₄と排水量 Q₄を, 弁室の管内径 dv と 水撃発生回数 C を用いて無次元化し、ポンプ性能 を揚程係数 ∉ と揚水量係数 ∉ よよび排水量係数 ϕ_d として評価できることを示した.

(3)3種類の相似形状の水撃ポンプの結果から、 弁室内圧力の瞬時値 Pv.peak は、大きさによって多 少の違いはあるものの, すべてのタイプで揚程値 より大きく現れている.

また,弁室内圧力の揚水時の値 Pv.liftは,各タイ プの大きさの水撃ポンプとも, 揚水管内の流動損 失の分だけ揚程の値より大きな値を示している.

(4)3種類の相似形状の水撃ポンプの場合とも、揚 程の変化による揚水時圧力保持時間 Δt は, 揚程 の増加に伴い揚水時圧力保持時間は減少しており, 全体的には寸法形状の小さい水撃ポンプほど揚水 時圧力保持時間は短くなっている.

(5) 弁室内流れの可視化結果と流速の時間的変化 より,水撃発生時には,弁室内のx方向流速 vxの 減速に伴い y 方向流速 v, が揚水方向に変化してい るものの,水撃ポンプ作動時のvxとvyの時間的変 化の明瞭な規則性は少ない.

文 献

- (1) 鏡・出井・牛山,水撃ポンプ製作ガイドブック,
- (2001), p.47, パワー社. 柚木, 水撃ポンプの製作と特性に関する研究, 科学教育研究, Vol.28, No.2 (2004), pp.94-100. (2)
- (3) Abi Awoke Tessema, Hydraulic Ram Pump System Design and Application, Proceedings ESME 5th Annual Conference on Manufacturing and Process Industry, 2000-9, pp.1-8.

- (4) 長谷川・末廣・山口,水撃ポンプの試作と特性, 豊田工業高等専門学校 研究紀要,第17号, (1984), pp.15-20.
- (5)Teferi Taye, Hydraulic Ram Pump, Journal of the ESME, Vol. II, No.1(1998-7), pp.1-11.
- 斉藤・他4名,水撃ポンプの幾何学的形状と流 (6) 体力学的特性との関係,日本機械学会論文集(B編), 76-767 (2010-7), pp.1028-1034.
- (7) Sumio SAITO, Yoshimi NAGATA, Masaaki TAKAHASHI, Daijiro INOUE, Yuki HOSHINO, Relationship between the Basic Geometric Form and Hydrodynamic Characteristics of Water Hammer Pump, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.5, No.3, 2010, pp.491-502.
- (8) 斉藤・高橋・永田, 水撃ポンプシステムの特性 に及ぼす圧力タンク内空気量の影響, ターボ機 械, 第39卷, 第2号, 2011-2, pp.87-94.
- (9) Sumio SAITO, Masaaki TAKAHASHI, Yoshimi NAGATA, Effects of the Air Volume in the Air Chamber on the Performance of Water Hammer Pump System, International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol.4, No.2, April-June 2011, pp.255-261.
- (10) 斉藤・高橋・永田, 出嶌, 水撃ポンプの特性に 及ぼす排水弁まわりの幾何学的形状因子の影 響,ターボ機械,第39巻,第6号,2011-6,2011-6, pp.323-331.
- (11) Sumio SAITO, Masaaki TAKAHASHI, Yoshimi NAGATA, Keita DEJIMA, Effects of the Geometry of Components Attached to the Drain Valve on the Performance of Water Hammer Pump, International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol.4, No.4, October-December 2011, pp.367-374.
- (12) 斉藤・出嶌・高橋・土方, 水撃ポンプの揚水弁 部の開口面積が性能に及ぼす影響と弁室内流 れの挙動, ターボ機械, 第39巻, 第8号, 2011-8, pp.449-457.
- (13) Sumio SAITO, DEJIMA, Keita Masaaki TAKAHASHI, Gaku HIJIKATA, Takuya IWAMURA, Effects of the Lift Valve Opening Area on Water Hammer Pump Performance and Flow Behavior in the Valve Chamber, International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol.5, No.3, July-September 2012, pp.109-116.
- (14) 草間,水力機械,(1982), p.80, コロナ社.
- (15) 大橋, 流体機械, (2011), p.171, 森北出版.

(平成25年10月31日 受理)

表計算ソフトによる鉛フリーはんだのAnandパラメータ決定

林 丈晴*, 高部真彰**, 海老原理徳***, 志村 穣*

Determination of Anand Parameters to Lead-Free Solder Alloy using Spreadsheet Software Takeharu HAYASHI, Masaaki TAKABE, Yoshinori EBIHARA, Jyo SHIMURA

We are difficult for determining parameters of Anand model because the model is complicated. In this study, we drove the equations for determination of Anand parameters, proposed a process where we can easily determine them and developed a calculation system to conduct the process based on Excel. Next, we determined Anand parameters using the developed system. Then, we analyzed the tensile tests using Anand model with the parameters and compared FE analysis results with experimental test data. It was confirmed that analytical results were in good agreements with the experimental ones.

Keywords : Anand Model, FEA, Lead-Free Solder, Parameter Determination

1. 緒 言

近年,電子機器の小型化,高密度化に伴って, 微細はんだ実装技術の開発が進められている.ま た,地球環境保護の観点から,鉛フリーはんだを 使用したはんだ実装が進展している.これらの電 子部品はんだ接合部では,電源のON・OFF などに よる周期的な温度環境下で,構成材料の線膨張係 数の違いに基づく変位のミスマッチにより,低サ イクルの周期的な熱変形がはんだ接合部に生じ, 疲労破壊が生じる.従って高密度はんだ実装技術 の開発では,はんだ接合部の熱疲労寿命予測が重 要な検討課題である.

一般に、温度サイクル負荷を受けるはんだ接合 部の熱疲労寿命は次のプロセスで予測される.ま ず、機械的疲労試験などによりはんだの疲労寿命 特性を求めるとともに、寿命予測をしたいはんだ 接合部について、有限要素法による構造解析を行 って、寿命予測で用いる相当非弾性ひずみ範囲を 求める.次にこの相当非弾性ひずみ範囲と疲労寿 命特性から疲労寿命を予測する.従って、有限要 素解析では正確な相当非弾性ひずみ範囲を求める ことが重要である.

一方, 鉛フリーはんだは融点が約220℃であり,

厳しい温度環境で塑性とクリープが同時に存在し、 かつこれらが相互に影響しあう複雑な特性があり, その力学的特性は温度依存性およびひずみ速度依 存性が顕著である.従って,塑性特性を高ひずみ速 度の引張試験から取得し,クリープ特性をクリー プ試験から取得する古典的な弾塑性クリープモデ ルでは、この相互作用を表すことが出来ない(1).こ の打開策の一例として、Anandモデル⁽²⁾のはんだ への適用の試み⁽³⁾⁻⁽⁸⁾が報告されている.一方,当 モデルは材料定数の決定が複雑で、一般に高度な ソフトを用いて定数決定が行われる. そこで本研 究では、表計算ソフトでAnandパラメータ決定が 可能な決定式を導出し、容易なAnandパラメータ 決定法を提案し、提案した手法で鉛フリーはんだ についてAnandパラメータを決定し、その妥当性 を検証する.

2. Anand パラメータ決定式

2・1 Anand モデルの粘塑性ひずみ速度式

当モデルでは、非弾性ひずみ速度即ち粘塑性ひ

ずみ速度 ε^ν は式(1)で表す.

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = A \exp(-\frac{Q}{RT}) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right) \right]^{1/m} \qquad (1)$$

ただし、Tは絶対温度、 σ は応力、sは抗応力、A、 Q/R、 ξ , mは Anand パラメータである. 抗応力 s の 移行式として式(2)を用いる.

$$\dot{s} = h_0 \left(1 - \frac{s}{s^*} \right)^a \varepsilon^p \tag{2}$$

ただし、s*は抗応力の収束値, h_0 , aは Anand パ ラメータである. 抗応力の収束値 s*は式(3)で表す.

$$s^* = s \left[\frac{\varepsilon^{v_p}}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^n$$
(3)

ただし、s,nはAnandパラメータである. 応力 収束域では、粘塑性ひずみ速度は試験条件のひず み速度と一致するので式(3)から式(4)が得られる.

$$s^* = s \left[\frac{\varepsilon}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^n \tag{4}$$

ただし, *ε*はひずみである.またこのモデルでは 応力は抗応力に比例し,式(5)のように表す.

$$\sigma = cs \tag{5}$$

ただし、c は粘塑性ひずみ速度および温度の関数 である.また、粘塑性ひずみが生じた瞬間では、 式(5)は式(6)のように表される.

$$\sigma_0 = c_0 s_0 \tag{6}$$

ただし、 c_0 は初期の粘塑性ひずみ速度に対応する c, s_0 は Anand パラメータである.

2・2 Anand パラメータ決定式の導出

2・2・1 応力収束値と試験条件のひずみ速度の関係式の導出

式(1)は式(7)のように変形することができる.

$$\sigma = \frac{s}{\xi} \sinh^{-1} \left[\frac{\varepsilon^{vp}}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^m$$
(7)

式(5)および式(7)より,式(8)が得られる.

$$cs = \frac{s}{\xi} \sinh^{-1} \left[\frac{\dot{\varepsilon}^{vp}}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^m$$
(8)

式(8)の両辺をsで割ると式(9)が得られる.

$$c = \frac{1}{\xi} \sinh^{-1} \left[\frac{e^{\nu p}}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^m$$
(9)

ここで、応力収束域について考える. 応力収束 域では式(5)は式(10)で表す.

$$\sigma^* = cs^* \tag{10}$$

ただしσ*は応力収束値である. c は粘塑性ひずみ 速度の関数であるため、時間の経過と共に変化す るが、この領域では粘塑性ひずみ速度は試験条件 のひずみ速度と一致するので式(9)から式(11)が導 かれる.

$$c = \frac{1}{\xi} \sinh^{-1} \left[\frac{\dot{\varepsilon}}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^m$$
(11)

式(4),式(10)および式(11)より,式(12)が得られる.

$$\sigma^* = \frac{\hat{s}}{\xi} \sinh^{-1} \left[\frac{\hat{\varepsilon}}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^m \left[\frac{\hat{\varepsilon}}{A} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^n (12)$$

式(12)は、試験条件のひずみ速度および温度と 応力収束値の関係を表し、この関係から、s/ξ, A,m,nおよび Q/R を決定することができる. 2・2・2 応力・粘塑性ひずみの関係式の導出 ここでは式(12)の応力収束値 σ*を関数とした 応力・粘塑性ひずみ関係式を導出する.式(2) および式(5)より、式(13)が得られる.

$$\frac{\sigma}{c} = h_0 \left(1 - \frac{cs}{cs^*} \right)^a \varepsilon^p$$
(13)

式(13)の両辺にcを乗じると式(14)のように変形される.

$$\overset{\cdot}{\sigma} = ch_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^a \varepsilon^p \tag{14}$$

式(14)は、式(15)、式(16)のように変形できる.

$$\frac{d\sigma}{dt} = ch_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^a \frac{d\varepsilon^{vp}}{dt}$$
(15)

$$d \sigma = ch_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^a d\varepsilon^{\nu p}$$
(16)

式(16)の両辺を de^{vp}で割ると,式(17)の応力・粘塑 性ひずみ線図の傾きを得ることができ,雨海らは 式(17)を Anand パラメータを決定に使用した⁽⁴⁾.

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon^{\nu p}} = ch_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^a \tag{17}$$

式(17)の変数分離を行うと、式(18)を得られる.

$$\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^{-a} d\sigma = ch_0 d\varepsilon^{\nu p}$$
(18)

式(18)を積分すると、式(19)が得られる.

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \left(\frac{\sigma^* - \sigma}{\sigma^*} \right)^{-a} d\sigma = ch_0 \int_0^{\varepsilon^p} d\varepsilon^{\nu p}$$
(19)

式(19)の両辺に(σ*)^{-a}乗じると,式(20)が得られる.

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \left(\sigma^* - \sigma \right)^{-a} d \sigma = \left(\sigma^* \right)^{-a} c h_0 \int_0^{\varepsilon^p} d\varepsilon^{vp} \quad (20)$$

式(20)を計算すると、式(21)が得られる.

$$\left[\frac{-1}{1-a}\left(\sigma^*-\sigma\right)^{1-a}\right]_{\sigma_0}^{\sigma}d\ \sigma = \left(\sigma^*\right)^{-a}ch_o\varepsilon^{\nu p} \quad (21)$$

式(21)は、式(22)~式(26)のように変形される.

$$\left[\left(\sigma^* - \sigma\right)^{1-a}\right]_{\sigma_0}^{\sigma} = -(1-a)\left(\sigma^*\right)^{-a}ch_0\varepsilon^{\nu p} \qquad (22)$$

$$\left(\sigma^* - \sigma\right)^{l-a} - \left(\sigma^* - \sigma_0\right)^{l-a} = \left(a - 1\right)\left(\sigma^*\right)^{-a} ch_0 \varepsilon^{\nu p} (23)$$

$$\left(\sigma^* - \sigma\right)^{1-a} = \left(\sigma^* - \sigma_0\right)^{1-a} + \left(a - 1\right)\left(\sigma^*\right)^{-a} ch_0 \varepsilon^{vp} (24)$$

$$(\sigma^* - \sigma) = \left[(\sigma^* - \sigma_0)^{1-a} + (a-1)(\sigma^*)^{-a} ch_0 \varepsilon^{\nu p} \right]^{\frac{1}{1-a}} (25)$$
$$\sigma = \sigma^* - \left[(\sigma^* - \sigma_0)^{1-a} + (a-1)(\sigma^*)^{-a} ch_0 \varepsilon^{\nu p} \right]^{\frac{1}{1-a}} (26)$$

cは粘塑性ひずみ速度と温度の関数であるため時間の経過と共に変化することを考慮しつつ,式 (26)を書きかえると,式(6)および式(9)より,式(27) のようになる.

$$\sigma = \sigma^* - \left[\left(\sigma^* - c_0 s_0 \right)^{1-a} + \left(a - 1 \right) \left(\sigma^* \right)^{-a} \left(\frac{1}{\xi} \sinh^{-1} \left[\frac{i}{\varepsilon^{v_p}} \exp(\frac{Q}{RT}) \right]^m \right] h_0 \varepsilon^{v_p} \right]^{\frac{1}{1-a}} (27)$$

3. Anand パラメータ決定

3・1 Anand パラメータ決定プロセス

導出した式を用いた Anand パラメータ決定法を 記す.この決定手順は、次の①~⑥のプロセスか らなる.

- ① 式(12)より試験条件であるひずみ速度および 温度とその時の応力収束値から s/ξ , A, m, n および Q/Rを決定する.
- ② 応力ひずみ曲線から応力ひずみ曲線の多直線 近似を行う.この時、降伏応力とヤング率か

ら計算される降伏時のひずみからなる座標点 をプロットに含める.

③ 図1の手法で、応力ひずみ曲線から応力・粘 塑性ひずみ関係を求める.なお、せん断成分 の試験結果からAnandパラメータを決定する 場合は、相当応力・相当粘塑性ひずみ関係に 変換するなどで対応が可能である.



Fig. 1 Removal of elastic strain

- ④ c₀を決める.ここでは、粘塑性ひずみが初め て生じた時の値を用いる.
- ⑤ 応力・粘塑性ひずみ関係からカーブフィッテ イング技術を用いて式(27)を用いて ζ, h₀, a お よび s₀を決定する.
- ⑥ ②で決定した \hat{s}/ξ と③で決定した ξ とから \hat{s} を決定する.

この定数決定プロセスを実施するための計算 システムを Excel をベースに作成した. このシス テムを用いれば, Anand パラメータを容易に決定 できる.

3 • 2 システムの使用方法と Anand パラメー タ決定

著者らがすでに行った Sn3.5Ag0.5Cu0.07Ni0.01Ge は んだの試験結果[®]のうち,温度 298K,ひずみ速度 0.002%/sec, 0.2%/sec で 5%のひずみが生じるまで行っ た引張試験結果から、3・1節で作成したシステムを用 いて Anand パラメータ決定を行った.以下にシステム の使用方法を示す.

 表1の灰色部分に試験条件であるひずみ速度,温 度および試験結果から得られる応力収束値を入 力する.表1の太枠部に数値を入力すると Calculated saturation stressの欄に式(12)により計算 された応力収束値が出力される.従って,Excel の演算機能を用いるなどして、この計算値と試験 値が等しくなるように太枠部の数値を最適化し、

 s/ξ , A, m, n およびQRを決定する. このプロセスはI)に相当する.

2) 次に応力ひずみ曲線から降伏応力およびヤング 率を読み取り、その数値を表2の灰色部に入力す る.

	A[1/sec]	1338000				
	<i>Q/R</i> [1/K]	7730				
Parameter	\hat{s}/ξ [MPa]		27.56			
	т	0.136				
	n	0.0001				
m , 1 ,	Saturation stress [MPa]	41.60	27.10			
Test data	Strain rate[/sec]	0.002	0.00002			
	Temparature[K]	298	298			
Calucurated s [MPa]	aturation stress	41.58	27.07			
		<u>र</u> (12)				

Table 1 Material parameters determined by Eq(12)

Table 2 Young's modulus and yeild stress

Young's modulus[MPa]	50000
Yeild stress[MPa]	5

3) 試験結果の多直線近似を行い、近似プロットを表 3 の灰色部に入力する. なお、1 つ目のプロット 点である降伏点については、表2 に入力した値か ら自動計算されるのでここでは入力しない. 表 3 の Stress[MPa] と Strainの列の1行目が灰色でない のは、このことによる. 表3の Inelastic strainの列 には、図1の方法で表2 のヤング率を用いて自動 計算された値が、粘塑性ひずみとして出力される. さらに、表3の Value of cの列では式(9)により c および c₀が自動計算され、その値が出力される. これはプロセス③および④に相当する. なお、表 3の Slopeの列には応力ひずみ曲線の傾きが出力

(a) $\varepsilon = 0.2\%$ /sec							$(b) \frac{1}{\varepsilon} = 0$	0.002%/s	sec				
Strain rate	0.002	Temperat ure [K]	298	Satura tion stress [MPa]	41.6		Strain rate	0.00002	Temperat ure [K]	298	Satura tion stress [MPa]	27.1	
Stress [MPa]	Strain	Inelastic strain	Inelastic strain rate	Value of c	Calcula ted stress [MPa]	Slope	Stress [MPa]	Strain	Inelastic strain	Inelastic strain rate	Value of c	Calcula ted stress [MPa]	Slope
5.0	0.0001	0.0000	0.00161	1.234	21.0	50000	5.0	0.0001	0.0000	0.0000169	0.804	13.7	50000
23.8	0.002	0.0015	0.00191	1.252	25.5	9868	19.5	0.002	0.0016	0.0000197	0.817	16.8	7632
28.3	0.004	0.0034	0.00195	1.254	29.4	2250	21.1	0.004	0.0036	0.0000198	0.817	19.3	775
31.0	0.006	0.0054	0.00196	1.255	32.2	1375	22.3	0.006	0.0056	0.0000198	0.818	21.1	600
32.8	0.008	0.0073	0.00197	1.255	34.1	890	23.3	0.008	0.0075	0.0000199	0.818	22.3	500
34.2	0.01	0.0093	0.00198	1.256	35.6	725	24.0	0.01	0.0095	0.0000199	0.818	23.3	365
35.3	0.012	0.0113	0.00198	1.256	36.7	525	24.5	0.012	0.0115	0.0000199	0.818	24.0	260
36.2	0.014	0.0133	0.00199	1.256	37.5	475	24.8	0.014	0.0135	0.0000199	0.818	24.5	163
37.0	0.016	0.0153	0.00199	1.256	38.1	360	25.2	0.016	0.0155	0.0000199	0.818	24.9	203
37.5	0.018	0.0173	0.00199	1.256	38.6	275	25.5	0.018	0.0175	0.0000200	0.818	25.2	135
38.0	0.02	0.0192	0.00199	1.256	39.1	250	25.8	0.02	0.0195	0.0000200	0.818	25.5	125
38.4	0.022	0.0212	0.00199	1.256	39.4	215	26.0	0.022	0.0215	0.0000200	0.818	25.7	100
38.9	0.024	0.0232	0.00199	1.256	39.7	210	26.2	0.024	0.0235	0.0000200	0.818	25.9	125
39.2	0.026	0.0252	0.00199	1.256	39.9	190	26.4	0.026	0.0255	0.0000200	0.818	26.0	100
39.6	0.028	0.0272	0.00199	1.256	40.1	185	26.6	0.028	0.0275	0.0000200	0.818	26.1	75
39.9	0.03	0.0292	0.00199	1.256	40.3	150	26.7	0.03	0.0295	0.0000200	0.818	26.2	65
40.2	0.032	0.0312	0.00199	1.256	40.4	145	26.8	0.032	0.0315	0.0000200	0.818	26.3	50
40.5	0.034	0.0332	0.00200	1.256	40.5	130	26.9	0.034	0.0335	0.0000200	0.818	26.4	40
40.7	0.036	0.0352	0.00199	1.256	40.6	125	26.9	0.036	0.0355	0.0000200	0.818	26.5	35
41.0	0.038	0.0372	0.00200	1.256	40.7	150	27.0	0.038	0.0375	0.0000200	0.818	26.5	30
41.3	0.04	0.0392	0.00200	1.256	40.8	125	27.0	0.04	0.0395	0.0000200	0.818	26.6	25
41.5	0.042	0.0412	0.00200	1.257	40.9	100	27.1	0.042	0.0415	0.0000200	0.818	26.6	20
41.5	0.044	0.0432	0.00200	1.257	40.9	45	27.1	0.044	0.0435	0.0000200	0.818	26.7	10
41.6	0.046	0.0452	0.00200	1.257	41.0	30	27.1	0.046	0.0455	0.0000200	0.818	26.7	0
		Fig. 1 $\overline{\Delta t} \left(\frac{1}{2} \right)$	$\frac{\Delta \varepsilon^{vp}}{= \Delta \varepsilon / \varepsilon}$	€q(9)	f Eq(27	7)							

Tabel 3 Multi-linear approximation data of stress-strain curves and automatic calculation system

され、これはひずみの増加とともに減少する のが自然であり、ひずみの増加とともに増加 する場合は不自然な多直線近似を意味する. 生データの状態ではしばしばこのようなこと が起きるので、注意を要する.

 表4の太枠部に数値を入力すると Calucurated stressの列に式(27)により計算された応力値が 出力され、この計算値と試験結果が図2に表 れる.従って、ここで試験結果と計算された 応力値が一致するようにカーブフィッティン グを行うことで ζh₀,a および s_oを決定する.

ここで、 s/ξ とで ξ とからs が自動計算され

る. これはプロセス⑤および⑥に相当する. なお,表4の値と図2のグラフはカーブフィ ッティング後のものである.

Table 4 Material parameters determined by Eq(27)

_	
s_o [MPa]	17
<i>Q/R</i> [1/K]	7730
A[1/sec]	1338000
ξ	1.2
т	0.1361
<i>ho</i> [MPa]	7500
^ S	33.071
n	0.0001
а	1.4



4. 本決定方法の妥当性の検証

4•1 有限要素解析

作成したシステムで決定した表4に示す Anand パラメータを用いて引張試験の有限要素解析を行った.なお,解析には汎用有限要素解析ソフト Ansysを用いた.

解析では、図3に示す長さ15mm,半径5mmの 円柱形状のモデルを作成し、片方の端面を軸方向 に固定し,もう一つの端面を軸方向に強制変位 0.75mm(ひずみ5%)を与えた.ひずみ速度 0.2%/secについては、この強制変位を25秒間かけ て行い、ひずみ速度 0.002%/secについては2500 秒間かけて行った.なお、使用要素は四面体10 節点2次要素で、要素数が361、節点数が685で ある.

4・2 有限要素解析結果と妥当性の検証

解析結果を図4に示す.図4が示す通り解析結 果と試験結果はよく一致し,提案する Anand パラ メータ決定法は妥当であることが分かる.



Fig. 3 Finite element mesh







- (1) 表計算ソフトでAnandパラメータ決定が可能 な決定式を導出し、その決定プロセスを提案 した.
- (2) この定数決定プロセスを実施するための計算 システムを Excel をベースに開発した.
- (3) 温度298K, ひずみ速度0.002%/sec, 0.2%/sec で行った Sn3.5Ag0.5Cu0.07Ni0.01Ge はんだの引帰試験 結果から, 開発したシステムを用いて, Anand パ ラメータを容易に決定した.
- (4) 汎用有限要素解析ソフト Ansys を用いて、決定した Anand パラメータで有限要素解析を行い、解析結果と試験結果を比較したところこれらはよく一致し、本手法は妥当であることを示した。

6. 今後の課題

今回は温度 298K のみの引張試験結果について のみのパラメータ決定であったが、今後は他の温 度についてもパラメータを決定する.

文 献

 McDowell, D.L., Miller, M.P., and Brooks, D.C., "AUnified Creep-Plasticity Theory for Solder Alloy", Fatigue of Electronic Materials, ASTM STP 1153, S. A. Schroeder and M. R. Mitchell, eds., *American Society for Testing and Materials*, *Philadelphia*, pp. 42-59(1994).

- (2) Anand, L., "Constitutive Equation for the Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures", *Transactions of the ASME, Journal of Electronic Packaging*, Vol.104(1982), pp. 12-17.
- (3) 横田康夫 ・渡辺正樹, "熱疲労シミュレーションによる鉛フリーはんだヒートサイクル 試験期間の適正化", エレクトロニクス実装 学会誌, Vol.7, Nol (2004-1), pp.76-81.
- (4) 雨海正純, "鉛フリーはんだ材における Anand 粘塑性モデル適用の検討", 日本機械 学会第 15 回計算力学講演会講演論文集 (2002-10), pp.775-776.
- (5) 京極好孝・加茂由佳里・石橋正博, Sn-3.0Ag-0.5CuのAnandモデルの材料定数算 出法に関する研究,第15回マイクロエレク トロニクスシンポジウム論文集(2005-10), pp.117-120.
- (6) Chen, X., Chen, G., Sakane, M.," Prediction of Stress-Strain Relationship With an Improved Anand Constitutive Model For Lead-Free Solder Sn-3.5Ag", *IEEE transaction on component and packaging technologies*, vol.28, No.1(2005), pp. 111-116
- (7) Wilde, J., et al., "Rate Dependent Constitutive Relations Based on Anand Model for 92.5Pb5Sn2.5Ag Solder", *IEEE transaction on advanced packaging technologies*, Vol.23, No. 3(2000),pp.408-414
- (8) Cheng, Z.N., et al., "Viscoplastic Anand model for solder alloys and its application", *Soldering & Surface Mount Technology*, Vol. 12 Iss: 2, pp.31 -36
- (9)林丈晴・海老原理徳・浅井竜彦・渡邉裕彦,"粘 塑性・クリープ分離型構成モデルの鉛フリー はんだへの適用",日本機械学会論文集(A 編),Vol.77,No.780(2011-8),pp.1169~1177.

(平成25年10月31日 受理)

波動逆解析による内部欠陥の可視化システムの構築

福田勝己*, 西村良弘**, 鈴木隆之**, 福田昌了***

Construction of a System of Making to Internal Defect by Inverse Problem Solving Katsumi FUKUDA, Yoshihiro NISHIMURA, Takayuki SUZUKI, Masatoshi FUKUTA

Ultrasonic Inspection is effective for inspecting ceramic materials because ultrasonic waves are easily propagated in general ceramic materials. Aperture synthesis cannot derive high quality image of internal defects in ceramic sample because the acoustic velocity of ceramic materials is very high, compared to metal samples. In this study, internal defect images were reconstructed by Synthesis Aperture. We investigated what kind of factor affects the reconstructed defect images.

Keywords : Ultrasonic Inspection, Array Probe, Inversion Analysis, Synthesis Aperture

1. 緒言

非破壊検査の一つである超音波探傷法は、航 空機や鉄道等の車軸や構造物の安全性、健全性 を保つ手法である.この方法は,超音波が物体 の界面で反射する性質を利用しており,材料内 部の欠陥を検出することが可能である.特に, アレイプローブを用いたフェーズドアレイ法は, 材料内部の任意の点で焦点を結び、電子走査す ることで瞬時にデータの取得が可能な方法で, 近年注目されている非破壊検査法の一つである. 一方,窒化ケイ素などのセラミックス材料は, 金属材料と比べて剛性や耐熱性に優れており, 高い精度が求められる電子機器や高温金属を扱 う分野で期待されている.しかし、材料内部の 局所的欠陥によって強度や破壊じん性が左右さ れてしまうために,材料内部の欠陥を正確に検 出することは重要であるが、セラミックスは金 属と比較して音の伝播速度が速く、波長が長い ために近距離音場の範囲が短くなってしまう. さらに、大型のセラミックス構造物を対象とし た場合には、超音波の減衰が大きくなり欠陥検 出が困難になる. 1)~4)

本研究では、材料内部の欠陥の可視化システ ムの構築を目的に、開口合成による画像再構成 プログラムを作成し、欠陥がどのように再現さ れるのかについて明らかにした. 2. 実験

2.1 アレイプローブ

アレイプローブは,一般的に用いられるシン グルプローブとは異なり,多数の振動子を並べ た超音波探触子である. 各振動子に与える発振 電圧と発振時間とを制御し,遅延時間を設定す ることで,材料内部の任意の点で焦点を結び, 欠陥の画像構築が可能となる.また,Y 方向に チャンネル数の範囲内で電子走査すれば短時間 で2 次元画像が得られ、さらに、X 方向に機械 的に走査すれば3次元欠陥イメージを描写する ことが可能である.しかし、この方法では多重 反射などの問題があり,操作スピードに限界が ある. そこで、本研究では村上ら5)が提案した ボリュームフォーカス技術をもとに実験を行っ た.これは、測定時に焦点を結ぶのではなく、全 チャンネルを同時に励起することで平面波を発 生させて測定を行い、その後に PC 上で焦点を結 び画像化する手法である.表1に本研究で用いた アレイプローブの諸元を、図1に外観を示す.

Table1 Specification of Array Probe

Material : PZT	Configuration	: Rectangle
Channels : 32ch	Frequency	: 5[MHz]
Dimension of probe	: 25×25×50[mm]	
Dimension of transdu	: 0.4×13[mm]	
Curvature radius of d	: 50[mm]	
Clearance of transduc	: 0.1×13[mm]	



Fig.1 Array probe

2.2 実験装置

図2に実験装置の外観を、図3に欠陥形状お よびサンプルとアレイプローブとの位置関係を 示す.本研究では、サンプル材料を窒化ケイ素 とし、その内部に欠陥として底面から高さ 5[mm],幅1[mm]のスリットと、高さ5[mm], 直径1[mm]の穴欠陥を想定した.また、セン サの周波数(5[MHz])とサンプル材料の音速(約 10870[m/s]) との関係から、1波長は約 2.2[mm]となる.つまり、この1波長分がセン サの分解能に相当する.

3. 実験原理

3.1 フェーズドアレイ法4)

フェーズドアレイ法は、アレイプローブを用 いた方法であり、X 方向は電子的に走査される ため、Y 方向の機械的走査のみで振動子数の範 囲内で欠陥のイメージを描画することが可能で ある.図4に、電子的走査と機械的走査につい て示す.機械的走査のみで試験を行うシングル プローブに比べ、時間を短縮して探傷が可能な 方法である.また、振動子毎の遅延時間をコン トロールすると、目的に応じて自由に焦点深度 を変化させたり、斜めに伝播させたりすること も可能である.図5にフェーズドアレイ法の原 理を示す.

フェーズドアレイ法の手法には、リニアスキャ ンとセクタースキャンとがある.リニアスキャン は、振動子の一部を用いて試料内部にある任意の 深さに超音波の焦点を結び、直線上に焦点を移動 して走査する手法である.また、セクタースキャ ンは、焦点を扇上に走査する手法である.



Fig.2 Measuring device



Fig.3 Measurement model







Fig.5 Phased array

3.2 開口合成法5)

開口合成法は,指向性の低い超音波を送波し, その超音波が物質内部で広がった範囲の情報を, 一度の反射波の受信で得ることができる手法で ある.計測領域内の各位置で得られた反射波か ら高い分解能の再構成画像が得られる.

任意の点からの反射波を同位相で足し合わせることで、その点に焦点を形成する.いま、振動子(x_0 , y_0)から球面波を計測領域に送波すると、点A(X,Y)の反射波が(x_i , y_i)の振動子に到達するまでに要する時間 t_i は、次式で求められる.ここで、cは材料の音速である.

 $t_i = \frac{\sqrt{(x_0 - X)^2 + (y_0 - Y)^2}}{c} + \frac{\sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2}}{c}$

それぞれの振動子に時間遅延を乗じると、こ れは反射波を同位相で足していることになり、 その結果として点Aに焦点を形成することがで きる.図6に同位相の足し合わせを示す.

仮に、振動子から計測対象に広がりのある超 音波を送波し,反射波を全ての振動子で受信し たとする.各振動子における送波から反射波の 受波までの時間が既知なので,音速を一定とす



Fig.6 Sum of coordinate phase

ると,振動子→反射体A→振動子の距離が計算 できる.

図7に開口合成法の原理を示す.振動子から 超音波を同時発信し,それが送信波として反射 体に伝わる.そして,反射体から返ってくる反 射波を各振動子で受信する(図7(a)反射体の取 得).受信した反射波から振動子を中心にして 半径を描くことで,反射体の範囲が分かる(図 7(b)反射体の存在範囲).これより,欠陥の位 置は,半径の重複した部分に特定できる(図7 (c)反射体の推定).



4. 実験結果および考察

4.1 仮想欠陥の画像再構成⁶⁾

図8(a)に示す仮想欠陥を用いて,開口合成法 で画像再構成を行った.(b)は画像を再構成した 結果である.

再構成画像を(a)の欠陥と比較すると、欠陥の ある場所を特定できていることが分かる.しか し、画像の欠陥部分が実際のものより大きく検 出されてしまっている.この開口合成法では、 音波の伝播方向と垂直な方向にノイズが出てし まうという特徴があるために、このような結果 になったものと考える. 図8(a)のような仮想欠陥を対象に画像の再構 成を行ったところ、欠陥の有無を確認できたた めに実際のデータへの応用を行う.

送信波としてプローブから送られた超音波は, 計測対象物中を伝播し,物質の境界面で反射さ れ再びプローブへと戻ってくる.計測対象物の 内部に欠陥が存在すると,超音波の性質によっ て表面からの反射波や欠陥での反射波が戻って くる.また,計測対象物の底面からも反射波が プローブへ戻ってくることで,反射波を画像と してコンピュータ上に表示できる.図9にその 様子を模式的に示す.



Fig.8 Comparison of each analysis model





4.2 セラミック試験片の画像再構成

図 10 に, 400MHz における 16ch の波形データを 示す.

サンプリング時間が 20μs を超えた付近に、大き な波形が現れている.これが,試験片底面からの反 射波である.また,この底面反射波より手前の18μs 付近に小さな波形が現れているのが分かる.この波 形が,底面に作製した欠陥からの反射波である.



Fig.10 Signal sampled at 400MHz

この波形に対して画像の再構成を行った.図11(a) に窒化ケイ素の欠陥モデル図を、(b)に開口合成法に よる再構成画像を示す.

図 11 より,開口合成法によって欠陥を再現するこ とができた.しかし,深さ方向は正確に再現されて はいるものの,欠陥が実際のものより大きく検出さ れてしまい,2つの欠陥が連結していることが分か る.これは,仮想欠陥に対する画像の再構成の際に も出現した音波の伝播方向と垂直な方向に発生する ノイズによるものと考える.

5. 結言

材料の内部欠陥を明らかにするための可視化の手 法として開口合成法を用いたところ、欠陥を再現で きることが明らかとなった.また、本研究で構築し た装置を使用して窒化ケイ素を対象に実験を行った ところ、同様に欠陥を再現することができた.



Fig.11 Reconstructed image of slit defect in $$\rm Si_3N_4$$

参考文献

- Y.Nishimura , INTERNATIONAL JOUNAL OF APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS. Vol.28, pp.171-176(2008).
- R.G.Pratt, Seismic waveform inversion in the frequency domain I Theory and verification in a physical scale model, Geophysics, pp.888-901(1999).
- 3) 福田勝己,西村良弘,斎藤直也,岡部卓也,"波動逆 解析による内部欠陥の可視化システムの開発",第54 回日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, pp193-194(2010)
- 福田勝己,西村良弘,斎藤直也,"波動逆解析による 内部欠陥の可視化システムの開発",第55回日本学 術会議材料工学連合講演会講演論文集, pp220-221(2011)
- 5) 村上丈子、ドミニクブラコニエ、三浦俊治、村井純 一、西谷豊、"アレイ探触子による高速超音波探傷 新技術"、日本非破壊検査協会、平成 18 年度超音波 シンポジウム、pp.35-38(2006)
- 6) Y.NISHIMURA, T.SUZUKI, K.FUKUDA, M.ISHII, N.SAITO, Image Reconstruction of Defects 100 mm deep within SN Sample using Inverse Problem Solving, IEEE International Ultrasonic Symposium, (2012)

(平成25年10月31日 受理)

円周方向溝付管を通した間欠振動流と呼気・吸気用ツインピストン式 人工呼吸器による生体外換気実験

清水昭博*, 内田敦士**, 清水優史***, 菅原路子****

In Vitro Ventilation Experiment by Intermittent Oscillatory Flow through a Pipe with Circumferential Grooves and a Respirator with Twin Pistons for Inspiration and Expiration Akihiro SHIMIZU, Atsushi UCHIDA, Masashi SHIMIZU, Michiko SUGAWARA

A respirator with twin pistons for inspiration and expiration has been proposed and fabricated. In vitro ventilation experiments by intermittent oscillatory flow or sinusoidal oscillatory flow through a pipe with circumferential grooves or a straight pipe using this respirator with twin pistons have been carried out. Variations of carbon dioxide concentration have been measured and obtained values of half-life of carbon dioxide in the chamber as a lung space by intermittent oscillatory flow using a pipe with circumferential grooves were smaller than those in the other conditions, in the range of lower frequency of oscillation. Obtained lung compliance of the present experimental set up was almost similar to the value of the typical human body.

Keywords : intermittent oscillatory flow, respirator, ventilation, half life, carbon dioxide

1. はじめに

近年,病院で用いられている高頻度換気法⁽¹⁾に よる人工呼吸器は気管への挿管が必要である.気 管挿管は医師,歯科医師,または所定の講習と実 習を受けた救急救命士のみに認められた医療行為 とされている.気管挿管により,呼吸停止患者へ の効率的な人工呼吸が可能となる反面,患者は会 話や食事ができなくなるなど,QOL(Quality of Life)の問題がある.そして,気管挿管には,誤っ て食道に挿管してしまい,死亡事故に至った事例 もあり,問題となっている.

気管挿管不要で,簡単に操作でき,患者への負担 が小さいマスク式の高頻度換気法による人工呼吸 器の実現を目指して試作した前報²⁰のリフレッユ 機能付き換気装置による生体外換気実験において 肺空間内に導入した圧縮空気により肺空間内の圧 力が大きく上昇してしまう問題が発生した.

そこで本研究では、圧力上昇を低減し、肺への 負担を弱め、肺空間の効率的な換気を目指して考 案した、呼気・吸気を別のピストンで行う「ツイ ンピストン方式」の人工呼吸器を試作し、これと 気管内面を最も単純な形状で模した管路としての 円周方向溝付管(以下「溝付管」と呼ぶ.)または 内面が滑らかな管(以下「直管」と呼ぶ.)または 内面が滑らかな管(以下「直管」と呼ぶ.)を、肺 空間モデルに連結した上で、さらに管路内での炭 酸ガスの高い有効拡散係数を確認できた間欠振動 流⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾と従来型の正弦波状振動流⁽⁶⁾を用いて、生 体外換気実験⁽⁷⁾を実施し、肺を想定したチャンバ 内の炭酸ガス半減期の計測を行い、同時に圧力変 化も測定したので、それらの結果について報告する.

*機械工学科,**京王電鉄株式会社,***東京工業大学名誉教授,****千葉大学

2. ツインピストンによる呼気と吸気の分離

前報⁽³⁾で,新鮮な圧縮空気を導入すると同時に, 汚れた空気と新鮮な空気の混合したものを排出す る「リフレッシュ機能」を付与して同様の換気実 験を行ったが,圧縮空気によって肺空間内の平均 内圧が上昇してしまったため,本研究では Fig.1 に示すような呼気と吸気を分離したツインピスト ン式人工呼吸器を考案した.



Fig.1 Principle of separation of inspiratory and expiratory flows by twin pistons

上部ピストンが吸気用,下部ピストンが呼気用 となっている.さらに両ピストンが摺動するシリ ンダのアクリル樹脂製の端板に 4 つの内径 12 [mm]の穴を開け,上から順に,吸気,気道へ,外 気へ,呼気の役割を与え,どの穴も一方向からの 流れとする逆止弁を形成するため,厚さ1[mm], 直径 25 [mm]のシリコーン製ゴム板で穴を塞いだ. ピストンは厚さ10 [mm]のポリカーボネート製で, 円周面にフェルト製テープを貼った上でシリコン オイルをしみこませて密封性を保った.

3. 実験装置及び方法

3.1 実験装置

生体外換気実験用の実験装置を Fig.2 に示す. 左から間欠振動流発生装置,ツインピストン式人 工呼吸器、気管を想定した管路,肺空間モデルで ある。気管を想定した実験管路は Table 1 のよう な内径 18 [mm]の黄銅製の直管とアルミ製の溝付



Fig.2 Experimental set up

管を用いた.溝付管の断面形状を Fig. 3 に示す.

Table 1Dimensions of tested pipes [mm]

Internal configuration	Min.ID	OD	
Straight	1	22	
Grooved(D30W10)	18	30	44



Fig.3 Cross sectional drawing of a pipe with circumferential grooves

間欠振動流を発生させるための4種類のサイズ の三角カムを Fig.4 に示す.リフトは左から順に, 80,60,40,20 [mm]である.



Fig. 4 Four sizes of triangular cams (From left: Lift=80, 60, 40, 20 [mm])

三角カムをクランク円盤によるスコッチヨーク に変更してツインピストン式人工呼吸器に連結し た写真を Fig.5 に示す. Fig.6 に示す肺空間を模し たチャンバの左端には厚さ 0.5 [mm], 直径 50 [mm] の天然ゴムが張ってあり,内部には炭酸ガス濃度 検出器とファンが 2 個設置してある.内容積はピ ストン上死点において 2175 [cc](直管), 2243[cc](溝付管)である.



Fig.5 Photograph of the twin piston type respirator driven by the Scotch york



Fig.6 Chamber covered by a sheet of natural rubber on the left end in which a CO_2 detector and two DC fans are installed

3.2 実験方法

あらかじめ Fig.2 の実験装置の右側のチャンバ 内に大気圧の濃度 5 [%]の炭酸ガスを充満させ、 AC サーボモータ(山洋電気(株): P50 B07030 DXS00, 300 [W])からクランク円盤または三角カ ムを介してピストンを駆動し、正弦波状振動流ま たは間欠振動流を発生させる. チャンバ内の炭酸 ガス濃度を,炭酸ガス濃度測定器(光明理化学工業 (株), 非分散型赤外線式, UR-1200, 検知遅れ 20 [ms])によって, 圧力を微差圧計 (長野計器(株), デジタル微差圧計 GC30, -5 [kPa]~+5 [kPa], 分解 能±(1.0 [%]F.S+1 digit.)) によって測定した. その 後, データロガー((株)キーエンス, NR-600)を介 して PC にデータを保存し、各電圧から濃度およ び圧力に換算した. 炭酸ガス半減期は1条件に付 き3回測定を行い、平均したものを最終的な半減 期とした.

3.3 実験条件

実験室内の温度は 20±2 [℃]とし,以下のような 条件を設けた.拍出体積 V=40, 80, 118, 158 [ml] に対し, f=0.2, 1, 2, 6 [Hz].振動流の種類は間欠 振動流と正弦波状振動流,実験管路の種類は直管 と気管を模した溝付管について実験を行った.

4. 実験結果及び考察

4.1 炭酸ガス濃度半減期

濃度変化測定例として間欠振動流・溝付管にお ける V=80 [ml], f=6 [Hz]時の濃度変化を Fig.7 に 示す.濃度は振動流による振動数に対応した1周 期中の変動が発生するので,これらを取り除いて 滑らかな濃度降下曲線とするために,前後のデー タによる移動平均法による平滑化処理を施した上 で、半減期を算出した.



Fig.7 Example of carbon dioxide concentration change on the condition of V=80[ml, f=6[Hz], Intermittent oscillatory flow through a Grooved pipe

また, Fig.8(a)に V=40 [ml],同(b)に V=80 [ml], 同(c)に V=118 [ml],同(d)に V=158 [ml]とした際の 炭酸ガス濃度半減期[s]と振動数 *f*[Hz]との関係の グラフを示す.まず,Fig.8(a),(b),(c)において,正 弦波状振動流・直管とそれ以外を比べると,正弦 波状振動流・直管のグラフに比べ,他の3本の直 線はかなり小さな値をとっていることが読み取れ る.間欠振動流や溝付管内における物質輸送の促 進³⁾が起こっている.(c)の V=118 [ml]で振動数*f* が小さい領域では間欠振動流の効果が顕著である.



そして、Fig.8(d)を見てみると、振動数fが高いと、振動流の種類や実験管路の種類によらず、非

常に短い時間内で,ほとんど差がなく半減期を迎 えていることが分かる.

よって、低頻度領域においては、間欠振動流や 溝付管を用いることが有効であることがわかる.

4.2 圧力変化

Table 2 に間欠振動流・溝付管における V=158[ml], f=6[Hz]時の圧力測定値一覧, Fig.9 に V=40[ml], f=1[Hz]時の圧力変化を示す.

拍出体積 V, 振動数fの条件によらず,大気圧付 近でほぼ一定の圧力(小さな圧力差⊿p=0.03~ 0.055[kPa])での換気ができた.ただ,負圧領域で 一定になってしまっている.この理由としてツイ ンピストン機構における両ピストンの微妙な密封 性の違いによるものが考えられる.

Table 2Pressure in the chamber(Sin: sinusoidal, Int: intermittent,
S: straight pipe,G: grooved pipe)

V=158[ml], f=6[Hz] [kPa]						
	<i>p</i> _{max}	p_{\min}	Δp			
Sin S	-0.05	-0.08	0.03			
Sin•G	-0.0475	-0.0825	0.035			
Int [.] S	-0.045	-0.085	0.04			
Int [.] G	-0.0425	-0.0975	0.055			



Fig.9 Example of pressure change in the chamber as the space for a airway and alveoli in the case of V=40[ml] and f=1[Hz]

4.3 肺コンプライアンス

肺コンプライアンスの成人の場合の正常値は 170~200 [mL/cmH₂0]付近であり,値が小さいほど 肺が膨らみにくく、値が高いほど肺が膨らみやす い.本実験で得られた圧力差と拍出体積より算出 した肺コンプライアンスは 130~300 [mL/cmH₂0] であった.生体における正常値にほぼ同じオーダ ーの肺コンプライアンスが再現された生体外換気 実験になっていることがわかる.

5. まとめ

呼気・吸気用のツインピストン機構を用いた生 体外換気実験装置を製作し,振動数,拍出体積, 振動流や実験管路の種類を変えて実験を行った. その結果,本実験の範囲内で次のことが分かった.

- (1) 振動流により肺空間内の炭酸ガス濃度は時間 経過とともに指数関数的に減少する.
- (2) 拍出体積 V=118 [ml]で振動数 f が小さいとき, 間欠振動流での炭酸ガス半減期は正弦波状振 動流の場合より小さい.
- (3) 換気時の圧力は大気圧付近でほぼ一定の値を 維持することができる.

謝辞 辞

本研究は <u>JSPS 科研費 24592758</u>の助成を受けた ものです.

参考文献

(1)中川聡;HFOV のすべて、日刊工業新聞社、(2010).
 (2)佐藤正樹;,清水昭博,清水優史,菅原路子、日本機械学会第23回バイオエンジニアリング講演会、リフレッシュ機能付き振動流による換気(2012),講演番号7H11.

(3)藤岡秀樹,田中学,西田正浩,谷下一夫,"管内間欠流における軸方向拡散の数値解析",日本機械学 会論文集 B 編, Vol. 59, No. 566 (1993), pp. 144-151.
(4) Tanaka, G, Ueda, Y., and Tanishita, K., "Augmentation of Axial Dispersion by Intermittent Oscillatory Flow", *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 120 (1998), pp. 405-415.

(5) 松田憲明,清水昭博,清水優史,菅原路子,三角カムによる間欠振動流中のガス拡散,日本機械学会第23回バイオエンジニアリング講演会講演論文集

(2011), pp. 553–554.

(6)清水昭博,清水優史,菅原路子,"直円管内における振動流中のガス輸送と乱流遷移",日本機械学会論文集 B編, Vol. 78(2012), No. 785 (2012), pp. 17-26.
(7)内田敦士,清水昭博,清水優史,菅原路子,"呼気・吸気のツインピストンを用いた間欠振動流による生体外換気実験",日本機械学会第 25 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集(2013),講演番号 3E16.

(平成25年10月31日 受理)

モータの駆動領域におけるインバータノイズ低減法のシミュレーション評価 _{綾野秀樹*,村上昂平**,松井義弘*}

Simulation of the Reduction Technique of a Noise Generated by an Inverter in Motor Driving Range Hideki AYANO, Kouhei MURAKAMI, Yoshihiro MATSUI

This paper proposes a technique for reducing the leakage current which flows into a power source as a conductive noise. This leakage current may have an adverse effect on the peripheral equipment such as causing malfunctions. The proposed method applies a zero-sequence voltage to the output voltage references in a circuit containing grounding capacitors. The simulation results show the effect of the proposed method in the system which uses motor.

Keywords : leakage current, zero-sequence voltage, common-mode, EMI, motor

1. 諸言

エアコン,冷蔵庫などの家電製品や,電車,電 気自動車に至る産業製品など,幅広い分野でイン バータ(逆変換器)が導入されている。インバータ は,商用交流電力を整流した直流電力に対して, 半導体素子のスイッチング動作によって任意の周 波数,任意の振幅の交流電力に変換するシステム である。このインバータによって,例えばモータ 負荷の場合には,低損失で滑らかな可変速駆動が 実現できる。

一方、インバータのスイッチング動作時には各 相の出力電圧が急峻に変化する。この場合に発生 する電磁ノイズの抑制が課題となっている^{(1)~(6)}。 例えば、

高周波数の漏えい電流として電源などに 漏えいし、漏電ブレーカや自機器・周辺機器の誤 動作を誘発する恐れがある。筆者らは先に、最も ノイズが大きくなる零速度領域の場合(昇降機の 駆動開始や停止の場合や電車駆動時の後退起動抑 制および電気自動車の坂道発進など、極低速で高 トルク出力の条件に相当する条件)を対象として, 漏えい電流を低減する手法を提案した^{(7)~(10)}。こ の手法は、モータの制御に影響を与えない成分で ある零相電圧を利用する点が特徴である。これに より、ノイズ抑制部品などハードウェアを追加す ることなく、ソフトウェア処理のみで漏えい電流 の低減が可能になる。

本報告では、零速度に加え、モータ駆動領域ま で考慮した漏えい電流の低減手法を提案する。モ ータ駆動領域では、零速度時と異なり、インバー タの出力周波数の増加に伴って誘起電圧が増加す る。そこで、提案方式ではインバータの出力周波 数に応じて利用する零相電圧量を変化させ、安定 したモータ駆動と漏えい電流の低減を同時に実現 する。この方式において、シミュレーションを用 いて検討した結果を述べる。

2. 提案方式の構成と漏えい電流低減の原理

2. 1 システム構成と等価回路

Fig. 1にインバータ装置のシステム構成を示す。 検討対象のシステムでは、電源とダイオード整流 器の間にコモンモードチョーク *L*。を接続する。さ らに、コモンモードチョーク *L*。とダイオード整流 器の間の各相に、対地コンデンサとして *C*ga を星 型接続し、その中性点とグランドの間を *Cgb* を介 して接続する。インバータの出力には配線インダ クタンス *L*1を介してモータを接続する。さらに、 インバータのスイッチング周波数は10 kHz として 駆動させる。

インバータのスイッチングに起因して発生する 漏えい電流は、モータの巻線-フレーム間に存在す る浮遊容量 C_mを介してグランドに漏えいする。こ の漏えい電流は、周辺機器を経由して電源を流れ る経路と対地コンデンサを流れる経路がある。漏 えい電流はスイッチング周波数以上の高周波数と なるため、コモンモードチョークを経由する電源 側の経路よりも対地コンデンサを通る経路の方が インピーダンスは低くなる。このため、Fig. 1 で は、漏えい電流は主に対地コンデンサ側に流れ、







Fig.2 Zero-sequence equivalent circuit.

周辺機器への悪影響を低減できる。本研究では, 電源側に流れる漏えい電流 *i*。の更なる低減を目 的としており,出力電圧指令値に零相成分の指令 値を重畳する点が特徴である^{(7)~(9)}。この零相成分 は各出力相電圧に対して同時に同量を与える電圧 であり,線間電圧を考えた場合には相殺されるた め,モータ駆動に対して影響を与えない。

Fig. 2 に Fig. 1のシステムの等価回路を示す。 ここで, R_m はモータ等の負荷側の抵抗成分であり, R_s は電源側の抵抗成分である。インバータは零相 電圧の電圧源として表され,零相電流は L_1 , R_m , C_m を介してグランドに流れる。この零相電流は, C_{ga} と C_{gb} の直列接続で表される対地コンデンサ C_g を流れる経路と電源側の L_o , R_s を流れる経路から インバータへ循環する。Table 1 に等価回路の定 数を示す。ここで, L_o , C_g , L_1 , C_m は, 実機評価 システムにおいて個別に実測した値であり, R_s お よび R_m は,数 kW クラスのモータを想定して設定 した値である。

2. 2 ノイズ低減の原理

Fig. 2 において,漏えい電流 i_c とインバータ

Table 1Parameters in equivalent circuit.

cable inductance	L_{I}	8.2[μH]
load resistance (zezo-sequence)	<i>R</i> _m	25[Ω]
stray capacitor	C_m	2.9[nF]
common mode choke's inductance	L_{c}	0.79[mH]
power source resistance	R_s	3[Ω]
grounding consolton	C_{ga}	0.68[μF]
grounding capacitor		0.47[μF]



Fig.3 Admittance gain of the leakage current.

出力の零相電圧 *v_{oz}* の比(以下漏えい電流ゲイン *G*_sと呼称する。)は,

$$G_s(s) = \frac{I_c(s)}{V_{zo}(s)} = \frac{C_m \cdot s}{A(s)} \qquad (1)$$

として表される。ここで, A(s)は,

$$\begin{aligned} A(s) &= L_l \cdot L_c \cdot C_m \cdot C_g \cdot s^4 + C_m \cdot C_g \cdot (L_l \cdot R_s + L_c \cdot R_m) \cdot s^3 \\ &+ (L_l \cdot C_m + L_c \cdot C_m + L_c \cdot C_g + C_m \cdot C_g \cdot R_m \cdot R_s) \cdot s^2 \\ &+ (R_m \cdot C_m + R_s \cdot C_m + R_s \cdot C_g) \cdot s + 1 \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

である。Fig. 3 に, Tabel 1 の条件での漏えい電 流ゲイン G_s の周波数特性を示す。Fig. 3 は共振点 を持つ特性となり, 共振周波数 f_c は, コモンモー ドチョーク L_c と対地コンデンサ C_s に依存する値 になる。Table 1 の条件では共振周波数は 9. 2kHz となる。提案方式では, 共振周波数がキャリア周 波数(10kHz) よりも低くなるようにコモンモード チョーク L_c と対地コンデンサ C_s の値を設定して いる。これにより, キャリア周波数の高調波次数 が高くなるほど漏えい電流ゲイン G_s は小さくな る。

漏えい電流 *i*_cは(1)式より,

 $I_{c}(s) = G_{s}(s) \cdot V_{oz}(s) \cdots (3)$

と表される。つまり,漏えい電流を低減するには, Fig. 3において漏えい電流ゲイン G_s の大きい共振 点付近の周波数成分である $V_{as}(s)$ の基本波成分



Fig.4 Square waveform.

(10 kHz)を低下させることが有効である。

Fig. 4にスイッチング周期の周期関数のインバ ータ出力を想定した矩形波の概略図を示す。提案 方式により零相成分の指令値を重畳した場合には, インバータから出力される矩形波電圧の形状が変 化し,重畳量に比例してαが増加する。Fig. 4 の 矩形波は,次式のようにフーリエ級数展開できる。

$$v_{duty}(\omega_c t) = \frac{V_{za}\alpha}{\pi} - \frac{2V_{za}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\sin k\alpha}{k} \cos k\omega_c t + \frac{\cos k\pi - \cos k\alpha}{k} \sin k\omega_c t \right) \qquad \dots \dots \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 ω_{c} はキャリア角周波数である。 V_{za} は矩形波の振幅であり、Fig. 1の構成では、

$$V_{za} = \frac{200\sqrt{2}}{2} \cdots \left(5 \right)$$

となる。 α とデューティ比の関係は、 α =0 radの 場合にデューティ比が 50%の矩形波になり, α=π /2 rad の場合, $\alpha = 9\pi/10$ rad の場合に, それぞ れデューティ比が 75%, 95%の矩形波となる。(4) 式より、デューティ比が 50%の場合には、キャリ ア周波数(10kHz)の成分とその奇数次高調波が含 有されることになる。一方、デューティ比の増加 に伴い偶数次の高調波が発生するが, Fig. 3 で漏 えい電流ゲイン G の大きい基本波成分(k=1 の場 合の振幅値)を低減できる。なお,200V 系受電電 源のシステムにおいて零電圧を出力する条件 $(v_{u}^{*}=v_{v}^{*}=v_{w}^{*}=0V)$ では, $\alpha=0$ rad(デューティ比が 50%)の場合は、零相成分を重畳しない従来の条件 に相当する。また、 $\alpha = \pi/2$ rad (デューティ比が 75%)の場合は、零相成分の指令値として50√2 V 零相成分の指令値として90√2 V をそれぞれ重畳 した条件に相当する。



Fig.5 Peak values of i_c when the duty ratio is changed.

2.3 零速度時のノイズ低減効果

Fig. 5 に、零速度時における voz のデューティ 比をパラメータとした漏えい電流のピーク値特性 と、従来の場合(デューティ比が 50%の場合)およ びデューティ比が 95%の場合の漏えい電流の実測 結果を示す。Fig. 5 より、シミュレーション結果 と実測結果はよく一致しており、デューティ比の 増加に伴って漏えい電流のピーク値を減少できる ことが確認できる。従来の場合の漏えい電流のピ ーク値は 150mA である。一方、デューティ比が 95% となるように零相成分を重畳した場合には、漏え い電流のピーク値は 40mA となり、漏えい電流を 70%低減できることが確認できる。

3. モータ駆動領域でのノイズ低減手法の提案 3. 1 制御方式

モータ駆動領域に対応する零相電圧を用いた漏 えい電流低減方式について検討する。本報告では 誘導モータを使用し, v/f 一定制御⁽¹¹⁾で使用する。 v/f 一定制御はインバータの出力周波数と振幅の 比を一定にする制御方法であり,出力周波数(回転 速度)に対して励磁量を一定に保つことで広範囲 の速度制御を実現できる。

Fig.6 にインバータの出力電圧と出力周波数の 特性を示す。供試モータの定格電圧は200V(線間 電圧),定格周波数は50Hzであるため、出力相電 圧と周波数の比は、



Fig.6 The relationship between the available additional zero-sequence voltage and the available output voltage.

$$V_{f} = V_{\text{max}} / f_{\text{max}} = 200\sqrt{2/3} \text{V}/50 \text{Hz}$$

= 3.27V/Hz (6)

となる。また、出力相電圧の指令値を正弦波とした場合、インバータがひずみなく出力できる電圧の上限値は100 $\sqrt{2}$ Vである。この場合のインバータの最大の出力周波数は(6)式より、

$$f = \frac{100\sqrt{2}}{3.27} = 43.25 \text{Hz} \dots (7)$$

となる。モータ駆動領域で零相電圧 v_z^* を重畳す る場合には、このインバータの出力電圧を考慮す る必要がある。つまり、Fig.6より電圧指令値 v_r^* と零相電圧重畳量 v_z^* の加算電圧値をインバータ の出力可能範囲よりも小さくしなければならず、

$$v_z^* = (100\sqrt{2} - 3.27 \times f) \times 0.9$$
 (10)
となる。



Fig.7 Simulation results.

3. 2 シミュレーション結果

Fig. 7 に漏えい電流のシミュレーション結果を 示す。Fig. 7(a)はインバータの出力周波数と重畳 する零相成分の特性である。シミュレーションで は、モータの回転周波数指令は 0.25 秒の時点から 与え、線形に増加させて 5 秒間でインバータの出 力周波数が最大の 43.25Hz に達するように設定し た。

Fig. 7(b)に従来方式(零相電圧の指令値を重畳 していない場合)の漏えい電流波形を示す。モー タの零速度領域で漏えい電流は最大値156mAとな り,インバータの出力周波数の増加に伴って減少 する。これは周波数が増加するにつれてインバー タ各出力相の同時スイッチングが発生しなくなり, インバータの出力する零相電圧の変化率が小さく なるためである。Fig. 8 に, Fig. 7(b)の結果にお いて代表的な出力周波数(OHz, 27Hz, 43. 3Hz)での 拡大波形を示す。Fig. 8 より,漏えい電流波形の 振動周波数はいずれも10kHzであり,出力周波数 の増加に伴って振幅は減少していることが確認で きる。さらに,いずれの周波数においても波形形 状はほぼ正弦波であることが確認できる。





Fig.7(c)に提案方式を用いた場合の漏えい電流 波形を示す。漏えい電流は、モータが低速の場合 には零相電圧指令の重畳量が大きいため、 Fig.7(b)の場合よりも大幅に低減できる。しかし、 周波数の増加に伴って零相電圧の重畳量は減少す るため、漏えい電流は一旦増加し、周波数指令が 27Hzにおいて振幅は最大になる。さらに周波数が 増加した場合には、インバータ各出力相の同時ス イッチングが発生しないことにより、漏えい電流 は低減する。

Fig.9 に, Fig.7(c)の結果において代表的な出 カ周波数(OHz, 27Hz, 43. 3Hz)での拡大波形を示す。 Fig.9 より,漏えい電流波形の振動周波数はいず れも10kHzであるが,Fig.9(a)の周波数指令が OHz の場合には正負が非対称なひずみ波となる。これ は偶数時の高調波が発生するためである。 Fig.9(b)の周波数指令が 27Hz における漏えい電 流の振幅最大値は 107mA となり, Fig.8(a)の従来 方式での最大値(156mA)と比較して約 31%の低減



Fig.9 Extended waveforms of the leakage current with proposed method.

効果を確認できる。今後は,このシミュレーショ ン結果について実機により検証していく。

4. まとめ

本報告では、零速度に加え、モータ駆動領域ま で考慮した漏えい電流の低減手法を新たに提案し、 シミュレーションによる有効性の確認を実施した。 以下に結論を記す。

- モータ駆動領域の誘起電圧を考慮して、重畳 する零相電圧を出力周波数の関数とする方式 を提案した。
- 提案方式においてシミュレーションを実施した結果、従来方式と比較して漏洩電流のピーク値を約3割低減できることを確認した。

提案法は,指令値に零相電圧を重畳するソフト ウェア処理のみで漏えい電流の低減効果を向上で きる点に有用性が高いと考える。さらに,零相成 分を有効に活用することによる変換器高機能化の 可能性を広げるものである。 本研究の一部は,2013 年度日本学術振興会 科 学研究費補助金基盤研究(C)「零相電圧を有効利用 した電力変換器のノイズ低減技術の研究」,東京工 業高等専門学校の平成24 年度重点配分経費の援 助により行われた。

参考文献

- (1)小笠原悟司・藤田英明・赤木泰文:「電圧形 PWMインバータが発生する高周波漏れ電流の モデリングと理論解析」,電学論 D, 115, 1, pp. 77-83 (1995-1)
- (2) 清水敏久:「EMI抑制法の最新技術動向」,
 平22電学産業応用部大, Vol. 1, No. 1-02-3,
 pp. 15-18 (2010)
- (3) 千田忠彦・楠野順弘・三島彰・栗田將紀・井 堀敏:「欧州EMC規格対応インバータのフィ ルタ設計技術」,平成21電学産業応用部大, Vol. 1, No. 1-S1-5, pp. 163-168 (2009)
- (4) M. L. Heldwein and J. W. Kolar : `Impa ct of EMC Filters on the Power Density o f Modern Three-Phase PWM Converters', I EEE Trans. on Power Electronics, Vol.24, No. 6, p. 1577-1588 (2009)
- (5)武田順二・嶋根一夫・武田享悦・松岡寛晃・ 餅川宏・津田純一「エレベータにおける漏れ 電流低減方法の提案」日本機械学会 技術講 演会講演論文集, pp. 23-26 (2009)
- (6) 森本雅之:「統合接地システムにおけるPWM インバータの漏洩電流の低減」,平20電学産 業応用部大, Vol. 1, No. 1-67, pp. 315-320 (2008)
- (7)綾野秀樹・松井義弘:「零相成分を利用した 漏えい電流抑制法に関する検討」,平23電学 産業応用部大,Vol.1,No.1-158,pp.695-6 98 (2011)
- (8) 綾野秀樹・佐藤優貴・松井義弘:「零相電圧 を利用した漏えい電流低減法の提案と検証」, 電気学会論文誌D,132巻,12号,pp.1141-1148 (2012)
- (9) 綾野秀樹・佐藤優貴・松井義弘:「インバー タが発生する伝導性ノイズの低減法とその 評価システムの構築」東京工業高等専門学校 研究報告書,44号(1),pp.107-112 (2012)
- (10) 綾野秀樹・佐藤優貴・松井義弘:「対地 コンデンサの位置による漏えい電流の変化 とその要因」,電気学会論文誌D,133巻,1 1号,掲載予定(2013)
- (11) 見城尚志・赤木泰文・川村昭・三上亘:
 「ACサーボモータとマイコン制御」,総合電子出版社

(平成25年9月17日 受理)

有効電力損失低減効果に基づく無効電力の価値評価手法

土井 淳*, 橋本拓郎**

Evaluation Method for Reactive Power Pricing Based on Effect of Active Power Loss Reduction Atsushi DOI, Takurou HASHIMOTO

Reactive power is one of the most important ancillary services, and reactive power has a special characteristic. Reactive power cannot travel very far in the power system due to its losses. So in a deregulated power system, reactive power pricing that all participants in the electricity market can agree is very difficult. This paper presents the method for evaluating a spot value of reactive power supply based on reduction of active power loss. By application of this method, the ancillary service costs for voltage regulation can be distributed to fairy to the participants.

Keywords : electronic power system, power system operation, ancillary services, reactive power pricing, active power loss

1. はじめに

電力系統を運用する上で系統運用者は、電力自由 化前においても、自由化後においても系統周波数や 電圧の一定維持、電力供給の継続性などいわゆる電 力品質を保証することになる。しかし、電力自由化 の進展に伴って様々な問題が発生する。かつて電力 自由化前には、電気事業者が電力品質維持のための 費用を総括的に把握し、電気料金により回収してい た。しかし自由化後は、各事業者が応分のサービス の提供や,費用負担を行うことになる(1)。この電力 系統の安定な運用制御に関わるサービスとして、ア ンシラリーサービス(Ancillary Service)を考えること が重要となる。アンシラリーサービスには、周波数 制御,予備力の確保,無効電力供給及び電圧制御, ブラックスタートが挙げられる。周波数制御は系統 全体の問題であり、電力市場に深く関わるためアン シラリーサービスとしての価格決めは容易である (2)。しかし、周波数制御などと違い無効電力供給及 び電圧制御に関しては, 無効電力の発生及び消費が 局所的であり、その発生場所の選定に当たってはか なり自由に選ぶことができるため全系統参加者が納 得する価格決めが非常に難しい問題となる。そのた め,今までに無効電力価値評価手法として,各母線 に設置された無効電力供給源が電源の総燃料費の削 減にどれだけ貢献しているかに基づき評価を行う手 法⁽³⁾や,最大輸送電力の増大にどれだけ貢献してい るかに基づき評価を行う手法(4), 独立系統運用者 かるコストを算出し,適切な配分ルールに基づいて 価格を決定する手法⁽⁵⁾,電気的距離という概念を用 いて電力システムをいくつかの重複しない電圧制御 地域に分けることで,局所的な無効電力市場を形成 する手法⁽⁶⁾など,様々な手法が提案されている⁽⁷⁾。 しかし,文献(3),(4)の手法では評価対象が全ての

(ISO)が発電事業者から無効電力を調達する際にか

日かし、又歌(3),(4)の手法では評価対象が至ての 母線の無効電力出力であるものの,全母線の無効電 力上限を増加させ,無効電力の変化に対して積分を 行っているため,すでに無効出力が上限となってい る発電機母線では評価が行えないといった欠点があ る⁽⁸⁾。また,文献(5)の手法は発電機の無効出力を評 価する手法であるため,電力系統の各地点に設置さ れる調相設備の無効出力を評価することはできな い。文献(6)の手法は発電機ごとに市場を分けている ため,発電機の無効出力に関しては非常に相性の良 い市場が形成されると考えられる。しかし,調相設 備を対象にした手法ではなく,電気的距離導出手法 が複雑であるという欠点がある。以上より,系統全 体で評価できる調相設備の無効出力に関する価値評 価手法が必要であると考えられる。

そこで本稿では、電力系統内に設置される調相設 備を対象に、無効電力供給及び電圧制御のアンシラ リーサービスとしての価格決めのための、系統損失 低減効果に基づいた無効電力供給源の地点別価値評 価手法を提案する。

本稿で提案する手法の概念

本稿では、無効電力供給源の地点別価値を系統全 体の有効電力損失低減効果によって導出される無効 電力(Q)価値係数を用いて価値評価を行う。下記の (1)~(3)に示す系統特性から,発電機に大無効電力の 発生・吸収を負担させるとすると送電線・変電所を 通して無効電力の輸送が必要となり、無効電力を無 効電力需要の存在する場所まで輸送すれば当然その ための有効電力損失が発生(無効電力損失も発生) し, また電圧降下が増大し, さらに有効電力損失が 増えることになる。一方、無効電力需要の存在する 場所ごとに,それに見合う無効電力源を配置すれば, 無効電力の輸送が必要なくなり、電圧降下もなくな り、有効電力損失が最小となる。つまり、無効電力 需要の存在する場所までの無効電力の輸送距離が長 くなれば有効電力損失は増え, 受電端での電圧降下 が増大するため適正電圧の維持が難しくなり、無効 電力需要の存在する場所の近くに無効電力源を配置 すれば,距離の長さに応じて有効電力損失が減り,

適正電圧の維持がし易くなると考えられる。このよ うな観点から,無効電力供給源の設置によって有効 電力損失をどれだけ低減できるかを「無効電力に関 する電気的距離」と定めると,系統内の発電機群と 無効電力供給源の任意の設置地点の電気的距離を定 量的に評価でき,系統全体での無効電力の価値評価 が行える。また,このQ価値係数により無効電力供 給源の設置による効果が明確に評価できることか ら,このQ価値係数を利用すれば, <5·1>節と<5·2> 節の検討例にも示すように,系統参加者にとって納 得し易く,より公平な無効電力の価格決めができる と考えられる。

- (1) 発電所と需要端が電気的に離れている場合,送 電線で消費する無効電力 xl²が増大して,発電所 で起こした無効電力の大部分が負荷に届く前に 失われること
- (2) 無効潮流による電流 *I* が増すことによって,送 電線などの有効電力損失 *rI*²も増加すること
- (3) 無効電力はできるだけ、その消費地点に近い場 所で発生するのが得策であること

また、本稿では、電力系統に設置される調相設備 のアンシラリーサービスとしての価値評価を目的と しており、供給信頼度の高い電力系統の形成に必要 な調相設備容量は、運転状態によらず、予め備えて おく必要がある。調相設備の必要量は調相設備計画 によって決定され,その計画期間内で想定されたピ ーク需要断面において SC の設備容量が,オフピー ク需要断面において ShR の設備容量が算出される。 このことから,調相設備計画において想定されたピ ーク需要断面やオフピーク需要断面での Q 価値係 数の算出で,調相設備が設置される地点における無 効電力の価値評価を行うことが適切であると考えら れる。

3. 本稿で提案する無効電力価値評価手法

本稿で提案する Q価値係数は、電力系統において ある運転点の近傍で潮流方程式を線形化することに より導出することができる。系統の有効電力損失(系 統損失)は、それをどの発電機でどれだけ負担するか により変化し、無効電力の価値評価結果に影響を及 ぼす可能性がある。このため、Q価値係数を導出す るに当たり、系統の有効電力損失(系統損失)を任意 の発電機で分担できるように、ノードkにおける発 電機の出力を P_{Gk}、損失分担を除いた発電機の出力 分を P_{G0k}、系統損失を P_{loss} とすれば、各ノードにお ける発生有効電力は(1)式のように表せる⁽⁹⁾。

次に,系統損失分担を考慮した Q 価値係数の導出 手順について述べる。各発電機ノードに供給される 有効・無効電力を P_G(=P_{G0}+βP_{loss}), Q_G,各負荷ノ ードで消費する有効・無効電力を P_L, Q_L,系統損失 を P_{loss},調相設備などの無効電力源から供給される 無効電力を Q_Cとすると,電力系統の潮流方程式は, 各ノードの電圧・位相角 V, δを用いて

 $\mathbf{P}_{\mathbf{G}} + \boldsymbol{\beta} P_{loss} - \mathbf{P}_{\mathbf{L}} = \mathbf{f}_{\mathbf{P}} (\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) \quad \dots \quad (2)$

 $\mathbf{Q}_{\mathrm{G}} - \mathbf{Q}_{\mathrm{L}} + \mathbf{Q}_{\mathrm{C}} = \mathbf{f}_{\mathrm{Q}} (\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) \quad \dots \quad (3)$

と表せる。ここで,(2)式,(3)式の右辺は電力系統の アドミタンス行列成分実部 *G_{km}*,虚部 *B_{km}*を用いる と

$$f_{Pk} = V_k \sum_{m=1}^{N} V_m \left\{ G_{km} \cos\left(\delta_k - \delta_m\right) + B_{km} \sin\left(\delta_k - \delta_m\right) \right\} \cdots (4)$$
$$f_{Qk} = V_k \sum_{m=1}^{N} V_m \left\{ G_{km} \sin\left(\delta_k - \delta_m\right) - B_{km} \cos\left(\delta_k - \delta_m\right) \right\} \cdots (5)$$

である。Q価値係数を導出するための電力系統の運転点は,発電機ノードに供給される有効電力を(1) 式で表し, P_{loss} を変数とし位相基準ノードの有効電力の式を加えるほかは,教科書通りに潮流計算を行うことで得られる。(2)式,(3)式において,潮流計算により得られた運転点の近傍での V,δ の偏差を $\angle V$, $\angle \delta$ として,各発電機ノードに供給される有効・無効 電力 P_{G0}, Q_G および各負荷ノードで消費する有効・ 無効電力 P_L, Q_L を一定とすれば

と線形化した式が得られる。簡単のためそれぞれの ヤコビ行列を J1~J4 と置く。(6)式の右辺第一項を J₁, 第二項を J₂ とし, 同様に(7)式の右辺第一項を **J**₃, 第二項を **J**₄ とする。ここで, **J**₁, **J**₃ において は位相角の基準となる箇所が必要であるため位相基 準ノードに対応するベクトルを消去する。J2, J4に おいては無効電力供給における電圧変動が発電機ノ ードでは AVR(automatic voltage regulator;自動電 圧調整器)の働きにより抑えられると仮定し,発電機 ノードに対応するベクトルを消去している。これは 仮に発電機ノードの電圧が無効電力供給源により変 化してしまうと、それに伴い無効電力潮流が変化し てしまい無効電力の価値を評価することができなく なるからである。そして無効電力供給源である∠Qc は、負荷にのみ設置することを考えると、負荷に関 する項のみ残るため J₃, J₄の発電機ノードに対応す るベクトルを消去する。その結果, n ノード系統に おいて位相基準ノードを除いた発電機ノードの数を $h \geq \tau h \not \subset J_1 \not \subset n \times (n-1), J_2 \not \subset n \times (n-h-1), J_3$ $lt(n-h-1) \times (n-1), J_4 lt(n-h-1) \times (n-h-1)$ の行列となる。

ここで、(6)式を書き改めると
$$0 = (-\beta \mid \mathbf{J}_1) \left(\frac{\triangle P_{loss}}{\triangle \delta} \right) + \mathbf{J}_2 \triangle \mathbf{V} \dots (8)$$

となり、(8)式から

$$\left(\frac{\angle P_{loss}}{\angle \mathbf{\delta}}\right) = -\left(-\mathbf{\beta} \mid \mathbf{J}_{1}\right)^{-1} \mathbf{J}_{2} \angle \mathbf{V}$$

となり、(12)式を変形すると

となり、(13)式を(10)式に代入すると

が得られる。ここで、簡単のために(14)式の係数をa とすると

(15)式より,電力系統の各地点における無効電力 供給源による系統損失の低減効果が算出でき,初期 値によって決まる Q 価値係数αの要素の大小によ り,無効電力の地点別価値評価を行うことができる。

4. Q価値係数αの持つ性質

Q価値係数 α がどのような性質を持つかを確認す るため、Fig.1に示す単純な1機2ノード系統におい て、本手法を適用した。線路定数はTable1に示す通 りである⁽¹⁰⁾。ここで P_2 を力率が遅れ0.8、1、進み 0.8 という条件の下、0.01[pu]から0.1[pu]にまで変化 させた場合と、力率が遅れ0.8 または1, P_2 が0.05[pu] という条件の下、送電線距離を50[km]、100[km]、 150[km]と変化させた場合についてそれぞれ導出し たQ価値係数 α をFig.2に示す。

Fig.2(a)より軽負荷時には Q 価値係数αの絶対値 は小さな値を取り, 重負荷時には大きな値を取るこ



Fig. 1. 1-generator 2-nodes model

Table 1. Parameters of 1-generator 2-nodes model

(154kV, 100km, 2-ways)

Resistance:R[pu]	Reactance:X[pu]	Capacitance: Y/2[pu]
0.187	0.89	0.0064

とがわかる。つまり,軽負荷時よりも,重負荷時の 方が無効電力の価値が大きくなるといえる。また, 負荷の力率が遅れの状態では負の値を持ち,遅相の 無効電力供給による価値が示される。一方,負荷の 力率が進みの状態では正の値を持ち,進相の無効電 力供給,つまり遅相の無効電力を吸収することによ る価値が示される。

Fig.2(b)より,送電線距離が短いほど無効電力の 価値は低く,送電線距離が長いほど無効電力の価値 が高くなることがわかる。これは負荷力率が1では ない場合,送電線距離が長くなるほど送電線に流れ る電流の無効分が大きくなり,系統損失が大きくな るため無効電力の価値が高く示されたと考えられる。 また,負荷力率が1の場合においても,距離が長く なるほど無効電力の価値が高く示されたのは距離が 長くなるにつれて対地容量から供給される遅相の無 効電力が大きくなり,実質進み力率になって正の値 が示されたと考えられる。

このように,負荷地点における Q価値係数αは, 送電線距離や負荷の状態と正の相関があり,発電機 群からの電気的距離の指標であることがわかる。複 数の発電機と負荷が存在する複雑な系統においても



(a) Different of active power and power factor



(b) Different of distance

Fig. 2. Characteristic of coefficient-a

本手法を適用することにより,発電機群と負荷間の 電気的距離を定量的に評価することができる。

5. 本手法の適用結果と利用

Fig.3 に示す系統⁽⁹⁾に本手法を適用し,重負荷時の ある潮流断面において,系統損失を分担する発電機 を変えて,8箇所の変電所(S/S)二次側と3箇所の負 荷端(Load)におけるQ価値係数 α_i を算出した結果を Fig.4 に示す。Fig.4 では,系統損失を分担する発電 機について,スラックノードの位置を P/S1 から P/S5 まで順次変えた「 $\beta_{P/S1}=1$ 」から「 $\beta_{P/S5}=1$ 」ま での5通りと損失分担を除いた各発電機出力(P_{G0k}) 比を系統損失の分担比率とした「 $\beta_{sharing}$ 」の計6通 りの算出結果が示されている。送電線の抵抗はFig.3 に示すリアクタンス値の5%,対地容量は200%×2 とする。各S/S二次側における調相設備の容量は Table 2の通りである。

Fig.4 から次のことがわかる。





Table 2. Susceptance of 5-generator 30-nodes model

S/S	B[pu]	S/S	B[pu]
1	0.8657	5	0.5600
2	0.2416	6	0.2012
3	0.4463	7	0.07557
4	0.5075	8	0.08219



Fig. 4. Coefficient-a of 5-generator 30-nodes model

- (1) Q価値係数 ai は負値となることから、各ノードでの遅相の無効電力供給によって系統損失が低減すること
- (2) それらの低減効果は、{S/S 1, S/S 2, S/S 3, S/S
 4}と{S/S 5, S/S 6, S/S 8, Load1, Load2}と{S/S
 7, Load3}のQ価値係数aの絶対値がそれぞれ近い値を示していることから、それぞれをグルーピングできること
- (3) 上記の6通りのβ(系統損失の発電機分担比率) における Q価値係数αは、スラックノードの位置を含めて分担比率の設定を変えると、各地点における Q価値係数は僅かに変動し、その変動はすべての地点で同方向に増減していること

これらの事項から, Fig.3 の系統における Q 価値係 数の活用例を以下の節で検討する。

5.1 無効電力源の地点別価値

Fig.3 に示す系統は山側の電源を含む基幹系の 500kV系統がモデルとなっている。一般的に,基幹系 (500V系統,および275V(220V)系統のうち電源線, ループ系統など電力系統の骨格をなす系統)において, 500kV S/Sでは500kV系統で大量の無効電力が消費さ れるため一次および二次電圧を,その他変電所では, 二次母線電圧を運用目標値に維持するよう,調相設備 および電圧調整設備の設置等が計画されている。その ため,500kV S/S二次側に置かれた無効電力源は,基 幹系における上位系統(500kV系統)の電圧を運用目 標値に維持することによる「上位系統における電圧分 布の適正化」と500kV S/S二次電圧を維持することに よる「S/S二次側に繋がる下位系統における電圧制御」 の二つの役割を持っている。

問題を単純化するため,発・送電が分離され,複数 の発電事業者が,送電事業者(独立系統運用者)が運 用する基幹系統を使い S/S 二次側に繋がる需要家に電 力供給を行う場合を想定する。基幹系における上位系 統の電圧を運用目標に維持するために必要な設備形成 費を原価とする上位系統おける電圧分布の適正化に関 するサービス費の各発電事業者の負担比率μは,ここ で導出された Q 価値係数αを用いて

と表すことができ、ここで、 L_{totali} はS/Siに繋がる需要家の総契約電力、 L_{ki} は発電事業者kとS/Siに繋が

る需要家との契約電力, n は S/S の箇所数を表す。(16) 式では,系統損失の低減に貢献している Q 価値係数 $|\alpha_i|$ が大きい箇所に繋がる需要家と契約した場合, 負担すべきサービス費が割り引かれるように,逆比に より分配することができる。

発電機群からの電気的距離が遠い(Q価値係数 $|\alpha_i|$ が大きい)箇所に調相設備を設置すれば、発電機群からの電気的距離が近い(Q価値係数 $|\alpha_i|$ が小さい)箇所に調相設備を設置するより少ない設備容量で上位系統の電圧を維持し、系統損失の低減が図られることから、電気的距離の遠い箇所により多くの調相設備が設置されていると考えられる。

このことから,発電事業者が任意の S/S 二次側に繋 がる需要家に電力供給する場合、「S/S 二次側に繋がる 下位系統における電圧制御」に関するサービス費を, その S/S の調相設備の設備容量の大小に応じての負担 することは発電事業者にも納得できるものと考えられ る。一方「上位系統における電圧分布の適正化」に関 するサービス費については,発電機群からの電気的距 離が遠い(Q価値係数 | α_i | が大きい)箇所に調相設 備が多く設置されていることから,S/S の調相設備の 設備容量の大小に応じての負担は、発電事業者には納 得いかないものと考えられる。これを解決するため, 当該のサービス費を Q価値係数 | α_i | の大小により再 配分することが考えられる。各 S/S における「上位系 統における電圧分布の適正化」に関するサービス費を Siとすれば、「上位系統における電圧分布の適正化」に 関する系統全体のサービス費 S_{total} (= $S_1+S_2+ \cdot \cdot \cdot$ $+S_n$) は、例えば、(17)式を満たす S_i を求めることに より再配分することができる。

 $|\alpha_1|S_1 = |\alpha_2|S_2 = \cdot \cdot \cdot = |\alpha_n|S_n = C (-\overline{c}) \cdot (17)$

この結果,(16)式に示すように Q価値係数 $|\alpha_i|$ の逆 比によって分配され,Q価値係数 $|\alpha_i|$ が大きい S/S ほど「上位系統における電圧分布の適正化」に関する サービス費の負担が割り引かれることになる。

ここで、Fig.3 の系統である発電事業者が S/S 二次 側に繋がる需要家に 0.1[pu]の電力供給を行うと仮定 する。その際、各 S/S における Q価値係数 $|\alpha_i|$ の差 異によって負担比率 μ がどのように変化するかを確か める。各 S/S 二次側における需要家との総契約電力 $L_{total i}$ は Fig.3 に示す S/S 二次側を通過する P_L とした。 負担比率 μ の導出結果を Fig.5 に示す。

Fig.5 より, Q価値係数 | α_i | が大きく, 総契約電力
に対する電力供給の割合が小さい S/S 3, S/S 4 に繋が る需要家と契約した場合,負担すべきサービス費は大 きく割り引かれることがわかった。また,Q価値係数 $|\alpha_i|$ が小さく,総契約電力に対する電力供給の割合 が大きい S/S 7, S/S 8 に繋がる需要家と契約した場合, 負担すべきサービス費は大きく割り増しされることが わかった。

5.2 無効電力市場形成の局地化

独立系統運用者が無効電力を調達する場合を想定す ると、系統参加者が公正な価格競争を行える無効電力 市場を形成(®する必要がある。そこで各ノードの Q 価 値係数 αi による供給地点のグルーピングをすることに より、局地的な無効電力市場を形成できる。供給地点 のグルーピングは、算出された Q 価値係数 | α | の結 果から、次のようないくつかの範囲、Range1、Range2、 Range3、... に区分することにより、各供給地点がど のグループに属するかを決定する(®)。

 $0 \leq \text{Range1} < R_1, R_1 \leq \text{Range2} < R_2,$

本章の数値計算例では、 R_1 =0.008、 R_2 =0.01、 R_3 =∞ に設定することにより、供給地点を {S/S 1, S/S 2, S/S 3, S/S 4} と {S/S 5, S/S 6, S/S8, Load1, Load2}, {S/S 7, Load3} の3つにグルーピングできる。

ここで、分けられたグループのうち{S/S 1, S/S 2, S/S 3, S/S 4}のグループの各ノードにそれぞれ無効電 力を 0.1[pu]注入した場合, 他のノードにどれだけの電 圧変化量を与えたかを Fig.6 に示す。Fig.6 より, 調相 設備の容量増加による無効電力注入を行った母線の電 圧は大きく上昇し、その近傍にある母線の電圧も上昇 することがわかった。特に、Q価値係数 $|\alpha_i|$ の大き い母線に無効電力を注入した場合、母線電圧は大きく 上昇しているので,系統損失低減に貢献していると考 えられる。また、同一グループ内であれば無効電力を 注入した母線に関わらず他の母線の電圧はほぼ一定の 変化が現れる結果となった。すなわち、同一グループ 内であれば無効電力の系統に与える影響はほぼ同じで あると言えるので、グループ内で、次のような局所的 な無効電力市場を形成できることがわかった。無効電 力は局所的に必要になるものであり、1MVar 当たりの 無効電力の価値が系統内のすべての場所のおいて同じ わけではない。各供給地点における無効電力の価値(相



Fig. 5. Coefficient-y of 5-generator 30-nodes model



Fig. 6. Voltage variation of 5-generator 30-nodes model

対的な重要性)が、その地点の Q 価値係数で相対的に グルーピングされると、その価値が同程度の供給地点 間における無効電力調達は価格だけで決定することが できる局所的な市場を形成することができる。

6. 実規模系統モデルへの適用

本章では、本稿で提案している Q価値係数を用い ての無効電力の価格評価の有用性を確かめるため、 実規模系統モデルへの適用を行う。Fig.7 に示す電 気学会 EAST30 機系統モデル⁽¹¹⁾において、昼間断 面(ピーク時)及び夜間断面(オフピーク時)につ いて検討を行った。損失分担係数βは、G18 が繋が る 3010 番ノードをスラックノードとした場合と、 系統内の火力発電所に発電容量比で分担させた場合 について計算を行った。二つの潮流断面において、 3300 番台のノードについて導出した Q 価値係数α を Fig.8~9 に示す。

Fig.8 より,昼間断面においては,{3301,3303, 3304,3305},{3302,3306},{3307},{3308,3309, 3310,3312}のグループに分けられることがわかっ た。これは Fig.7 の系統図と照らし合わせると,発 電機ノードに近い箇所では小さく,発電機ノードか ら離れた箇所では大きいことから本手法で正しく発



Fig. 8. Coefficient-a of IEEJ EAST 30-machine

電機群からの電気的距離を算出し、グルーピングが できていることを表している。Fig.9より、夜間断面 においては、昼間断面ほど各ノードにおける Q価値係 数 $|\alpha_i|$ の大きさに差異はなく、{3301, 3302, 3303, 3304, 3305, 3306}, {3307, 3308, 3309, 3310, 3312} のグループとなった。そのため、昼間断面と夜間断面 で一様に潮流が変化するとは限らない実規模系統モデ ルでは、グループ分けによる無効電力市場の局地化に





関しては昼間断面と,夜間断面で分ける必要性がある と考えられる。

次に,発電事業者が各 S/S 二次側に 0.1[pu]の電力を 供給すると仮定した際に,発電事業者が負担すべき電 圧分布の適正化に関するサービス費の負担比率_ルの計 算を行った。ここで 3304 番ノードは,50Hz 系統と 60Hz 系統の連系線に繋がるノードであるため,3300



Fig. 7. IEEJ EAST 30-machine system model



Fig. 10. Coefficient-y of IEEJ EAST 30-machine system model(a 3300 number node, peak)



Fig. 11. Coefficient-γ of IEEJ EAST 30-machine system model(a 3300 number node, off-peak)

番台ノードのうち 3304 番ノードを除いた Q 価値係数 α を用いて負担比率 k を導出した。導出結果を Fig.10 ~11 に示す。

Fig.10~11 から, Q価値係数 | α_i | が大きく, 総契 約電力に対する電力供給の割合が特に小さい 3302番, 3305番, 3306番ノードに繋がる需要家と契約した場 合、負担すべきサービス費は大きく割り引かれること がわかった。また、Q価値係数 $|\alpha_i|$ が小さく、総契 約電力に対する電力供給の割合が大きい 3307 番ノー ドに繋がる需要家と契約した場合、負担すべきサービ ス費は大きく割り増しされる結果となった。また、夜 間断面において、特に総契約電力に対する電力供給の 割合が大きい 3312 番ノードでも、負担比率ルが大き い結果となった。発電事業者が既存の電力系統を利用 するには、その電力系統の設備形成に必要な費用を負 担にする必要があることから, 調相設備計画において 想定されたピーク需要断面やオフピーク需要断面での SC と ShR のそれぞれの設備容量に対する負担を合算 する必要がある。

以上より,実規模系統モデルにおいても本手法を適 用することにより,Q価値係数αを用いて発電機群か らの電気的距離を定量的に評価し,局所的な無効電力 市場の形成が可能であり,電圧分布の適正化に関する サービス費の負担比率μを導出することができた。

7.まとめ

本稿では、全系統参加者が納得するのが非常に難 しい問題となる無効電力供給及び電圧制御の問題に おいて、より全系統参加者が納得の行きやすい無効 電力地点別価値評価手法を提案した。そして本手法 により導出される Q 価値係数αを用いることで、発 電機群から任意の無効電力供給源設置点における電 気的距離を定量的に評価でき、無効電力供給源の地 点別価値を明確にできることを示した。

また、本手法で導出した Q 価値係数αを用いて、 電圧分布の適正に関するアンシラリーサービス費を 系統参加者に適切な形で分配・負担させることがで きた。また、Q 価値係数αの大きさによって電力系 統の各地点をグループ化でき、無効電力調達のため の公平な価格競争市場を形成することができること がわかった。また、実規模系統モデルに本手法の適 用を行い、本手法の有効性を確認することができた。

参考文献

- (1) 林 秀樹:「系統運用・制御の動向」,電学誌,127
 巻,2号,pp.85-88 (2007)
- (2) Hajime Miyauchi: "New Trend of Planning and Operation of Power Systems", IEE Japan Conf. pp.19-22 (2007) (in Japanese) 宮内 肇:「電力系統の新しい計画・運用の動向」, 平成 19 年電気学会全国大会, pp.19-22 (2007)
- (3) Toru Yamashita and Hiroumi Saitoh : "Economic value of reactive power supply based on marginal cost", IEE Japan Conf., pp.205-206 (2006) (in Japanese) 山下 透・斎藤 浩海:「限界費用に基づいた無効 電力供給源の価値評価手法」, 平成 18 年電気学 会全国大会, pp.205-206 (2006)
- (4) Toru Yamashita and Hiroumi Saitoh : "A theoretical study on spot evaluation of voltage ancillary service", IEE Japan Technical Meeting Annals, PSE-06-121, pp.31-36 (2006) (in Japanese)

山下 透・斎藤 浩海:「電圧アンシラリーサービ スの地点別価値評価に関する理論的検討」,電気 学会研究会資料, PSE-06-121, pp.31-36(2006)

(5) Yuji Ueki, Ryoichi Hara, Hiroyuki Kita, Eiichi Tanaka, and Jun Hasegawa : "A Study on Cost-based Pricing Method for Reactive Power Ancillary Services", IEE Japan Conf., pp.311-312 (2007) (in Japanese)

植木 悠次・原 亮一・北 裕幸・田中 英一・長 谷川 淳:「無効電力アンシラリーサービスのコ ストベースプライシング手法に関する検討」,平 成 19 年電気学会全国大会, pp.311-312 (2007)

- (6) Jin Zhong, Emilia Nobile, Anjan Bose and Kankar Bhattacharya : "Localized Reactive Power Markets Using the Concept of Voltage Control Areas", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL.19, NO.3, AUGUST 2004, pp.1555-1561 (2004)
- (7) Takurou Hashimoto and Atsushi Doi: "A study of Evaluation Method for Reactive Power Pricing in Power System", Research Reports of Tokyo National College of Technology, No.42(2), pp.109-114 (2011) (in Japanese)
 橋本 拓郎・土井 淳:「電力流通における無効電 力の価値評価手法に関する検討」,東京工業高等

専門学校研究報告書, 第 42(2)号, pp.109-114 (2011)

(8) Toru Yamashita, Yuichi Tobita, and Hiroumi Saitoh : "Spot evaluation of reactive power supply based on integration of Lagrange multipliers", IEE Japan Conf., pp.313-314 (2007) (in Japanese)

山下 透・飛田 雄一・斎藤 浩海:「ラグランジ ュ乗数の積分値に基づく無効電力供給源の地点 別価値評価」, 平成 19 年電気学会全国大会, pp.313-314 (2007)

- (9) 土井 淳:「線形計画法を用いた電圧無効電力の 総合制御」, 電気学会 システム・制御研究会資 料, SC-82-37, pp.64-71 (1982)
- (10)新田目倖造:「電力系統技術計算の基礎」,電気書院, p.72 (1980)
- (11)電力系統モデル標準化調査専門委員会編:「電力 系統の標準モデル」,電気学会技術報告,第754

号 (1999)

(平成 25 年 10 月 11 日 受理)

フォトリソグラフィを用いたMOEMS技術の教材開発 -第3報,マイクロ光電子デバイスの設計及び基礎特性の評価-

新國広幸*, 伊藤 浩*

Development of Teaching Materials for MOEMS Technology by Using Photolithography -3rd Report, Design and Evaluation of Basic Characteristics for Micro-Opto-Electro Device-

Hiroyuki NIKKUNI, Hiroshi ITO

In this paper, in order to develop teaching materials for MOEMS, design guidelines for guided wave optical pressure sensors with a diaphragm were established and the optimum process condition of the negative photoresist photolithography was examined. The sensor sensitivity and the resonance frequency of the diaphragm depend on the diaphragm dimensions. The dependence was theoretically examined. Also, the optimum process condition of the negative photoresist photolithography was obtained from some experimental results. Using both the negative photoresist and the positive photoresist, it would be developing our photolithography manufacturing technique for teaching materials of MOEMS technology.

Keywords : MOEMS, photolithography, guided-wave optical pressure sensor

1. はじめに

MOEMS (光・電気・機械マイクロシステム) は, 電子回路,光学部品,機械構造などの異なる要素 を組み合わせた高機能なマイクロマシンである. 我々の身近でも,MEMS 加速度センサを組み込ん だゲーム機やプロジェクタや映写機に利用されて いる DMD (Digital Micromirror Device)が MOEMS 技術を基に作られている。

MOEMS は、基板に所望のパターンを転写させるフォトリソグラフィ技術を利用して作製され、これにより、一括生産やデバイスの小型化が実現できる.また、転写パターンの工夫により、ナノ・マイクロ領域での新物性の発現や新たな MOEMS デバイスの実現が期待できる.

MOEMS デバイスの作製プロセスには、電子工 学、光工学、機械工学といった多様な技術が必要 であり、従来の各分野を横断した新規の基礎的研 究が必要となる.また、MOEMS 技術は、実社会 で多く利用されており、社会からの MOEMS 作製 技術者の育成需要も高まっている.

そこで、本取り組みでは、本校の教育・研究シ ステムに、フォトリソグラフィを利用した MOEMS 技術を導入することで、MOEMS 技術者 の育成ならびに新規のMOEMSデバイス開発を目

的とする. 第1報では、フォトリソグラフィに関 する基礎的データの収集を主として行い(1),第2 報では、確立したフォトリソグラフィ技術を利用 して光導波路,物性評価デバイスシステムを作製 し,その特性評価を行った⁽²⁾.本報告では,光導 波路に機械的構造体であるダイヤフラム構造を付 与させた MOEMS 圧力センサ, すなわち, 光導波 型圧力センサの作製を目指し、その設計指針を明 らかにする。また、ネガ型フォトレジストを利用 したフォトリソグラフィ技術により物性評価デバ イスを作製する。フォトリソグラフィでは感光材 としてフォトレジストを使うが、これには現像時 に露光部分が溶解するポジ型と未露光部分が溶解 するネガ型がある。本報告では、基板に対する密 着性が強く、耐薬品性が高いネガ型フォトレジス トを用いたフォトリソグラフィの最適条件を検討 する。

2. 光導波型圧力センサの設計

2. 1 センサの動作原理

図 2-1 に光導波型圧力センサの概形を示す。図の ように、このセンサは圧力感知部としての薄い板 状構造をしているダイヤフラムと、単一モード直 線光導波路で構成される。光導波路はダイヤフラ



図 2-1 光導波型圧力センサの概形

ム上に設けられ,最低次のTM-like,TE-likeモード光のみを伝搬させる。

図に示すように、圧力センサは、2つの直交した 偏光子と検光子の間に置かれている。TM-like, TE-like モード光を同強度で励起させるために, 偏 光子の偏光方向をセンサ基板面に対して 45° に傾 け,光導波路端面に直線偏光波を入射する。 ダイ ヤフラムに圧力が印加されると、ダイヤフラムに たわみが起こり、ひずみが生じる。このひずみは 光弾性効果により,ダイヤフラム上の光導波路に 屈折率変化を引き起こす。屈折率変化により、光 導波路を伝搬する光波の位相が変化する。このと き, TM-like, TE-like モード光は, それぞれ異なる 位相変化量を得るため、両モード間に位相差が生 じる。導波路出力端において光波は、位相差に応 じて, 直線, 楕円, 円偏光のいずれかの偏光状態 をもつ。ここで、位相差を検出するために、入射 光の偏光方向に対して 90° 偏光方向が傾いた検光 子を出力側に置き, 位相差を光強度に変換する。 これにより、印加圧力に応じた光強度が出力され る。なお、単位圧力当たりの誘起位相差を位相感 度と呼び、本センサの感度として使用する。

2.2 感度の導波路位置依存性

本センサにおいて,位相感度及び共振周波数は 重要な特性であり,共にダイヤフラムサイズに依 存する。本論文では,感度及び共振周波数のダイ ヤフラムサイズとの関係性等について考察した。 さらに,感度は導波路位置にも依存するため,そ の依存性についても考察を行った。なお,ダイヤ フラム材料は薄膜ガラス基板として市販されてい る Corning 0211 ガラスを想定した。MEMS とし ての実用を考えると,シリコン基板を利用するの が妥当であるが,ガラスは等方性材料で光学定数, 物性定数なども既知であるため,基礎研究には適 した材料であると言える。本報告で得られた知見 はシリコン基板を利用したセンサにも適用可能で ある。

圧力印加時におけるダイヤフラムのたわみ方は 場所によって異なるため,各部分に生じるひずみ は一様ではない。したがって、 位相感度はダイヤ フラム上の導波路位置によって異なる。ここでは, 参考文献(3)の動作解析法を利用して, 位相感度の 導波路位置依存性を計算した。導波路に垂直な方 向のダイヤフラム辺長をa, 導波路に平行な方向 のダイヤフラム辺長を bとして, a/b が 0.5, 1.0, 2.0 の場合の依存性を求めた。計算では、ダイヤ フラムに一様に圧力が加わるものと仮定し、さら にダイヤフラムの4辺を固定端とした。また、光 源として He-Ne レーザを想定し、光波の波長を 633 nm とした。センサ構成材料の材料力学定数, 光学定数には, Corning 0211 ガラスの値を使用し た。ただし, 光弾性係数に関しては, Corning 0211 ガラスの値が分からないため, 溶融石英の値を代 わりに用いた。溶融石英も Corning 0211 ガラス も共にSiO2を主成分としているため、溶融石英 の光弾性係数を計算に利用することは、計算結果 に大きな誤差を引き起こさないと考えられる。図 2-2 は計算結果である。図では、それぞれの辺比に おいて、導波路がダイヤフラム端に位置するとき に位相感度が1となるように正規化してある。図 において, 導波路位置 ±a/2 はダイヤフラム端に, 導波路位置0はダイヤフラム中央に対応している。



図 2-2 感度の導波路位置依存性

図より,導波路がダイヤフラム端に位置すると き,最も感度が高くなっている。そのため,セン サの高感度化には導波路位置をダイヤフラム端と するのが適していると言える。しかし,端付近で は導波路位置が少しずれただけでも感度が大きく 変化することも分かる。一方,ダイヤフラム中央 付近の導波路では,導波路位置が多少ずれても感 度はあまり変化しない。ただし,ダイヤフラム辺 比 *a/b* が 1 以上の場合には,ダイヤフラム中央 付近の導波路で感度が低くなっている。したがっ て,導波路の位置ずれの影響を避けたい場合には, ダイヤフラム辺比 *a/b* が 1 以下の時,ダイヤフ ラム中央に導波路を設置するのが有利であると言 える。

2.3 感度のダイヤフラム厚依存性

ダイヤフラム辺比と面積を一定とし、位相感度 をダイヤフラム厚の関数として計算した。計算で は、ダイヤフラムの形状が正方形で、かつその面 積は10 mm×10 mmであると仮定した。また、導波 路はダイヤフラム端 (±a/2) に位置するものとし た。図2-3は計算結果で、図では、ダイヤフラム厚 0.1 mm のときの位相感度が 1 となるように正 規化してある。図の両対数グラフにおいて、傾き が-2であるので、位相感度はダイヤフラム厚の2 乗に反比例することが分かる。なお、このような 感度のダイヤフラム厚依存性は、任意の辺比、任 意の導波路位置で成り立つ。



図 2-3 感度のダイヤフラム厚依存性

2. 4 感度のダイヤフラム辺長依存性

ダイヤフラム辺比と厚さを一定とし、位相感度 をダイヤフラムの辺 a の関数として計算した。計 算では、ダイヤフラム辺比 a/b を1とし、厚さを 0.22 mm とした。また、導波路はダイヤフラム端 (±a/2) に位置するものとした。図 2-4 はその計算 結果である。図では、ダイヤフラムの辺 a の長さ が 1 mm のとき、位相感度が 1 となるように正規 化してある。図では、両対数グラフにおいて、傾 きが3であるので、位相感度はダイヤフラムの辺 aの3乗に比例することが分かる。なお、このよ うな関係は、任意の辺比、任意の導波路位置で成 り立つ。



図 2-4 感度のダイヤフラム辺長依存性

2. 5 共振周波数のダイヤフラムサイズ依存性

共振周波数はダイヤフラムの固有振動数で, 共振現象によりダイヤフラムの振動振幅が著し く大きくなる。そのため,共振周波数付近では センサ感度が高くなるが,センサは通常,共振 周波数より十分低い周波数域で動作させる。そ のため,光導波型圧力センサを設計する際には, ダイヤフラムの共振周波数をセンサの動作周波 数の上限よりも高く設定しなければならない。 共振周波数はダイヤフラムの自由振動について の微分方程式

$$\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{Y h^3}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} \right) = 0 \qquad (1)$$

から求められる。ここで、wは圧力印加によるダ イヤフラムのたわみ、 ρ はダイヤフラムの密度、 hはダイヤフラムの厚さ、tは時間、Yはヤング 率、 μ はポアソン比を表す。ダイヤフラムの周辺 状態を 4 辺固定として、この式を解くと、ダイ ヤフラムサイズと共振周波数の関係式は以下の ようになる⁽⁴⁾。

$$f = \frac{\alpha \pi}{2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho(1-\mu^2)}} \frac{h}{a^2}$$
(2)

ここで, α はダイヤフラム辺比によって決まる 値である。式(2)から, 共振周波数はダイヤフラ ムの厚さに比例し、ダイヤフラム辺長の2 乗に 反比例することが分かる。

2. 6 ダイヤフラムサイズの設計

2.3,2.4,2.5で考察した感度,共振 周波数のダイヤフラムサイズ依存性を基に,感度 や共振周波数の仕様からダイヤフラムサイズを決 定するための,ダイヤフラム設計線図を考案した。 図 2-5 がその線図の1例である。本線図の作成で は,導波路の位置を感度が最も高いダイヤフラム の端とした。また,ダイヤフラム形状を正方形と した。さらに,光波の波長は633 nm とした。セ ンサ構成材料の材料力学定数,光学定数としては, センサ基板として使用する Corning 0211 ガラスの 値を使用した。ただし,光弾性係数に関しては, Corning 0211 ガラスの値が分からないため,溶融 石英の値を代わりに用いた。

図において、実線は位相感度とダイヤフラムサ イズの関係を示す等感度曲線である。感度はダイ ヤフラム辺長の3乗に比例し、ダイヤフラム厚の 2乗に反比例するため、実線の傾きは1.5となる。 また、点線は共振周波数とダイヤフラムサイズの 関係を表す等共振周波数曲線である。共振周波数 は、ダイヤフラム辺長の2乗に反比例し、ダイヤ フラム厚に比例するので、点線の傾きは2となる。 所望の感度、共振周波数の値と一致する等感度直 線、等共振周波数直線をダイヤフラム設計線図か ら見つけ、その交点が示すダイヤフラム厚及びダ イヤフラム辺長が、要求仕様を満たすダイヤフラ ムサイズとなる。



図 2-5 ダイヤフラム設計線図

3. ネガ型フォトレジストを用いた微細加工実験 3. 1 概要

本研究は、フォトリソグラフィ技術を用いて微 細な構造を作成し、様々な分野に応用できる MOEMS デバイス開発の基盤技術を構築すること である。そこで、前回報告まではフォトレジスト としてポジ型を用いた実験条件、加工特性等を報 告してきた^(1,2)。今回の報告では、ネガ型のレジス トを用いた作製条件を検討し、その最適条件を見 出すことができたので報告する。この成果により、 ポジ型プロセスとネガ型プロセスの基盤技術が整 い、今後はそれぞれの特徴を生かして様々な微細 構造プロセスに応用していくことが可能となる。

3. 2 実験方法

フォトリソグラフィの工程には、レジストの塗 布工程,露光工程,現像工程,エッチング工程な どが含まれ,最終的な加工特性ではすべての工程 条件が関係することになるため,工程ごとではな く,すべての工程を考慮した一つの最適条件を見 出す必要がある。そのため,最適条件を検討する ためには膨大な数の実験パラメータ数が必要とな る。そこで,本実験では,使用したレジストの仕 様を参考に,条件範囲を絞り,実験を行うことに した。最適条件として評価するための基準として は,現像工程後の現像パターンを金属顕微鏡及び SEM で確認し,最適な条件を検討していくことと した。

(1) ネガ型フォトレジスト

本実験に用いたネガ型フォトレジストは、東京 応化製 OMR-83 (45cp)を用いた。このレジスト は、主成分にキシレン、エチルベンゼン、環化ゴ ムを用いているため、一般的な有機溶剤では溶け ず、逆に反応しゴム状に硬化してしまう特性があ る。そのため、ネガ型レジスト専用の溶剤、剥離 液、リンス液を用いる必要がある。

(2) レジスト塗布

フォトレジストの塗布には、スピナー(ミカサ MS-A100)を用いた。本工程の条件では、基板表 面にレジストを均一な膜厚で塗布するための回転 数、時間及び、前処理条件がある。本実験では、 前処理としてレジストと基板との濡れ性及び密着 性向上を目的に、表面活性剤(東京応化 OAP)を 塗布し、その後、高温乾燥させる。また、スピナ

14

ー回転数を 1000rpm から 6000rpm まで,回転時間 を 20 秒から 80 秒まで変え検討した。

(3)プリベーク

レジスト塗布後に、レジストの乾燥及び、密着 性向上のためにホットプレートにて大気中加熱乾 燥した。この条件も現像特性に影響を与える重要 な要素となる。本実験ではプリベーク温度 $T_{\rm pb}$ は 90℃及び、110℃とし、プリベーク時間 $t_{\rm pb}$ は 90~ 240 秒の範囲で検討した。

(4) 露光

露光にはマスクアライナー(ミカサ M-1S)を 用い,露光時間*t*expは0.5~15秒の範囲で検討した。

(5)現像

現像工程は,露光後のサンプルを現像液の入っ たビーカに侵漬する。現像時間はすべて 60 秒とし た。現像の後,リンス液,アセトン及び純水にて 洗浄後,酸素プラズマアッシングによりレジスト の残を除去した。

(6) リフトオフ

リフトオフ工程では,現像後のレジスト上に真 空蒸着装置にてアルミニウム Al を蒸着し,その後 にネガ型用の剥離液 (東京応化 502A) が入ったビ ーカに侵漬し,レジストの溶解と同時に Al 膜を剥 離する。剥離時間及び,剥離温度は約 48 時間及び, 50℃として行った。この後,超音波洗浄機を用い て Al 膜の破断剥離を促し,膜を剥離する。超音波 洗浄器の周波数は 40kHz で,膜の剥離状況を観察 しながら 5~60 秒間行った。

3.3 実験結果

(1) レジスト塗布特性

図 3-1 にスピナー回転数とレジスト膜厚の関係 を示す。回転時間は 20 秒一定である。この結果か ら,回転数が 5000rpm 以上でほぼ一定となり,膜 厚は約 1.5µm であった。また,4000rpm 以下では 回転数に応じて 2~10µm の範囲で変化している。 本実験では,回転数を 1000rpm, 3000rpm,4750rpm の3条件にてレジストを塗布し,光リソグラフィ の最適条件を検証する。

図 3-2 にネガ型レジストの膜厚と回転時間の関係を示す。この結果から,回転時間が 20 秒以上で ほぼ一定の膜厚となっていることが分かった。よって,本実験ではすべて回転時間は 20 秒として行った。





図 3-2 ネガ型レジスト (OMR-83 45cp) の膜 厚と回転時間の関係

(2) 各種条件による現像特性の評価

図 3-3 にスピナー回転数による現像結果を示す。 この結果から、1000rpm の回転数ではパターン間 にレジストが残っており、その形状は紐状である。 また、パターンエッジ部は乱れている。3000rpm 及び 4750rpm の結果ではパターン間のレジストの 残は無く、エッジも比較的シャープに現像されて いる。これらの結果から、本実験ではスピナー回 転数は 4750rpm とした。

図 3-4, 図 3-5 にプリベーク温度と時間による現 像結果を示す。プリベーク温度が 90℃及び 110℃ の結果から,90℃ではレジストと基板との密着性 が悪く、レジストが浮いた状態となり、膜表面に 波状模様が見られる。また、110℃では密着性が改 善され、フラットな表面になっている。また、プ

ネガ型レジス h:OMR-83





(a) 1000 rpm









(c) $t_{exp} = 15 \text{sec}$

図 3-6 露光時間による現像結果 (tpre=90sec)





(a) $t_{exp}=0.5sec$

図 3-7 露光時間による現像結果 (tpre=240sec)

れが確認でき、240秒ではその乱れも改善され、 良好な現像パターンを確認出来た。これらの結果 より、本実験ではプリベーク条件は 110℃, 240 秒が最適条件と考えた。

図 3-6, 図 3-7 に露光時間を 0.5~15 秒変化させ たときの現像結果を示す。図 3-6 及び図 3-7 はプ リベーク時間をパラメータとし,それぞれ90秒及 び240秒のときの結果を示す。図3-6の結果から、 露光時間が1.5秒ではレジストの密着性が悪く、 現像パターンに乱れが生じている。また、10秒で はパターンエッジ部に乱れが確認できる。さらに 15 秒の結果では露光時間が長いため,光の回折に よりパターン間が繋がった結果となった。図 3-7 の結果では、露光時間が 0.5 秒では露光時間が短 いため、レジストが完全に硬化せず、浮いた状態 となり、パターンに乱れが生じている。1.5秒では 最適な露光時間であり,パターンも良好な結果を 得た。これらのことから、プリベーク時間が 240 秒で, 露光時間は 1.5 秒が最も良好な現像パター ンを得ることが確認できた。



(c) 4750 rpm 図 3-3 スピナー回転数による現像結果





(a) 90°C (b) 110°C 図 3-4 プリベーク温度による現像結果



(c) $t_{pre} = 240 sec$

図 3-5 プリベーク時間による現像結果

リベーク時間を90~240秒変化させた結果から, 90 秒ではレジストの密着性が悪く,現像パターン に乱れが見られた。また、140秒では密着性は改 善されているが、パターンエッジ部にわずかな乱



図 **3-9** 最適条件で作製した現像パターンの SEM 写真

図 3-8に Al 膜のリフトオフ後の写真を示す。リ フトオフの条件は、50℃の剥離剤に2日間漬け置 き、その後、超音波洗浄器の周波数は40kHz 固定 で、パターン寸法を考慮して適宜超音波洗浄時間 を変えて行う。この結果から、超音波洗浄時間が 60 秒では Al 膜が破壊され、時間が長すぎること が分かる。また、5 秒では破壊がなく、良好な結 果となった。しかし、100μm 程度の大きいパタ ーンでは逆に、5 秒では Al 膜が剥離できずに残る 結果となった。このことから、リフトオフの超音 波洗浄時間はパターンの大きさに応じて時間を調 整する必要があることが分かった。

(3) ネガ型フォトリソグラフィ最適条件

以上の結果から、ネガ型フォトレジストを用い たフォトリソグラフィの最適条件を検討し、以下 の最適条件を得ることができた。また、図 3-9 に はより正確に現像パターンを評価するために、最 適条件で作製した現像パターンの SEM 写真を示 す。確認した結果、最小寸法が 3µm のパターン に対して 10%程度大きくパターニングされるこ とが分かった。

新國, 伊藤:フォトリソグラフィを用いたMOEMS技術の教材開発

l 次回転速度:800[rpm]		
1 次回転時間: 3[sec]		
2 次回転速度 : 4750[rpm]		
2 次回転時間: 20[sec]		
3 次回転速度: 6000[rpm]		
3 次回転時間: 0.2[sec]		
	-	,

(表面活性剤:回転速度300[rpm],回転時間5[sec])

プリベーク方法:大気中ホットプレート

- プリベーク時間:240[sec]
- プリベーク温度:110[℃]

<u> 〇露光・現像条件</u>

露光時間:1.5[sec] 現像時間:120[sec] リンス時間:90[sec]

〇ポストベーク条件

ポストベーク温度:145[℃] ポストベーク時間:20[min]

<u>Oリフトオフ条件</u>

剥離剤浸漬温度:50[℃] 剥離剤浸漬時間:48[hour] 超音波洗浄:40[kHz], 5~60[sec]

4. まとめ

本報告では、フォトリソグラフィを用いた MOEMS 技術の教材開発を目指して、マイクロマ シン構造を導波路に付与した光導波型圧力センサ の設計指針の考察及びネガ型フォトレジストを用 いたフォトリソグラフィの最適条件を検討した。

光導波型圧力センサの設計指針の考察では、感 度は導波路がダイヤフラム上の端にあるとき最も 高くなることが分かり、また、感度はダイヤフラ ム厚の2乗に反比例し、ダイヤフラム辺長の3乗 に比例することが分かった。共振周波数はダイヤ フラム厚に比例し、ダイヤフラム辺長の2乗に反 比例することが明らかになった。また、感度及び 共振周波数のダイヤフラムサイズ依存性を基に、 ダイヤフラム設計線図を考案し、ダイヤフラム設 計においての有用性を示した。

ネガ型フォトレジストを用いたフォトリソグラ フィの最適条件を検討し,見出すことができた。 この結果から,ネガ型レジストの利点を生かし, ポジ型よりもさらなる微細パターンの加工へと発 展できることが可能である。また、ポジ型、ネガ型の両手法を組み合わせて利用できることから、 微細加工プロセスを考える上で多様性が増し、複 雑な形状パターンの形成が可能となり、MOEMS 教材開発、研究を進める上で特に有益である。

以上の成果より,光導波型圧力センサの設計指 針を確立させ,また,ネガ型フォトリソグラフィ 技術を用いたデバイス作製における一知見を得る ことができた.今後は,実際に導波路にダイヤフ ラム構造を付与した光導波型圧力センサを試作し, MOEMS 技術教材開発へ向けた基礎研究に取組ん でいく予定である.

謝辞

本研究の一部は,東京工業高等専門学校の平成 24 年度重点配分経費により行われた.

東京大学大規模集積設計教育研究センター (VDEC) 所有の F5112+VD01 EB 描画装置 (株式 会社アドバンテスト寄付)を使用してマスクの作 製を行った. 文部科学省ナノテクネットワークの 支援を受けた.

参考文献

(1) 伊藤 浩, 新國広幸, "フォトリソグラフィ を用いたMOEMS技術の教材開発", 東京工業高 等専門学校研究報告書, 第43(2)号, 2012, pp.107-112.

(2) 新國広幸, 伊藤 浩, "フォトリソグラフィ を用いたMOEMS技術の教材開発-第2報, マイ クロ光電子デバイスの実現に向けた基礎特性 の評価", 東京工業高等専門学校研究報告書, 第 44(2)号, 2013, pp.85-90.

(3) M. Ohkawa, K. Hasebe, S. Sekine, and T. Sato, "Relationship between sensitivity and waveguide position on the diaphragm in integrated optic pressure sensors based on the elasto-optic effect", Appl. Opt., 41, 2002, pp.5016-5021.

(4) 松平 精,"基礎振動学", 共立出版(株), 1951, pp.266-270.

(平成25年10月30日 受理)

光ファイバを用いた偏光干渉型光マイクロホンの感度向上に関する研究

新國広幸*

Research on Sensitivity Improvement of a Polarimetric Optical Microphone Using an Optical Fiber Hiroyuki NIKKUNI

In this study, the sensitivity of a optical microphone was successfully improved by acoustic impedance matching. The sound pressure through diaphragm depends on the thickness of the diaphragm. The dependence on thickness of the diaphragm was examined theoretically and experimentally. Based on the dependence, the thickness of the fabricated microphone was determined to be 0.061 mm. The diaphragm area was 20 mm \times 20 mm. The minimum detectable sound pressure level of the fabricated microphone was evaluated to be 100 dB-SPL. Also, the resonance frequency of the microphone was measured to be 1.4 kHz.

Keywords : optical microphone, diaphragm, polarization maintaining fiber

1. はじめ

音を検出するデバイスの一つに、マイクロホン が挙げられる。従来の電気を利用したマイクロホ ンは、MRI などの高磁界環境下では使用できず、 使用用途によっては漏電やショートが問題になる 場合がある。一方、光ファイバを用いたマイクロ ホンは、マイクロホン本体に金属や電気を用いて いないため高磁界環境下においても使用可能であ る。本研究では、そのような場所で安全に使用で きる光ファイバを用いた偏光干渉型光マイクロホ ンの開発を目標としている。

マイクロホンでは、音の検知にダイヤフラムを 用いているが、空気とダイヤフラムの音響インピ ーダンスの違いが大きいため、音波のほとんどが 反射してしまい、感度が低いと考えた。ダイヤフ ラムに伝わる音圧は、ダイヤフラムの厚さに依存 することが予想される。そこでダイヤフラムの厚 さとダイヤフラムに伝わる音圧の関係を理論的、 実験的に考察し、最薄かつ実現可能なダイヤフラ ム厚を求める。そして最薄なダイヤフラム厚の光 マイクロホンを試作し、その音圧特性、最小検出 可能音圧、周波数特性について実験的に評価する。

2. マイクロホンの構成および動作原理

図1に偏光干渉型光マイクロホンの概略図を 示す。音圧感知部としての薄い構造をしている ダイヤフラムと,偏波保持光ファイバとで構成 されている。ダイヤフラムの基板材料として, 材料力学定数や光学定数が良く知られていて, 比較的容易に入手することのできるホウケイ酸 ガラスを用いることとした。



図1 光導波型マイクロホンの概形

ダイヤフラムに音圧が印加されると、ダイヤフ ラムにたわみが起こり、ひずみが生じる。このひ ずみは光弾性効果によりダイヤフラム上のファイ バに屈折率変化をもたらす。屈折率が変化すると、 ファイバを伝播する光波の位相が変化する。この 位相変化を 90° 偏光方向が傾いた偏光子を用い ることで光強度に変換する。これにより印加音圧 に応じた光強度が得られる。

3. 実験

3. 1 透過音圧実験

音圧がダイヤフラムにどのくらい伝わっている のか確認するために、ダイヤフラム厚と透過率の 関係を理論的、実験的に考察し、図2の結果を得 た。スピーカーからダイヤフラムへ加える音圧、 周波数は6.3 Pa(音圧レベル110 dB)、1000 Hz と した。



図2 ダイヤフラム厚と透過率の関係

図2を見ると、ダイヤフラムを薄くするほど透 過音圧が上昇するという傾向を確認することがで きた。しかし、実験値と理論値に大きな差が出て しまった。本研究では、計算時にクラウンガラス の音響インピーダンス12.8×10⁶ Ns/m³ を使い計算 した。しかし、本実験ではホウケイ酸ガラスを使 用したため、計算値が大きくずれてしまったと考 えられる。また、計算ではダイヤフラムが変形し ないが、実験ではダイヤフラムが振動するためエ ネルギーが損失し、透過音圧が低減し、このよう な結果になったとも考えられる。

3.2 音圧特性評価

図3に示した光学系において,スピーカーにより,光マイクロホンに音圧レベル80 dB~120 dB の音を印加し,光マイクロホン信号を評価した。 スピーカーとマイクロホンの距離は5 cm とし,ノ イズ低減のため周波数帯域が300~3000 Hz のバ ンドパスフィルタを使用し実験を行った。なお, 周波数は1kHzの正弦波とした。今回の測定では, マイクロホン感度が最も高くなる,初期位相が約 90°の状態で実験を実施した。レーザには波長 635 nmの半導体レーザを使用し,レーザ出力光強 度は 8.4 mW である。



図4 光マイクロホンの音圧特性

図4のグラフより,光マイクロホン信号は,印 加音圧に応じて線形的な変化をしていることが確 認できた。マイクロホン感度は12.2 mV/Paとなっ た。昨年度の研究でのマイクロホン感度は,3.64 mV/Paであるため,本研究では,約3倍,感度が 向上する結果になった。これはダイヤフラムの厚 さが77 µmから61 µmへと薄くなったことで,透 過音圧が約2倍になり,さらにダイヤフラムが約 1.6倍たわみやすくなったためだと考えられる。し かし,今回試作したマイクロホンの共振周波数は 1.4 kHzであり,本実験の周波数1 kHzに近いため 感度が上がったとも考えられる。

本実験では,95 dB よりも下の音圧レベルでは, 雑音が大きく,1 kHz の周波数を検出することが できなかった。音を加えていない状態でも35mV の雑音が出ていたため,95 dB から下の音圧レベ ルでは1 kHz の周波数を検出できないことが分か る。これにより,作製した光マイクロホンの最小 検出可能音圧レベルは100 dB であることが分か った。また、今回のマイクロホンの出力光強度は 1.8 mW であったが、さらに出力光強度をあげるこ とで、光マイクロホン信号が大きくなるのでマイ クロホン感度をさらに向上できると考えられる。 また、100 Hz の雑音が大きかったため、雑音源を 特定するか、100 Hz の信号をカットできるバンド パスフィルタをさらに増やすことで解決するので はないかと考えられる。

3.3 周波数特性評価

周波数 400~3000 Hz の音を加えることで周波 数特性を測定した。加える音波の音圧レベルは 120 dB で固定した。本研究では、1 次共振周波数 は 1401 Hz と見積った。 音圧レベルの音の波形は検出することができなか った。特定の周波数で高い雑音が発生していたた め、フィルタをさらに使用することで、雑音を消 すことができればより低い音圧レベルの音を検出 することが可能である。

マイクロホンに, 音圧レベルは 120 dB で, 周波 数が 400~3000Hz の音を加えることにより, 周波 数特性を評価した。その結果, 理論値とほぼ同じ 周波数で, 1 次共振周波数 1.4kHz を確認すること ができた。

謝辞

本研究の一部は,東京工業高等専門学校の平成 24年度重点配分経費により行われた。

(平成25年10月30日 受理)



図5 光マイクロホンの周波数特性

図5を見ると,1200 Hz~1400 Hz での光マイク ロホン信号値の急激な上昇は,1次共振周波数で あると考えられる。これにより理論値と実験値が ほぼ同じ結果になったことが確認できた。

4. 結論

本研究では、ダイヤフラムの厚さと、透過音圧 との関係を理論的、実験的に考察し、ダイヤフラ ムを薄くすることにより透過音圧が増え、感度が 向上することが分かった。

ダイヤフラムは作製した中で最も薄かった厚さ 61 µmのもの使用し, 偏光干渉型光マイクロホン を試作した。作製したマイクロホンに, 音圧レベ ル80~120 dBの音を加えることにより, 音圧特性 を評価した。マイクロホン感度は, 昨年度の感度 の約3倍である12.2 mV/Paとなった。しかし, 最 小検出可能音圧レベルは100 dB で, 95 dB 以下の

Hiroshi NAGAYOSHI*

Silicon nanostructure formation of silicon nanowires, sheets, and texture surface on a silicon substrate has been achieved using hydrogen radical etching reactions. Metallic tungsten and a tungsten hot wire were used as catalysts for the hydrogen molecular cracking. It was shown that a variety of surface structures on silicon such as inverted pyramid texture, V groove texture, dense silicon nanowire growth over texture, and nanosheet structure can be obtained by controlling the process conditions. The obtained results suggested that the formation of nano tungsten silicide particle is essential prerequisite to obtain these structures. The particles work as an etching mask against hydrogen radical etching, as well as a catalyst for vapor-solid-solid (VSS) growth. SEM, TEM, micro-RAMAN and XPS and in some were used for the analysis of the hydrogen radical treatment of Si surface in presence of tungsten nanoparticle is discussed. It is concluded that the proposed acid free method, which is based on a modification of Si surfaces only by hydrogen radicals, can be considered as a "green" technology approach, which can be used for the cost effective fabrication of silicon nanostructures, which can be considered as a base for several types of advanced devices in a future.

Keywords : Texture, Silicon nanowire, Etching, Hydrogen radical

1 Introduction

In recent years, Si nanostructures such as nanowires and nanoparticles have attracted much attention due to their interesting physical properties, finding applications in information, bio-, display, and energy technologies such as solar cells and batteries [1-7]. The silicon nanowires are usually obtained in a vapor-liquid-solid (VLS) growth mode [8-12]. Growth of such nanowires by methods such as chemical vapor deposition (CVD), molecular beam epitaxy (MBE), and pulsed laser vaporization (PLV) has been reported [13-19]. In the case of CVD, small liquid droplets of a metal, such as gold, form low-temperature eutectic liquids supersaturated with silicon that act as seeds for nanowire growth. However, preparation process of metal catalyst mostly involves indirect, multi-step procedures and suffers from many processing variant limitations. А of this method is vapor-solid-solid (VSS) growth, which can occur at temperatures well below the eutectic temperature of the catalyst particles. This is similar to a metal-induced layer exchange process followed by metal-induced solid-phase crystallization, where amorphous silicon is deposited on top of a metal film

on a substrate, for example, an aluminum film deposited on a glass substrate[20-23]. In this method, the amorphous silicon dissolves in the metal film and diffuses through it during annealing below the eutectic temperature. This is followed by the formation of crystalline silicon nuclei on the substrate that grow into a thin polycrystalline Si film that is confined at the interface between the metal film and the substrate. Growth of Si nanowire by the VSS method has been reported from Al catalyst particles, Ti forming TiSi₂ islands, and Cu catalyst particles[24-28]. In this case, only substrate texturing, without any additional growth of a Si layer, occurs upon whisker formation on the Si substrate, in contrast to the case of molecular beam epitaxy based Si nanowire growth[29].

In this paper, we report the preparation of silicon nanostructures such as inverted pyramid texture, V groove texture, dense fine silicon nanowire growth over texture, and nanosheet structure using a set of hydrogen initiated reactions: hydrogen with tungsten, Si and tungsten silicide. We have developed the two step process on the hot filament method. The process consists of particle deposition with high filament current and hydrogen radical treatment for surface

^{*}Department of Electronic Engineering

etching process. The WSi₂ particles are generated by a gas phase reaction between evaporated tungsten and silicon hydride that generated by a reaction between silicon and hydrogen radicals [30-35]. In addition, we have developed the one step process, which does not need a filament current, is quite simple and suitable for the large area processing of such nanostructures. Nanowires based structures and textured Si surfaces can be obtained on silicon substrates above 700°C within the "green" technology approach.

2 Experimental conditions

Hydrogen radicals are produced by dissociative adsorption of H_2 on the hot tungsten surface. The filament temperature of hot filament CVD reactors is generally around 1800°C. In this temperature, hydrogen molecules are effectively cracked as follows.

$$H_2 + 4.5 \text{ eV} \rightarrow 2H \tag{1}$$

Other refractory metals such as Ta and Mo can be used as well. We observed surface texturing with silicon nanowire growth occurring at zero filament current when the distance between the filament and the substrate was 3mm, revealing that the reaction can proceed only by furnace heating. On the basis of the results mentioned above, we replaced the filament with the tungsten mesh that closely placed over the silicon substrate. As compared to the hot filament, this method could be quite simple and suitable for large area processing. In the hot filament method, hydrogen radical density largely depends on the filament temperature. On the other hand hydrogen radical density in the one step process is determined by pressure and temperature. Figure 1 shows a schematic of the experimental apparatus. The reactor is a quartz tube, 60 mm in diameter, enclosed in a furnace. In the hot filament method, a tungsten filament is positioned above the substrate. On the other hand, a tungsten mesh is closely placed above the substrate in the case of one step process. The gap between the substrate and the tungsten mesh is 0.5mm. The substrate is a polished p-type, 10 Ω cm CZ (100) mono-crystalline silicon wafer. Before hydrogen radical etching, a native oxide of the substrate surface was removed by 5% HF solution and the reactor was evacuated at a pressure of less than 0.02 Torr. Pure hydrogen was used as the source gas. Experimental conditions for the process are shown in Table1. Scanning electron microscopy (SEM), high resolution transmission electron microscopy (HRTEM), photoluminescence (PL), white light interferometry, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and micro-Raman spectroscopy were employed for characterization of hydrogen radical treated Si samples.

3 Texture structure formation

Figure 2 shows the examples of the texture surface obtained using the hot filament method. Texture



Fig.1 Schematic of experimental apparatus for the one step process: (a) Hot filament method (b) One step process.

Table 1 Process conditions.		
Hot filament method		
1 st stage treatment		
Reaction pressure	0.3	Torr
Filament current	24	Α
Temperature	800	°C
Process time	20	sec
H ₂ flow rate	30	SCCM
2 nd stage treatment		
Texturing		
Reaction pressure	0.1-10	Torr
Filament current	0-22	А
Temperature	700-1000 °C	
H ₂ flow rate	30-250	SCCM
Texturing with Si nanowire gr	owth	
Reaction pressure	1-30	Torr
Filament current	0-18	А
Temperature	700-1000 °C	
H ₂ flow rate	30	SCCM
One step process		
Texturing		
Reaction pressure	1-30	Torr
Temperature	700-1000 °C	
H ₂ flow rate	30	SCCM
Texturing with Si nanowire gro	owth	
Reaction pressure	10-100	Torr
Temperature	700-100	0°C
H ₂ flow rate	30	SCCM

surface with no nanowires can be obtained when the filament current is higher than 18A. Many particles remain at a ridge of texture. We confirmed those particles are tungsten silicide. The surface morphology depends on the first stage process condition. Figure 2(c) shows a SEM image of the Si surface after 20second of tungsten particle deposition at 800°C. The tungsten filament was heated around 1800°C under hydrogen ambient. The Si surface was covered by tungsten particles, which diameter was around

50nm. The covering of tungsten particles on the Si surface was not uniform and many large openings were observed in the particle layer. The average distance between the large openings was around 1.5 μm. A volatile of silicon hydride species while particle deposition might contributes to a fluctuation of particle covering. The results clearly suggested that the particle deposition enables to obtain texture structures. The particles are generated by the reaction between evaporated tungsten and silicon hydride generated on the silicon surface by hydrogen radical etching reaction. To confirm the property of the particles, silicide diffraction pattern spacings were measured, using a Si [110] zone axis pattern as a reference, and compared with known W-Si structures[36].



(c)

Fig.2 Examples of the secondary electron analysis topography images of texture structure obtained by the hot filament process (0.1 Torr, 20A, 900°C, 30min). (c) After 20 s particle deposition on the silicon substrate. Tungsten silicide particles show bright contrast.

The tetragonal WSi₂-phase with lattice parameters a=b=3.211 Å and c=7.868 Å was found to match the diffraction patterns from the particles. Figure 3(a) shows a particle that is adhering to a mound on the Si substrate. Figure 3(b) is an enlarged image of the rectangular area marked in Fig. 3(a). The WSi₂ phase was found to be highly crystalline, as can be observed from the lattice image in Fig. 3(b). The dark-bright contrast and the orientation relationship at the interface indicate some strain between the two phases. A diffraction pattern of a similarly oriented particle superimposed on silicon [110] zone axis is shown in Fig. 3(c). In Fig. 3(d), the diffraction pattern from the [-331] zone axis in the particle is indexed. The two lattices are semicoherent and some lattice plane orientations continue across the interface. The orientation relationship of this particle with silicon was found to be $(002)_{Si} \parallel (103)_{WSi2}$ and $[-110]_{Si}$ [[-331]_{WSi2}. The results suggested that the particle was composed of mono crystalline WSi₂. In the hot filament method, the diameter of the particles was in the range of 10-50 nm.



Fig. 3 Analysis of tungsten silicide particles:

(a) TEM overview and (b) HRTEM image of the interface between the tungsten silicide and the silicon substrate after H radical treatment. (c) Diffraction pattern showing a Si [-110] zone axis superimposed on a [-331] zone axis from the WSi₂ phase. (d) Indexed diffraction pattern from the [-331] zone axis of the WSi₂ phase The result shown in Fig. 3(b) suggested that the particle does not form chemical bonds with the silicon surface, meaning they can be easily removed from the surface.

In the case of one step process, texture structure was obtained at the reaction pressure less than 100 Torr. When the pressure is higher than 10 Torr, silicon nanowires cover the whole area of texture surface. Examples of SEM images are shown in Fig.4. Fig.4(a) is a V groove surface, showing a similar surface as that obtained by the hot filament method in Fig.2. Although tungsten evaporation is not possible in the one step process method, very fine WSi₂ particles can be seen on a ridge of texture structure as shown in Fig.4(a). Some small silicon lumps and silicon nanowires remain on the texture surface. In some part of the ridge, we observed silicon nanowalls grown





(c)

Fig.4 Secondary electron analysis topography images of texture structure obtained by the one step process: (a) V groove (3Torr, 1000°C, 90min). (b) randomly textured surface covered by very fine silicon nanowire(10Torr, 950°C, 90 min). (c) nanowall growth from the ridge (magnified the dotted line area in Fig.4(a).)

from the string shape catalyst remaining on the ridge of texture, shown by the arrows in Fig. 4 (c). Figure 4(b) shows the texture surface obtained at 10 Torr, 950°C. The surface shows random texture structure with very fine silicon nanowires covering the whole area of the textured surface. From the point of device applications, surface damage by hydrogen radical treatment is an important issue. Defect formation by hydrogen radical treatment using a PECVD reactor has been reported by Nordmark et.al [33]. In processing at temperatures less than 400°C, hydrogen radical treatment creates crystalline defects since excess hydrogen radicals diffuse into the subsurface area of silicon, causing formation of hydrogen related bubbles and voids [30]. On the other hand, TEM results in the hot filament method suggested that no crystalline defects formed on the texture surface as shown in Fig.3(a).[36] The processing temperature of the hot filament method was over 700°C, preventing hydrogen radical accumulation in the sub-surface region of the silicon surface, due to high diffusivity of hydrogen in Si at elevated temperatures.

4 Silicon nanowire growth

Silicon nanowire growth on the hot filament method quite depends on the filament current condition on the second stage process. Figure 5 shows examples of the dense silicon nanowire grown by hot filament method. In the hot filament method, the silicon nanowires can be obtained when the filament current is less than 18 [A] upon the hydrogen radical treatment process. This result suggests that high density hydrogen radical generation with radiation heating prevents the silicon nanowire growth by strong etching reaction. The thickness of the nanowires was 10-50nm, showing zigzag shape. In Fig.5(c), small dots are observed not only tips of the whiskers but in the body, which causes the zigzag shape of whiskers. The results suggest that nano-scale WSi₂ particles are supplied from the filament and being incorporated into the nanowire body during the growth. This means that in the hot filament method, the tungsten hot filament emits tungsten clusters during the nanowire growth. Hollows also exist between the nanowire layer and the texture surface as shown in Fig.5(a).

In the one step process, variety shape of silicon nanowires were obtained above 10 Torr. The hydrogen radical generation and residence time of silicon hydride generated from the silicon surface increase with the reaction pressure, enhancing the VSS nanowire growth. When the reaction pressure was higher than 100Torr, both texture formation and nanowire growth disappeared since hydrogen radicals cannot reach the silicon surface because of the high recombination rate at such pressures. Examples of SEM images obtained for Si substrates treated under conditions of the one step process are shown in Fig.6. The silicon nanowire image in Fig.6(b) is showing straight shape nanowires, suggesting an absence of





Fig.5 SEM images of silicon nanowires obtained by the hot filament method (1 Torr, 18A, 850°C, 60min) : (a) Hollows under the silicon nanowire layer. (b)Whole surface is covered by zigzag shape silicon nanowires. (c) TEM image of the whiskers.

400nm

(b)

 $\frac{1}{30\mu m}$ $\frac{1}{100nm}$ (c)
(d)
Fig.6 SEM images of silicon nanowires obtained by the one

1µm

(a)

step process; (a)(b)Straight shape nanowires obtained by the one step process; (a)(b)Straight shape nanowire (70Torr, 1000°C, 90min). (c)Sponge shape dense silicon nanowires (22Torr, 1000°C 90min). (d) Dense silicon nanowire layer covering the whole area of texture surface (10Torr, 900°C, 90min).

evaporated tungsten nanoparticles incorporated into the wire. Fig.6(c) and (d) show dense fine silicon nanowire layers covering the whole texture surface. These silicon nanowires are quite thinner than those of the hot filament method. The hydrogen radicals generated at the tungsten surface reach the silicon surface through the nanowire layer, generating silicon hydrides by the etching reaction on the silicon surface. These results suggest that the hydrogen radical etching reaction proceeds during silicon nanowire growth and that the silicon nanowire is more stable than the flat surface against hydrogen radical attack. In the case of silicon nanowire growth by the hot filament method, we have confirmed the presence of WSi₂ nanoparticles on the tip of the nanowires, suggesting that the growth mechanism can be explained by the VSS model.[37-40] Although we have not confirmed vet presence of nano WSi2 particles on the tip of a Si



Fig.7 Secondary electron analysis topography images of cotton like structure obtained using one step process. Multi crystalline pillars and cotton like structure can be observed (10Torr, 1000°C, 90min).



Fig.8 $45 \times 62 \mu m$ topography map of the Si surface containing nanostructures obtained using one step process and measured by an interferometer. The surface structure is not uniform, showing texture distribution.

nanowire, grown by the one step process, since such nanowires are very fine, it can be supposed that these nanowires might grow with a similar growth mechanism, which can be described by the VSS model.

5 Growth of ultra fine structures

Figure 7 shows SEM images of sample surfaces obtained at 10 Torr by the one step process. Thick pillars and cotton like structures can be observed on the surface. The cotton like structure is composed of bundles of very fine silicon nanowires and nanosheets. The pillar is composed of multi crystalline silicon. The

topography map of the sample surface was measured using white light interferometer, as shown in Fig.8. The measurement indicates a layer thickness of 1-1.5 µm. Figure 9 show a TEM image of the sample. The nanowire thickness is around 1 nm, which is quite fine as compared to that obtained by conventional growth methods. Large sized metal or tungsten silicide particles were observed at the bottom of the pillar, suggesting that these pillars grow by a bottom growth mode. Although the growth mechanism of such a large size WSi₂ particle is not clear yet, results are suggesting that WSi₂ particles can be fused into each other below 1000°C. The TEM results suggest that the very fine silicon nanowires are growing from tips of small projections on the etched silicon surface. The projections might have fine WSi₂ particle on the tip.

Figure 10 shows high resolution Si 2p XPS spectra of the cotton shaped structure. Analysis of XPS spectra was performed on a KRATOS AXIS ULTRA^{DLD} X-rav photoelectron spectrometer using monochromatic Al K α radiation (hv = 1486:6 eV) at 15 kV and 10 mA. The pass energies for the survey and high resolution scan were 160 and 20 eV, respectively. The pressure of $(3-6) \times 10^{-9}$ Torr in the chamber was maintained during the analysis. Prior to the analysis the samples were slightly etched with Ar+(0.5 keV, 20 s) in order to remove C contamination and adsorbed O species. The acquired after oxidized charge spectra were neutralization performed by low energy electrons driven by the analyzer magnetic field onto the sample surface. The spectrum acquired with the Si substrate being electrically floating is shown in Figure 9(a). The data shown in Figure 10(a) is raw, i.e., the peak positions were not corrected to account for the overcompensation effect of the charge neutralization process. In this measurement condition, the substrate signal and the signal from the cotton like material on the surface are overlapping. A broad plasmon peak was observed at 120 eV, which contains plasmon peaks of both the Si substrate and the cotton-like material. Figure 10(b) shows the Si 2p spectrum when the substrate was earthed. In this condition, both the substrate main 2p peak and its associated Plasmon peak were separated from the spectrum of the



(a)



(b)



Fig.9 TEM image of cotton like structure and thick pillar obtained using one step process. Ultra fine silicon

nanowires grow from the tip of small projections on the

silicon surface.

91





Fig.10 Si_{2P} XPS spectra of the cotton like structure: (a) Measured under electrically floating condition. (b) Measured with ground connected substrate. (c) Peak deconvolution of the main peak.

cotton-like material and this is indicative of the differences in conductivity between the substrate and the cotton-like material. The energy difference between the separated plasmon and main peak at 112eV and 95 eV respectively coincides with the Si plasmon energy loss (~17eV). On the other hand, the plasmon energy loss of cotton like material was found to be ~23eV, which is a value close to that of SiO_2 . When the sample was earthed the electrical potential of the substrate was fixed to the ground level and the substrate Si 2p peak was shifted to the expected energy (99.7 eV). On the other hand, the surface material contains more positive charge and the spectra are shifted towards higher binding energy since this is less conductive. Although the electrical properties of the cotton like material have not been measured, the results suggest that this material has a wider bandgap than bulk silicon. Figure10(c) shows the deconvolution of main peak. The layer thickness of cotton like material is more than 1µm, however, the substrate peak has structure on the higher energy side, suggesting that the main peak contains also the signal of the native oxide of the substrate surface since the atomic density of the cotton like layer is quite low. For the purposes of peak fitting, the half width at half maximum (FWHM) value of the native material can be separated to four different silicon peaks, suggesting that the sample surface has oxide layer. (Si⁴⁺) on a standard Si wafer sample was used as the FWHM of Si⁴⁺. As a result the peak of the cotton-like oxidized



Fig.11 Photoluminescence spectrum of the cotton like structure.

material by exposure in the air, the dominant peak was Si^{2+} . The results reveal that the cotton like material is unstable in the air and easily oxidized.

Figure 11 shows the photoluminescence spectrum of the cotton like structure measured at room temperature under excitation wavelength at 404 nm. A green emission band, which has been ascribed to neutral oxygen vacancies in SiO_x layer (native oxide) formed on top of the cotton-like oxidized material, was revealed at 510 nm[42]. The peak is asymmetrical with a tail extending above 700 nm. The tail band can be attributed to the recombination of the confined excitons[42-51]. Figure 12 shows the Raman spectra excited at 532.1 nm. The Raman scans performed were done with a Horiba Jobin Yvon T64000 instrument working in backscattering single grating mode. A grating with 2400 rules pr. mm and a slit width of 100 microns ensured a spectral bandwidth of 1.35 cm⁻¹. The Rayleigh scattered light was blocked with a 532nm Kaiser Optical holographic Super-Notch filter. The 532nm light for sample illumination was generated by a frequency doubled Millennia Pro 12sJS Nd:YVO₄ laser running at 200mW. Losses through the system and the Olympus LMPlanFl 50x/0.50 objective, resulted in a laser effect of 2.4mW at the sample. The scan time was typically 3x20s for each spectrum. The frequency scale was calibrated against the spectrum of a standard Silicon sample. Although the laser beam (~2 μ m in diameter) was focused on the nanowire laver, the measured data might include a signal from



Fig. 12 Raman spectra peak around 520 cm⁻¹.

the silicon substrate. A single peak appeared at 521.3cm⁻¹, suggesting the crystalline structure. Broad shoulder peak at low energy originated from defects was not observed[34-37]. The peak position was around 0.7 cm⁻¹ higher than that of Si reference peak, which is equal to the 14MPa of compressive stress under static water pressure in bulk Si.

6 Growth model of nanostructures

Figure 13 shows a model of particle deposition and the silicon whisker growth in the hot filament method. Whiskers grow from the top of the protuberance formed by the hydrogen radical etching around particles which act as an etching mask.



Fig. 13 Model of surface modification by the hot filament method: (a) Tungsten silicide particles are generated by the reaction of silicon hydride and tungsten vapor emitted from the filament at the initial stage and deposit on the surface. (b) Simultaneously surface texturing by hydrogen radical etching with the particle mask and tungsten silicide particle absorption of silicon hydride leads to whisker growth.



Fig.14 Growth model of WSi_2 particle deposition and nanostructure formation in the one step process.

Initially, silicon hydride generated on the silicon surface reacts with evaporated tungsten from the filament, causing particle deposition on the surface. During subsequent etching, whiskers grow from individual particles. Growth is by a VLS mechanism, driven by silicon hydride generated over the silicon surface being absorbed by the particles and being reprecipitated as Si.

The catalytic reaction in one step process occurred at temperature below 1000°C, hence there is no possibility of evaporation of metallic tungsten. However, we observed deposition of very fine WSi₂ particles at the first stage of the reaction process. Figure 14 shows the possible growth process including particle deposition. The tungsten catalyst has a thin oxide layer on the surface, and the oxide layer changing into metal tungsten nanoparticles through the reducing reaction by hydrogen radicals. Silicon hydrides generated from the silicon surface react with tungsten metal nanoparticles and, as a result, a fine WSi₂ nanoparticle layer deposits on the silicon surface. Then texture surface can be obtained when the particle acts as an etching mask of hydrogen radical etching. When the silicon hydride, generated on an etching reaction of silicon surface by hydrogen radical, is absorbed on the WSi2 particles, silicon nanowire grow from the particle by VSS growth mechanism.



Fig.15 Example of the secondary electron analysis topography image showing thin WSi_2 particle layer on the ridge of texture.

The results are suggesting that the bottom–up growth mode is possible. Figure 15 shows an example of fine WSi_2 particles depositing on a silicon surface as a thin film upon a one step process at 1000°C, 40Torr. It can be assumed that when such thin layer structure remains on the surface and the nanowire growth condition are fullfilled, there is a possibility that the silicon nanosheet growth occurs.

Summary

Simple silicon nanostructure growth method using hydrogen radical has been developed.

- Such silicon nanostructures as inverted pyramid texture, V groove texture, dense silicon nanowire growth over texture, and nanosheets can be obtained using hydrogen initiated catalytic reaction with tungsten and Si and metal tungsten with silicon.
- Silicon nanostructures have grown on a silicon substrate using tungsten catalytic reaction and only pure hydrogen as a reactant gas. The results suggested that the fine WSi₂ particle deposition is an essential prerequisite to obtain these structures.
- The Si nanowire growth model as well as the 3. texturing mechanism initiated by H radical treatment of Si surface in presence of tungsten nanoparticle are discussed. It is concluded that the proposed acid free method, which is based on a modification of Si surfaces only by hydrogen radicals, can be considered as a "green" technology approach. The proposed approach can be used for the cost effective fabrication of silicon nanostructures. Such nanostructures can be considered as a base for several types of advanced devices in a future such as solar cells and optical sensors. Optimizations and adjustments of the proposed technology for each concrete case of implementation (detectors, sensors, solar cells, batteries etc.) still are required.

References

- Y. Huang, X. Duan, J. Hu, and C. M. Lieber: Science **291** (2001) 630.
- [2] A. M. Chocka, K.C.Klavetter, C.Buddie Mullins,

and B.A.Korgel: Chem. Mater., 24(19)(2012)3738.

- [3] E. C. Garnett, and P. Yang: J. Am. Chem. Soc., 130(2008)9224.
- [4] F. Shen, J. Wang, Z. Xu, Y. Wu, Q. Chen, X. Li, Xu. Jie, L. Li, M. Yao, X. Guo, and T. Zhu: Nano Lett., 12 7 (2012)3722.
- [5] Y. Yao, N. Liu, M. T. McDowell, M. Pasta, and Y. Cui: Energy Environ. Sci., 5(2012)7927.
- [6] E. B. Ramayya, L. N. Maurer, A. H. Davoody. And I. Knezevic: Phys. Rev. B86(2012)115328.
- [7] GF. Zheng, W. Lu, S. Jin, and C. M. Lieber: Advanced Materials **16** (2004)1890.
- [8] J. L. Liu, S. J. Cai, G. L. Jin, S. G. Thomas, and K. L. Wang: J. Cryst. Growth **200** (1999) 106.
- [9] A. M. Morales and C. M. Lieber: Science 279 (1998) 208.
- [10] V. Schmidt, J. V. Wittemann, S. Sentz, and U. Gosele: Advanced Materials 21(2009)2681.
- [11] B. Fuhrmann, H. S. Leipner, H-R. Hoche, L. Schubert, P. Werner, and U. Gosele: Nanoletters 5(2005)2524.
- [12] L. Dupré, D. Buttard, C. Leclere, H. Renevier, and P. Gentile: Chemistry of Materials 24(2012)4511.
- [13] Y. F. Zhang, Y. H. Tang, N. Wang, D. P. Yu, C. S. Lee, I. Bello, and S. T. Lee: Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 1835.
- [14] R. J. Barsotti, Jr., J. E. Fischer, C. H. Lee, J. Mahmood, C. K. W. Adu, and P. C. Eklund: Appl. Phys. Lett. 81 (2002) 2866.
- [15] R. S. Wagner, W. C. Ellis, K. Jackson, and S. M. Arnold: J. Appl. Phys. 35 (1964) 2993.
- [16] E. I. Giargizov: J. Cryst. Growth 31 (1975) 20.
- [17] R. P. Chang, C. C. Chang, and S. Darack: J. Vac. Sci. Technol. 20 (1982) 45.
- [18] S. J. Rathi, B. N. Jariwala, J. D. Beach, P. Stradins, P. C. Tavlor, and X. Weng: J. Phys. Chem. C, 115 10 (2011)3833.
- [19] F. W. Yuan, H. J. Yang, and H. Y. Tuan: J. Mater. Chem., 21 (2011)13793.
- [20] O. Nast, S. Brehme, D. H. Neuhaus, and S. R. Wenham, IEEE Trans. Electron Devices 46(1999)2062.
- [21] P. I. Widenborg and A. G. Aberle, J. Cryst.

Growth **242**(2002)270.

- [22] T. J. Konno and R. Sinclair, Philos. Mag. B 66(1992)749.
- [23] P. I. Widenborg, A. Straub, and A. G. Aberle, J. Cryst. Growth 276(2005)19.
- [24] T. J. Konno and R. Sinclair, Mater. Sci. Eng., A 179-180(1994) 426.
- [25] Y. Wang, V. Schmidt, S. Senz, and U. Gösele, Nat. Nanotechnol. 1(2006)186.
- [26] T. I. Kamins, R. StanleyWilliams, Y. Chen, Y.-L. Chang, and Y. A. Chang, Appl. Phys. Lett. 76(2000)562.
- [27] T. I. Kamins, R. Stanley Williams, D. P. Basile, T. Hesjedal, and J. S. Harris, J. Appl. Phys. 89(2001)1008.
- [28] J. Arbiol, B. Kalache, P. Roca i Cabarrocas, J. R. Morante, and A. Fontcuberta i Morral, Nanotechnology 18(2007)305606.
- [29] J. Bauer, F. Fleischer, O. Breitenstein, L. Schubert, P. Werner, U. Gosele, and M. Zacharias, Appl. Phys. Lett. 90(2007)012105.
- [30] H. Nordmark, H. Nagayoshi, S. ishimura, K. Treashima, J. C. Walmsley, R. Holmestad, and A. Ulyashin: Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2007) 1686.
- [31] H. Nagayoshi, S. Nishimura, K. Treashima, and K. Konno: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) 7839.
- [32] H. Nagayoshi, S. Nishimura, K. Terashima, and A. Ulyashin, Proc. 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, (2006)1411.
- [33] Heidi Nordmark, Randi Holmestad, John C. Walmsley, and Alexander Ulyashin: J. Appl. Phys. 105, (2009) 033506
- [34]C. Ghica, L. C. Nistor, H. Bender, O. Richard, G. Van Tendeloo, and A. Ulyashin: Philos. Mag. 86 (2006) 5137.
- [35] H. Nagayoshi, H. Nordmark, S. Nishimura and K. Terashima, C. D. Marioara, J. C. Walmsley, R. Holmestad and A. Ulyashin: Thin Solid Films 519 (2011)4613
- [36] Powder Diffraction File, Inorganic Phases, Sets1–44, International Centre for Diffraction Data (ICCD), 1994.

- [37] H. Nordmark, A. Ulyashin, J. C. Walmsley, B. Tøtdal, and R. Holmestad: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 253 (2006) 176.
- [38] Y. Wang, V. Schmidt, S. Senz and U. G sele: nature nanotechnology 1 (2006)186
- [39] C. Y. Kuo, and C. Gau: Thin Solid Films 519 (2011)3603.
- [40] P. Qi, W. S. Wong, H. Zhao, and D. Wang: Appl. Phys. Lett. 93(2008)163101.
- [41] J. Arbiol, B. Kalache, Pere Roca i Cabarrocas, J.R. Morante, and A. Fontcuberta i Morral: Nanotechnology 18(2007)305606.
- [42]J. Q. Hu, Y. Jiang, X. M. Meng, C. S. Lee and S. T. Lee: Chemical Physics Letters 367 (2003)339.
- [43] X. C. Wu, W. H. Song, K. Y. Wang, T. Hu, B. Zhao, Y. P. Sun, J. J. Du: Chem. Phys. Lett. 336 (2001)53.
- [44] S. Kar, S. Chaudhuri: Solid State Communications, **133** (2005) 151.
- [45] J. Q. Hu, Y. Jiang, X. M. meng, C. S. Lee, and S. T. Lee: Chemical Physics letters **367** (2003) 339.
- [46] H. Tu, L. Wang, X. Chen, S. Zhu, J. Du and Q. Xiao: Proceedings of 3rd Nanoelectronics Conference (2010) 24.
- [47] N. Zamanzadeh, M. S. Brandt, and M. Stutzmann: Journel of Non-Crystalline Solids 227-230(1998)503.
- [48] N. Wang, Y. H. Tang, Y. F. Zhang, C. S. Lrr, I. Bello, and S. T. Lee: Chemical Physics Letters 299(1999)237.
- [49] H. J. Lee, Y. H. Seo, D. H. Oh, K. S. Nahm, Y. B. Hahn, I. C. Jeon, E. K. suh, Y. H. Lee, and H. J. Lee: J. Appl. Phys. 75, (1994)8060.
- [50] H. D. Fuchs, M. Stutzmann, M. S. Brandit, M. Rosenbauer, J. Weber, A. Breitshwerdt, P. Deak, and M. Cardona: Physical Review B 48(1993)8172.
- [51] J. D. Prades, J. Cirera, J. R. Morante, and A. Fontcuberta I Morral: Appl. Phys. Lett. 91 (2007)123107.

(Received Oct. 30, 2013)

魚眼カメラを用いた移動ロボット向け全方位障害物検知システムの基礎実験

山内 索*, 青木宏之**

Fundamental Experiments for Omnidirectional Obstacle Detection System

or Autonomous Robots Using Fish-Eye Cameras

Saku YAMAUCHI, Hiroyuki AOKI

Abstract : Obstacle detection is currently essential for autonomous robots as it contributes to safety and free running in the real environment. The aim of this research is to propose a method using a stereo fish-eye camera detecting omnidirectional obstacles. In order to achieve it at low cost, this study focuses on a pair of fish-eye cameras that combine a low-cost fish-eye lens for smartphone and an ordinary webcam instead of costly devices such as Laser range finder and Millimeter wave radar. However, low-cost lenses have low resolution as well as irregular distortion. Then fundamental experiments were conducted, using a pair of low-cost fish-eye cameras, in which feasibility of obstacle detection and reliability for image region were examined. The result of the experiment showed that the proposed method made it possible to measure ranges in zenith angles of 25 and 85 degrees. Consequently, it is concluded that the omnidirectional detection using the proposed method is made possible by confining zenith angles.

Keywords : computer vision, fish-eye cameras, obstacle detection, omnidirectional, stereo vision

1. はじめに

人間環境の中を活動する,社会の役に立つロボ ットということで自律走行型ロボットの研究が行 われている.その要素技術の中でも,障害物など の周辺環境を認識する手段として,距離計測は必 須の技術となっている.

昨年度,本研究室では障害物検知を行うために, ステレオカメラを用いた距離計測システムを構築 した^[1].カメラにはウェブカメラを用いており, ほかの距離計測デバイスであるミリ波レーダーや レーザーレンジファインダーなどと比べて,安価 で構築が容易,ほかの画像処理との組み合わせが 可能,などの利点がある.しかし,ウェブカメラ の画角の都合上,1つのステレオカメラシステム では,左右約 60°程度しか観測することができな い.これにより,死角の物体に気付かず衝突する, 近寄ってくる物体を認識できない,といった問題 が発生する.

先ほど述べたミリ波レーダーやレーザーレンジ ファインダーといったデバイスのほかに,環境認 識のデバイスとして全方位カメラが注目され研究 されているが,全方位カメラも信頼性の高いもの は高価であるという問題がある.しかし,近年ス マートフォンの普及と搭載される小型カメラの高 性能化により,小型かつ安価なコンバージョン魚 眼レンズが市販されるようになった.魚眼カメラ は画角が 180°を超えるものもあり,鉛直方向に 向けることで全方位カメラとして使うことができ る.魚眼カメラを用いた距離計測の研究もおこな われており⁽²⁾、安価なレンズとウェブカメラを組 み合わせることで構築する,低コストの魚眼カメ ラでも全方位に対する障害物検知の実現が期待で きる.そこで本研究では,安価なステレオ魚眼カ メラシステムを用いた全方位障害物検知システム を構築することを目的としている.

本稿では、提案するシステムの概要と原理を示 し、そのシステムの実用性を図る基礎実験として 実際に構成した魚眼カメラを用いた距離計測実験 を行い、その結果を示す.最後に、実験結果につ いて考察を行い、システムの実用性と信頼性につ いて考える.

2. システム概要

システムの実装予定図を、図1に示す. ロボッ



図1 ステレオ魚眼カメラの自律走行ロボットへ の実装イメージ図

トは本研究室で開発されているものであり,自律 走行型ロボットの技術チャレンジである「つくば チャレンジ^[3]」に参加することで,その性能を評 価している.ステレオ魚眼カメラとして,図1の 左に示したように,魚眼カメラを視線が同じにな るように並べて使用する.このステレオカメラを ロボット上部に鉛直下向きに装着することで,図 に示したような検知範囲を持った障害物検知シス テムとして使用できると考えられる.

3. 魚眼カメラの光学系

一般に魚眼カメラには図2のように、円形の画 像が得られる円周魚眼と矩形の画像が得られる対 角線魚眼の2種類がある.対角線魚眼は、円周魚 眼で得られる画像を切り出した画像と同等である ため、本研究では、撮影できる範囲が広い円周魚 眼を用いる.また、魚眼カメラでは画像の中心か ら外側に向かうにつれて、物体がゆがみ小さく映 るような画像となる.このとき、円周魚眼の円内 部である、実際に物体を映す画像領域をイメージ サークルと呼ぶ.

実世界上の3次元位置座標における物体から放 たれる光が、レンズを通して、画像平面における 2次元位置座標に撮像されるのを投影と呼ぶ.以



(a) 円周魚眼の画像
 (b) 対角線魚眼の画像
 図 2 魚眼カメラによる撮影画像例



図3 魚眼投影モデルにおける世界座標系と画像 座標系との関係

降に、魚眼カメラにおける投影について述べる.

図 3 に、世界座標系 (X_w, Y_w, Z_w) の対象点に対 する画像座標系 (X_i, Y_i) への魚眼カメラでの投影 の関係図を示す.世界座標における対象点を $P(x_p, y_p, z_p)$ とし、カメラの視点を座標の原点 O_w とする.カメラの視線は Z_w 軸と同様であり、こ れを光軸ともいう.光軸はレンズ中心と焦点を結 ぶ直線となっている.また、一般のカメラにおけ る左右方向が X_w 軸にあたり、上下方向が Y_w 軸に あたる.

このとき、線分 $O_w P$ と光軸がなす角を天頂角 θ (0° $\leq \theta < 180^\circ$)とし、線分 $O_w P$ を $X_w Y_w$ 平面 上に射影させた線分と X_w 軸がなす角を方位角 φ (0° $\leq \varphi < 360^\circ$)とする. $\theta \ge \varphi$ を世界座標 における対象点Pの座標 (x_p, y_p, z_p) を用いて表 すと、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}}{z_p}$$
(1)
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{y_p}{x_p}$$

となる.また,光軸と画像座標平面の交点を光軸 点 $c(c_x, c_y)$ とする.

画像座標系における,投影点p(x,y)は, $\theta \ge \varphi$ とcによって定まり,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} + r_f \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}$$
(2)

で表される.このとき、投影点と光軸点の間の距

離である r_f は θ の関数であり,魚眼レンズの設計 により異なる.代表的なものを以下に示す.

$$r_f = f \theta$$
 (等距離射影) (3)

$$r_f = 2f \tan(\theta/2) \ (\Xi \oplus \Re \mathbb{R}) \tag{5}$$

 $r_f = 2f \sin(\theta/2)$ (等立体角射影) (6) ここで、fはレンズとカメラの組み合わせによっ て決まるパラメータであり焦点距離と呼ばれる. ここで、一般的なカメラ(中心投影)も同様の式 で表すことができ、

$$r_f = f \tan \theta \tag{7}$$

となる.

4. 魚眼カメラモデルと校正

魚眼カメラでの投影は,製造過程での誤差やレ ンズとカメラの組み合わせなどの影響により,一 般に,理想的な投影の式に従わない.魚眼カメラ を用いた距離計測では,5章で詳しく述べるが, 画像の座標から天頂角 θ と方位角 φ を正確に求 める必要がある.そこで,文献^{[4][5]}を参考に,魚 眼カメラでの投影をモデル化し,θとφを計算で きるようにする.ここで,個々のカメラに対して ある操作をすることで投影モデルのパラメータを 得ることを,カメラの校正という.

まず θ と r_f の関係について考える.式(3)~ (6)は画像座標における投影点と光軸点の間の距離,すなわち画像の光軸点から放射線状に発生するひずみを表す式となっている.このひずみを放射方向歪曲収差と呼ぶ.しかし,実際の魚眼カメラではどの式にも従わない.一般的な設計において, r_f は天頂角 θ に対して線形か,sinまたはtanの関数によって表されており,これらの三角関数のテイラー展開は θ の奇数乗項のみとなる.そこで,本稿では,このテイラー展開の5乗項までを用いて,

 $r_f = k_1 \theta + k_3 \theta^3 + k_5 \theta^5$ (8) と近似した式を、一般の魚眼カメラに対するモデ ルとして用いる.ここで、 k_1 、 k_3 、 k_5 はテイラ ー展開の各項の係数となっている.

次に,式(2)について考える.一般に光軸点は 画像の中心となるように設計されるが,実際には 光軸が画像中心を通らないために多少ずれてしま う.また,カメラの撮像素子は,通常は図4の左 のように,センサを縦と横の長さを等しくし,等



図4 デジタルカメラ撮像素子のイメージ図

間隔に配置するように設計される(正方格子).しかし,こちらも実際には図4の右のように長さが等しくならない.そこで,以上を考慮し,式(2)を図4の右で示したセンサの縦横比αを用いて書き直すと,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} + r_f \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}$$
(9)

となる.

魚眼カメラには、カメラとレンズの向きのずれ による接線方向歪曲収差と呼ばれるひずみが存在 することが知られているが、一般にこのひずみに よる影響は小さいため本稿では取り扱わない.以 上から、本稿の魚眼カメラモデルでの投影は、式 (8) と式(9)を統合して、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} + (k_1\theta + k_3\theta^3 + k_5\theta^5) \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha}\cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix}$$
(10)

となる.また,

 $I = [k_1 \quad k_3 \quad k_5 \quad c_x \quad c_y \quad \alpha]$ (11) を魚眼カメラの内部パラメータとして定め、この パラメータを得る (校正する) ことで、天頂角 θ と 方位角 φ から投影点 p(x,y) を、あるいは逆に投 影点 p(x,y) から天頂角 θ と方位角 φ を求めるこ とができるようになる.

5. ステレオ魚眼カメラを用いた距離計測

2 つの魚眼カメラを用いた距離計測の原理図を, 図 5 に示す.図のように,光軸が一致するように 2 つの魚眼カメラを配置する.このとき,2 つの カメラ間の距離を基線長 b とする.図より,



図5 魚眼カメラを用いた距離計測原理図

 $b = h_2 - h_1$ (12) であることがわかる.このとき、それぞれの魚眼 カメラの測距対象に対する方位角 φ が等しいと すると、 h_1 、 h_2 は測距対象との距離 d と、それ ぞれの魚眼カメラの測距対象に対する天頂角 θ_1 、 θ_2 を用いて、

$$h_1 = \frac{d}{\tan \theta_1}$$
(13)
$$h_2 = \frac{d}{\tan \theta_2}$$

と表せるため、式 (12) に代入することで、

$$d = \frac{b}{\frac{1}{\tan \theta_2} - \frac{1}{\tan \theta_1}} \tag{14}$$

という式が得られ,魚眼カメラと測距対象との距離 *d* を求めることができる.

6. 距離計測の処理手順

魚眼カメラによる画像から距離計測を行う処理 の流れは、

- 撮影した画像に対する、補正を含めた極座 標変換
- ② 変換後の画像に対する領域ベースマッチン グでの、対応点の角度差推定
- ③ 推定した角度差から対応点に対するそれぞれの距離を算出

のようになる. ①, ②, ③の処理について, 以降 で述べる.



図6 補正と極座標変換による座標変化

① 補正と極座標変換

魚眼カメラ画像に対して,光軸点を原点とした 極座標変換をかけることで,画像間の対応点(同 じ物体を映している座標)の探索が,直線上を走 査するのみとなり容易となる.ここで,通常の極 座標変換では,動径 r_f が式(8)であらわされる天 頂角 θ の多項式関数であるため,後の計算が複雑 となってしまう.そこで変換の際に,校正で得た パラメータを用いることで,変換後の座標軸を θ に対応させることが可能となる.座標系変換の概 略図を図6に示す.

② 領域ベースマッチング

本稿では画像間の対応点を探索する方法として, 領域ベースマッチングと呼ばれる手法を用いる. 領域ベースマッチングとは,図7に示すような, 1つの画像対を小領域に分割し,それぞれの基準 となる小領域と対応する点を画像マッチングによ ってもう一方の画像中から探索する手法となって いる.

本稿では、小領域の比較方法として SAD (Sum of Absolute Difference) という評価関数を用いる. SAD は、小領域画素間の輝度の差分をとり、その 絶対値の総和の大きさによって類似度を比較する ものとなっている.このとき、差が少ない、すな わち総和が最も小さくなる点を対応点として選択



図7 領域ベースマッチングによる対応点探索

する. また, 探索する小領域を走査させた際に, SAD の最小値付近の値を内挿することで, サブピ クセル(1 画素より細かい値)単位で対応点の位 置を探索することができる.

領域ベースマッチングでは、処理結果は視差 (disparity)という形で出力される.しかし、本 稿で述べる処理においては天頂角θの差を見た いので、前節で述べた極座標変換を行った画像に 対して適用することで、基準画像に対するθの角 度差という形で出力が得られる.

③ 距離計算

領域ベースマッチング処理では、天頂角の角度 差 $\Delta \theta$ が出力される.そこで、式(14)において、 θ_1 の角度を示すカメラを基準とし、

$$d = \frac{b}{\frac{1}{\tan(\theta_o - \Delta\theta)} - \frac{1}{\tan\theta_o}} \tag{15}$$

と変形することで,距離を求めることができる. ここで, $heta_o$ は式 (14) における $heta_1$ を書き換えた ものである.

7. 魚眼カメラの校正実験

ステレオ魚眼カメラによる距離計測を行う前に, カメラの校正を行う.表1に,本研究で使用する 魚眼カメラの構成を示す.本研究では,文献^[4]の 中野らが提案した,しま模様校正パターンの直線 性を利用する校正手法を用いて,式(11)の内部 パラメータを推定しカメラの校正を行う.この校 正手法は,内部パラメータの初期値を与え,画像 内のしま模様校正パターンと内部パラメータから 与えられる評価関数を最小化するようにパラメー タを更新していくことで,パラメータの推定を行 うものとなっている.

初期値としては、使用する魚眼レンズの公称画

表1 魚眼カメラの構成

ウェブカメラ	ロジクール HDウェブカム C615
舟田 101ブ	イザワオプト スマホ・ケータイ用
魚眼レンス	185 [°] 円形魚眼レンズ KSW-4

角 185° というデータを利用する.また,魚眼カ メラの投影については,もっとも一般的に用いら れる等距離射影方式であり,光軸点はイメージサ ークルの中心であると仮定する.また,撮像素子 は正方格子ということにして初期値を設定する.

初期値を求めるイメージを、図8に示す.円周 魚眼カメラでは図2(a)のように、イメージサー クルの中に撮像される.このとき、イメージサー クルの中心点を円近似によって算出し、光軸点 $c(c_x, c_y)$ とする.イメージサークルの直径は画角 を表すため、公称値通りであるなら、185°とな る.したがって、半径の画角は92.5°となる.等 距離射影では、式(3)のように、画像座標におけ る光軸点からの距離 r_f は、天頂角 θ に比例する. したがって、式(8)のテイラー展開は、第1項の みを扱うため、

$$=k_1\theta \tag{16}$$

と考えてよい. イメージサークルの半径は, 光軸 点からの最大の距離と等しいため, r_f に半径, θ に公称の画角である 92.5° を代入することで, パ ラメータ k_1 を求めることができる.

表2に、1920×1080 Pixelsの画像サイズで算 出した初期内部パラメータと、校正によって推定 された内部パラメータを示す.また、魚眼カメラ で撮影した画像と、初期値で補正(一般のカメラ で撮ったような画像にする変換)を行った画像、



図8 校正の初期値算出のイメージ

表 2 校正によ	り得られた内部	パラメータ
----------	---------	-------

	初期値とした	校正により推定された
	パラメータ	パラメータ
k_1	320.4316	327.0650
k_3	0	32.6772
k_5	0	-15.8940
c_x	1005.8816	1004.7026
c_y	528.0940	525.3115
α	1	1.0007



(a) 補正前の魚眼カメラ画像





(b) 初期値による
 (c) 推定したパラメータ
 補正画像
 図 9 魚眼カメラの校正による効果

推定した内部パラメータを使って補正を行った画 像の3枚を図9に示す.画像は格子状のパターン を撮影したものだが,初期値による補正よりも, 推定したパラメータによる補正の方が直線らしく なっていることから,校正がなされていることが わかる.

8. 距離計測実験

本実験では、ウェブカメラと小型魚眼レンズの 組み合わせである安価な魚眼カメラを用いた距離 測定の可能性と、撮影画像領域に対する信頼性を 明らかにする.そこで、理想的な条件に近い環境 で距離計測実験を行い、その精度について考察す る.

実験環境を図10のように設定する.測距対象



図10 実験環境の概略図

表3 距離計測でのシミュレーション条件

領域ベースマッチング における小領域サイズ	15×15 Pixels
魚眼カメラの撮影画像 サイズ	1920×1080 Pixels
極座標変換後の画像サイズ	360×360 Pixels
観測する天頂角	1,3,5, \cdots ,89 $^{\circ}$

を天頂角に対して均一に与えるために,対象を壁 面と床面とした.基準となるカメラからの水平距 離と垂直距離が 30cm となるようにし,基線長は 5cm となるように配置した.このとき,カメラの 移動には,上下昇降機能付きのカメラスタンドを 使用し,距離計測はメジャーによる実測のものと なっている.また,シミュレーションの条件は表 3のようにした.

距離計測の結果を図 11 に示す. ただし, この グラフでは原点を基準カメラの位置とし, 横軸を 水平距離, 縦軸を垂直距離とすることで位置関係 を表すものとなっている. 距離計測の結果を丸で 示し, 太い直線は壁面と床面を表している. また, 天頂角に対する誤差を壁面や床面との2次元座標 での距離とし, 計測結果を図 12 に示す.

図 11 の結果から,魚眼カメラを用いて計測し た距離は,実測の壁面と床面に対して沿うように 結果が出ていることから,距離計測がなされてい ることがわかる.しかし,図 12 の結果からわか るように,天頂角が小さい領域や 90° に近い領域 では誤差が大きいことがわかる.これらは魚眼カ



メラの解像度の低下や、計算過程での誤差の増幅 によると考えられる.しかし、解像度の低下は処 理である程度改善できるが、誤差の増幅について は計測原理上避けられないものである.したがっ て、距離計測の信頼性向上のためには、使用する 天頂角は限定するのが良いと考えられる.天頂角 が70°~80°での誤差を上限として、天頂角が小 さい領域に適用することで、25°~85°程度の範 囲を今後距離計測に用いることとする.

9. まとめ

本稿では、2つの魚眼カメラを用いた距離計測 の基礎実験を通して、距離計測において使用する 天頂角を25°~85°程度の範囲に限定すること で、安価な魚眼カメラでも距離計測が可能である という結果が得られ、提案システムの障害物検知 への応用の可能性を示した. 今後は、2つの魚眼カメラ間の姿勢や位置関係 などについて推定する方法を確立したのち、図1 に示したような形でロボットに組み込むステレオ 魚眼カメラを構成し、全方位障害物検知システム へと発展させる.そして、実際にロボットに組み 込み、提案システムについて評価を行っていく予 定である.

参考文献

- [1] 林和哉,"画像を用いた移動ロボット向けリア ルタイム障害物検知システムの開発,"東京工 業高等専門学校専攻科電気電子工学専攻 平 成24年度特別研究論文,2012.
- [2] 金珍向, 久保守, 村本健一郎, "円周魚眼カメ ラのマルチベースラインステレオ法による全 天3次元計測,"電子情報通信学会技術研究報 告, Vol.107, No.538, pp.249-254, 2008.
- [3] つくばチャレンジ · つくば市, つくばチャレ ンジ実行委員会,

http://www.tsukubachallenge.jp, 2013.

- [4] 中野誠士,李仕剛,千葉則茂,"球面モデルに 基づくしま模様パターンを用いた魚眼カメラ の校正,"電子情報通信学会論文誌, Vol.J90-D, No.1, pp.73-82, 2007.
- [5] 加瀬翔太,光本尚訓,新垣洋平,下村倫子, 梅田和昇,"複数の魚眼カメラを用いた俯瞰画 像生成手法の構築,"精密工学会誌,Vol.75, No.2, pp.251-255, 2009.

(平成25年10月30日 受理)
3次の統計量を用いたパタン類別法に関する検討

鈴木雅人*, 北越大輔*

A Study on Pattern Categorization Method Using the Third Statistics Value Masato SUZUKI, Daisuke KITAKOSHI

Mahalanobis distance is a quadratic descriminant function which can reognize handprinted characters in high accuracy by approximating the destribution of each principal component with normal distribution. In recognition of a low quality character, however, such approximation is difficult. In this paper, we improve the recognition accuracy by extracting some components with large skewness from principal components of middle class, and applying the asymmetric partial normal distribution and JohnsonSU distribution. We experimented in character recognition for 1052 types of letters of a hiragana and an educational chinese character. As a result, it is found that a recognition accuracy is improved about 10 points, and that our proposed method is useful for recognization of low quality handprinted characters.

Keywords : Skewness component analysis, Asymmetric partial normal distribution, JohnsonSU distribution, handprinted chinese character recognition

1 はじめに

主成分分析は、多変量特徴量から分布のばらつ きが大きい成分を抽出する手法の一つである。こ れらの成分を用いたマハラノビス距離 (MMD) や ベイズ識別関数は、手書き文字の高精度な識別に 有効であり、楷書で丁寧に書かれた手書き文字(高 品質文字)であれば、非常に高い精度で認識するこ とが可能である [1]. しかし, 我々がメモをとると きに書くような文字(低品質文字)は字形が多様で あるため、認識精度は著しく低下してしまう、こ れは、特徴量のばらつきが大きいために、字種ご との特徴量分布が他字種のそれと重なってしまう ためである.手書き文字認識では、字種ごとの特 徴量の母集団分布の推定精度を高めるため,数多 くの学習用データを用意し、中心極限定理によっ て母集団分布が多変量正規分布に従うという仮定 のもとで識別関数の設計を行うことが多い. しか し、低品質文字を扱う場合、実際に十分な学習用 データが用意できたとしても、標本分布に対して 正規分布をあてはめることは難しく、多変量正規 分布を前提としている MMD などの二次識別関数 には、識別関数としての限界がある。

このような問題を解決するため,MMD で用い る共分散行列の固有値や固有ベクトルを補正する 方法が提案されている [2].また,著者らは高品質 文字の認識において,特徴量の分布に歪みがある ことに着目し,非対称マハラノビス関数を用いた 手法 [1] も提案している.しかし,いずれの手法も 直接的に低品質文字の認識精度を改善することを 目的としたものではないため,文字品質低下に伴 う認識精度の低下は避けられないのが現状である.

母集団分布をより正確に推定するためには、3次 以上の統計量も考慮する必要があるが、高次の統 計量は解析学的な扱いが困難であり識別関数の設 計も難しくなる.そこで本稿では、高次の統計量 のうち、分布の非対称性に一番寄与する3次の統 計量(歪度)に着目し、低品質文字の認識精度改善 を試みる.

歪度最大基準に基づいて選択した特徴量に対し, 部分的正規分布 [3] および JohnsonSU 分布 [4] を適 用し、識別関数を設計することで文字の歪みによる 誤認識率を緩和できることを実験により検証する. 以下では、2 で部分的正規分布および JohnsonSU 分布を用いた識別関数の設計法について述べる.3 では提案アルゴリズムを用いた検証実験の内容と 結果について述べ、4 で結論をまとめる.

2 歪度を用いた識別関数の設計

低品質文字の認識においては、分散の大きい順 に主成分を並べたときに、中間層の主成分の中で 歪度の大きい成分が認識精度に悪影響を及ぼして いることが知られている。そこで本稿では、歪度 最大基準に基づく座標系の構築法(歪度成分分析) を用いて、中間層の主成分からなる部分空間の座 標軸を再構成する。そして、歪度の大きな成分に 対して、部分的正規分布またはJohnsonSU分布を あてはめることで MMD を改良し、低品質手書き 文字の認識に有効な識別関数を設計する。

2.1 歪度成分分析

歪度成分分析は、多変量データに対して歪度の 大きな判別軸を逐次的に決定する方法で、その概 要は次の通りである。

- d 次の特徴空間を d 1 個の角度を用いて極 座標系式 (θ₁, θ₂,..., θ_{d-1}) で表し,分割が必 要な角を n 区間に分け,特徴空間を小さな局 所領域に分割する (詳細は文献 [3]).
- 2. *n^{d-1}* 個の小領域に対して局所探索法 [5] を適 用し,その領域における A の最適解を求める.
- 3. 全ての小領域に対して求めた解の中から, もっ とも歪度が大きくなる *A*を選択する.
- 4. 学習用データ $\vec{x_k}$ に対し, $\vec{x_k} \vec{A_1}^t \vec{x_k} \vec{A}$ を改 めて $\vec{x_k}$ と置き, 同アルゴリズムを繰り返す.

2.2 部分的正規分布のあてはめ

歪度成分分析によって得られた歪度の大きな主 成分に対し,正規分布に歪みを加えた分布関数をあ てはめ,MMDを改良する.本稿では図1のように, 分散の異なる正規分布を境界x = mでつなぎ合わ せることで,正規分布に歪みを加えたような分布を



図 1: 部分的正規分布の確率密度関数

用いる. これを部分的正規分布 (Asymmetric Partial Normal Distribution) と呼び, $A(m, \sigma_1, \sigma_2)$ で 表す. 値 x = m における連続性と, 確率密度関数 の性質を用いると, $A(m, \sigma_1, \sigma_2)$ の確率密度関数 は次のようになる.

$$p(x) = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{2\pi}(\sigma_1 + \sigma_2)} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_1^2}\right) \\ (x \le m \ \mathcal{O} \succeq \mathfrak{S}) \\ \frac{2}{\sqrt{2\pi}(\sigma_1 + \sigma_2)} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_2^2}\right) \\ (m \le x \ \mathcal{O} \succeq \mathfrak{S}) \end{cases}$$
(1)

この確率密度関数の期待値 μ ,分散 σ^2 , 歪度 s は 次のようになる.

$$\mu = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} (\sigma_2 - \sigma_1) + m$$

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 - \frac{2}{\pi} (\sigma_2 - \sigma_1)^2$$

$$s = \frac{1}{\sigma^3} \left\{ \frac{2}{\sqrt{2\pi}} (\sigma_1^3 - 4\sigma_1^2 \sigma_2 + 4\sigma_1 \sigma_2^2 - \sigma_2^3) + \frac{8}{\pi\sqrt{2\pi}} (\sigma_2 - \sigma_1)^3 \right\}$$

(2)

学習データから得られる推定量を式 (2) に代入す れば、 m, σ_1, σ_2 を未知数とする非線形連立方程式 が得られるので、非対称正規分布 $A(m, \sigma_1, \sigma_2)$ を 定めるための全てのパラメータを計算することが できる. このようにして得られた部分的正規分布を用いて, MMDを改良すると次式が得られる.

$$D_{s} = \sum_{k \in \chi} \frac{\{(\vec{x} - \vec{m})^{t} \vec{e_{k}}\}^{2}}{\lambda_{k} + b} + \sum_{k \in \Omega} \varphi(\vec{x}, \vec{e_{k}}, m_{k}, \sigma_{k1}, \sigma_{k2})$$
(3)

ここに、 Ω は中間層の主成分の番号の集合であ り、 χ はそれ以外の番号の集合である.また、 $\varphi(\vec{x}, \vec{e_k}, m_k, \sigma_{k1}, \sigma_{k2})$ は、k番目の軸 $\vec{e_k}$ に部分 的正規分布 $A(m_k, \sigma_{k1}, \sigma_{k2})$ をあてはめたときの、 $\vec{x}^t \vec{e_k} \ge m_k \ge 0$ マハラノビス距離である.

2.3 JohnsonSU 分布のあてはめ

式(2)において歪度sの取りうる範囲は

$$0 \le |s| \le \frac{8 - 2\pi}{\pi\sqrt{2\pi}} \cdot \left(\frac{\pi}{\pi - 2}\right)^{\frac{3}{2}} \simeq 0.995 \qquad (4)$$

となるため、 $A(m, \sigma_1, \sigma_2)$ は上式の範囲より大きい 歪みをもつ分布を表現することはできない。そこ で、どのような歪度を持つ標本でも分布のあては めが可能な分布として、JohnsonSU 分布を検討す る. JohnsonSU 分布は、4つのパラメータ $\gamma, \delta, \lambda, \xi$ をもつ分布で、確率密度関数 p(x) は次式で与えら れる.

$$p(x) = \frac{\delta}{\lambda\sqrt{2\pi}\sqrt{z^2+1}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\gamma+\delta\sinh^{-1}z\right)^2\right\}$$
$$\hbar t \xi \, \mathcal{L}, z = \frac{x-\xi}{\lambda} \tag{5}$$

p(x)の期待値 m,分散 σ^2 , 歪度 β_3 ,尖度 β_4 は, 次式で与えられる.

$$m = \xi - \lambda \sqrt{\omega} \sinh \Omega$$

$$\sigma^2 = \frac{\lambda^2}{2} (\omega - 1) (\omega \cosh 2\Omega + 1)$$

$$\beta_3 = \omega (\omega - 1) \frac{\{\omega(\omega + 2) \sinh 3\Omega + 3 \sinh \Omega\}^2}{2(\omega \cosh 2\Omega + 1)}$$

$$\beta_4 = \frac{\omega^2 (\omega^4 + 2\omega^3 + 3\omega^2 - 3) \cosh 4\Omega}{2(\omega \cosh 2\Omega + 1)^2}$$

$$+ \frac{4\omega^2 (\omega + 2) \cosh 2\Omega + 3(2\omega + 1)}{2(\omega \cosh 2\Omega + 1)^2}$$
(6)

ここに $\omega = \exp(\delta^{-2}), \Omega = \gamma/\delta$ である. 学習デー タから,これら 4 つの統計量の不偏推定量を求め れば,上式の非線形連立方程式を解いて,4 つの パラメータ $\gamma, \delta, \lambda, \xi$ を求めることができるので, JohnsonSU 分布のあてはめが可能となる. e_k 軸 上で未知入力文字 \vec{x} との距離を求めるためには, 分布のピークを中心とし,ピークと \vec{x} との間のマ ハラノビス距離を計算する.この計算式を式 (3) 第 2 項に置き換えることで,MMD の改良を行う ことができる.

3 検証実験

歪度成分分析における角度分割数 n を n = 15 とし、歪度の大きな成分に対して部分的正規分布 をあてはめ、識別関数を式 (3) のように設計して 認識実験を行った.認識対象は、平仮名および教 育漢字の合計 1052 字種である。各字種ごとに 200 サンプルの文字画像を用意し、そのうち 180 サン プルを学習用データとして用い、残りの 20 サン プルを認識実験用データとして用いた.図2は認 識実験結果をまとめたものである。尚、歪度が式 (4) の限界値を超える場合には、分布のあてはめに 用いる関数を非対称正規分布 [1] で代用した、実



図 2: 認識実験結果

験では、従来の MMD による認識精度と、提案手 法による認識精度の他、MMD で用いる各主成分 に対して、そのまま部分的正規分布をあてはめて MMD を計算した場合の結果も併記した. この結 果によると、MMD で用いる主成分に対して、部分 的正規分布を適用するだけでも、認識精度がわず かに改善することがわかる. 特に大きなひずみを もつ主成分が多い字種に関しては、改善率が高い

こともわかった。ばらつきの小さい主成分におい ては、主成分軸および分散の計算結果に大きな誤 差が含まれているため、固有値にバイアスをかけ ることで分散に含まれる誤差は軽減されるが、中 間層の主成分軸の誤差は軽減されない. そのため, 各主成分に部分的正規分布をあてはめた手法の改 善率は、提案手法のそれよりも低くなっていると 推察できる. また, 平仮名・漢字いずれの場合にお いても、提案手法の平均認識率が一番高いが、特 に提案手法による改善率は、平仮名の認識に顕著 に表れている。196次元という高次元の特徴空間 において、その原因や傾向を解析することは難し いが、画数の少ない漢字においても改善率が高い 傾向にあることから, 方向線素特徴量を用いた識 別において、各主成分の歪みは、画数の少ない文 字で大きく現れ、その歪みを改善して識別を行う ために、提案手法が有効にはたらいていると考え られる。一方, JohnsonSU 分布を用いた実験では, 全体の認識精度が88.6%まで改善され、母集団分 布の推定がより精度よく実現できたと考えられる が、ピークとなる値の算出や標準偏差を考慮した マハラノビス距離の計算が複雑になるため計算量 が膨大となることがわかった.

4 結論

方向線素特徴量などを用いた高次元特徴空間に おいて、マハラノビス距離を用いた識別手法は、各 主成分軸における分布が正規分布であることを仮 定している.学習用データを大量に収集すること で、この仮定の妥当性を裏付けることは理論的に 可能であるが、実際には、文字品質や収集にかか るコストなどにより、正規分布を仮定するのが難 しい場合が多い.

本稿では、このような問題に対処するために、母 集団分布をより正確に把握することを目的として、 3次の統計量(歪度)を考慮する方法を提案した.提 案手法は、認識精度に対する歪みの影響が大きい中 間層の主成分を対象として歪度成分分析を適用し、 得られた軸に対して部分的正規分布やJohnsonSU 分布をあてはめることで、マハラノビス距離の計 算をより精度高く行おうとするものである。今回 の実験では、その効果がより強く期待できると考 えられる部分空間に適用範囲を限定し,計算可能 な範囲で実験を行った.その結果,平仮名および 教育漢字1052字種を対象とした認識実験では,従 来の MMD に比べて約10ポイントの認識率を改 善することが可能となり,有効性を確認すること ができた.部分的正規分布に比べて JohnsonSU分 布の方が,より多様な分布に対応できるため,わ ずかに認識精度が高いが,計算量は JohnsonSU分 布の方が遥かに大きい.今後は,計算量の削減法 を検討しながら,提案手法のより効果的な適用方 法を検討する必要がある.

尚,本研究の一部は科学研究費補助金 (基盤研究 (C) 課題番号 22500170) および,柏森情報科学 振興財団研究助成金 (K24 研 XVII 第 396 号)の助 成によるものである.

参考文献

- [1] Nei Kato, Masato Suzuki, Shinichiro Omachi, Hirotomo Aso, and Yoshiaki Nemoto, "A Handwritten Character Recognition System Using Directional Element Feature and Asymmetric Mahalanobis Distance", IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence, vol.21, no.3, pp.258-262, Mar. 1999.
- [2] 岩村雅一,大町真一郎,阿曽弘具,"有ベクト ルのずれの影響を軽減する固有値補正法",信
 学技報 PRMU99-449, pp.93-100, Nov. 1999.
- [3] 鈴木雅人,北越大輔,松本章代,"歪度最大基 準に基づく特徴選択法による低品質手書き文 字認識手法の検討",信学技報 PRMU, Jan. 2013.
- [4] 鈴木雅人,北越大輔,松本章代, "JohnsonSU 分布を用いた手書き文字認識用識別関数の改 良", 2013 年信学総大, D-12-18, Mar. 2013.
- [5] 田中秀俊,"直交計画法を用いた局所探索法", 情処学会研究報告 MPS30-7, pp.25-28, Jun 2000.

(平成25年10月27日 受理)

体験・分析・表現の3段学習成長プロセスによる 主体的思考力を涵養する早期技術者教育

小坂敏文*, 大塚友彦**, 清水昭博***, 木村知彦****, 新國広幸****, 一戸隆久**, 西村 亮*, 城石英伸*****, 藤野 宏*****, 羽鳥広範******, 永吉真知子******, 雑賀章浩******, 新田武父******

Early Engineering Education To Cultivate the Independent Intellectual Power by 3-stage Learning Growth Process

Toshifumi KOSAKA, Tomohiko OTSUKA, Akihiro SHIMIZU, Tomohiko KIMURA, Hiroyuki NIKKUNI, Takahisa ICHINOHE, Makoto NISHIMURA, Hidenobu SHIROISHI, Hiroshi FUJINO, Hironori HATORI, Machiko NAGAYOSI, Akihiro SAIGA, Takenori NITTA

The novel educational method of considering three processes of the experience, the analysis, and the expression has been employed in the introductory part of a common technological education. This year we have adopted a new method such as the following. (1)Every time in experiments and exercises, students are asked to create a document summarizing what is important. (2)At the end of year, students are asked to make presentation summarizing what is important. According to the questionnaire students have given good evaluation to the trial that is based on the method.

Keywords : common technological education

1. はじめに

現在の中学校カリキュラムにおいては図1に示 すように技術家庭科の時間数が1960年頃に比べ て、2/3程度に、また理科も3/4程度に減少してい る。実験実習を伴う科目では、実施時間数が修得 内容に影響を与えている。また、子供たちを取り 巻く環境も変化しており、公園のシーソーやブラ ンコがなくなり、遊びを通じて物理法則を体感す る機会が激減している。一方、ブラックボックス 化されたゲーム機や携帯電話などに触れる機会が 増加し、子供たちが科学技術への深い興味を抱く 機会を阻害している。その結果、かつてのラジオ 少年に代表される技術科学に興味を持った10代 が希少となり、科学技術とイノベーションを目指 す我が国の担い手が薄くなってきている。

工業高等専門学校(高専)は、わが国で唯一、 15歳の若者を受け入れ早期技術者教育を目指し ている学校種である。高専においても現在の風潮 は否めず、科学技術に興味はあるものの、体験・ 経験が乏しく、ねじを回した経験、はんだ付けの 経験がない状態で入学してくる学生も少なくない。 新入生の中には PC,ゲーム機や携帯端末に熱中す るものの、それ以外の技術には興味を示さない学 生も含まれる。「将来の予測が困難な時代」にむけ



て,幅広い技術を学び,イノベーションを支える 人材を育てるため,早期に技術分野での体験経験 の機会を与え,興味を引出し,さらに「主体的な 学び」に進ませる仕組みが必要となっている。

東京工業高等専門学校(東京高専)では、早期 技術者教育ではあるが、早期に細分化しない教育 を目指して、2005年度よりくくり相当入試を導入 した。入学学科を限定せずに200名の新入生を入 学させ、本校の5つの専門学科に対応した、機械 工学、電気工学、電子工学、情報工学、物質工学

^{*}東京高専情報工学科 **東京高専電子工学科 ***東京高専機械工学科 ****東京高専電気工学科 *****東京高専物質工学科 *****東京高専教育研究センター

分野での共通導入教育(ものづくり基礎工学 150 時間)を40名単位のローテーションで実施してい る。そして技術者としてのリテラシを1年間学ん だ後,専門学科に配属される制度になっている。 ここで行われている技術系導入教育「(科目名)も のづくり基礎工学」は、実験・実習・演習を中心 とした体験型の教育であり、体験経験不足を補い、 その後の技術者教育につなげるものとなっている。

実験・実習・演習を中心とした主体的な学びを 促進する導入教育の課題は、しっかりと考えられ た教材・教育手法を採用しなければ、ならない。 よくまとめられた手引書のもとでは、実験・実習・ 演習はスムーズに運ぶが、学生は現象を注意深く 観察して主体的に考察することなく、手引書通り の単純作業を行うだけとなってしまう。実行可能 な難しさを保ちつつ、かつ過度に教え過ぎないよ うに注意しながら、好奇心を引き出しながら主体 的な学びへと発展させる教材・教育手法を開発す る必要がある。

一方,自分の言葉で,要点を整理する作業は, 主体的な活動を高める効果がある。また,プレゼ ンテーションを行うことは,「他の人に教えようと したとき,本人に内容が根付く」という経験につ がるため,こうした過程を意図的に教育手法に組 込むことによって一層の効果を図ることができる。

本研究では、自分で考えた方法で、経験体験を 増やし、発見や理解の面白さを味わいながら、実 習・演習に参加させるという視点で、内容の改善 を行う。そして体験から自分なりに分析・試行し、 新しいことに気づき、またそれを周囲に発表する ことで自分の新しい知識を整理するという方法を 取り入れる。

2. 「ものづくり基礎工学」

早期技術者教育の入門科目として、「ものづくり 基礎工学」は、本校1年次に5単位の通年科目と して開設されている。実習・演習は、入学してき た学生たちの技術への興味を引き出す内容、安全 に取り組むための注意事項と取り組む姿勢への助 言、技術者教育開始時に最小限の共通知識を与え る内容で構成されている。

毎年,各学科が工夫して,共通内容を意識し, 学科の特色も考えながら,実習・演習の内容を改 めており,今年度は表1に示すような内容になっ ている。¹⁾²⁾³⁾

また、年度当初におけるガイダンスは非常に重要で、この科目の意義を明確に示す役割を担っている。これからの技術者は複合融合の目を持たなければならないこと、できるだけすそ野の広い技術上の知識を修得しなければならないこと、将来の仕事の範囲を狭めないようにしておかなければならないことを伝えている。4

	表1 各学科の実習・演習テーマ
機械	0. 安全指導, 受講姿勢, レポートの書
工学	き方,評価方法
科	1. 寸法測定とテクニカルイラストレー
	ション
	2. 基礎製図
	3. 3D-CAD
	4. 鋳造
	5. CAD/CAM
電気	1. テスタの製作とテスタを使った測定
工学	(1) 半田付け指導を含む
科	2. テスタの製作とテスタを使った測定
	(2) 体感的な電流・電圧・抵抗の説
	明を含む
	3. PIC マイコンを用いた電子工作(1)
	アセンブリ言語を含む
	4. PIC マイコンを用いた電子上作(2)
∓ →	5. 太陽電池の特性測定
電子	1. 抵抗と直列回路
上字	
科	3. 電波をつかもう
	4. 増幅の任祖み
(主 主)	 5. 尤工レクトロニス人門 1. コンパピークガニス・ハクス(00)
1月 報 て 学	1. コンヒュータク $) / 1 = \sqrt{(GG)}$ プロガラミングの甘木(C = 55)
上子	クログノミングの基本(C 言語) 9 動きのなる CC(C 言語)
17	2. 動きのめるもの(し言曲) 3. マイクロコンピュータ 表示法置と
	3. ペイノロニノビューク 衣小表直と スイッチの利田(C 言語)
	4 マイクロコンピュータ センサの利
	用とモータの制御(C 言語)
	5. 音の波形と分析
物質	1. 物質の分離と精製 基本的な実験器
工学	具の操作
科	2. コンピュータ化学/環境分析/生物の
	観察
	3. 酸化還元反応
	4. 酸塩基と中和反応
	5.物質の変化と反応

3. 実施担当者の問題意識

各学科教員,総合教育センターの技術職員が実際の実習・演習を担当しているが,これまでの教育の中でいくつかの問題点が見えてきている。

途中で技術分野に興味を持てなくなってしまう, レポートが提出できないといった学生は毎年数人 出てくるが,これはそれぞれ個別に対処するしか ない。むしろ,手引書通りに実験・演習をこなし, 実習・演習内容が何も残らない学生,やらされ感 だけが残り,受け身で実験・実習に臨んでいる学 生が少なからず目立つようになっているのが問題 と感じられている。

4. 今年度の実施方法

今年度の方向として、「やらされ感」ではなく、 主体的な取り組みをさせること、最後に自分なり にまとめて発表することでやったことの整理をさ せるという考え方のもとで、次の2点を実施する こととした。

(1)毎回の実習・演習において、重要だと感じたことを3つまとめて図2に示す「今日のテーマのまとめ」フォーマットに従い提出させる。(これは採点対象ではない。)

今日のテーマのまとめ
テーマ名:
クラス組 番号氏名
 Q1 今日のテーマ内容で大事だと思った要点を 3 つ挙げよう。 (1)
(2)
(3)
 Q2 上記 3 つの項目が大事だと思った理由をそれぞれ書いてみよう。 (1)
(2)
(3)

図2 「今日のテーマのまとめ」フォーマット

- (2)学年の最終週では、その前の週の実習・演習について、重要だと思ったことを数人のグループごとに発表させる。発表に際して、グループ内の全員の貢献した役割について説明してもらう。学生の相互評価を取り入れる。評価項目は事前に公開しておき、評価結果は後日発表することにしている。
- 5. 現在までの進捗
- 5.1 「今日のテーマのまとめ」に関して 学生から提出された「今日のテーマのまと め」で取り上げられた要点は学科ごとに次の ようなものであった。

(1)機械工学科 ノギスとマイクロメータの 使用法,正確な寸法測定法,熱膨張による誤 差,図面の重要性,投影法,3面図,製図用 文字,製図機械使用方法,等角図,展開図, 3DCADの便利さ,幾何拘束,立体化手順, マウス操作,フィーチャー,鋳込み手順,防 具,安全第一,服装,3S(清掃,整理,整 頓)等が挙げられたが,意外に多かったのが, 正確で丁寧な作業,片付けの重要性,考えな がらの作業,安全,防具,非常停止ボタン等 で安全で正確に効率よく行動するエンジニア の姿勢に関する事柄であった。

(2) 電気工学科 はんだ付け技術と安全な使 用方法,テスタの使い方,太陽電池の種類と 性質,データのグラフや表へのまとめ方,有 効数字の考え方などが要点として挙げられた。 また,先生の話をしっかり聞く,集中して作 業する,あわてないなどテーマの本質とは直 接関係ない内容を要点として挙げた学生もい た。

(3) 電子工学科 電源や測定機器の取扱い注 意,法則,計算式,単位,グラフの書き方な どの事項が多く挙げられた。さらに電位基準 やコンデンサのしくみ,抵抗のカラーコード, OP アンプのピン配列など学生によってさま ざまなポイントが挙げられた。

(4) 情報工学科 CG プログラミングで事前 の座標計算,コンピュータ操作やプログラム 記述のこまかな注意事項,まだ習ったことの なかった 2 進法表記などが挙がっており,ほ ぼ予想通りだが,タイピングを挙げる学生な どもおり,教員の予想を超えたものもあった。 (5) 物質工学科 それぞれのテーマの内容や, 安全,基本的実験操作やチームワークに関す ることなどが多くあげられた。

総じて,実習・演習・実験のポイントを押さえ たものになっているが,学生にしてみれば初めて の経験なので各個人の個性に応じて重要だと感じ たポイントにはばらつきがある。

5.2 学生からの評価(暫定)

今年度の取り組みに関する学生からの評価に関 しては、学年末の実施を予定しているが、Webア ンケートの用意ができた情報工学科での「今日の テーマのまとめ」に関するアンケート結果がこれ までの分が集計されている。各クラス2回目の演 習終了時(夏休み前)までのアンケート集計結果 は次の通りとなった。

この結果を見ると,要点をまとめることを念頭 に実習・演習をすすめることについて,主体的に 取り組ませることに成功していると考えられる。 (1)要点は何かを考えながら演習を行った



(2)最後に振り返って要点は何だったかを考えるとき、その日の演習内容が頭の中で整理された。



(3)要点をまとめる作業は自分にとって有意義だ。



(4)要点をまとめる作業は学生を主体的に参加させることになると思う。



(5)今回の演習で、自分の知識技能が広がった。



(6)今回の演習はいやだったが義務感で作業した。



6. 次年度に向けて

次年度に向けて,次のような方向で考えている。 (1)「分析」として、課題等について主体的に考 えるようなテーマを各分野で開発する。

(2)「本日のテーマのまとめ」3項目については、 来年度以降、WEBで公開することも考える。

(3) 来年度以降に各分野が発表できるようなテ ーマややり方を考える。論理回路入門コース,オ ームの法則入門などの案が出ている。

7. まとめ

学生が本校に入学し始めて技術について学ぶ科 目において、学生が前向きに取り組めるような工 夫を凝らし。前向き主体的に取り組めるようにな ってきた。今回は第1報であり、まだこの手法の 一部のみの報告になっているが、今後さらに予定 した改善を進め、学生からの評価を受ける予定で ある。

謝辞

本研究の遂行に当たり,各学科の担当教員,東 京高専教育研究センタの職員の皆様のご支援をい ただいております。感謝申し上げます。

本研究は科学研究費補助金基盤 C 一般,課題番号 25350217-0001 の支援を受けたものである。

参考文献

1)一戸隆久,大塚友彦他,東京高専電子工学分野における 新入生向門導教育の授業改善,全国高専教育フォーラム教 育研究活動報告会概要集, pp. 297-298, August, 2012 2)清水昭博他,学科を超えた全新入生対象の機械系ものづ くり実習としての自動車模型製作と滑走コンテスト,全国 高専教育フォーラム教育研究活動報告会概要集, pp. 35-36, August, 2012

3)城石英伸,清水昭博,大塚友彦,西村亮他,「ものづくり 基礎工学」における安全教育の推進と ビジュアル教材の 開発に向けた取り組み,東京工業高等専門学校研究報告書, 第42(2)号, pp.137-140, 2011

4)大塚友彦・清水昭博・西村 亮・城石英伸他,高専1年 生専門導入教育「ものづくり基礎工学」受講者の意識調査 とその分析,工学・工業教育研究講演会講演論文集, pp.262-263, August, 2009

(平成25年10月31日 受理)

ヘテロジニアスマルチホップ通信と探索連接ロボット制御への応用

田中 晶*

A Study on Heterogeneous Multihop Communications Applied to Group Robot Exploration Akira TANAKA

Multihop communication systems designed with easily available or obtainable composing devices and communication media have been studied in my laboratory. Experimental systems are developed and we obtained many good results. In addition to multihop advantage such as no-large-scaleequipment, our system can set and used by anybody in everywhere anytime. We already solved important problems specific to multihops, and we are developing applied system such as grouprobot-control with interpersonal communications. Especially, by our designed user-friendly interfaces including barrier-free operations, our multihop systems are appropriate to communication-andcontrol in disaster site as well as in neighboring areas. In this paper, our recent results on multihop communications focused on group-robot-control are presented.

Keywords : mobile multihop communications, heterogeneous communications, routing, multicast, shared memory, group robot control

1. はじめに

著者研究室では、容易に入手可能な通信媒体を用 いて簡易に通信ネットワークを構築できる身近なマ ルチホップ無線通信システムの研究を進めており、 実験システムを作製し検証を行ってきた^{1),2)}.大規 模なシステムを用いることなく、身近で容易に入手 できる素材や装置により、利用者が自ら周囲に簡易 なネットワークを構築でき、多くのユーザが利用で きる多方式のインタフェースと通信方式を備えてい



Fig. 1 Mobile multihop communication

るので,近隣での通信,或いは,災害時の緊急用通 信,バリアフリー通信など,用途は広い.対人通信 や家電リモコン制御^{1),2)}だけでなく連接ロボット制 御^{3),4),5)}にも適用・検証した.これらのマルチホッ プ通信システムでは,目的に沿った範囲程度に限定 してはいるが,複数の移動する端末を対象にリンク を連ねて通信するマルチホップにおける重要課題も 解決し実験システムで機能を実証済みである.

本稿では、応用例の一つとして特にユーザに親和 性の高いインタフェース(バリアフリー化)を有す る環境適用マルチホップ制御による連接ロボット制 御の基礎実験評価結果に関して報告する.

2. マルチホップ移動体無線通信システム

一般の通信では図1(i)の経路のように大規模なネ ットワークを介し基地局や幾つかの中継局を経由し てデータや音声が送られるが、マルチホップ移動体 無線通信システムでは図1(ii)のように端末間だけで 情報を伝達する.目的や周囲の状況に応じて経由す る端末の種類も様々で、人が直接操作しない中継端 末や受信先に送信することになる.さらに、送受信 端末だけでなく中継器も移動するので,周囲の状況 常のネットワークが利用できない場合に効果を発揮 にも対応した最適な経路の選択等が課題となりこれ すること、を目標にしており、ロボット操作も同様 までにも多くの研究成果が出されている. 大規模ネ の目標に沿うように設計し, レスキュー活動にも応 ットワークが提供する高度・複雑な機能は利用でき 用できるよう検討している. そのため, どんな状況 ないことや、端末の処理能力等に起因する問題の解 でもコマンド入力可能でマルチホップ伝送できる、 決が必要になるものの,ある程度の限定された領域 換言すれば,バリアフリー操作インタフェースを有 の中で目的を限って使用すれば、多くの人が自分の し、誤りの少ない最小伝送データ単位によって複数 周りにネットワークを用意できる便利な通信方法で 種類のリンク経由で送信できなければならない. ある.一昨年度までの著者研究室の成果を元に,著 3.2 マルチホップマルチメディア伝送 者,及び,本年度と昨年度著者研究室所属学生(小 <画像>設計済みのマルチ/ユニキャストマルチメ 林正崇君,野崎博樹君,安藤岬君,門脇雄治君,伊ディアマルチホップ伝送 1),2) (図2参照) は処理負荷 藤総一郎君, 岡野慎史君) が設計したマルチホップ 低減のためメディア種類によらず同一の伝送方式を システムとその応用先の一つとして,3章で連接ロボ 採っていて,その反面,一度に送信できる画像デー べ,4章でロボット制御通信の拡張にも適用する情報 た. そこでより広い状況で利用できるよう文字デー 共有マルチホップクラスタ制御や連接対象ロボット タファイルを連結するハンドラを作製し送信可能サ 行動再生機能の設計について述べる.

3. 利用状況に着目したマルチホップ無線通信シス テム構成技術例

3.1 設計条件

著者研究室で設計済みの、多くの人が常に携帯し ているスマートフォンや仕様変更が容易な FPGA・ マイコンを送信機/中継器とするマルチホップ無線 システムの一応用例として, 連接ロボット制御シス テムを設計している. ユーザ親和性のために, 当面 の操作端末としているスマートフォンを対象に次に 示す幾つかの情報入出力と通信方式の設計を行った. (a) 通常のタッチ入力による操作,(b) 音声コマンド入 カによる操作, (c)予めのプログラミングに従った動 作指示, (d)対ロボット(つまり操作コマンド)対人 (つまり音声)両方の並行通信が可能.我々のマル チホップシステムは利用範囲が限られている一方, 誰でもが使用できること、特に非常時・災害時の通

ット制御用,特にユーザインタフェースについて述 タサイズは文字データ量の制限値が上限となってい イズを無制限にした.受信側においては、大容量フ ァイルを受信するとその間にアプリケーション受信 と Android カーネル受信の同期が外れてしまうので, 同期合わせ処理を追加し、連続して大容量ファイル を受信できるようにした. 同期処理(同期合わせ) は、サイクル数をカウントして一定数でリセットす る方法が容易であるが新たな処理追加になる. そこ で,フレーム化手法を用いてファイル細分サイズを 同期外れが発生しない1KBとして、もともとの通信 処理を活かして処理量を増加させることなく同期外 れを防止し、送受信ともにファイルサイズ無制限と した.

> 実際にマルチホップ転送実験を行って、送信速度 を計測した結果を図 3 に示す.ファイルサイズが小 さいと画像ファイルに対してのハンドラ起動とフレ ーム細分初期化処理量の占める割合が高く転送速度 が小さいが、ファイルサイズが大きくなると、所定 速度が得られることが分かる.また,1ホップ伝送時



Fig. 2 Smartphone multihop multimedia chat system



Fig. 3 Transfer time ratio

間を既存のファイル交換ソフトのと比較すると,同等 ようバリアフリー/言語非依存伝送も設計し組み込 かそれ以下の時間で伝送できることから、本システんだ. ムのファイル転送時間は良好であると言える 7).

<音声>音声コマンド入力による操作では、音声信 ベル超の音)を検出するとその持続時間を測定し、 号をマルチホップ伝送すると広い帯域を使用してし 持続時間に応じたコマンドと解釈して対応するコー まうため, 音声認識を使いコマンドを識別し, コマ ドに変換してマルチホップ伝送し, 上記 3.2 節<音 ンドに対応したコードをマルチホップ伝送する.受 声>で述べたように受信端末がロボットに動作指示 信端末ではコードからコマンドに変換してロボット をする. 実装も実行も容易にし確実に動作するよう に動作指示をする. ロボット操作のみではなく対人 主アルゴリズムは音声レベル判定のみで設計し, コ 通信も並行して行うため,音声入力された情報も同 マンド識別が困難な場合の処理を別に設け,さらに 時に伝送する. 既に完成しているチャットによる伝 操作者の音声の特徴により感度と周期を調節可能に 送 1), 2) に加え、送信端末において音声入力された情して効率低下を防いだ. 報を特定のコードに変換して伝送し、受信端末では 備えられている受信したコードに基づき再生用ファ 人間の歩行速度程度でロボットが移動する場合,ス イルを用い再生する^{71,8}. 単語区切りの識別が困難な マートフォンに通常搭載されている Bluetooth class ため現時点で英語入力には対応できないが, 音声入 2 の範囲で命令を伝達すると約 1 秒周期で音声検出 力された情報がマルチホップ経路上は誤りが発生し を行えば約 90%の正確さでコマンド識別が可能であ にくくかつ短いコードで伝送され、受信側では元通ることがわかった8. りに再現可能である.

3.3 音声長によるマルチホップロボット操作

上記 3.2 節において、日本語で会話ができる人以 外でもマルチホップを使ったロボット制御ができる



図4に示すように操作端末で音声(或いは所定レ

小型自走ロボットに適用して実験を行った結果,

4. 災害時等のためのロボット制御マルチホップ通 信の拡張

4.1 ヘテロジニアスと信号精度による制御

連接ロボットを災害現場等に適用する場合等,共



Fig. 5 Heterogeneous multihop communication system

有メモリによる相互関係の認識 9や周囲に最適なロ ボット間リンクを自律的に選択できることが望まし い. そのため,図 5 に示すヘテロジニアスマルチホ ップ中継装置も Field Programmable Gate Array (FPGA)上で設計した¹⁰⁾.ここで用いる伝送媒体選択 や一昨年度に設計済みの移動予測による消費電力抑 制 2,4,5)等において端末距離によって自律制御を行う 場合,これまでは受信信号強度 Received signal strength indication (RSSI)を用いてきたが,より効 率が高くさらに単独で自律予備制御も行える信号精 度による制御を設計し実装した¹¹⁾(図6参照).

4.2 クラスタ化とロボット行動再生による制御情報 量の抑制

災害等の状況を想定すると、ある小さな範囲で情報を共有する必要がありクラスタ化は必須である. しかしながら、マルチホップでは多数の制御情報が送信されてしまうので直接のリング形成を避け、避難所での連絡等に適した階層併用形リング並びにチェイン状にクラスタ化している¹²⁾.また、マルチホップ連接している個々のロボットを制御するには、ホップ数が増大すると本来の通信制御に加えて大量のロボット操作情報が送受されてしまう.そのため、既に設計済みのルーティングによる制御情報量抑制方式^{2),4),5)}に加えてロボット制御用の情報量制御として、さらに、通信距離の延伸目的のため、連接ロボットがそれぞれ自律的に追随する先行ロボット行動再現機能を設計している¹³⁾.

5. むすび

これまでに著者研究室で設計したヘテロジニアス マルチホップ移動体無線通信システムに関し,特に 周囲の状況に応じた最適な制御・媒体を選択して複 数のロボットを連携操縦できる制御システムへの応 用技術を中心に述べた.通信精度を直接用いた制御 を採り,バリアフリーインタフェースでマルチメデ ィア伝送が可能で,対ロボットのみならず対人通信 や情報共有も同一のシステムで並列して行えて自律 的通信距離延伸が行え,災害現場等への適用も期待 できる.

謝辞

本研究の一部は,東京工業高等専門学校の平成 24年度重点配分経費により行われた.

参考文献

 田中晶, "マルチホップ移動体無線通信の一検討 ー身近な通信システムを目指してー,"東京工業高



Fig. 6 Signal accuracy detection for autonomous location control

等専門学校研究報告書, No.43(2), pp.127-133, Mar. 2012.

- 田中晶, "ヘテロジニアスマルチホップ移動体無線 通信の一検討,"東京工業高等専門学校研究報告書, No.44(2), pp.105-108, Mar. 2013.
- 3)田中晶, "ヘテロジニアスマルチホップロボット制 御無線通信の一検討," 2012 年信学ソ大(通信)講 演論文集, No. B-5-40, p404, Sep. 2012.
- 田中晶, "ヘテロジニアスマルチホップロボット群 制御無線通信の研究—身近な素材によるマルチホ ップ通信の応用—," 2013 年信学技報, No. AN2012-74, pp.137-142, Mar. 2013.
- A. Tanaka, "Locally exploitable heterogeneous multihop communications applied to cooperative-robots," Proc. 5th Int'l Conf. on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2013), No.7A-5, pp.321-326, Da Nang, Vietnam, Jul. 2013.
- 6) Bluetooth File Transfer https://play.google.com/store/apps/details?id=it. medieval.blueftp&hl=ja 2012/10
- 7) 小林正崇, "携帯電話の Bluetooth を用いたマルチ ホップ通信におけるファイル転送の拡張とデータ 通信の研究," 2012 年度東京工業高等専門学校卒業 論文, Mar. 2013.
- 8) 野崎博樹, "携帯電話の Bluetooth を用いたマルチ ホップ通信における音声通信の研究," 2012 年度東 京工業高等専門学校卒業論文, Mar. 2013.
- 9) 田中晶, "マルチホップ無線通信におけるノード識別方式の一検討,2011年信学ソ大(通信)講演論文集, No. B-5-87, Sep. 2011.
- 安藤岬, "マルチホップへテロジニアス無線通信 の研究," 2012 年度東京工業高等専門学校卒業論文, Mar. 2013.
- 11) 門脇雄治, "マルチホップ通信移動予測システム

の相対的測位の研究,"2012年度東京工業高等専門 学校卒業論文, Mar. 2013.

- 12) 伊藤総一郎, "Bluetooth マルチホップ通信を用 いた基地局の通信緩和," 2013 年度東京工業高等専 門学校卒業論文, Mar. 2014. (予定)
- 13) 岡野慎史, "Bluetooth マルチホップ通信における自走中継機による通信距離の拡大の研究," 2013 年度東京工業高等専門学校卒業論文, Mar. 2014. (予定)

(平成25年10月31日 受理)

電子透かしコンテストの紹介

小嶋徹也*

Introduction to Digital Watermarking Competition

Tetsuya KOJIMA

Digital watermarking is one of the technologies to hide secret information to digital media such as image, video and audio files, in a manner where such secret information cannot be recognized by human recognition systems (HRS). Usually, digital watermarking is used for copyright protection, and it is required to protect the digital contents against any illegal use and attacks. However, the criteria to evaluate the quality of the digital watermarking algorithms have not been established. Since 2012, annual watermarking competition has been held by the committee for information hiding and its criteria for evaluation. This competition can also be used for PBL (problem based learning).

Keywords : information hiding, digital watermarking competition, PBL, copyright protection

1. まえがき

情報ハイディング(information hiding)とは, 人間の知覚によって認識できないような方法で, 秘密情報をデジタルコンテンツに隠ぺいする技 術である¹⁾。この技術では,デジタルコンテンツ の品質を極力損なわないように情報を埋め込む こと,および埋め込まれた情報を正確に抽出する ことが求められる。電子透かしは情報ハイディン グ技術の一種であり,主にデジタルコンテンツの 著作権保護など,デジタルコンテンツ自体を不正 な利用や攻撃から守るために使用される。

これまでに情報ハイディングや電子透かしに 関する多くの研究成果が報告されているが,多く の研究者は,独自の評価基準によって電子透かし 方式の特性を評価しており,公平な比較や特性検 証が行なわれてきたとは言い難い。一方で,もう 一つのデジタルコンテンツ保護技術である暗号 技術には明確な評価基準があり,その基準を満た した方式が世界中で広く利用されている。

この問題に対し,情報ハイディング技術に関す る評価基準の制定,およびその評価基準を用いて 情報ハイディング技術の向上を実現できるスキ ームを確立することを目的として,電子情報通信 学会の第二種研究会である情報ハイディング及 びその評価基準委員会(IHC 委員会)²⁾が設立さ れた。同委員会では,2012年より,同委員会が定 めた評価基準を超える電子透かし方式を公募す る電子透かしコンテストを実施している。一方, 学生教育の現場において,このようなコンテスト への応募を目的とすることで,学生の意欲や能力 を向上させ,教育的効果を高めることは,問題解 決型学習(PBL: problem based learning)の一環と しても重要である。

本稿では、電子透かしコンテストの背景や評価 基準,これまでのコンテストの結果などを紹介し、 PBLの一環として、高専生に本コンテストへの応 募を目標とさせる場合の手法や問題点について 考察する。

2. 情報ハイディング

情報ハイディングとは,情報隠ぺい技術とも呼 ばれ,秘密の情報を密かに忍ばせることや,通信 自体を隠ぺいする技術のことである。情報ハイデ ィングの歴史は古く,紀元前にヘロドトスが著し た『歴史』には,ろう板の表面のろうを削り取っ た後に秘密のメッセージを刻み,再びろうで覆っ てメッセージを隠した例や,奴隷の頭皮にメッセ ージを刺青として彫り,頭髪が生えそろうのを待 って伝令として送った例などが紹介されている¹⁾。 また,誰もが幼少期に遊んだ経験があるであろう 「あぶり出し」も,広い意味では情報ハイディン グの一種と考えられる。現代のデジタル社会にお いては、デジタルコンテンツを対象とした情報ハイ ディング技術が用いられる。デジタル情報ハイディ ングにおいては、コンテンツの品質を極力損ねない ような方法で秘密情報を埋め込むこと、および埋め 込まれた情報を正確に抽出することが求められる。

一般に、情報ハイディング技術は、その目的や用 途に応じて二種類に分類される。埋め込まれる秘密 情報が重要で、その存在が知られないことが求めら れる場合は、ステガノグラフィ(steganography)と 呼ばれる。これに対し、秘密情報が埋め込まれる先 のデジタルコンテンツそのものが保護すべき対象で ある場合には、電子透かし(digital watermarking)と 呼ばれる。電子透かしは、さらに細分化することが でき、コンテンツを歪ませる攻撃に対して高い耐性 を持つロバストな電子透かし(robust watermark)と、 コンテンツの改ざん検知を目的としたフラジャイル な電子透かし(fragile watermark)がある。本稿で紹 介する電子透かしコンテストにおいては、ロバスト な電子透かしが対象となっている。

3. IHC 委員会と電子透かしコンテスト

情報ハイディング技術には、埋め込み品質、攻撃 耐性、埋め込み容量の評価が求められる。このうち、 品質評価においては、埋め込まれるコンテンツ毎に 基準が異なるため、情報ハイディング技術は静止画 像や動画像などに対する画像処理技術や、音声や音 響などに対する音響処理技術などの技術分野を含む ことになる。一方、攻撃耐性評価や埋め込み容量の 評価に対しては、暗号技術や情報理論などの分野が 情報ハイディングの背景として必要である。

現在の電子透かしに関する研究は、安全性に対す る評価基準がないために、統一した評価が行なわれ ていないという問題を抱えている。これは、情報ハ イディングがさまざまな技術分野を内包しているた め、一つの学問分野として融合されておらず、上で 述べたような種々の研究分野の連携が行なわれてい ないことが最大の原因と考えられる。さらに安全性 に対する理論的な枠組みがないために、標準化やア ルゴリズム公開が困難であるという問題もある。

このような問題に対処するため、情報ハイディン グ技術に関する評価基準の制定、およびその評価基 準を用いて情報ハイディング技術の向上を実現でき るスキームを確立することを目的として、情報ハイ ディング及びその評価基準委員会(IHC (information hiding and its criteria for evaluation)委員会)が設立さ れた。同委員会は、電子情報通信学会情報・システ ムソサイエティ傘下のマルチメディア情報ハイディ ング・エンリッチメント研究専門委員会が運営する 第二種研究会として,2011年に設立された。この委 員会の目的としては,

- 情報ハイディング技術に関する評価基準の 確立
- その評価基準を用いた情報ハイディング技術の向上
- これらを実現できるスキームの確立

● 電子透かしの安全性(の限界)の明確化 が掲げられている。

これらの目的を達成するため、同委員会は 2012 年度より、電子透かしコンテストを実施している。 コンテストでは、委員会が定めた評価基準を超える 方式が認定される。さらに、秘密情報を埋め込んで も高い品質を保持することができる方式に対して高 品質賞が、各種の攻撃を加えた場合でも正確に情報 抽出を行なうことができる方式に対して高耐性賞が 授与される。

4. 電子透かし技術の評価基準

本節では、電子透かしコンテストにおいても認定 のための基準となっている、IHC 委員会が定めた電 子透かし技術の評価基準について述べる。評価基準 には、画像に対する基準、映像に対する基準、音響 信号に対する基準の三つがあり、コンテストもこれ らの基準ごとに三部門において行なわれている。以 下、各部門の評価基準について述べる。

4.1 画像に対する電子透かし技術の評価基準

画像に対する電子透かし技術を評価するために用いる画像は、10M ピクセル以上のカラー画像が基本であり、現在、IHC 委員会では、図1に示す6枚の4608×3456 画素の画像を提示している²⁾。

6 枚の評価画像に埋め込む電子透かしはどの画像 に対しても共通で、200 ビットの2進系列とし、評 価画像全体に埋め込まれるものとする。埋め込み系 列は8次のM系列で,生成多項式は $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ とし、生成するための線形帰還シフトレジス タ(LFSR: linear feedback shift register)の初期値も IHC 委員会によって定められた 10 通りのものを使用す ることが求められている。主たる評価項目は、情報 を埋め込んだ後の画質と、埋め込まれた情報の検出 精度の二点であるが、画質評価に用いる PSNR (peak-signal-to-noise ratio)値、抽出精度の評価に用 いられるビット誤り率(BER: bit error rate)ともに、



図1:6 枚の評価画像

これら 10 通りの系列を埋め込んだ場合の平均値で 評価することとする。

埋め込み情報の抽出に当たっては、原画像および 関連情報を参照することはできない。また、評価画 像ごとに異なる情報を参照して抽出を行なうことも 認められず、どの画像に対しても共通の方式で情報 抽出が行なわれなければならない。さらに、どの評 価画像に対しても使用する秘密鍵の情報も共通とし た上で、埋め込み情報の抽出を行なう必要がある。

画質評価においては、電子透かしを埋め込んだ評 価画像に 1/30 以下のファイルサイズ (YUV422 ファ イルサイズとの比較)となる符号化・復号化を行な い、同様の符号化・復号化を行なった非埋め込み画 像(原画像) との差分が PSNR 値で 30dB 以上とな ることが、前提条件として求められる。1/30のファ イルサイズへの圧縮は以下のような2段階で行なわ れるものとする。まず、1回目の符号化・復号化で 1/15 以下のファイルサイズに圧縮し、2回目の符号 化・復号化でさらに圧縮を加えてファイルサイズを 1/2 以下とする。このとき、ファイルサイズの比較 においては, YUV422 ファイルサイズと比較して最 終的に 1/30 以下の圧縮となることとし, RGB ファ イルとの比較による 1/30 以下の圧縮ではないもの とする。圧縮のための符号化は JPEG または JPEG2000 とするが、使用ツールは任意のものでよ い。コンテストの審査過程においては主観評価を行 なうこともあるため、IHC 委員会の要請に基づいて 埋め込み後の画像を提出するよう、求められる場合

がある。

一方,検出精度の評価には、上で述べた2段階の 符号化・復号化によるファイルサイズの圧縮を行な った画像から、フルハイビジョンサイズ 1920×1080 画素の切り取りを行なった画像を使用する。切り取 った 1920×1080 画素の画像から、埋め込まれた 200 ビットの秘密情報を検出することとなる。4606× 3456 画素の評価画像6枚すべてに同一の情報を埋め 込み,2段階の圧縮後,IHC委員会により事前に指 定された矩形領域を切り出し、そこから200ビット の情報が誤りなく抽出可能であることが求められる。 フルハイビジョンの画像領域の切り抜きに際しては、 IHC委員会から10種類の矩形を形成する4頂点があ らかじめ指定されている。矩形領域を指定する方法 は、たとえば、4 頂点の座標が(x1, y1) = (16, 16)、 $(x_2, y_2) = (1935, 16), (x_3, y_3) = (1935, 1095),$ $(x_4, y_4) = (16, 1095)$ といった形式で与えられる。 秘密情報の抽出に当たっては,指定された10種類の 矩形領域すべてから埋め込まれた200ビットの秘密 情報が抽出できなくてはならない。また、コンテス トの審査過程においては、あらかじめ指定された箇 所に加えて、異なる切り取り箇所での検出結果を求 められる場合もある。すなわち、原則として、画像 のどの部分を切り抜いたとしても、埋め込まれた秘 密情報が正確に抽出できなければならないことにな る。

さらに、画像の回転や拡大・縮小といった、いわ ゆる幾何学的攻撃を加えた場合にも耐性を有し、秘 密情報の抽出が可能である場合には、コンテストの 審査において評価点に加点が行なわれる場合がある。

4.2 映像に対する電子透かし技術の評価基準

映像に対する電子透かし技術の評価基準において も、画像の場合と同様に、電子透かしを埋め込んだ 後にファイルサイズ圧縮を行なうための符号化・復 号化を行なった後に、秘密情報の抽出を行なう。2013 年度のコンテストでは、静止画像の場合とは異なり、 映像では圧縮は1段階とし、画像の切り抜きのよう なことも行なわない。

基準となる映像は ITE³動画像第一版の No.2, No.8, No.20, No.23, No.46 の 5 種類とする。埋め込む秘 密情報は,動画ファイルにおいて 15 秒当たり 16 ビ ットとする。また,埋め込まれた秘密情報の抽出に 際しては,原画像および関連情報は一切参照しては いけない。静止画像の場合と同様,画質評価および 攻撃後の抽出精度(攻撃耐性)により性能を評価す る。 画質評価に当たっては、電子透かしを埋め込んだ 評価画像を MPEG-4(H.264)あるいはMPEG-2 を 用いて符号化・復号化し、ファイルサイズを 1/100 以下に圧縮した映像ファイルを使用する。埋め込み 後の映像と非埋め込み画像(原画像)を同様の方法 で符号化・復号化した映像との PSNR 値が 30dB 以 上であることが求められている。評価用の動画像は 12Gbps のファイルであるが、符号化後はファイルス トリームの平均ビットレートが 12Mbps でなければ ならない。

一方,抽出精度の評価に当たっては,画像を MPEG-4 (H.264)で符号化,復号化した画像をD/A 変換した後,さらにA/D 変換を行なって再デジタル 化した映像信号から,埋め込まれた秘密情報が誤り なく抽出可能であることが求められる。D/A 変換を 行なうに当たっては,ビデオ機器等のアナログ出力 端子をそのまま利用することも許されている。

4.3 音響信号に対する電子透かし技術の評価基準

音響信号に対する電子透かしにおいて,原信号の 信号フォーマットは,16ビット直線量子化,サンプ リング周波数 44.1kHz のステレオ音声とする。ホス ト信号としては,表1に示した SQAM⁴⁰から8音源, 表2に示した RWC-MDB-G-2001⁵⁰から12音源の計 20 種類を用い,それぞれの音源の先頭から60秒を 対象とする。60秒に満たない信号は60秒に至るま で繰り返し使用する。

ホスト信号に埋め込む秘密情報としては、15 秒当 たり 90 ビット、すなわち 60 秒間のホスト信号に対 して 360 ビットとする。原則として誤り訂正技術は 使用せず、埋め込む 2 進系列は IHC 委員会ウェブサ イト²⁾ にて指定されたランダム系列とする。コンテ ストにおける評価項目は、客観的な音質劣化評価お よび誤り率とする。

客観的音質劣化評価には, ITU-R BS.1387-1 で勧告 された PEAQ (Perceptual Evaluation of Audio Quality) を実装した PQevalAudio v2r0⁶⁷⁾を用い,以下に示す ような ODG (objective difference grade)を求める。

- 圧縮なしのホスト信号を原音とし、ホスト信号に透かし系列を埋め込んだ音声を劣化音声として得られる ODG
- 圧縮なしのホスト信号を原音とし、ホスト信号に透かし系列を埋め込んだ音声に対し、
 MP3 符号化および復号化を行なったものを劣化音声として得られる ODG

基準値としては、1. の場合は最低値を-2.5 以上 とする。一方、2. については、20 個の音源に対する

表1:評価用音源(SQAM)

Track	音源名
27	Castanets
32	Triangles
35	Glockenspiel
40	Harpsichord
65	Orchestra
66	Wind ensemble
69	ABBA
70	Eddie Rabbit

表 2: 評価用音源(RWC-MDB-G-2001)

No.	音源名
1	Wasting Time (ポップス)
7	Everyday Lovin' (ロック)
13	Guess Again (ダンス)
28	Wind Up(ジャズ)
37	Musica Nova(ラテン)
49	組曲「水上の音楽」第2番(クラシック)
54	「星条旗よ永遠なれ」(行進曲)
57	トッカータとフーガ ニ短調 (クラシック)
64	Blue Print (ワールド)
85	白いバラ(声楽)
91	大漁船(邦楽)
100	Precious Love (ア・カペラ)

ODG の算術平均が-2.0 以上であることとする。さらに、片側のチャンネルのみに埋め込みを行なう場合は、そのチャンネルのみモノラル信号としたときの1.の ODG も算出するものとする。上記の基準を超えた技術に対する評価には、これらの ODG の平均値および最低値を評価対象とする。

埋め込まれた透かし情報の検出においては、ホス ト信号を使用しないブラインド検出を行なうが、ホ スト信号に依存しない鍵情報や埋め込みパラメータ に相当する情報を検出時に利用することは認められ ている。

透かしが埋め込まれた音声信号に対して,以下の 信号処理あるいは符号化・復号化を行なった後,透 かしを検出し,誤り率を評価する。以下のうち,選 択項目は、7項目中3項目を応募者が自由に選択し て実施することができる。これらの信号処理を行な うために使用するソフトウェアやパラメータも、 IHC 委員会の指定に従わなくてはならない。攻撃ご とに埋め込みパラメータや埋め込みアルゴリズム等 を変えることは、現実的ではないため禁止する。 <必須項目>

MP3 128kbs (Joint Stereo)

<選択項目>

- ガウス性雑音付加
- バンドパスフィルタ
- 時間不変ピッチ変換
- スピード(ピッチおよび時間)変換
- 遅延音付加
- MP3 128kbps (Joint Stereo) の2回符号化
- MPEG-4 HE-AAC 96kbps

誤り率の評価に際しては、透かしが埋め込まれた 音声信号の先頭から 15 秒間のうちランダムに定め る開始時刻から連続45 秒間の信号を対象として、そ のうち30秒間に埋め込まれた180ビットのうちの誤 りビット率を算出する。なお、サンプリング周波数 を変換する類の攻撃では、変換量と同じ割合で劣化 音声の検出開始時刻と検出時間長を伸縮することと する。満たすべき基準としては、必須項目および選 択項目における誤り率を最大10%以下とする。応募 者はすべてのホスト信号とそれぞれの攻撃の組み合 わせに対するビット誤り率を報告しなければならな い。

5. 電子透かしコンテストの結果

2012 年度, 2013 年度とも、電子透かしコンテストの結果は、情報科学技術フォーラム (FT: Forum on Information Technology) で実施された企画セッションにおいて発表された。各年度における応募総数と認定件数の一覧を表3に示す。

2012年度と2013年度では認定基準に差があり、 2013年度の認定基準の方が高度な要件を課してい るため単純な比較はできないが、画像部門における 認定数が他部門よりも多いことがわかる。なお、2012 年度において、音響信号部門で応募のあった6件の うち、2件は認定基準を満たしていたが、応募×切 を過ぎてから応募されたため、認定されなかった。 2012年度は映像部門の応募は皆無であったが、2013 年度は1件の応募があった。ところが、基準動画像 のうち2件の圧縮率について基準を満たしていなか ったため、認定されなかった。

2012年度の画像部門で認定された7つの方式のうち1件が高画質賞を,別の1件が高耐性賞を受賞した。2013年度も画像部門で認定を受けた3件のうち1件が高画質賞,別の1件が高耐性賞を受賞している。2013年度の音響信号部門で認定された1件は,高品質賞と高耐性賞の双方を受賞した。

表3:電子透かしコンテストの結果

年度	部門	応募総数	認定件数
	画像	8	7
2012	映像	0	0
	音響	6	0
	画像	6	3
2013	映像	1	0
	音響	1	1

2012 年度は著者のグループも画像部門に応募し, 基準を満たしており,認定を受けている⁸。著者ら が用いた手法は完全相補系列を用いたステガノグラ フィ技術⁹¹⁰に基づくものであったが,高品質賞や 高耐性賞を受賞するには至らなかった。2013 年度も 応募を目指していたが,高度化された認定基準を満 たすことが困難だったため,応募を見送るに至った。

6. PBL 教育としての価値

PBL (Problem Based Leaning), すなわち問題解決 型学習とは,提示された問題に対し,学習者自身が 少人数のグループで試行錯誤を繰り返しながら学ぶ 教育手法のことをいい,30年ほど前に医学系分野で 導入されて以来,実践的な問題解決能力が重視され る分野において頻繁に採用されてきた。工学分野で も,ロボットやソフトウェア製作などにおいて,創 造的な課題を提示することで学習者自身の知識やス キルを向上させるのみならず,コミュニケーション 能力やプレゼンテーション能力,PDCAの実践とい った内容の学習を,実践的かつ総合的なシステム開 発プロセスを通して行なえることから,数多くの取 り組みがなされている。

特に高専教育においては、高専ロボコンやプログ ラミングコンテスト、デザインコンテストなどのコ ンテストを PBL の課題として提示することが多い。 コンテストを目標に定めることは、目的が明確であ ること、結果が客観的な評価として得られることな どから、PBL として取り組むテーマとしては適して いると考えられる。

その意味でも、本稿で述べてきた電子透かしコン テストのようなテーマは、PBLの教材に十分なり得 ると考えられる。しかし、前節で述べたコンテスト 結果から見られるように、現行のコンテストで運用 されている評価基準は非常に高く、応募者が学生と は限らないにも関わらず、応募数、認定件数とも数 えるほどしかないのが現実である。これは、そもそ ものコンテストの目的が、統一的な評価基準のもと で、高品質かつ客観的な電子透かし方式を発掘する ことに置かれているためである。

したがって、本コンテストの評価基準を満たすこ とを高専生向けの PBL 課題として提示することは 容易であるとは言えない。一方で、冒頭で述べたと おり、電子透かしにはさまざまな方式があり、画像 処理や音響系のソフトウェアにも電子透かしやステ ガノグラフィ技術が標準で備えられている場合も少 なくない。たとえば、コンテストにおける認定基準 のすべてを満たさなくても、高品質性を競うのみ、 あるいは攻撃耐性を競うのみにするなどして問題を ブレイクダウンすることで、学生にとっても取り組 みやすくなる可能性はある。

著者の研究室では、5 年生の卒業研究の準備、あ るいは、情報工学科4年生の情報工学ゼミナールで 研究室に配属された学生への導入的テーマとして、 電子透かしコンテストの内容や認定基準について調 査することから始め、現行のアルゴリズムについて の調査や自分なりの工夫を加えて改良を行なうこと などを課題として課している。研究室に配属される 学生が決して多くはないため、コンテスト的な形式 に持っていくには至っていないが、上記のように、 画質や攻撃耐性などのテーマに絞り込むことで、2 ~3 名の学生でも、互いに競い合いながら短時間で 技術を習得する形式で実践することは可能であると 考えている。

長い目で見れば、研究室で継続的にテーマとして 取り上げることで、コンテストへの応募や認定を視 野に入れることも可能である。また、実現までの障 壁は大きいだろうが、将来的には学内コンテスト、 他高専との間のコンテストなどへ拡張することも興 味深い。

7. むすび

2012 年度より行なわれている電子透かしコンテ ストの概要と評価基準,および過去2年間の結果に ついて紹介した。すでに述べたとおり,本コンテス トの目標は,統一的かつ客観的な評価基準を定め, その下で高品質な電子透かしアルゴリズムを発掘し て,技術の標準化を目指すものである。今後は,さ らに基準が高度化され,2014年度からは国際コンテ ストへ発展させることが計画されている。

一方で、コンテストというシナリオが元来持つ特 性上、高専生向けの PBL 課題としても適切なテーマ 設定を行なうことができる。卒業研究の導入として だけではなく,情報セキュリティ分野の実践的な学 習教材としても格好のテーマであり,課題のレベル 設定も含め,高専生の創造力を高めることを目的に 教材開発を進めることは有意義であると考えられる。

参考文献

- F.B. Petitcolas, R.J. Anderson and M.G. Kuhn, "Information Hiding—A Survey," Proceedings of IEEE, vol.87, no.7, pp.1062—1078 (1999).
- 1) 情報ハイディング及びその評価基準委員会, http://www.ieice.org/iss/emm/ihc/ (参照日:2013年10月30日).
- 3) 映像情報メディア学会, http://www.ite.or.jp/ (参照日:2013年10月30日).
- 4) EBU, "Sound Quality Assessment Material recording for subjective tests,"
 - http://tech.ebu.ch/publications/sqamcd (参照日:2013年10月30日).
- 5) 後藤真孝, "RWC 研究用音楽データベース:音楽 ジャンル,"

http://staff.aist.go.jp/m.goto/RWC-MDB/rwc-mdb-g-j.html (参照日:2013年10月30日).

- 6) P. Kabal, "An examination and interpretation of ITU-R BS.1387: Perceptual evaluation of audio quality," TSP Lab Technical Report, Dept. Electrical and Computer Engineering, McGill University, pp.1-89 (2002).
- 7) P. Kabal, "The AFsp package," http://www-mmsp.ece.mcgill.ca/documents/Downloads/AFsp/ (参照日:2013年10月30日).
- 8) 三島陵亮, 小嶋徹也, 黛龍輔, "完全相補系列を用 いたプライベート型画像ステガノグラフィ方式," 画像電子透かしコンテスト報告書 (2012).
- 9) R. Mayuzumi and T. Kojima, "A Blind Digital Scheme Steganography Based on Complete Complementary Codes," Proc. 2011 Seventh International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIHMSP'11), pp.45-48, Dalian, China (2011).
- 10) R. Mayuzumi and T. Kojima, "An Improvement of Steganography Scheme Based on Complete Complementary Codes," Proc. 2012 International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA 2012), pp.638-642, Honolulu, Hawaii, USA (2012).

東京高専低学年学生を対象とした「観る」生物学実習の構築

伊藤篤子, 城石英伸, 衣笠 巧, 雑賀章浩, 石井宏幸, 庄司 良, 三谷知世*

Implementation of a Biological Observation for the Early Undergraduate Students at TNCT Atsuko ITOH, Hidenobu SHIROISHI, Takumi KINUGASA, Akihiro SAIGA, Hiroyuki ISHII, Ryo SHOJI, Tomoyo MITANI

The possibility of implementing biology classes for early undergraduate students at the Tokyo National College of Technology (TNCT) was considered. Since all first year students at TNCT take the Fundamental Engineering Laboratory course, all students in the course must have an experience in observing cytoplasmic streaming in *Charophyceae* using microscopes. Though the program take only about one hour, the student questionnaires for the course meet good standard in terms of their satisfaction with the program. Thus, it can be concluded that the biology program should be continued.

Keywords : biology, Fundamental Engineering Laboratory course, microscope observation

1. 緒言

科学技術政策の長期的指針である第4期科学技 術基本計画は、東日本大震災をうけてその内容が 見直され、平成23年8月に策定された。その中 で、「将来にわたる持続的な成長と社会の発展の実 現」のために「震災からの復興、再生の実現」、「グ リーンイノベーションの推進」、「ライフイノベー ションの推進」の3つの大きな課題が掲げられて いる^[1]。グリーンイノベーションの推進には再生 可能エネルギーの開発や低炭素社会の実現を、ラ イフイノベーションの推進には疾患の予防、診断、 治療の新たな技術開発などが期待されている。こ れからわかるように、いずれの分野においても、

「生物学」の基礎知識は必要不可欠なものである。 高専卒業生の多くは技術者となり、これらの分野 を担う重要な人材となるはずである。従って、所 属専門学科にかかわらず、「生物学」の学習は必須 であると考えられる。しかし実際は、関東甲信地 区7高専のうち全学科に通年で生物学を必修とし ている高専は2高専にとどまり、工業高専におけ る生物学の履修率は、物理学や化学に比べて低い。 また、短期間に高度な知識を習得させる密度の濃 い高専カリキュラムの中に、新たな科目を導入す ることは非常に難しい。

東京高専において生物学を履修するのは、物質 工学科に進んだ学生のみである。先述したように、

*東京工業高等専門学校 物質工学科

必要な知識とはいえ、新たに科目として「生物学」 を他の学科のカリキュラム内に導入することは困 難であると予想できる。しかし東京高専では、1年 次に配属希望学科によらないクラス編成が取られ ており、あわせて全学科の実習を経験する「もの づくり基礎工学」が必修得科目として設定されて いる。実習を伴うものづくり基礎工学を利用する ことで、実践を伴った知識のインプットが可能と なり、短時間でも効率的な生物学の基礎知識を学 習させることができると考えた。そこで、平成23 年度重点配分経費を受けて 20 台の顕微鏡を購入 した。顕微鏡は、生物学にかぎらず工学分野全般 にわたって使用されることが多い機器であること から、「工学分野と生物学とは関係ない」と考えが ちな低学年の学生にも興味喚起する有効なツール である。導入した顕微鏡を使った「観る」生物学 実習を構築し、ものづくり基礎工学のカリキュラ ムに導入した。導入に関する詳細は平成 24 年度 全国高専教育フォーラムにて報告したが^[2]、大規 模に実施をするにあたって改良を加えたので報告 する。

2. 実習テーマと顕微鏡の選定

学生の生物学実習体験について把握するため、 ものづくり基礎工学を履修中の平成23年度1年 生202名に顕微鏡実習の経験と興味についてアン ケートを行った。その結果、多くの学生が顕微鏡 実習を中学校までに体験しているものの、その背 景は非常に多様であることがわかった。また、「身 近なもの」と「未経験なもの」を「観てみたい」 と考える学生が非常に多いことも明らかとなった。 実習のテーマは経験の多少にかかわらずある程度 の達成感を得られる必要があるため、学生のニー ズが高い「未経験なもの」を選定する必要があっ た。また、教員側としては、対象物が安価かつ維 持管理が容易で、実習の準備にさほどの労力を要 しないものが理想である。これらの条件を踏まえ て、実習テーマとして「シャジクモの原形質流動 の観察」を導入することとした。



図1 シャジクモ

シャジクモは車軸藻綱 Charophyceae に属す る淡水産緑藻類である(図 1)^[3]。 屋外でも睡蓮鉢 などで維持可能であり、一定温度範囲内の室内で なら通年飼育できる。維持管理が容易であるのに 対して、環境省のレッドリスト絶滅危惧 I 類(絶滅 の危機に瀕している種)に分類されており^[4]、この 藻類を実際に目にしたことのある学生は極めて少 ないと考えられる。シャジクモの体を構成する節 間細胞は大きいもので数 cm あり、巨大な細胞の 中をかなりのスピードで細胞内構造物が動く「原 形質流動」現象を観察することは、多くの学生に とって興味を非常に喚起すると予想された。実験 に使用するシャジクモは株式会社科学クラブより 購入した。 購入後、野外および室内にて維持繁殖 を行った。



図 2 セレストロン LCD デジタル顕微鏡

本校にはクラス単位で実習可能な顕微鏡が導入さ れていなかった。そこで、平成23年度重点配分経 費を受け、セレストロン LCD デジタル顕微鏡 CE44340を20台導入した(図2)。本来、実習内 容を確実に修得するためには一人一台の顕微鏡配 備が必須であり、複数人で1台の顕微鏡を使用す ることはひとつのメガネを複数人で使用するよう な極めて不都合な状態である。この重大な問題点 をいくらか解消するため、接眼レンズのかわりに モニター設置顕微鏡を導入し、容易に複数人で観 察できるようにした(図3)。



図31台の顕微鏡を2-3人が同時観察

3. 試験的実施

大規模導入の前に、平成 24 年度に物質工学科 に配属された 2 年生 44 名および前期にものづく り基礎工学の物質工学科が担当する5回のうち3 回目の実験を履修する1年生1クラス42名に実 習を導入した。実施時期は、2年生はすでに「生 物学」で「原形質流動」について学び終えた6月 上旬、1年生は期末テスト直前の7月下旬であっ た。1年生の背景は、顕微鏡観察の経験がある学 生は98%にのぼったが、シャジクモの観察経験の ある学生はいなかった。



図4 流速計測

実習は以下の手順で行った.

- 実験講義(約20分):原形質流動についての 簡単な講義と顕微鏡の使い方、および今回の 実習で行うことについて説明した。
- ② 顕微鏡取扱い(約 20 分):簡易タイプの対物 マイクロメーター(Watson, 177-401C)を用い て、モニターに写った 10 µm の目盛を自身の 定規で測定することで、自身の定規 1 目盛が 対物レンズ 4 倍、10 倍のときにそれぞれ何 µm に相当するのか計測させた。
- ③ 観察および測定とレポート提出(約 40 分): スライドグラスにイオン交換水を1 滴たらし、 ピンセットでつまんだシャジクモの先端を一 房切断したものを置き、カバーグラスをかけ プレパラートとした。顕微鏡下で節間細胞を 観察させ、流動の方向をスケッチさせた。加え て流速(µm/秒)を測定させ(図 4)、一日あた

りの移動距離(m/日)に換算させた。レポート は穴埋め形式のものを記入させ、特に考察は 求めなかった。

2年生は顕微鏡取り扱いに関して93%の学生が 修得できたと感じ(図 5)、原形質流動は81%の 学生が理解できたと答えた(図 6)。 実習の前後 で「原形質流動が起こる細胞の種類」「流速」「方 向」「原形質流動の起こる機構」について〇×形式 で質問を行ったが、いずれの設問に対しても実習 後は正答率が8~25%上昇した。以上より、実践 を伴うインプットを行うことで、短時間で効率よ く知識の定着ができることが明らかとなった。ま た、75%の学生が難易度(図 7)、時間(図 8)と もにちょうどよい実習であると答えた。



図5 顕微鏡取り扱い習得度 「習得できた」を「5」、「習得できなかった」

を「1」として5段階で判定させた。数字が大きいほうが習得度が高いことを示す。



図6 原形質流動理解度

「理解できた」を「5」、「理解できなかった」 を「1」として5段階で判定させた。数字が大き いほうが理解度が高いことを示す。

1年生は顕微鏡取り扱いに関して95%の学生が 修得できたと感じ(図 5)、原形質流動は90%の 学生が理解できたと答えた(図 6)。また、実習の 難易度が適当であると答えた学生は69%(図 7)、 実習時間が適当であると答えた学生は 64%であった(図 8)。

1年生と2年生を比較すると、顕微鏡の習得、 原形質流動の理解、実習の難易度に関して大きな 差は見られなかったが(図 9,10)、実習時間に関 して「短い」「やや短い」と答えた学生が1年生で は31%にのぼり、2年生と比較して顕著な差とな った(図 10)。これは、1年間ものづくり基礎工学 で実習を経験し、さらに専門課程における実習も 履修中である2年生との経験の差によるものが大 きいと思われる。



図7 難易度適応度

難易度を適当であると感じた場合を「3」、難し すぎると感じた場合を「5」、簡単すぎると感じた 場合を「1」として5段階で判定させた。「3」に 近いほど難易度が適切であることを示す。



図8 実習時間適応度

実習時間の長さを適当であると感じた場合を 「3」、長すぎると感じた場合を「5」、短すぎると 感じた場合を「1」として5段階で判定させた。 「3」に近いほど実習時間が適切であることを示 す。

4. 大規模実施に向けた改良点

小規模実施を受けて、1年生はやや実習に不慣 れなため、課題を削減することとした。前節の実 習手順2にある「マイクロメーターを用いた画面 上の長さの計測」を省略し、あらかじめ「対物レ ンズが4倍および10倍の時、自分の定規1mm はそれぞれ20µmおよび8µmである」とテキス トに示した。また、他の実験も行うため、実験講 義を15分に短縮した。

5. 大規模実施

上記改良を加え、平成24年度後期にものづく り基礎工学の物質工学科が担当する5回のうち3 回目の実験を履修する4クラス164名の学生に顕 微鏡を用いた生物学実習を導入した。これらの学 生の背景は、顕微鏡実習を96%の学生が経験して おり、97%の学生にシャジクモの観察経験がなか った。アンケートの結果、顕微鏡取り扱いに関し て91%の学生が修得できたと感じ(図5)、原形 質流動は81%の学生が理解できたと答えた(図6)。 また、実習の難易度が適当であると答えた学生は 67%(図7)、実習時間が適当であると答えた学生 は68%であった(図8)。先行クラスに比べて特 に流動の理解について不十分な傾向が見られた

(図 9)。これは、実験講義時間の短縮と、同一時 間内に異なる複数の実習(ヘスの法則を確かめる 実験)を行ったことで生物学実習に対する意識が 散漫となり、知識の定着にやや困難が生じたため と考えられる。顕微鏡の習得および難易度の満足 度低下も同様の理由が考えられる(図 9,10)。対 して、実習時間に関しては 68%の学生が「ちょう どよい」と答え、先行クラスに比べて満足度が上 昇した(図 10)。課題を減らしたことで、無理な く全ての実習を行うことができたと感じた学生が 増えたと思われる。

当初の目的である「顕微鏡を用いてシャジクモ の原形質流動を観察、理解する」は、8 割以上の 学生が「できた」と考えており、非常に高い満足 度を示すものとなった。

以上の結果より、「シャジクモの原形質流動の観 察」は、多様な背景をもつ低学年学生に対して、 効率的に知識を定着させることができたと考えら れる。

6. まとめ

実習実施時、学生の希望学科は機械 34 名、電気 27 名、電子 31 名、情報 46 名、物質 37 名、未定 31 名であり、希望学科に偏りはなかった。



図 9 顕微鏡取り扱い習得度および原形質流動理 解度

図5および6で示した5段階の判定を平均した。 数字が大きいほうが習得・理解が高いことを示す。



図 10 難易度および実習時間適応度 図 7 および 8 で示した 5 段階の判定を平均した。 「3」に近いほど難易度および実習時間が適切で あることを示す。

原形質流動は高等学校生物で初期に学習する基 礎的内容である。物質工学科2年生は既にこの内 容を学んでいたが、実習前の知識定着率確認アン ケートでは「原形質流動を知っている」と答えた 学生は52%にとどまった。この結果に対し、15分 間の講義のみで実習を行った1年生の理解度(本 人申告)が80%を超えた。「生物学」の座学を全 学科の学生に履修させることは理想であるが、実 践を伴う知識のインプットを行うことで短時間で も効果的に「生物学」を学習させることが可能で あることが示された。

モニター付き顕微鏡の導入は概ね好評であった。 生物にほとんど興味を示していない学生でも「画 面がついていて驚いた」「テンションが上った」「高 専は中学までとは違うと思った」などといった感 想を書いており、比較的生物学に興味が薄い学生

に対しても興味喚起することができた。また、通 常の顕微鏡では手動で光量や陰影の調節を行うが、 今回導入した顕微鏡はそれらが自動で調節された ため、感想に「画像がとてもきれいだった」とあ るように、労せずして観察に適した画像を得るこ とができる。本来、光量や陰影の調節などを行う ことで顕微鏡の構造や観察の技術を習得していく ものではあるが、短時間で興味範囲の多様な学生 に対しての導入として、本顕微鏡は最適であった といえる。ただ、複数人で1台の顕微鏡を用いた ため(図3)何人かの学生からはやはり「一人一 台の顕微鏡」を求める声が上がった。学生の興味 と顕微鏡操作経験の背景が多様であるため、じっ くり色々と観察したい学生や操作技術取得速度の 違いで不満を感じる学生が生じたと考えられる。 今後、何年かかけて一人一台割り当てられるよう、 台数を増設していくことが必要不可欠である。

今回の実習後、今後の自身の進路の中で顕微鏡 による観察が必要である、と答える学生は40%で あった。半数近い学生が顕微鏡使用の必要性を認 識することができた。学生の中には「結晶を見た い」「半導体の表面をみたい」「物質の表面を観察 したい」といった生物顕微鏡とは異なる顕微鏡に 対する興味を抱くものもあり、本実習が透過型の 光学顕微鏡による生物観察だけでなく、工学分野 での顕微鏡学習へ応用できる可能性も示している。

以上の結果を受けて、平成 25 年度ものづくり 基礎工学ではこのあとに示すテキスト(抜粋)を 用いて実習を実施し、今後継続的に生物学の実習 を1年生全員に行うこととした。

8. 謝辞

本研究は平成 24 年度重点配分経費を受けて実施されたものである。

9. 参考文献

第 4 期科学技術基本計画 総合科学技術会
 議

2) 平成 24 年度全国高専教育フォーラム要旨集

3) 田沢仁 :「シャジクモ類」,遺伝 49 巻 11 号, pp.63-65(1995)

4) 2000 年版環境省レッドデータブック

(平成25年10月29日 受理)





光学顕微鏡で被	検物のサイズを計測する方法。			
画面に自分の定規をあて、組織	や細胞を計測すれば、被検物のサイズを計測するこ			
とができる。				
ただし、観察する倍率によって	、定規の1目盛りのサイズが異なるので、			
あらかじめ、メモリ幅がわかっ	ている定規(対物マイクロメーター)を特定の倍率			
で観察することで、王二夕一上で	計測する定規の1目盛りのサイズを求めておく。			
対物マイクロメーター:スラ	イドガラスの中央に、目盛りが刻まれている。その			
1目盛りは10µm	(10マイクロメートル、1mmの100分の1)である。			
0.01mm	Q			
hudu	uhuduuhuduuhuduuhud			
իտիուկակակարտիտիակավուլ				
目盛りの拡大図				
① 対物レンズを4倍にして、対	物マイクロメーターをステージの上にセットする。			
② 対物マイクロメーターの目盛りを画面中央にくるようクレンメル移動ハンドル				
でステージを動かして調節する。				
③ 焦点調節ねじを動かし、目盛りが明瞭に見えるように焦点を調節する。				
④ 画面に定規を当て、定規の目盛りと目盛りが重なる場所に、対物マイクロメータ				
一の目盛りがいくつ入るか計測する。				
<例>.				
定期の日感	N 図中、定規の目盛り14日盛りに対して、			
対物マイクロッーク	対物マイクロメータの日盛りは3日盛りである			
の目盛り	したがって 定用の1日成りけ			
(The second seco				
(対物マイクロメータの日盛り数×10 mm) 一定担の日盛り数				
(3	$(10\mu m) - 14 = 21\mu m$			
	$(10 \mu m) \cdot (14 - 2.1 \mu m)$			
フロは、 対物レンプル座の時、定規4日感が	0(1mm)/t 20 mm			
21初レノス10倍の時、疋規1日盛	の「Imm/は る#m で計算してください。」			

【課題】.

③ 細胞質流動が直線的になっているところを選び、なるべく長い区間を各自で設定して、細胞質の顆粒がその区間を通過する時間(秒)をストップウォッチで測定する。顆粒の移動距離と通過時間から流速(μm/秒)を求めることができる。 5か所以上で測定し、平均を出しなさい。

測定生物名				
a				
 地点 1	距離	μm	通過時間	秒.
	速度			
 地点2	距離	μm	通過時間	秒.
a	速度		<u>um/秒</u> 。	
 地点3	距離	"m	通過時間	秒
•1	速度		<u>um/秒</u> 。	
地点4	距離	μm	通過時間	秒.
	速度		um/秒	
地点5	距離	μm	通過時間	秒.
.1	速度		<u>um/秒</u> 。	
a Sa S				
-1				
 平均速度	t	µm∕	秒.	



The name of the journal has been changed from "Research Reports of Tokyo National Technical College" into "Research Reports of Tokyo National College of Technology" since the 1984 issue.