ISSN　0286－0503

Research Reports of Tokyo National College of Technology

東京工業高等専門学校

研　究　報　告　書

第 40(1) 号

2009.1

東京工業高等専門学校研究報告書　第40（1）号　目次

Research Reports of Tokyo National College of Technology No. 40 (1)

CONTENTS

大学編入学試験における数学の問題の調査研究 I

清　藤　　晃*

Research on Examinations in Mathematics for Transfer Admission to Universities, Part I

Akira SEITOH

We introduce the examiation questions in mathematics for transfer admission to universities to help our students who prepare those examinations. In this note we discuss the questions on complex numbers and functions of complex variables set in the University of Tokyo.

(Keywords: Transfer Admision to Universities, Examination in Mathematics.)

1. はじめに

ここ数年来, 東京高専においても大学編入学をめざす学生が増えている。学科によって, あるいは年度によって多少の変動はあるが, クラスのほぼ半数が大学編入学または専攻科進学を希望している。推薦による編入学ではなく, 学力試験による編入学試験の場合, 数学の学科試験の得点は合否の判定に大きな割合を占める。専門科目を試験科目に課さない大学が増えている現状を考えると, 数学の試験の出来不出来はますます大きな合否のファクターになっている。志望大学のいわゆる「過去問」を携え質問にやってくる学生たちに, 以前から我々数学科の教員はできるかぎり懇切丁寧な対応を行ってきたが, 編入学希望の学生の絶対数の急激な増加, また同一の「過去問」を何人もの学生が質問しにくるため, これまでのボランティアによる個別対応では我々の対応能力が限界になってきた。そこで, 数学科では, 2005 年度から 5 年前期中の 4 月末から 6 月末の時期に 1 単位の選択科目（集中講義）「数学総合演習」1 回 2 時間, 週 2 回, 計 30 時間）を設け, おもに各大学で出題された「過去問」を教材にした高専数学の総合復習のための授業を行っている。しかし, この集中講義を受講しただけで編入学試験の準備ができるわけもなく, 相変わらず, 非常に多くの学生が個別に質問にやってくる。

2005 年に「過去問」を集め, ある程度詳しい解答解説をつけた問題集が出版され, 早くも翌年には確率の問題を収録した第 2 版 [1] が出された。大学編入学希望の学生の増加を考えると, この種の問題集の出版は多くの高専生から待望されていたものと思われる。膨大な数の試験問題を収集し, 分野別に典型的な問題を取り上げて解説し, あるいは解答に必要な基本事項を整理して載せるという膨大な量の作業を成し遂げられた問題集 [1] の共著者の林, 山田両氏には頭の下がる思いである。残念ながら, この問題集の解答解説には, 少ないとは言えない量の補充, 修正すべき箇所があり, それは第 2 版でもあまり訂正されなかった。また, 過去に大学に編入学した卒業生が, 受験の経験談とともに過去問の「解答」を載せたサイトが多数あり, 現役の受験生には非常に参考になる

＊一般教科（数学）

のだが, これらのサイトで公開された「解答」も数学的に不十分, 不正確なものが非常に多い。筆者は, 上記問題集[1]の解説の補充, 解答の修正をできるかぎり丁寧に行い, PDF 化してファイル・サーバ[2]に公開してきた。

しかし一方で受験生の立場からすると, 基本事項を総復習するときは, 微分積分学, 線型代数学といった分野別に整理された問題集[1]が役に立つが, その後は, 普通高校からの大学受験の場合でいうといわゆる「赤本」のような, 自分が受験する大学の過去数年の問題を集め, 傾向と対策がまとめられている問題集がほしいはずである。そこで, 大学別に試験問題を調査し, 出題傾向を明らかにした上で, 解答の解説を行い, 研究報告書に継続的に発表していくことにした。第 1 回は, 東京大学の複素数, 複素関数に関する問題を取り上げる。

2. 東京大学の試験問題

東大の編入学試験における数学の問題は, 試験時間が 150 分, 問題数は大問が 5 問, どの問もいくつかの小問に分かれており, 出題された小問の順に解いていけば, 誘導されて完答できるように出題されている場合がほとんどである。手許にある 2001 年度から 2008 年度の問題について, 出題分野を調べてみよう。なお, ここで 2008 年度というのは, 2008 年度編入学という意味である。東大は受験生に試験問題の持ち帰りを許可していない。受験した学生からどんな問題が出題されたか話は聞けるが, 問題が公開された後でないと正確なことは言えないので, ここでは 2009 年度の問題については触れない。

年度	問	問題の内容
2001	1	線型変換と固有値
	2	図形のベクトル方程式
	3	複素積分と Laurent 展開
	4	関数の Laplace 変換
	5	幾何分布と微分方程式
2002	1	線型変換と固有値
	2	図形の体積, 長さ, 表面積
	3	(有限) 三角級数と複素数
	4	1 の虚 17 乗根
	5	Markov 連鎖
2003	1	正方行列の N 乗
	2	重積分と図形の体積
	3	階段関数の Fourier 展開
	4	微分方程式
	5	確率
2004	1	立体図形の体積
	2	行列の指数 (対数) 関数
	3	確率と正規分布
	4	広義積分と二重積分
	5	微分方程式
2005	1	微分方程式
	2	陰関数の極値問題
	3	Markov 連鎖
	4	立体図形の体積
	5	空間内の直線を軸とする回転
2006	1	関数のグラフと面積
	2	連立漸化式と極限
	3	微分方程式
	4	複素方程式が表す図形
	5	二項分布とその平均
2007	1	微分方程式
	2	正方行列の n 乗
	3	1 の n 乗根と複素数平面上の図形
	4	回転体とその接平面の方程式
	5	幾何分布
2008	1	確率と漸化式
	2	微分方程式
	3	複素関数で変換される図形
	4	広義積分と二重積分
	5	固有値が重解の場合の行列の n 乗

この中で, 複素数, 複素関数に関する問題は 2001 年度第 3 問, 2002 年度第 4 問, 2006 年度

第 4 問, 2007 年度第 3 問, 2008 年度第 3 問であるが, ことし 7 月受験した学生の話では, 2009 年度第 1 問も複素平面上の曲線に関する問題だったそうだ。このように, この分野からほぼ毎年出題されている。一般に大学編入学試験で, 複素数, 複素関数に関する問題といえば, 電通大や筑波大などのように, 複素積分, 留数を用いた定積分の計算問題が多い。東大でも 2001 年度第 3 問はそのような問題だが, ここ数年は, 複素数平面上の図形についての幾何学的な出題が多い。また, 2002 年度第 4 問のように, 18 歳の Gauss が発見した 1 の 17 乗根が開平計算だけで求まるという歴史的なトピックが出題されることもある。先に指摘したように, いずれの問題もいくつかの小問に分かれて, 順に解いていくことにより, 最終結果に誘導されるようになっている。とはいっても, 手際よい計算, 先行する小問の結果を次の小問を解くためにどのように活用するのかなど, 見通しの良さが求められる。しかも, そのような問題を 5 問, 2 時間半で解かなければならない。はじめてお目にかかるような問題を前にしても萎縮しないためには, 日頃から数学に慣れ親しんでいる必要がある。その意味でも 4 年次の応用数学は重要である。現在, 東京高専では, 4 年次の応用数学はほとんどが非常勤講師または専門科目担当教員が教えている。はたしてこれで良いのか議論が必要だと思う。また, 各大学が, このような本来の意味での数学的な内容の問題を, 編入学試験問題として出題し続けているということは, 大学側がこのような問題で編入学者を選抜することに問題はないと考えているのだろう。このことはもっと重く考えて良い。一方, 卒業生の中には, 東大では 90% 完答したなどと書いてあることがよくあるが, はたして本当か疑問だ。実際の試験会場で完答することはなかなか難しいとしても, 数学教師としては, できるだけ不足のない解答例を学生に示すのが責務であろう。学生はそれを学んだ上で, 2 時間半という試験時間と相談しながら, 最善を尽くすということではないだろうか。次節以降で, 何問かの具体的な問題について, 解答解説を与える。

3. 2008 年度第 3 問

問題. 複素数 z を変数とする偶関数 $f(z)$, 奇関数 $g(z)$ が次の関数式を満たすとき, 以下の問いに答えよ。

$$e^{iz} = f(z) + ig(z). \qquad \cdots\cdots\cdots ①$$

なお, i は虚数単位であり, e は自然対数の底である。

(1) $f(z)$ ならびに $g(z)$ を用いて, e^{-iz} を表せ。ヒント: 題意より, $f(z) = f(-z)$, $g(z) = -g(-z)$ が成立する。

(2) e^{iz} ならびに e^{-iz} を用いて, $f(z)$ と $g(z)$ をそれぞれ表せ。

(3) $g(x+iy) = u + iv$ と表すとき, 以下の関係式が成立することを示せ。

$$u = \sin x \cdot \cosh y, \quad v = \cos x \cdot \sinh y.$$

ただし, x, y, u, v は実数であり, $\cosh y := \frac{e^y + e^{-y}}{2}$, $\sinh y := \frac{e^y - e^{-y}}{2}$ である。

(4) $g(x+iy) = i$ を満たす $x + iy$ を全て求めよ。

(5) $g(x+iy) = u + iv$ とし, 点 (x, y) が下図の太線で示す xy 平面上の長方形に沿って, 原点 O を出発して反時計回りに一周したとき, uv 平面上の点 (u, v) はどのような軌跡を描くか。その軌跡の概略図を示せ。

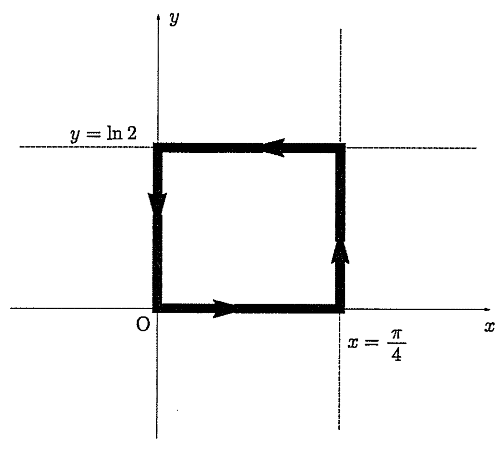


図 1　xy 平面上の長方形。

ヒント: 任意の実数 x, y で, $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$, $\cosh^2 y - \sinh^2 y = 1$ が成立する。

【解】

(1)

$$e^{-iz} = f(-z) + ig(-z) = f(z) - ig(z). \quad \cdots\cdots\cdots ②$$

(2) $\frac{①+②}{2}$, $\frac{①-②}{2i}$ より, それぞれ

$$f(z) = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}, \quad g(z) = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}. \quad \cdots\cdots\cdots ③$$

(3)

$$g(x+iy) = \frac{e^{i(x+iy)} - e^{-i(x+iy)}}{2i} = \frac{e^{ix}e^{-y} - e^{-ix}e^{y}}{2i}, \quad \cdots\cdots\cdots ④$$

$$\sin x \cosh y = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \cdot \frac{e^{y} + e^{-y}}{2}, \quad \cdots\cdots\cdots ⑤$$

$$\cos x \sinh y = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} \cdot \frac{e^{y} - e^{-y}}{2}, \quad \cdots\cdots\cdots ⑥$$

$i = -\frac{1}{i}$ に注意して ⑤ $+ i$⑥ を計算すると, ④より,

$$\sin x \cosh y + i \cos x \sinh y = g(x+iy).$$

したがって,

$$u = \mathrm{Re}\, g(x+iy) = \sin x \cosh y,$$
$$v = \mathrm{Im}\, g(x+iy) = \cos x \sinh y.$$

(4) $g(x+iy) = i$ の両辺の実部, 虚部を比較して,

$$\begin{cases} \sin x \cosh y = 0, & \cdots\cdots\cdots ⑦ \\ \cos x \sinh y = 1. & \cdots\cdots\cdots ⑧ \end{cases}$$

$\cosh y > 0$, ⑦より,

$$\sin x = 0. \quad \therefore x = n\pi, \ n \in \mathbb{Z}. \quad \cdots\cdots\cdots ⑨$$

⑨を⑧に代入して,

$$\sinh y = \frac{e^{y} - e^{-y}}{2} = (-1)^n.$$
$$\therefore e^{2y} - 2(-1)^n e^{y} - 1 = 0.$$
$$\therefore e^{y} = (-1)^n \pm \sqrt{(-1)^{2n} + 1} = (-1)^n + \sqrt{2}. \quad \because e^{y} > 0.$$
$$\therefore y = \ln\left((-1)^n + \sqrt{2}\right).$$

したがって,

$$x + iy = n\pi + i \ln\left((-1)^n + \sqrt{2}\right), \ n \in \mathbb{Z}.$$

ここまでは, Euler の公式を使って複素数の計算を手際よく処理するだけである。

(5) z 平面 (xy 平面) 上の長方形が w 平面 (uv 平面) 上のどんな図形に映るかを調べる問題である。単に Euler の公式を用いて複素数の計算ができるだけでなく, 関数が複変数になったとき, どのような挙動をするか4年次の応用数学 I で訓練しておく必要がある。A $\left(\frac{\pi}{4}, 0\right)$, B $\left(\frac{\pi}{4}, \ln 2\right)$, C $(0, \ln 2)$ とおく。

- 有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{OA}}$ は,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} \frac{\pi}{4} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad 0 \leq t \leq 1$$

と parameter 表示される。したがって,

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{\pi}{4}t\right) \cosh 0 \\ \cos\left(\frac{\pi}{4}t\right) \sinh 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{\pi}{4}t\right) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

つまり, 点 (x, y) が有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{OA}}$ 上を動くとき, 点 (u, v) の軌跡は有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{O'A'}}$ である。ただし $\mathrm{O'}(\sin 0, 0) = (0, 0)$, $\mathrm{A'}\left(\sin\frac{\pi}{4}, 0\right) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, 0\right)$ とおいた。

- 有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{AB}}$ は,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\pi}{4} \\ t\ln 2 \end{pmatrix}, \quad 0 \le t \le 1$$

と parameter 表示される。したがって,

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cosh(t\ln 2) \\ \sinh(t\ln 2) \end{pmatrix}, \quad 0 \le t \le 1.$$

$$\therefore u^2 - v^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2.$$

$$\because \cosh^2(t\ln 2) - \sinh^2(t\ln 2) = 1.$$

$$\therefore \frac{u^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2} - \frac{v^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2} = 1. \quad \cdots\cdots\cdots ⑩$$

点 (x,y) が有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{AB}}$ 上を動くとき, $0 \le t\ln 2 \le \ln 2$.

$$\cosh(\ln 2) = \frac{e^{\ln 2} + e^{-\ln 2}}{2} = \frac{5}{4}, \qquad \sin(\ln 2) = \frac{e^{\ln 2} - e^{-\ln 2}}{2} = \frac{3}{4}.$$

したがって, 点 (u,v) は直角双曲線⑩上を点 $\mathrm{A}'\left(\frac{1}{\sqrt{2}}, 0\right)$ から点 $\mathrm{B}'\left(\frac{5}{4\sqrt{2}}, \frac{3}{4\sqrt{2}}\right)$ まで動く。

- 有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{BC}}$ は,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-t)\frac{\pi}{4} \\ \ln 2 \end{pmatrix}, \quad 0 \le t \le 1$$

と parameter 表示される。したがって,

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\left((1-t)\frac{\pi}{4}\right)\cosh(\ln 2) \\ \cos\left((1-t)\frac{\pi}{4}\right)\sinh(\ln 2) \end{pmatrix} = \frac{1}{4}\begin{pmatrix} 5\cos\left((1+t)\frac{\pi}{4}\right) \\ 3\sin\left((1+t)\frac{\pi}{4}\right) \end{pmatrix}.$$

$$\therefore \left(\frac{u}{5}\right)^2 + \left(\frac{v}{3}\right)^2 = \left(\frac{1}{4}\right)^2.$$

$$\therefore \frac{u^2}{\left(\frac{5}{4}\right)^2} + \frac{v^2}{\left(\frac{3}{4}\right)^2} = 1. \quad \cdots\cdots\cdots ⑪$$

点 (x,y) が有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{BC}}$ 上を動くとき, $0 \le t \le 1$ より $\frac{\pi}{4} \le (1+t)\frac{\pi}{4} \le \frac{\pi}{2}$. したがって, 点 (u,v) は楕円⑪上を点 $\mathrm{B}'\left(\frac{5}{4\sqrt{2}}, \frac{3}{4\sqrt{2}}\right)$ から点 $\mathrm{C}'\left(0, \frac{3}{4}\right)$ まで動く。

- 有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{CO}}$ は,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = (1-t)\begin{pmatrix} 0 \\ \ln 2 \end{pmatrix}, \quad 0 \le t \le 1$$

と parameter 表示される。したがって,

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sinh((1-t)\ln 2) \end{pmatrix}.$$

つまり, 点 (x,y) が有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{CO}}$ 上を動くとき, 点 (u,v) の軌跡は有向線分 $\overrightarrow{\mathrm{C'O'}}$ である。

まとめて図示すると, 図 2 のようになる。

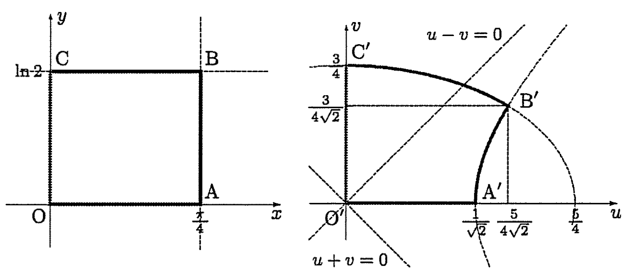


図 2　xy 平面上の長方形 OABC は, uv 平面上の図形 $\mathrm{O'A'B'C'}$ にうつる。

4. 2007 年度第 3 問

問題. 1 の n 乗根は, 方程式

$$z^n = 1 \quad (n \text{ は自然数})$$

をみたす n 個の複素数 $z_1, z_2, \ldots, z_n$ により与えられる。ここで, 各 n 乗根 z_i の偏角 $\arg z_i$ は, $0 \leq \arg z_1 < \arg z_2 < \cdots < \arg z_n < 2\pi$ をみたしているとする。また, 複素数平面において, z_1, $z_2, \ldots, z_n$ に対応する点をそれぞれ $\mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2, \ldots,$ P_n, 原点を O とする。このとき, 以下の問いに答えよ。

(1) 1 の 3 乗根に対応する点 $\mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2, \mathrm{P}_3$ を複素数平面上に図示せよ。また, 三角形 $\mathrm{P}_1\mathrm{P}_2\mathrm{P}_3$ の面積 S_3 を求めよ。

(2) 複素数平面において, 1 の 3 乗根に対応する点 $\mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2, \mathrm{P}_3$ と原点 O がつくる三つの三角形, すなわち $\mathrm{OP}_1\mathrm{P}_2, \mathrm{OP}_2\mathrm{P}_3, \mathrm{OP}_3\mathrm{P}_1$ の重心をそれぞれ $\mathrm{G}_1, \mathrm{G}_2, \mathrm{G}_3$ とする。三つの重心がつくる三角形 $\mathrm{G}_1\mathrm{G}_2\mathrm{G}_3$ の面積 A_3 を求めよ。

(3) 前問 (2) と同様にして, 1 の n 乗根に対応する点 $\mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2, \ldots, \mathrm{P}_n$ と原点 O がつくる n 個の三角形の重心 $\mathrm{G}_1, \mathrm{G}_2, \ldots,$ G_n を考える。n 角形 $\mathrm{P}_1\mathrm{P}_2\ldots\mathrm{P}_n$ の面積 S_n と n 角形 $\mathrm{G}_1\mathrm{G}_2\ldots\mathrm{G}_n$ の面積 A_n の比 $r_n := \frac{A_n}{S_n}$ を求めよ。

(4) 前問 (3) で求めた面積比 r_n の $n \to \infty$ のときの極限 $\lim_{n\to\infty} r_n$ を求めよ。

【解】

(1) $z := re^{it}$, $r = |z| \geq 0$, $0 \leq t = \arg z < 2\pi$ とおくと,

$$z^3 = 1. \quad \therefore r^3 e^{i3t} = e^0.$$

$$\therefore \begin{cases} r^3 = 1, & \cdots\cdots\cdots ⑫ \\ 3t = 2k\pi, \quad k \in \mathbb{Z}. & \cdots\cdots\cdots ⑬ \end{cases}$$

$r \geq 0$, ⑫より,

$$r = 1. \qquad \cdots\cdots\cdots ⑭$$

⑬より $t = \frac{2k\pi}{3}$. $0 \leq t < 2\pi$ より,

$$0 \leq \frac{2k\pi}{3} < 2\pi. \quad 0 \leq k < \cancel{2\pi} \cdot \frac{3}{\cancel{2\pi}} = 3.$$

$$\therefore k = 0, 1, 2. \qquad \cdots\cdots\cdots ⑮$$

⑭, ⑮より,

$$z_{k+1} = e^{i\frac{2k\pi}{3}}, \quad k = 0, 1, 2.$$

つまり,

$$z_1 = e^{i\frac{2\cdot 0\pi}{3}} \quad z_2 = e^{i\frac{2\cdot 1\pi}{3}} \quad z_3 = e^{i\frac{2\cdot 3\pi}{3}}$$
$$= e^{i0} \qquad = e^{i\frac{2\pi}{3}}, \qquad = e^{i\frac{4\pi}{3}}.$$
$$= 1,$$

よって, $\triangle\mathrm{P}_1\mathrm{P}_2\mathrm{P}_3$ は合同な二等辺三角形たち $\triangle\mathrm{OP}_1\mathrm{P}_2$, $\triangle\mathrm{OP}_2\mathrm{P}_3$, $\triangle\mathrm{OP}_3\mathrm{P}_1$ に 3 等分される正 3 角形である。3 点を図示すると, 図 3 のようになる。

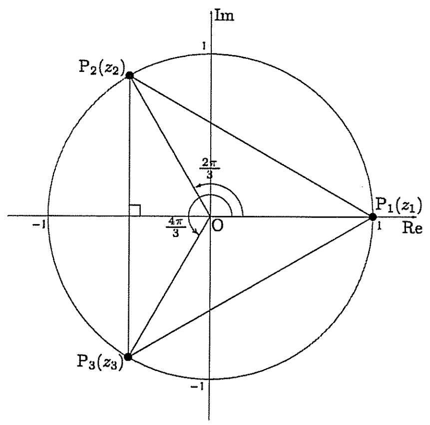


図 3　1 の 3 乗根 $\mathrm{P}_1(z_1), \mathrm{P}_2(z_2), \mathrm{P}_3(z_3)$.

$\mathrm{OP}_1 = \mathrm{OP}_2 = 1$, $\angle\mathrm{P}_1\mathrm{OP}_2 = \frac{2\pi}{3}$ に注意して,

$$\begin{aligned} \therefore S_3 &= \triangle\mathrm{P}_1\mathrm{P}_2\mathrm{P}_3 \\ &= 3\triangle\mathrm{OP}_1\mathrm{P}_2 \\ &= 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot \sin\frac{2\pi}{3} \\ &= \frac{3\sqrt{3}}{4}. \end{aligned}$$

(2) 複素数平面において点 $\mathrm{G}_1, \mathrm{G}_2, \mathrm{G}_3$ が対応

する複素数は, それぞれ

$$
\begin{aligned}
w_1 &= \frac{0+z_1+z_2}{3} \\
&= \frac{1+e^{i\frac{2\pi}{3}}}{3} \\
&= z_1 w_1, \\
w_2 &= \frac{0+z_2+z_3}{3} \\
&= \frac{e^{i\frac{2\pi}{3}}+e^{i\frac{4\pi}{3}}}{3} \\
&= e^{i\frac{2\pi}{3}}\cdot\frac{1+e^{i\frac{2\pi}{3}}}{3} \\
&= e^{i\frac{2\pi}{3}} w_1 \\
&= z_2 w_1,
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
w_3 &= \frac{0+z_3+z_1}{3} \\
&= \frac{e^{i\frac{4\pi}{3}}+e^{i\frac{6\pi}{3}}}{3} \\
&= e^{i\frac{4\pi}{3}}\cdot\frac{1+e^{i\frac{2\pi}{3}}}{3} \\
&= e^{i\frac{4\pi}{3}} w_1 \\
&= z_2 w_1.
\end{aligned}
$$

つまり w_1, w_2, w_3 はそれぞれ z_1, z_2, z_3 をすべて w_1 倍 (原点中心に $|w_1|$ 倍し, 原点のまわりに $\arg(w_1)$ 回転) した複素数である。したがって, $\triangle \mathrm{P_1P_2P_3} \backsim \triangle \mathrm{G_1G_2G_3}$ で, 相似比は $1:|w_1|$ である。

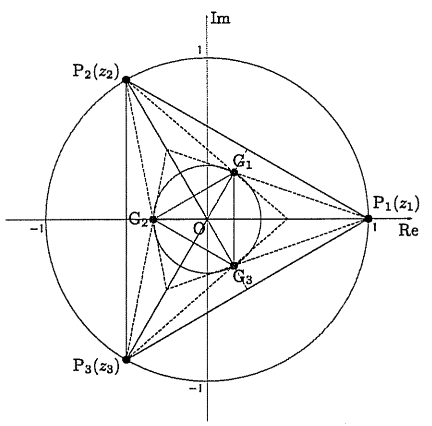


図 4　3 重心 $\mathrm{G_1}(w_1)$, $\mathrm{G_2}(w_2)$, $\mathrm{G_3}(w_3)$ を頂点とする正三角形。

$\mathrm{OG_1} = \mathrm{OG_2}$, $\angle \mathrm{G_1OG_2} = \dfrac{2\pi}{3}$ に注意して,

$$
\begin{aligned}
\mathrm{OG_1}^2 &= |w_1|^2 \\
&= w_1 \bar{w}_1 \\
&= \frac{1}{9}\left(1+e^{i\frac{2\pi}{3}}\right)\left(1+e^{-i\frac{2\pi}{3}}\right) \\
&= \frac{1}{9}\left(1+e^{i\frac{2\pi}{3}}+e^{-i\frac{2\pi}{3}}+1\right) \\
&= \frac{1}{9}.
\end{aligned}
$$

面積比は相似比の 2 乗の比だから,

$$\therefore A_3 = \frac{1}{9} S_3 = \frac{\sqrt{3}}{12}.$$

(3) (1), (2) で $n=3$ に対して行った考察を一般の n に対して行うだけである。$z := re^{it}$, $r = |z| \geq 0$, $0 \leq t = \arg z < 2\pi$ とおくと,

$$z^n = 1. \quad \therefore r^n e^{int} = e^0.$$

$$\therefore \begin{cases} r^n = 1, & \cdots\cdots\cdots ⑯ \\ nt = 2k\pi, \quad k \in \mathbb{Z}. & \cdots\cdots\cdots ⑰ \end{cases}$$

$r \geq 0$, ⑯より,

$$r = 1. \qquad \cdots\cdots\cdots ⑱$$

⑰より $t = \dfrac{2k\pi}{n}$. $0 \leq t < 2\pi$ より,

$$0 \leq \frac{2k\pi}{n} < 2\pi. \quad 0 \leq k < \cancel{2\pi}\cdot\frac{n}{\cancel{2\pi}} = n.$$

$$\therefore k = 0, 1, \ldots, n-1. \qquad \cdots\cdots\cdots ⑲$$

⑱, ⑲より,

$$z_{k+1} = e^{i\frac{2k\pi}{n}}, \quad k = 0, 1, \ldots, n-1.$$

つまり,

$$
\begin{aligned}
z_1 &= e^{i0} \quad z_2 = e^{i\frac{2\pi}{n}}, \quad \ldots, \\
&= 1, \\
& \qquad z_n = e^{i\frac{2(n-1)\pi}{n}}.
\end{aligned}
$$

よって, n 角形 $\mathrm{P_1P_2\ldots P}_n$ は合同な二等辺三角形たち $\triangle \mathrm{OP_1P_2}$, $\triangle \mathrm{OP_2P_3}$, $\ldots$, $\triangle \mathrm{OP}_n\mathrm{P}_1$ に n 等分される正 n 角形である。$\mathrm{OP_1} = \mathrm{OP_2} = 1$, $\angle \mathrm{P_1OP_2} = \dfrac{2\pi}{n}$ に注意して,

$$
\begin{aligned}
\therefore S_n &= \triangle \mathrm{P_1P_2\ldots P}_n \\
&= n \triangle \mathrm{OP_1P_2} \\
&= n \cdot \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot \sin\frac{2\pi}{n} \\
&= \frac{1}{2} n \sin\frac{2\pi}{n}.
\end{aligned}
$$

複素数平面において点 $\mathrm{G}_1, \mathrm{G}_2, \ldots, \mathrm{G}_n$ が対応する複素数は, それぞれ

$$w_1 = \frac{0+z_1+z_2}{3} = \frac{1+e^{i\frac{2\pi}{n}}}{3} = z_1 w_1,\qquad w_2 = \frac{0+z_2+z_3}{3} = \frac{e^{i\frac{2\pi}{n}}+e^{i\frac{4\pi}{n}}}{3} = e^{i\frac{2\pi}{n}}\cdot\frac{1+e^{i\frac{2\pi}{n}}}{3} = z_2 w_1,$$

$$\ldots,$$

$$\begin{aligned} w_n &= \frac{0+z_n+z_1}{3} \\ &= \frac{e^{i\frac{2(n-1)\pi}{n}}+e^{\frac{2n\pi}{n}}}{3} \\ &= e^{i\frac{2(n-1)\pi}{n}}\cdot\frac{1+e^{i\frac{2\pi}{n}}}{3} \\ &= z_n w_1. \end{aligned}$$

つまり w_1, w_2, $\ldots$, w_n はそれぞれ z_1, z_2, $\ldots$, z_n を w_1 倍 (原点中心に $|w_1|$ 倍し, 原点のまわりに $\arg(w_1)$ 回転) した複素数である。したがって, n 角形 $\mathrm{P}_1\mathrm{P}_2\ldots\mathrm{P}_n \backsim n$ 角形 $\mathrm{G}_1\mathrm{G}_2\ldots\mathrm{G}_n$ で, 相似比は $1:|w_1|$ である

$$\begin{aligned} \mathrm{OG_1}^2 &= |w_1|^2 \\ &= w_1\bar{w}_1 \\ &= \frac{1}{9}\left(1+e^{i\frac{2\pi}{n}}\right)\left(1+e^{-i\frac{2\pi}{n}}\right) \\ &= \frac{1}{9}\left(1+e^{i\frac{2\pi}{n}}+e^{-i\frac{2\pi}{n}}+1\right) \\ &= \frac{2}{9}\left(1+\cos\frac{2\pi}{n}\right) \\ &= \frac{2}{9}\cdot 2\cos^2\frac{\pi}{n} \\ &= \frac{4}{9}\cos^2\frac{\pi}{n}. \end{aligned}$$

面積比は相似比の 2 乗の比だから,

$$\therefore A_n = \left(\frac{4}{9}\cos^2\frac{\pi}{n}\right)S_n.$$

$$\therefore r_n = \frac{A_n}{S_n} = \frac{4}{9}\cos^2\frac{\pi}{n}.$$

(4) (3) の結果より,

$$r_n \to \frac{4}{9} \qquad \text{as } n\to\infty.$$

$\triangle\mathrm{OP_1P_2}$ がどんどん細くなり, その重心 G_1 は原点 O と単位円周上の点 $\mathrm{P}_1 \fallingdotseq \mathrm{P}_2$ を結ぶ線分を 2 : 1 に内分する点とみなせるようになっていく。他の三角形たちとその重心たちについても同様で, n 角形 $\mathrm{P}_1\mathrm{P}_2\ldots\mathrm{P}_n$ は単位円に, n 角形 $\mathrm{G}_1\mathrm{G}_2\ldots\mathrm{G}_n$ は原点中心, 半径 $\frac{2}{3}$ の円に近づく。つまり,

$$\left.\begin{aligned} &S_n \to \pi\cdot 1^2 = \pi, \\ &A_n \to \pi\left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{4}{9}\pi \end{aligned}\right\} \quad \text{as } n\to\infty$$

のように結果を予想できる。結果を予想できていれば, 小問の誘導に身を委ねるのも自然にできる。

5. 2002 年度第 4 問

問題. 方程式

$$z^{17} = 1 \qquad \cdots\cdots\cdots ⑳$$

を満たす複素数のうち, 1 でないものをひとつとり, ω とする。以下の問いに答えよ。

(1) この方程式を満たす 1 でない複素数は,

$$\omega^{\pm1}, \omega^{\pm2}, \omega^{\pm3}, \ldots, \omega^{\pm8}$$

で全てであることを示せ。

(2)

$$f_n := \omega^n + \omega^{-n} \qquad \cdots\cdots\cdots ㉑$$

と書くとき, 以下の各式が成り立つことを示せ。

$$f_i f_j = f_{i+j} + f_{i-j}, \qquad \cdots\cdots\cdots ㉒$$

$$f_{-i} = f_i, \qquad \cdots\cdots\cdots ㉓$$

$$f_{i+17} = f_i. \qquad \cdots\cdots\cdots ㉔$$

(3)

$$f_1+f_2+f_4+f_8 =: \alpha_0, \qquad \cdots\cdots\cdots ㉕$$

$$f_3+f_5+f_6+f_7 =: \alpha_1 \qquad \cdots\cdots\cdots ㉖$$

とおくと, α_0, α_1 は方程式

$$X^2+X-4=0 \qquad \cdots\cdots\cdots ㉗$$

の 2 解であることを示せ。

(4)

$$f_1+f_4=:\beta_0, \qquad \cdots\cdots\cdots ㉘$$
$$f_2+f_8=:\beta_1, \qquad \cdots\cdots\cdots ㉙$$
$$f_3+f_5=:\beta_2, \qquad \cdots\cdots\cdots ㉚$$
$$f_6+f_7=:\beta_3 \qquad \cdots\cdots\cdots ㉛$$

とおくと, β_0, β_1 は方程式

$$X^2-\alpha_0X-1=0 \qquad \cdots\cdots\cdots ㉜$$

の 2 解で, β_2, β_3 は方程式

$$X^2-\alpha_1X-1=0 \qquad \cdots\cdots\cdots ㉝$$

の 2 解であることを示せ。

(5) f_1, f_4 を 2 解とする 2 次方程式を一つ作れ。さらにこれを用いて, ω の満たす 2 次方程式を一つ作れ。必要ならば係数に $\alpha_0\sim\alpha_1$, $\beta_0\sim\beta_3$ などを用いてよい。

【解】 問題文中で i, j を添字に用いているので, 誤解を生じないように解答の中では虚数単位を $\sqrt{-1}$ で表す。

(1) $r:=|z|\geq 0$, $\theta:=\arg z\in\mathbb{R}$ とすると, $z=re^{\theta\sqrt{-1}}$. これを⑳に代入して,

$$r^{17}e^{17\theta\sqrt{-1}}=1=1e^{0\sqrt{-1}}.$$

$$\therefore \begin{cases} r^{17}=1, & \cdots\cdots\cdots ㉞ \\ 17\theta=2n\pi, \quad n\in\mathbb{Z}. & \cdots\cdots\cdots ㉟ \end{cases}$$

$r\geq 0$, ㉞より, $r=1$. ㉟より,

$$\theta=\frac{2n\pi}{17}, \quad n\in\mathbb{Z}. \qquad \cdots\cdots\cdots ㊱$$

したがって, 17 次方程式⑳の解は,

$$z=e^{\frac{2n\pi}{17}}, \quad -8\leq n\leq 8 \qquad \cdots\cdots\cdots ㊲$$

と表せる。$\omega\neq 1=e^{0\sqrt{-1}}$ より,

$$\omega=e^{\frac{2m\pi}{17}}, \quad -8\leq m\leq 8,\ m\neq 0. \qquad \cdots\cdots\cdots ㊳$$

とおける。

$$(\omega^n)^{17}=(\omega^{17})^n=1, \quad n\in\mathbb{Z}.$$

よって, ω^n, $n\in\mathbb{Z}$ はすべて⑳の解である。

$$\omega^k=\omega^l, \quad k,\,l=0,\,\pm1,\,\ldots,\,\pm8$$

とすると,

$$e^{\frac{2km\pi}{17}\sqrt{-1}}=e^{\frac{2lm\pi}{17}\sqrt{-1}}.$$

$$\therefore \frac{2km\pi}{17}=\frac{2lm\pi}{17}+2n\pi, \quad n\in\mathbb{Z}.$$

$$\therefore (k-l)m=17n. \qquad \cdots\cdots\cdots ㊴$$

$-8\leq k,\,l\leq 8$ より,

$$-16\leq k-l\leq 16. \qquad \cdots\cdots\cdots ㊵$$

㊵, ㊳より, $k-l$, m はともに 17 で割り切れない。したがって, ㊴より $n=0$.

$$\therefore (k-l)m=0. \quad \therefore k=l. \ \because m\neq 0.$$

つまり, 17 個の複素数

$$\omega^k, \quad k=0,\,\pm1,\,\ldots,\,\pm8$$

は, 17 次方程式⑳の異なる解である。したがって, ⑳の解はこれで全てである。このなかで $k=0$ ならば $\omega^0=1$ だから, 1 でない⑳の解は

$$\omega^k, \quad \pm1,\,\ldots,\,\pm8$$

で全てということになる。

(2) $|\omega|=1$ より,

$$\overline{\omega^n}=\omega^{-n} \qquad \cdots\cdots\cdots ㊶$$

用いて直接計算すればよい。容易な計算なので, 省略する。なお, ㉓より,

$$f_i=f_{|i|}, \qquad \cdots\cdots\cdots ㊷$$

㉒, ㊷より,

$$f_if_j=f_{i+j}+f_{|i-j|}, \qquad \cdots\cdots\cdots ㊸$$

㉓, ㉔より,

$$f_i = f_{-i} = f_{-i+17} = f_{17-i}.$$
$$\therefore f_i = f_{17-i} \qquad \cdots\cdots\cdots ㊹$$

なども用意しておくと後の計算に都合がよい。

(3) $\omega \neq 1$ は⑳の解だから,

$$\omega^{17} - 1 = (\omega - 1)(\omega^{16} + \omega^{15} + \cdots + \omega + 1) = 0.$$
$$\therefore \omega^{16} + \omega^{15} + \cdots + \omega + 1 = 0.$$

両辺に ω^{-8} をかけて,

$$1 + \left(\omega + \omega^{-1}\right) + \cdots + \left(\omega^8 + \omega^{-8}\right) = 0.$$
$$\therefore f_1 + f_2 + \cdots + f_8 = -1. \qquad \cdots\cdots\cdots ㊺$$

したがって, ㊺より,

$$\alpha_0 + \alpha_1 = f_1 + f_2 + \cdots + f_8 = -1 \qquad \cdots\cdots\cdots ㊻$$

同様に,㊸, ㊹, ㊺を用いて長いだけの計算を実行すると,

$$\alpha_0\alpha_1 = -4. \qquad \cdots\cdots\cdots ㊼$$

㊻, ㊼より, α_0, α_1 を2解とする2次方程式は,

$$\therefore X^2 + X - 4 = 0. \qquad \cdots\cdots\cdots ㉗$$

(4)

$$\beta_0 + \beta_1 = f_1 + f_4 + f_2 + f_8$$
$$= \alpha_0, \qquad \cdots\cdots\cdots ㊽$$

㊸, ㊹, ㊺より,

$$\beta_0\beta_1 = f_1 + f_2 + \cdots + f_8 = -1. \qquad \cdots\cdots\cdots ㊾$$

㊽, ㊾より, β_0, β_1 を2解とする2次方程式は,

$$X^2 - \alpha_0 X - 1 = 0. \qquad \cdots\cdots\cdots ㉜$$

$$\beta_2 + \beta_3 = f_3 + f_5 + f_6 + f_7$$
$$= \alpha_1, \qquad \cdots\cdots\cdots ㊿$$

㊸, ㊹, ㊺より,

$$\beta_2\beta_3 = f_1 + f_2 + \cdots + f_8 = -1. \qquad \cdots\cdots\cdots ㉛$$

㊿, 51より, β_2, β_3 を2解とする2次方程式は,

$$X^2 - \alpha_1 X - 1 = 0. \qquad \cdots\cdots\cdots ㉝$$

(5)

$$f_1 f_4 = f_5 + f_3 \quad \text{by ㊸}$$
$$= \beta_2 \quad \text{by ㉚} \qquad \cdots\cdots\cdots 52$$

㉘, 52より, f_1, f_4 を2解とする2次方程式は,

$$X^2 - \beta_0 X + \beta_2 = 0. \qquad \cdots\cdots\cdots 53$$

一方,

$$\omega\omega^{-1} = 1. \qquad \cdots\cdots\cdots 54$$

$n = 1$ のときの㉑, 54より, ω, ω^{-1} を2解とする2次方程式は,

$$X^2 - f_1 X + 1 = 0. \qquad \cdots\cdots\cdots 55$$

53を解いて,

$$X = \frac{\beta_0 \pm \sqrt{\beta_0^2 - 4\beta_2}}{2}.$$

㉑, ㊳, ㊶より,

$$f_n = \omega^n + \overline{\omega^n}$$
$$= 2\mathrm{Re}\left(\omega^n\right)$$
$$= 2\cos\frac{2mn\pi}{17} \in \mathbb{R} \qquad \text{for } n \in \mathbb{Z}. \qquad \cdots\cdots\cdots 56$$

したがって,

$$f_1 = \begin{cases} \frac{\beta_0 + \sqrt{\beta_0^2 - 4\beta_2}}{2} & \text{if } f_4 \leq f_1, \\ \frac{\beta_0 - \sqrt{\beta_0^2 - 4\beta_2}}{2} & \text{if } f_1 < f_4. \end{cases} \qquad \cdots\cdots\cdots 57$$

㊼を㊺に代入して, ω, ω^{-1} を 2 解とする 2 次方程式は,

$$\begin{cases} X^2 - \dfrac{\beta_0 + \sqrt{\beta_0^2 - 4\beta_2}}{2} X + 1 = 0 \\ \qquad \text{if } f_4 \leq f_1, \qquad \cdots\cdots\cdots ㊽ \\ X^2 - \dfrac{\beta_0 - \sqrt{\beta_0^2 - 4\beta_2}}{2} X + 1 = 0 \\ \qquad \text{if } f_1 < f_4. \qquad \cdots\cdots\cdots ㊾ \end{cases}$$

ここでまでしかできなくとも減点は僅少と思われるが, 解答を完全にするには f_1, f_4 の大小を調べる必要がある。
㊻より, $f_4 < f_1$ となるのは,

$$\cos\frac{8m\pi}{17} < \cos\frac{2m\pi}{17}.$$
$$\therefore \cos\frac{8m\pi}{17} - \cos\frac{2m\pi}{17} < 0$$

のときである。差 ⇒ 積の公式により,

$$-2\sin\frac{5m\pi}{17}\sin\frac{3m\pi}{17} < 0.$$
$$\therefore \sin\frac{5m\pi}{17}\sin\frac{3m\pi}{17} > 0.$$

$$\therefore \begin{cases} \sin\dfrac{5m\pi}{17} > 0,\ \sin\dfrac{3m\pi}{17} > 0 \quad \cdots\cdots\cdots ㊿ \\ \text{または} \\ \sin\dfrac{5m\pi}{17} < 0,\ \sin\dfrac{3m\pi}{17} < 0. \quad \cdots\cdots\cdots 61 \end{cases}$$

㊳より,

$$-8 \leq m \leq 8, \quad m \neq 0.$$
$$\therefore \begin{cases} -\dfrac{40\pi}{17} \leq \dfrac{5m\pi}{17} \leq \dfrac{40\pi}{17}, \\ -\dfrac{24\pi}{17} \leq \dfrac{3m\pi}{17} \leq \dfrac{24\pi}{17}, \\ m \neq 0. \end{cases}$$

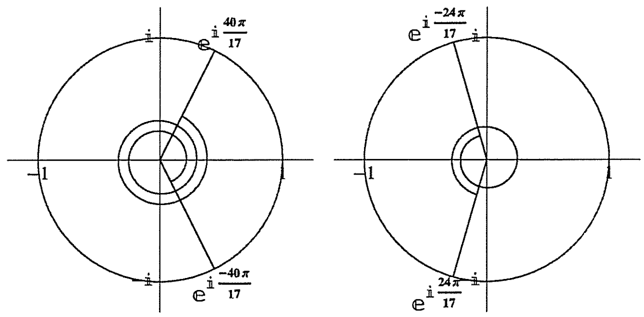


図 5　$\dfrac{5m\pi}{17}$ の範囲 (左) と $\dfrac{3m\pi}{17}$ の範囲 (右)。

$2\pi < \frac{40\pi}{17} < 3\pi$, $\pi < \frac{24\pi}{17} < 2\pi$ に注意して, ㊿が成り立つのは,

$$\begin{cases} -2\pi < \frac{5m\pi}{17} < -\pi \\ \text{または} \\ 0 < \frac{5m\pi}{17} < \pi \\ \text{または} \\ 2\pi < \frac{5m\pi}{17} \leq \frac{40\pi}{17} \end{cases}$$

かつ

$$\begin{cases} -\frac{24\pi}{17} \leq \frac{3m\pi}{17} < -\pi \\ \text{または} \\ 0 < \frac{3m\pi}{17} < \pi \end{cases}$$

のときである。

$$\therefore \begin{cases} -\frac{34}{5} < m < -\frac{17}{5} \\ \text{または} \\ 0 < m < \frac{17}{5} \\ \text{または} \\ \frac{34}{5} < m \leq 8 \end{cases}$$

かつ

$$\begin{cases} -8 \leq m < -\frac{17}{3} \\ \text{または} \\ 0 < m < \frac{17}{3}. \end{cases}$$

$6 < \frac{34}{5} < 7$, $3 < \frac{17}{5} < 4$, $5 < \frac{17}{3} < 6$ より,

$$\begin{cases} m = -6,\ -5,\ -4 \\ \text{または} \\ m = 1,\ 2,\ 3 \\ \text{または} \\ m = 7,\ 8 \end{cases}$$

かつ

$$\begin{cases} m = -8,\ -7,\ -6 \\ \text{または} \\ m = 1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5. \end{cases}$$

$$\therefore m = -6,\ 1,\ 2,\ 3. \qquad \cdots\cdots\cdots 62$$

一方, 61が成り立つのは,

$$\begin{cases} -\frac{40\pi}{17} \leq \frac{5m\pi}{17} < -2\pi \\ \text{または} \\ -\pi < \frac{5m\pi}{17} < 0 \\ \text{または} \\ \pi < \frac{5m\pi}{17} < 2\pi \end{cases}$$

かつ

$$\begin{cases} -\pi < \frac{3m\pi}{17} < 0 \\ \text{または} \\ \pi < \frac{3m\pi}{17} \leq \frac{24\pi}{17} \end{cases}$$

のときである。全く同様の考察により,

$$m = -3,\ -2,\ -1,\ 6. \qquad \cdots\cdots\cdots 63$$

62, 63より,

$$f_4 < f_1 \Leftrightarrow m = \pm1,\ \pm2,\ \pm3,\ \pm6. \qquad \cdots\cdots\cdots 64$$

$\frac{5m}{17}$, $\frac{3m}{17} \notin \mathbb{Z}$ より, $f_1 = f_4$ となることはない。よって,

$$f_1 < f_4 \Leftrightarrow m = \pm4,\ \pm5,\ \pm7,\ \pm8. \qquad \cdots\cdots\cdots 65$$

58, 64および59, 65により, $\omega = e^{\frac{2m\pi}{17}\sqrt{-1}}$ の満たす 2 次方程式は,

$$\begin{cases} X^2 - \frac{\beta_0 + \sqrt{\beta_0^2 - 4\beta_2}}{2} X + 1 = 0 \\ \qquad \text{if } m = \pm1,\ \pm2,\ \pm3,\ \pm6, \\ X^2 - \frac{\beta_0 - \sqrt{\beta_0^2 - 4\beta_2}}{2} X + 1 = 0 \\ \qquad \text{if } m = \pm4,\ \pm5,\ \pm7,\ \pm8. \end{cases}$$

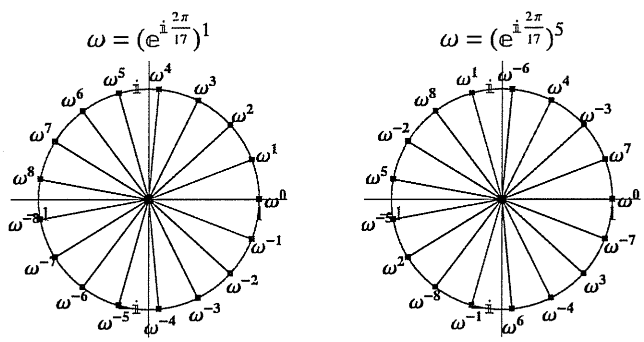


図 6 左が $\omega = e^{\frac{2\pi}{17}\sqrt{-1}}$ $(f_4 < f_1)$, 右が $\omega = e^{\frac{2\cdot5\pi}{17}\sqrt{-1}}$ $(f_1 < f_4)$ の場合の例。

6. おわりに

予定していたページ数におさまらず, 何カ所かで細かい計算を省略した。それらについても省略しないですべて書き示したものはファイル・サーバ 2) においてある。また, そこには, さらにいくつかの図や, Java applet ‘LiveGraphics3D’ による parametrized graphics や QuickTime movie も収録して, 学生が受験勉強をする場合に少しでも助けになるようにしている。

編入学試験に挑戦する 5 年生に読んでほしいと思って書いたが, 大学がこのような問題たちの出来不出来で編入学の合否を判定しているという現実を専門学科の先生方にも是非知ってほしいと思う。

次回は, 東大の微分方程式の問題を紹介する予定である。

参考文献

1) 林義実, 山田敏清, 大学編入学試験問題 数学/徹底演習 (第 2 版), 2006, 森北出版.

2) 清藤晃, `http://xythos.tokyo-ct.ac.jp/usr/seitoh/pub/`

（平成 20 年 9 月 24 日 受理）

技術者倫理教育の学習目標
──「事例に学ぶ技術者倫理」コース（JST）に見る学習目標例──

川　北　晃　司*

Targets of the Engineering Ethics Education
──Shown in Those of the JST Course on "Case Study in the Engineering Ethics"──

Koji KAWAKITA

Japan Science and Technology Agency (JST) has the "web-learning-plaza" since 2002, a useful and free e-learning service for Japanese engineers. It holds the course on "Case Study in the Engineering Ethics" now, which is highly recommendable to learn because it eventually covers the main targets of the engineering ethics education, highlights the necessity of communication of all sorts and encourages the professional pride (integrity) of engineers. But one thing to be regretted is its rough description of targets of the engineering ethics education. They ought to have been described more in detail and carefully.

(Keywords: engineering ethics, e-learning, JST, communication)

1．序言

倫理の「倫」は，なかまを意味し，「理」は，筋道が原意とすれば，倫理は元来，「共同生活において人の踏むべき筋道」のことを言う．そして，その共同生活の範囲が科学技術の効果と影響により，地球大にまで拡大したのがこの現代と見られる．

こうした現代において，JABEE（日本技術者教育認定機構）は技術者倫理の virtue を，①地球的視点から多面的に物事を考える能力とその素養として，また，②技術が社会や自然に及ぼす影響や効果に関する理解として，および，③技術者が社会に対して負っている責任に関する理解として，規定している．

JABEEは，技術者倫理に三つ（も）の倫理を盛り込もうとした，と考えるとわかりやすい．すなわち，①で環境倫理(environmental ethics)，②で技術倫理(ethics of technology)，③で専門職倫理(ethics of profession)の，計三つである．シンプルに③に特化しがちなアメリカの技術者倫理[(1)]に対して，あえて「付加価値」を付けたいJABEEの意気込みが感じられる．

だが，これは学問・教育上の困難も同時に引き受けることを意味したはずである[(2)]．つまり，非体系性（断片性），非専門性（表面性）等のリスクである．応用倫理学とよばれる分野がアメリカで1960年代から台頭した結果，生命倫理学，医療倫理学，環境倫理学，情報倫理学，企業倫理学，法曹倫理学(legal ethics)などは，すでに「学問」としての市民権を得たように見える．片や，技術者倫理(engineering ethics)については，「学問」の名にふさわしいだけの批判性と専門文献の蓄積が今の日本に存在するか疑わしい．

しかし技術者倫理を含む応用倫理学が，学究的，思弁的よりもむしろ実践的，工学的な特徴を有するのは自然である．最近の技術者倫理教科書のなかで，慶応大学の梅津光弘は適切にもこう記している．「あえて工学の言葉を借りて表現するなら，応用倫理学が対象とする倫理とは社会や組織の中における，人間行動の制御メカニズムを再検討することであり，意思決定のアルゴリズムの中に倫理的観点からのサブルーチンを含めることであり，組織とそこでのオペレーションを倫理的観点から設計し直す作業である」．

技術者自身の反応はどうだろうか．自分たちを

*一般教科（人文社会）

洗脳・管理するような技術者倫理は，自分たちには有害無益でしかない，との反発も予想される．

それはちがう，ということを，梅津は，以下の周到な一文で言おうとしているはずである．すなわち，「このモラル・エンジニアリングとでもよぶべき作業は人間の行動を自由に保ちながら，しかも一定の振れ幅のなかに安定させるためのものであり，自由主義の立場からの社会や組織構築を考える場合に不可欠の理念であると同時に，そこに存在する人間の自由を尊重し，個々人を行動の責任主体としてとらえることを通じて活性化し，さらに権限委譲，権限付与を促進する前提ともなるものである」(3)．

筆者もその方向で考えている．すなわち，技術者倫理は，公衆の安全と安心の確保を通して，結果的に，社会から信頼されるプロフェッショナルとしての技術者自身の自由と権限の確保，拡大に寄与すべきものなのである．

しかし，多くの担当教員が技術者倫理の教育方法で苦労している現実がある(4)．その大きな原因は，教科に不可欠な学習目標の具体化，標準化の困難ないし遅れにあると筆者は考えている．授業の中に最低限，何は盛り込むべきか．そのヒントになるようなものがほしい．

そこで本稿は，ネット環境にある誰でも簡単にアクセスできる自習教材としての「Webラーニングプラザ」における，「事例に学ぶ技術者倫理」コースを，学習目標の参考例として推薦したい．「Webラーニングプラザ」は，技術者の継続的能力開発や再教育の支援を目的として，(独) 科学技術振興機構（略称JST）が無料で提供する技術者向けeラーニングサービスである．2005年6月23日に技術者倫理分野が新設され，2007年3月29日に増補の末，現在のかたちのような「事例に学ぶ技術者倫理」コースになった(5)．

しかし残念なことがある．事例選択，ナレーション（主張内容)，そして画面構成が非常に行き届いているにもかかわらず，各レッスンのタイトル，学習目標記述，そして設問設計が，不統一，不十分なことである．これらを改善すれば，学習効果が一層増すだろう．

そこで本稿は，各レッスンタイトルと学習目標記述の改善をまず，提案するものである．

2．「事例に学ぶ技術者倫理」（JST）における元来のレッスンタイトルと学習目標

それでは，元来のレッスンタイトルと学習目標は，どのようなものであっただろうか．計9個のレッスンタイトルと学習目標を，以下にまず原文通りに描出してみよう．

1．組織と技術者－スペースシャトル・チャレンジャー号事故－

学習目標：科学技術のもたらす危害の典型として，組織の利益追求の結果が大きな事故に繋がることがある．このレッスンでは，スペースシャトル・チャレンジャー号事故を例に，事故を予見したひとりの技術者が，組織の中でどのように行動したかを見ていくことにする．

2．注意義務違反 －JCO東海事業所臨界事故－

学習目標：技術者が有していなくてはならない，注意義務に関して，JCO 東海事業所臨界事故を事例として学ぶ．

3．技術者の能力と倫理－N 鉄工所ソフトウェア持ちだし事件－

学習目標：技術者の多くは企業などに属し，その専門能力を発揮して新技術や新製品を開発している．通常これらの成果物は企業の財産となり，必ずしも技術者自身のものとはならないことがある．このレッスンでは，技術者が能力を発揮することと技術者倫理の関係について考える．

4．技術者による設計不備の公表

学習目標：技術者が自ら設計に携わった業務で，業務完了引渡し後に不備を発見したとき，それに逃げることなく最後まで立ち向かい解決することは，簡単のようで非常に難しい．このレッスンでは，シティーコープタワーを例に，不備を発見した技術者が，問題点を検証し，関係者に公表するに至るまでにどのように行動したかを見ていくことにする．

5．ビル崩壊の危機回避

学習目標：技術者が自ら設計に携わった業務で，業務完了引渡し後に不備を発見したとき，それに逃げることなく最後まで立ち向かい解決することは，簡単のようで非常に難しい．このレッスンでは，シティーコープタワーを例に，不備を発見した技術者が，関係者にリスクを開示して，問題解決するまでにどのように行動したかを見ていくことにする．

6．環境と技術者－開発と保護との共存－

学習目標：科学技術に支えられた人間活動は著しく強大となり地球規模で環境への負荷が増大している．この問題を克服するため，「持続可能な開発」の概念が提唱されている．このレッスンでは，人間生活を豊かにするための開発行為を担う技術者たちが，開発と絶滅の危機にさらされているイヌワシの保護とを両立・共存させるためにどのように行動したかを見ていくことにする．

７．治水事業におけるデ・レイケの功績

学習目標：明治政府は近代科学技術文明を全面的に導入するため，多数の外国人を雇った．その中の一人であるオランダ人技術者のデ・レイケは，30年もの間，日本に滞在し，日本の河川・港湾・砂防など，あらゆる利水治水事業を指導し，日本の水工技術の発展に大きな功績を残した．本レッスンでは，デ・レイケの行動や業績を通して，技術者倫理からみた，公共事業を担う技術者の資格について学習する．

８．「もんじゅ」のナトリウム漏れ事故

学習目標：高速増殖炉という新技術の開発段階において，1995年12月に，試運転中の高速増殖原型炉「もんじゅ」で，温度計鞘管の設計ミスにより2次系冷却材のナトリウムが漏れ出て火災が発生した．このレッスンでは，「もんじゅ」のナトリウム火災を例に，事故を未然に防止するための技術者の注意義務及び技術事項の公衆への説明責任について学習する．

９．原子力発電所点検記録の不正な取扱い

学習目標：2002年，国内のある電力会社による原子炉系機器の自主点検記録に関する不正問題が明らかになり，多くの原子力発電所が補修や安全確認のため長期間停止を余儀なくされた．一時は首都圏への電力供給不足が懸念される事態を招き，電力会社と原子力発電に対する，地元や国民の信頼を大きく損なう結果となった．この事例をもとに，公衆の安全確保のために技術者の取るべき行動を学習する．

オリジナルのレッスンタイトルと学習目標の描出は以上で終える．以下では，各レッスンで語られる音声ナレーション部分を要約すべく試みる．その後，前出の「学習目標」に検討を加えていく．

３．各レッスンの要点と学習目標の解釈

３．１　レッスン１

技術者が決定すべきこと，そして技術者の責任とは何か．まず，自分の専門範囲の技術を正確に用いることである．チャレンジャー号の場合では，Oリングのシール性能について，低温でどのような問題が発生するのか，正しく想定できねばならない．次に，技術者として，公衆の安全と健康を最優先するという倫理原則を守ることである．公衆とは，ある技術に関して知らないままにその影響を受ける人々を指す．チャレンジャー号の乗組員も，Oリングの技術に関しては公衆だった．チャレンジャー号の場合では，ボイジョリーはOリングからの燃焼ガス漏れが人命に関わる事故に発展する危険があることを認識していた．ボイジョリーは事故を防ぐことはできなかったが，最後まで打ち上げに反対し，技術者として責任ある行動を実行していたといえる．しかし，もし，経営者が技術者の能力を十分に信頼していれば，技術者たちの意見を尊重し「事故のリスク」が高いことを理解できていたことだろう．組織の中で，経営者と技術者が，日常のコミュニケーションを通じて信頼関係を築いておくことが必要だ．

チャレンジャー号事故の事例から見えてきた，技術者倫理の特徴がある．１)「組織の中での個人のモラル」を対象とする．組織の中にあっても，技術者としての専門的能力とモラルに基づき，また集団思考に陥ることなく，責任ある個人としての判断が求められる．２）対人関係において，「公衆」 を相手にしている．３）信頼関係を築くためのコミュニケーション能力が不可欠である．組織の中では，技術者同士，技術者と経営者との間でコミュニケーションを交わし，それぞれに信頼関係を築くことが重要だ．また，組織の外においても，技術者が公衆から信頼されるためには，高い専門的能力とモラルが必要であることに加え，さらに専門的な情報を伝えるコミュニケーション能力が求められる．

以上がレッスン１におけるナレーションの大意であり，これに合わせるかたちで，このレッスンの「学習目標」を考えてみよう．前出の「学習目標」では，「科学技術のもたらす危害の典型として，組織の利益追求の結果が大きな事故に繋がることがある．[中略]事故を予見したひとりの技術者が，組織の中でどのように行動したかを見ていくことにする」とされていた．しかし，「科学技術のもたらす危害の典型として，組織の利益追求の結果が

大きな事故に繋がることがある」という文章は，読点の前後がうまくつながっていない．また「どのように行動したかを見ていくことにする」という部分も，学習目標として備えるべきポイントを欠いている．

そこで原文をなるべく生かして，たとえば次のように言いかえてみよう．「科学技術のもたらす危害の典型は，組織の利益追求が招いた結果ともいえる，いくつかの大事故である．チャレンジャー号爆発事故の教訓を学ぶことで，組織の中で悪しき集団思考に陥ることなく，公衆の安全と健康を最優先し，そのために組織内外でのコミュニケーション能力を養うことの重要性を理解する」．

こうした理念を「学習目標」として明記したほうが，学習者の大きな助けになるだろう．

3．2　レッスン2

JCO 東海事業所では事故当時，作業者は業務の効率化を図るために，硝酸ウラニル溶液を沈殿槽に制限量の約7倍も注入していた．この臨界事故の場合，現場の考えで業務効率を優先したことが裏目に出た．作業現場には経験の浅い作業者のみで，専門的な指導ができる技術者が立ち会っていなかった．また，技術者が作業手順の変更を事前にチェックする体制の不備や，専門知識を有する技術者による作業者への教育が不十分であったなど，技術者の注意義務が果たされていなかった．これは，現場作業者と技術者とのコミュニケーション不足によるものともいえる．コミュニケーションが充分であれば，チェック体制の不備や教育の不足した状況を技術者が事前に把握できていたからである．また，現場での業務効率化を優先するあまり，法令に基づいた正規の手続きを踏んでいなかったことなどは，JCO の企業体質として，日常的なリスク・マネジメントが不十分であったことを示している．科学技術にたずさわる技術者は，重大な危害を及ぼさないよう注意をはらい，事故を未然に防止する義務がある．作業現場を含め，自分の専門分野に関するすべての状況に注意を払う必要がある．このため自らの職務だけでなく，技術者同士，技術者と現場のコミュニケーションをはかることが不可欠である．また技術者は，法令を遵守して行動し，社会からの信頼を高める努力も必要だ．

以上がレッスン2の主な内容であるが，これに従い，やはり前出の「学習目標」をもっと充実できるだろう．たとえば，「科学技術のもたらす危害として，技術者の注意義務違反が招いた結果でもある，いくつかの大事故も存在した．JCO 東海事業所臨界事故を事例として学ぶことで，現場作業者への教育を含め，事故を未然に防止するための注意義務について理解する．それは倫理以前の法的義務であり，企業のリスク・マネジメントの問題でもあるが，技術者同士および技術者と現場のコミュニケーションがやはり不可欠となる」などと記せるだろう．

3．3　レッスン3

この事件はプラントメーカーであるN鉄工所の幹部技術者など数名の技術者が，プラント設計用CAD ソフトウェアの開発資料などを外部に持ち出し，N鉄工所から提訴されたものである．このCAD ソフトウェアは，事件を起こした幹部技術者が中心になって，10年の歳月をかけて開発した，化学プラントに特有の複雑な配管設計を3次元で行なうことができる，当時としては非常に優れた製品であった．幹部技術者は，N 鉄工所の方針に不満を持ち，ソフトウェアを持ち出して，自から設立したベンチャー企業で販売しようとしたが，逮捕され，業務上横領の有罪判決を受けた．

知的財産は通常，企業の所有物であり，技術者は，これらの情報を外部に漏らすことができない．これが守秘義務である．たとえ自分が開発したものであっても，外部への情報提供に際しては，企業の同意に基づいて行なう必要がある．技術者が開発した形のある成果物は，基本的に企業の財産となるために，勝手に持ち出して利用したり，処分したりすることはできない．しかし技術者の元にも残るものがある．それは知識やノウハウを生み出す力，すなわち技術者の能力である．

成果物は企業のものでも，それらを生み出す能力は技術者自身に帰属する．所属する企業との意見の対立が起きた場合，まず周囲との対立を真摯に解決する努力が必要だ．周囲との信頼関係が維持されなければ，企業の中で自分の能力を発揮する機会は失われてしまう．努力の結果，対立が解決できなかったとしても，無断でソフトウェアを持ち出すような行為は避けるべきだった．安易な持ち出しは社会的な信用を失い，技術の発展の余地を自ら摘んでしまう結果につながる．別の選択

肢として，設立したベンチャー企業において自分の能力を生かし，新たなCADソフトウェアを開発し，行動の是非を裁判で問われることもなく，のちのちCADソフトウェアの技術的発展に寄与する可能性もあったはずだ．技術を生かすためには，技術力だけを偏重するのではなく，社会に受け入れられる公正な行動を心がけることが必要なのだ．

公正な行動をとり，技術者としての名誉を守ることは，技術者個人が自由に能力を発揮するための基本になる．さらに，技術者の能力を社会の発展や利益に役立てようとする意識をもつべきだ．社会に対する責任を意識することによって，自分の技術が社会の利益に役立っていると感じることができる．またもし，自分の技術が社会の利益を損なうおそれがある場合には，技術者としてどう行動すべきか，正しい判断を下すことができる．

以上がレッスン３の概要であり，これに従い，「学習目標」を明確化するとどうなるか．「技術者の多くは企業などに属し，その専門能力を発揮して新技術や新製品を開発している．通常これらの成果物は企業の財産となり，必ずしも技術者自身のものとはならないことがある」という説明はそのままでよい．しかしそれに続けて，「このレッスンでは，技術者が能力を発揮することと技術者倫理の関係について考える」で終わっているのは問題である．たとえば，「このレッスンでは，技術者が能力を発揮するには，公正な行動をとる必要があること，そして，その技術や能力を社会の発展や利益に役立てようとする意識をもつべきことを理解する」のように明記したほうがよい．というのも，目標を明記・言語化することで理解と記憶への定着が進むが，履修者の多くは，自ら学習目標を言語化しようとする動機を欠いていると思われるからである．

３．４　レッスン４および５

このレッスンでは，技術者自身が実施した設計に対して疑問が生じ，その解明によって公衆に危害が及ぶ危険性を認識したとき，ルメジャーという建築士がどのような行動をとったかについて学ぶ．自分の不利益になる情報を公表するか否かの状況下では，技術者としてのキャリアにキズがつき，損害賠償金も取られるのではと技術者は悩む．ルメジャーも同様に悩んだが，彼は公衆の安全を重視し，公表に踏み切った．問題を解決するために，ルメジャーは迅速に行動を起こした．問題に気づいた直後に，保険会社と顧問弁護士に連絡し，協力を依頼．翌日，保険会社の弁護士数人との会議が行われ，構造エンジニアであるレス・ロバートソンを特別顧問に雇った．ルメジャーは，200ヵ所を超える筋交いボルト接合部の補強として，ボルト継ぎ手部に約50㎜の鋼板を巻き付け，溶接する計画を立案し，その費用と期間を見積もった．準備を整えたルメジャーは，その日のうちにシティコープの副社長ジョン・リードに連絡をとり，ビルの危険性，補強工事およびその費用と期間など，すべての状況を説明．あくる日，シティコープの最高責任者ウォルター・リストンに面会．リストンは，ことの重大性を理解し，補強工事の提案を即決し，関係方面との連絡を自ら引き受けた．こうしてルメジャーはわずか３日間で関係者の協力を取り付けることに成功した．補強工事施行会社からは800万ドルの見積もり（工事費用）の提示があったものの，ルメジャーが掛けていた保険金は，200万ドルにすぎなかった．しかしシティコープの経営者は，ルメジャーのとった行動により，大惨事が防がれたことを高く評価し，ルメジャーは200万ドルのみの賠償金で済んだ．また保険会社は「保険史上最悪の大損害を未然に防いだ」と彼を評価し，人々は有能で誠実な構造エンジニアであると彼を讃えた．ルメジャーは後に，アメリカ工学アカデミーの会長を務め，さらに２つの大学から名誉博士号を授与された．

ルメジャーがビルの倒壊の危険性についていくら説明しても，もしシティコープの役員がルメジャーの警告をすぐに信用せず，協力を拒否していたら，補強工事はすぐには開始できず，大きなハリケーンに襲われて，ビルは倒壊していたかもしれない．つまり，関係者の理解と協力がなければ，対策はうまく実行できなかった．技術者は技術的な問題点を的確に把握し，公衆に向けてわかりやすく説明するだけでなく，日常の中で，周囲の人々との信頼関係を構築する事も大切なことがここでもわかる．

以上がレッスン４と５の概要であり，このレッスンは一連のものとわかる．したがってタイトルでもそれとわかるようにしたほうがよい．学習目標では，レッスン４でも５でもこう記されていた．「技術者が自ら設計に携わった業務で，業務完了

引渡し後に不備を発見したとき，それに逃げることなく最後まで立ち向かい解決することは，簡単のようで非常に難しい．このレッスンでは，シティーコープタワーを例に，不備を発見した技術者が，問題点を検証し，関係者に公表するに至るまでにどのように行動したかを見ていくことにする」．しかし，「･･･どのように行動したかを見ていく」のは，学習の「手段」であって「目標」ではないから，学習目標はむしろ下記のようになるだろう．すなわち，「このレッスンでは，危機の回避のためには，自らの不備を的確に把握し，勇気をもって関係者に公表してビルを崩壊から救い，結果的に自らの名誉と生活も守れた技術者がいたことを理解する」などである．

3．5　レッスン6

年々増大する電力のピーク需要に対応するため，電力会社は奥只見水力発電所と大鳥水力発電所の2 箇所を同時に増設する計画を立てた．しかし，その工事が予定されている現場には，国の天然記念物で絶滅危惧種に指定されているイヌワシがいた．このため，技術者たちは，工事とイヌワシの保護という，相反する課題を同時に解決しなければならなかった．この事例を通じて，持続可能な社会に向けて，自然を利用した開発行為を担う技術者の役割はどうあるべきか，環境倫理の考え方に基づいて考えていく．

技術者達は,イヌワシ保護対策を考えるうえで,「順応的管理」と呼ばれる手法を採用した.まず,予め目標を明確にした上で，生態学的干渉が行われた場合の自然現象について予測する．次に，生態学的干渉が行われている間の自然現象の変化を常にモニタリングしながら，予測結果の評価を行い，問題が生じていないかどうかを確認する．そして，例えばモニタリング結果と予測結果が異なるような新しい情報が得られれば，生態学的干渉の方法を柔軟に修正するなど，常に予想外の事態に対処できる用意をしておく．このような保護対策を行なって工事を進めた結果，工事を開始した翌年の2000年と2002年に，イヌワシは繁殖に成功．日本では，イヌワシの繁殖成功率が一般に20%程度だと言われているので，この繁殖成功率は満足がいくものであった．

しかし経過は単純ではなかった．幼鳥の巣立ちが一般に言われている6月上旬ではなく，約1ヶ月遅れて7月上旬までずれ込んだ.工事関係者は，年間4ヶ月しか工事ができないという制約の中で，7 月から日割りの工程を組んで準備していた．しかし巣立ったばかりの幼鳥はしばらくの間は工事区域の近くにある営巣地周辺に留まって親鳥から餌をもらいながら，飛び方の練習をするという状況だった．このような状態で，予定どおりに7月から工事を行うべきか，それとも，幼鳥を守るために工事の再開を見合わせるべきか．工事を行わなければ，発電所の完成時期が遅れ，大きな経済的損失が生じる．技術者たちはあらためて順応的管理の考え方を応用した方法を採用した．最初は規模を小さくして工事を再開するが，その間は幼鳥の行動や親鳥からの餌の受け渡しなどを常時モニタリングして，幼鳥に異常がないことを確認しながら，徐々に工事規模を拡大していった．このような制約を課して工事を進めた結果，幼鳥は巣立ちから約 1ヶ月後には，飛翔能力を身に付け，広い範囲で行動できるようになった．これを確認したのち，工事を全面的に再開．幼鳥への影響を回避し,工事も予定に間に合わせることができた．

環境倫理においては，自然の価値，地球の有限性，世代間倫理の3つの視点が重要である．絶滅の危機に瀕したイヌワシの生息環境を守り，次の世代に受け継ごうとする技術者たちの行動は，こうした環境倫理の原則と深く関わっている．自然を大切に思う気持ちこそが環境倫理の原点である．人間は，地球（環境）から「資源」を採取し，それをエネルギーやさまざまな生産活動に利用して生活している．そして，人間活動は大量の廃棄物を地球環境に戻して蓄積している．地球の資源や環境容量は有限なので，人間活動があまりに大きくなりすぎると，それらの容量を超えてしまう．一刻も早く地球規模での環境負荷を小さくする必要がある．さもないと未来世代の生存を脅かす．この問題意識が「世代間倫理」と呼ばれるもので，現在を生きる私たちに課せられた大きな課題として「持続可能な社会」に向けての取組みを開始しなければならない．

今回の事例で，技術者たちは，様々な制約条件のもとで，開発か保護かの二者択一の選択ではなく，これらを両立・共存させる第三の道を切り開いた．危機的な状況にある地球環境や自然生態系を守り，持続可能な社会に導いていくためには，

経済一辺倒ではない新しい価値観が求められる．それは，今回の事例でも示されたような「環境を守る」という強い意志である．これからの技術者は，開発の意義を大切にしながらも，環境倫理の視点を常に意識して，「環境を守る」行動を起していかなければならない．こうした技術者が一人でも増えていくことが，持続可能な社会に向けて大きな原動力になる．

以上がこのレッスンにおけるナレーション概要であり，学習目標に関しては，「このレッスンでは，人間生活を豊かにするための開発行為を担う技術者たちが，開発と絶滅の危機にさらされているイヌワシの保護とを両立・共存させるためにどのように行動したかを見ていくことにする」とあった．これをたとえば，次のように置き換えることができる．すなわち，「このレッスンでは，環境倫理における３つの視点について，そして開発か保護かの二者択一の選択ではなく，これらを両立・共存させる第三の道について，イヌワシ保護対策を例にして理解する」．

３．６　レッスン７

濃尾平野を流れる木曽川，長良川，揖斐川は，木曽三川と呼ばれ，古くから流域に洪水被害をもたらしてきた．明治以前の長良川は木曽川の支流で，独立した河口がなく，三川はお互いに合流と分流を繰り返して複雑につながっていた．ひとたび洪水が起きると，流量が多く，水位も高い木曽川の洪水が長良川，揖斐川に流れ込み，被害は大きくなった．住民は洪水を防ぐため，輪中堤と呼ばれる堤防で集落全体を囲んでいたが，輪中堤だけでは，濃尾平野の洪水を防ぐことはできなかった．明治になると，木曽三川流域の住民は，政府に外国人技術者を派遣して流域の調査と治水対策を行ってくれるよう，たびたび陳情していた．そこで調査のために派遣されたのが，デ・レイケらである．デ・レイケは，大規模な公共事業の計画や設計の知識が十分ではなかったため，オランダに戻った僚友エッシャーに手紙を書き，仕事の状況を相談する一方，必要な学術書の入手などを依頼した．エッシャーもフランス語の学術書を外国語の苦手なデ・レイケのためにオランダ語に訳して送るなど，支援を惜しまず，ふたりの文通はこの後 34 年もの間続いた．

ひとり日本に残ったデ・レイケは，このようにエッシャーの支援を受けながら，測量や流域調査を指導し，このののち明治 19 年(1886 年)までかけて，木曽三川の精密な治水工事計画を完成させた．デ・レイケが立案した改修計画は，明治 20 年(1887 年)から日本人技術者の手によって着工され，明治 33 年(1900 年)に竣工したが，着工式にも竣工式にもデ・レイケは参列していない．工事が始まったころ，デ・レイケはエッシャーに宛てた手紙の中で，「木曽川の工事は日本人技術者たちの管理下で実施中です．彼らはすべて私の計画によっていますが，必要になったときだけ私を呼ぶはずです．[後略]」と書き，工事が日本人だけで行われることも冷静に受け止めていた．

デ・レイケの人物像，功績から，公共事業を担う技術者の資質，関連する技術者倫理についていくつか学べる．デ・レイケは築堤職人の家に生まれ，輪中堤工事の家業を手伝いながら育った．少年時代，手伝いで出入りしていた工事現場で，後に王立アカデミーの教授としてエッシャーを教えたレブレットに出会い，数学，物理学，水理学などの土木技術の基礎を学んだ．そうして身に付けた基礎技術をその後，多くの現場業務を通して研鑽した．学歴のないデ・レイケが技術者としての成功を収めた背景には，こうしたたゆみない自己研鑽があった．エッシャーも，デ・レイケの技術者としての資質を高く評価している．またデ・レイケは，エッシャーから自然科学・社会科学を総合した視点の重要性を学んだ．森林管理，砂防ダム対策，乱伐の規制，洪水対策など，流域全体の河川管理を総合的な視点で分析し，計画，設計したのである．木曽三川改修計画に見られるように，公共施設に関わる技術者は，「安全で快適な機能」とともに，「普遍性のある機能」と，次の世代に配慮した「変更可能な柔軟性」を考え，計画することが求められる．

デ・レイケの作成した計画の基礎には，水位記録の重視，測量の徹底，水理計算などの近代科学の合理性が貫かれていた．明治初期まで経験を頼りにしていた治水事業に，合理的，科学的な計画を導入したことは，わが国のその後の治水計画に大きな影響を与えた．

現在では当然のことだが，デ・レイケは事業に要する費用を常に念頭に置き，少ない費用で効果を上げる計画を検討している．デ・レイケが内務

卿松方正義に手渡した書簡からも，デ・レイケの公共事業に取り組む姿勢を見ることができる．土木学会は1999年に「土木技術者の倫理規定」を新たに制定し，その一節に，「自然と人間を共生させる環境の創造と保存は，土木技術者にとって光栄ある使命である」とある．120年も前に，デ・レイケはこれを実践していたのである．

以上がこのレッスンにおけるナレーション概要であり，学習目標については「デ・レイケの行動や業績を通して，技術者倫理からみた，公共事業を担う技術者の資格について学習する」となっていた．筆者としてはこう換言したい．すなわち，「公共事業を担う技術者には，自然科学と社会科学の総合的視点による，自然と人間を共生させる環境の創造と保存，合理性と科学性，そのための継続学習と相互交流が求められることを理解する」などである．

3．7　レッスン8

1995年12月に，試運転中の高速増殖原型炉「もんじゅ」で，温度計鞘管の設計ミスにより2次系冷却材のナトリウムが漏れ出て火災が発生した．2次系のナトリウムは放射性物質を持たないため，事故による放射能漏れはなかったが，「起こらない」と考えられていたナトリウム漏れによる事故は，関係者に衝撃を与えた．当時の動燃によって行われた事故後の情報公開にも大きな問題があった．事故直後に1分程度のビデオ映像を公開したが，この映像は漏えい箇所の映像をカットするなど，編集を加えて短くしていた．これが事故情報の隠ぺいという印象を与え，動燃に対する世論の不信感が広がってしまった．

温度計鞘管の設計ミスは，技術者の注意義務が果たされなかった事例である．技術者の注意義務とは，専門分野に関係する状況全体に注意をはらい，事故を未然に防止することである．「もんじゅ」の事故では，事故原因となった設計担当者のミスが，2次系配管全体の設計チームでも，「もんじゅ」全体の設計を統括するチームでも見過ごされていた．個人のミスを組織でカバーすることができなかった．ここで得られる教訓は，技術者同士の信頼関係を大切にしながらも，公衆の安全を最優先にするという意識の下で，決して他人任せにすることなく，専門的能力に裏付けられた注意力を発揮することである．

公衆の安全に影響がある内容について，技術者は公衆に対し，十分な情報を公開し，説明を行わなければならない．専門分野の問題には，一般の人が内容を理解できず，問題に対する判断ができないものが多くある．だからといって説明が面倒な問題を隠すような行為は，技術者に対する公衆の信頼を損なう結果を招く．説明責任を果たすことによって，公衆との信頼関係を保つことが，技術者にとって非常に重要な責務なのである．

以上がナレーションの概要であったから，学習目標は下記のようになってよいだろう．「技術者には注意義務と説明責任がある．技術者同士の信頼関係を大切にしながらも，公衆の安全を最優先し，他人任せにすることなく，専門的能力に裏付けられた注意力を発揮する．くわえて，公衆の安全に影響がある内容については，技術者は公衆に対し，十分な情報を公開し，説明を行わなければならないことを理解する」．

3．8　レッスン9

国内のある原子力発電所で，1980年代後半から1990年代にかけて実施された自主点検において，原子炉系機器や配管にひび割れなどの欠陥が発見されていた．この点検結果について，記録に残さなかったり，発見日を遅らせたりなど，点検データの不正な取扱いが長期間にわたって行われていた．これらの事実は外部からの指摘に基づいて行われた電力会社の社内調査で確認され，2002年8月に国から公表された．この不正問題により，その電力会社のすべての原子力発電所が補修や安全確認のため長期間停止を余儀なくされ，一時は首都圏への電力供給不足が懸念される事態を招いた．また，電力会社と原子力発電に対する，地元住民や国民の信頼を大きく損なう結果となった．

不正問題の再発を防止するための取組みとして，この電力会社では，次の4項目を揚げている．

(1)原子力部門の情報公開を徹底し，社外の第三者の意見を取り入れて，発電所運営の透明性を高める

(2) 社員・組織の的確な業務運営を支援する機能を強化する

(3) 原子力部門の閉鎖性を打破し，風通しのよい企業風土を構築する

(4) 企業倫理の遵守を徹底する

国側は，再発防止策の柱として，事業者の品質

保証体制の国による確認，原子力発電所の維持基準の導入，自主点検の法的位置づけの明確化，トラブルの国への報告，公開基準の明確化，制度整備といった規制制度の見直しを実施した．維持基準とは，機器の経年劣化，欠陥の発生を前提とした，運転開始後の原子力発電所を管理するための基準である．この基準によって，検査で機器に欠陥が見つかっても，欠陥の大きさにより，安全上問題ないと認められれば，機器の使用を継続できることになった．このような維持基準は，海外では約30年前から制定されていた．

「公衆の安全に対する責任」という面で，技術者が果たすべき役割は3つ考えられる．

・安全を最優先する
・法制度への対応
・透明性の確保と説明責任

技術者の役割として第一に重要な点は,「安全を最優先する」ことである．企業や技術者が業務を行ううえで，公衆の受ける利益・利便性と安全確保のバランスを考慮しなければならない場合がある．このとき，技術者は,「安全」が最も重要であることを常に念頭に置き，自身の判断に関して，組織内部や公衆の理解を得るよう説明し，説得する責務がある．また，法律が現状に適応していない，内容が不明確であるなど，法制度に不備がある場合もある．じっさい，原子力発電所に関する法制度には，維持基準が未制定である，報告基準があいまいであるなど，規制に不備があった．しかしこうした不備があっても，公衆の安全にかかわる問題では，技術者は，法制度に対し，独自の判断や解釈で対応すべきではない．規制当局と十分にコミュニケーションをとりつつ，制度改正が必要な点については，業界団体，学会，規制当局に働きかけを行い，改善を促すよう努力する必要がある．この事例では，電力会社の原子力部門の独善的な考えが不正行為の原因となった．このように，当事者だけでは，公表すべきことを隠すといったような，社会的には認められない独善的な判断に陥るおそれがあるため，他の部門，あるいは第三者のチェックを受けることが必要になる．「専門的な事項は一般の人には理解しがたいので，余計な情報を流すと人々に不安を与える」といった考えは誤りだ．安全に関しては十分に情報公開を行うとともに，専門的な事項に関しても，可能な限り公衆，すなわち一般の人々の理解を得られるよう説明を行う努力をすべきで，そうした努力が，企業や技術に対する公衆の信頼を得ることにつながるのである．

ナレーション内容はほぼ上記のように要約できるので，本レッスンの学習目標はほぼ下記のように考えてよいだろう．「点検データの不正な取り扱いは住民・国民の信頼を大きく損なう．不正問題再発防止のためには，企業も国もむろん貢献すべきだが，技術者自身も，安全が最重要であることを常に念頭に置き，組織内部や公衆の理解を得るよう説明し，説得する責務がある．また，法制度に不備がある場合は規制当局と十分にコミュニケーションをとりつつ，透明性の確保，説明責任を果たすことで，企業や技術に対する公衆の信頼が得られることを理解する」．

4．レッスンタイトルと学習目標の書き替え案

今や各レッスンに対して，以下のように，タイトルと学習目標の書き替え案例を示してみたい．ここではサブタイトルを事例で統一したが，メインタイトルとして統一してもよい．

<u>1．公衆の安全と組織の利益</u>
<u>ースペースシャトル・チャレンジャー号爆発事故ー</u>

学習目標：技術者としての判断よりも組織の利益追求が優先した場合，大事故に至る場合がある．チャレンジャー号爆発事故の教訓を学ぶことで，組織の中で悪しき「集団思考」に陥ることなく，「公衆」の安全と健康を最優先し，そのために技術者が組織内外でのコミュニケーション能力を養うことの重要性を理解する．

<u>2．注意義務はどこまでか</u>
<u>ーJCO 東海事業所臨界事故ー</u>

学習目標：技術者の注意義務違反は大事故につながる場合もある．JCO 東海事業所臨界事故を事例として学ぶことで，現場作業者への教育を含め，事故を未然に防止するための注意義務について理解する．ここでも，技術者同士および技術者と現場のコミュニケーションがやはり不可欠となる．

<u>3．知的成果は誰のもの</u>
<u>ーN鉄工所ソフトウェア持ち出し事件ー</u>

学習目標：企業に勤める技術者はその専門能力を発揮して新技術や新製品を開発しても，通常これらの成果物は企業の財産となり，技術者自身のものとはならない．このレッスンでは，技術者が能

力を発揮するには，公正な行動をとる必要があること，その技術や能力を社会の発展や利益に役立てようとする意識をもつべきことを理解する．

４＆５．設計不備の公表が呼ぶ好評
－シティーコープタワー崩壊危機回避－

学習目標：技術者が自ら設計に携わった業務で，業務完了引渡し後に不備を発見することがありうる．このレッスンでは，危機の回避のためには，自らの不備を的確に把握し，勇気をもって関係者に公表してビルを崩壊から救い，結果的に自らの名誉と生活も守れた技術者がいたことを理解する．

６．持続可能な社会のために
－工事現場付近でのイヌワシ繁殖成功－

学習目標：科学技術に支えられた人間活動は著しく強大となり地球規模で環境への負荷が増大している．このレッスンでは，環境倫理における３つの視点，そして開発か保護かの二者択一の選択ではなく，これらを両立・共存させる第三の道について，イヌワシ保護対策を例にして理解する．

７．環境意識と自己研鑽
－治水事業におけるデ・レイケの功績－

学習目標：オランダ人技術者デ・レイケは，日本の河川・港湾・砂防など，あらゆる利水治水事業を指導し，日本の水工技術の発展に大きな功績を残した．公共事業を担う技術者には，自然科学と社会科学の総合的視点により，自然と人間を共生させる環境の創造と保存，合理性と科学性，継続学習と相互交流が求められることを理解する．

８．重い説明責任
－「もんじゅ」のナトリウム漏れ事故－

学習目標：技術者は技術者同士の信頼関係を大切にしながらも，公衆の安全を最優先し，他人任せにすることなく，専門的能力に裏付けられた注意力を発揮する．公衆の安全に影響がある内容については，技術者は公衆に対し，十分な情報を公開し，説明を行うべきことを，高速増殖原型炉「もんじゅ」ナトリウム漏れ事故を通して理解する．

９．法制度の不備をこえて
－原子力発電所点検記録不実記載－

学習目標：点検データの不正な取り扱いは住民・国民の信頼を大きく損なう．技術者は，自身の判断に関して，組織内部や公衆の理解を得るよう説明し，説得する責務がある．また，法制度に不備がある場合は規制当局と十分にコミュニケーションをとりつつ，透明性の確保，説明責任を果たすことで，企業や技術に対する公衆の信頼を得ることを理解する．

５．分析と考察（まとめ）

本稿の構成は以下の通りであった．１．序言，２．「事例に学ぶ技術者倫理」（JST）における元来のレッスンタイトルと学習目標，３．各レッスンの要点と学習目標の解釈，４．レッスンタイトルと学習目標の書き替え案，５．分析と考察（まとめ）．

JSTによる９つの事例を通してみた場合，じつのところ「コミュニケーション」が重要なキーワードのひとつであることが判明した．技術者にはたんなる安全に加え，公衆の安心に対しても責任（説明責任）が生じている．また，独善的にならずに技術者仲間や組織，規制当局をも説得できるコミュニケーション能力が問われているのである．

以下に各事例をカテゴリー別に分類してみよう．まず，ナレーション部分でコミュニケーション能力に言及があるか，関係が深いと思われる事例を１とした．また，「国内・国外」では，日本国内事例を１，国外を２．「成功・失敗」については，技術者の意図が成功した事例は１，それ以外は２．「多聞・寡聞」については，既存教科書等で比較的よく目にする事例は１，それ以外は２．そして，「遵法・良心・環境」については，遵法の強調が１，遵法を超えた良心的行為の必要が２，新しい倫理としての環境意識の強調を３として下表（表１）に記入した．

＜表１　各事例の範疇別分類＞

事例 / 範疇	1	2	3	4	5	6	7	8	9
コミュニケーション能力	1	1	1	1	1	?	1	1	1
国内・国外	2	1	1	2	2	1	1	1	1
成功・失敗	2	2	2	1	1	1	1	2	2
多聞・寡聞	1	1	1	1	1	2	2	1	1
遵法・良心・環境	2	1	1	2	2	3	3	2	2

これらはじつによく考え抜かれた事例配分・配列であると，上の表を見て筆者は考える．

しかし，学習目標の記述については，遺憾ながら不十分であったと，これまでの考察から結論づけざるを得ないとも考える．学習目標を，事例から推理して学習者自身に考えさせる，という教育

方法もありうる．今回，筆者が実行したことがまさにそれに他ならない．それは研究者・教育者としては興味深かった．しかし技術者倫理の一般履修者に対しては，適切な方法とは言いかねる．負担が重すぎるからである．したがって，書き替えを筆者が提案したようなタイトルと学習目標を，事前または事後に履修者に開示するとよいだろう．

しかしJSTは次のように反論可能であろう．すなわち，この「事例に学ぶ技術者倫理コース」では，全体としての学習目標を最初に明記していた．それは，「企業等の研究開発やものづくりの現場で働く技術者が，技術者倫理とは何かを理解するため，国内外の科学技術に関連した事故・事件を事例として取り上げ，技術者倫理のケーススタディとして学習する」というものであった．すなわち，「技術者倫理とは何かを理解する」のが目標なので，技術者倫理上の具体的な学習目標の達成までは求めていない．これはあくまで導入にすぎない．したがって，各レッスンの学習目標についても，それが立ち入った記述になっていないのは，むしろ故意に自己抑制した結果なのである．

それに対しての筆者からの可能的返答はこうである．「それは了解できるが，各レッスンのタイトルと学習目標の記述スタイルは改善の余地が大きい．それらを読まない履修者も多いだろうが，学習効果向上のためには，読んだほうがよいし，またそのような具体的な説明が求められていると考える」．

技術者倫理教育の具体的な学習目標に関して中核的と思われるキーワードを，JSTのこの教材から収集できる．それは，公衆の安全・健康，コミュニケーション，注意義務，知的財産権，持続可能性，環境意識，継続学習，説明責任，透明性確保，などである．

これらに加えて，倫理綱領，専門職倫理，生命倫理，研究倫理，リスク・マネジメント，STS論，ユニヴァーサル・デザインといった項目を適宜導入することで，各授業における学習目標が具体的に定まってくるだろう．具体的目標が定まれば，次は実現方法の問題である．JSTの本教材で自習するのも，その一方法たりうる．なぜならそれは，事例の適切な配列によって，技術者倫理の主要な学習目標をカバーしており，さらにコミュニケーションの重要性をくり返し強調し，総じて，学習者を励ます論調だからである．

むろん，これだけで，キーワードとして列挙したような項目の学習目標達成がなされるわけではないが，技術者倫理に関して次のことは理解可能になるだろう．すなわち，技術者が公衆の安全と安心に向けた最善の努力を行うことで，結果的に，社会から信頼されるプロフェッショナルとしてのこれからの技術者自身の自由と権限の確保，拡大がもたらされる．そのことの理解が技術者倫理における教育・学習目標のひとつには含まれているのである．

注および文献

（1）イリノイ工科大学のデイヴィスが最近編んだ，技術者倫理のアンソロジー（*Engineering Ethics*, Ashgate,UK.2005）においても，その傾向は顕著である．約50名の著者からなるこの論文選集は，以下の7部構成をとっている．第1部「予備作業」，第2部「重要事例」，第3部「専門職的(professional)責任」，第4部「大組織における専門職的(professional)自律」，第5部「倫理綱領と専門職(professional)組織」，第6部「研究と教育」，第7部「再開(reprise)：「具体的適用」．この論文集は，*The International Library of Essays in Public and Professional Ethics* というシリーズ中の一冊である，という事情はあるにせよ，技術者倫理の，専門職倫理としての位置づけの大きさは紛れもないところであろう．ちなみに，日本で技術者倫理を専門職倫理として開花させるべく苦心している一人に，名古屋大学の伊勢田哲治がいる．伊勢田によれば，教室において工業系の学生に望ましい種類の，専門家としての誇り(professional pride)を養成する一番良い方法は，技術者によって提供されるサービスの重要性を強調することである．このようにして獲得された専門家としての誇りは，専門家としての高潔さ(professional integrity)につながるだろう．専門家としての能力(たとえば高度な教育と技能)の強調もまた，専門家としての誇りを育てるかもしれないが，しかしこの種の誇りが専門家としての高潔さに結びつくことは期待できない，という(Tetsuji Iseda “How Should We Foster the

Professional Integrity of Engineers in Japan? A Pride-Based Approach" *Science and Engineering Ethics*(2008)14, Springer,p.174). 伊勢田は科学哲学と倫理学の第一級の理論家であり，規範倫理としては功利主義理論の擁護者として知られてきた（近著としては，Unsettled-Domain Utilitarianism: A Revision of Hare's Two-Level Theory for Application, *Philosophy(Tetsugaku)*, Annual Review of the Philosophical Association of Japan No.59/April2008,pp.25-38）．それだけに，誇りという徳への彼の訴えは一層興味深いことである．徳育に関しては筆者も以下のような拙稿をまとめたことがある．「徳育としてのリスクコミュニケーション──技術者倫理教育のために──」『東京工業高等専門学校研究報告書』39(1)，2008，pp. 15-27

（2）JABEE としては高いハードルを設ける意図はなかったと思われる．認定基準の解説において，「技術と自然や社会との係わり合いを特定分野について理解させるのでも差し支えない」と述べ，種々の方法があることを示唆しているからである．教育方法としては事例が用いられることが多い．しかし，事例が持っている倫理としての問題点（達成目標）がなにかを十分見極めないと教育の効果がないことが報告されている．井上昭・佐藤勲　連続講座技術者倫理教育の最前線「2.2　JABEE 審査の現場から－大学審査における技術者倫理教育の現状と問題点」日本機械学会誌 2007.7　Vol.110　No.1064　pp.539-540

（3）梅津光弘「9　企業倫理－技術者倫理確立の条件：個人倫理，企業倫理，社会的支援制度との関係から」『はじめて学ぶ技術者倫理の教科書』2008 年 5 月，丸善株式会社，監修者　今道友信　札野順，p.130

（4）川北・浅野・河村・木村・庄司「技術者倫理教育に関する全国高専アンケート結果の一考察－自由記述欄回答から学べることー」『東京工業高等専門学校研究報告書』第 39(2)，2008，pp. 23-34

（5）http://weblearningplaza.jst.go.jp/

（後記）本論文は平成 18－20 年度科学研究費補助金基盤研究C，「工業高専および企業における人材育成と技術者倫理教育の現状と課題」(川北晃司・河村豊・浅野敬一・木村南・庄司良）による研究成果の一部である．また，本稿は「Web ラーニングプラザ」の意見窓口である，科学技術振興機構研究基盤情報部情報整備課まで提出済みであり，執筆者である日本技術士会と相談しながら，現行のコースおよび今後制作のコースに活かしていきたい旨の回答が事務局より 10 月 31 日にあった．

（平成 20 年 9 月 25 日　受理）

毛細管内の水の振動流による増強熱伝導

清水昭博*，戸谷祐季**

Enhanced Heat Conduction in Oscillatory Flow of Water through Capillary Tubes

Akihiro SHIMIZU, Yuki TOTANI

An experimental apparatus which has two reservoirs in different temperatures connected by a bundle of straight capillary tubes with the inner diameter of 1 mm and the length of 120 mm and water occupied in the tubes oscillated by a piston of sinusoidal motion has been fabricated and experiments on enhanced heat conduction by this apparatus with the capillary tubes and the same tubes with copper wires inside have been carried out. To achieve uniform temperature distribution in each of both reservoirs, natural convection of water was utilized. The range of frequency of oscillation was 0.1 to 20 Hz and the tidal displacements of water in capillary tubes were 50,100,150 mm. The obtained thermal conductivity was 130 to 19000 W/mK.

(Keyword: oscillatory flow, capillary tube, thermal conductivity)

1.　はじめに

高頻度振動換気による人工呼吸器 [1]からヒントを得て，拡散と熱の偏微分方程式が同じ形であることから，拡散と同様に熱伝導も増強されるはずであるとして，Kurzweg によって特許が取得された「ドリームパイプ」は，毛細管内の流体の振動流によって液体自身は流れないにもかかわらず，大きな熱輸送を実現する装置 [2] [3]で，ヒートパイプと同様に熱制御および省エネルギー技術において重要な熱輸送デバイスである．ヒートパイプが受動的であるのに対して，ドリームパイプは振動流の振幅や振動数などを変えることにより有効熱伝導率などの熱輸送能力を容易に制御できるなどの特徴を有する能動的なシステムである．

Kaviany ら [3]は高温側および低温側の各々の水槽内の温度分布のバラツキを無くすことが重要である旨，述べている．

また，Ye ら [4]は内面に円周方向の溝を付けた管路内において水の振動流中のインクの拡散実験を行った結果，直管に比べて有効拡散係数が向上することを報告した．管路内面に工夫を施すことによって，熱伝導がさらに増進することが期待できるのではないか，と考えられる．

そこで，本研究では，実験装置に工夫を施してより精密な実験を可能にし，振幅と振動数を変え，毛細管内部に銅線等挿入による工夫を施して実験し，増強熱伝導の可能性について考察する．

2.　実験装置および方法

製作した実験装置の概略図を図 1 に示す．高温側と低温側の両水槽および毛細管内とも水道水を満たし，水槽内温度分布を各々できるだけ一様にするため，自然対流を利用した工夫を施した．高温側水槽の底板を熱伝導性良好な銅板で製作し，その下に平板型ラバーヒータ（スリーハイ製，320 W）を設置し，高温側水槽側面の中央から出る毛細管との連結部が最下部になる位置に低温水槽を設置した．毛細管の管軸を含む鉛直面が高温側水槽および低温側水槽の中心を通るように設置した．寸法はすべて容器の内寸である．

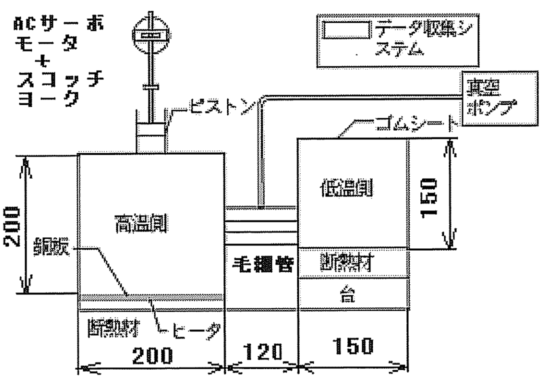


図 1　実験装置概略

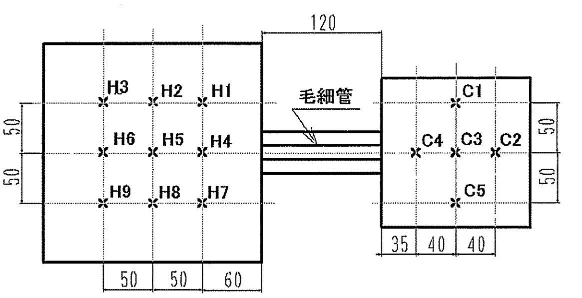
両水槽とも透明な厚さ 10 mm のアクリル製で，その容積は，高温側の温度変化を最小限にするために高温側水槽を大きくして内寸で一辺が 200

*機械工学科　**日本造船技術センター

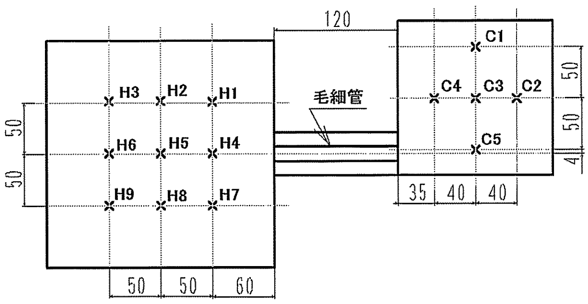
mmの立方体，低温側は温度が上昇しやすくするために小さくして一辺が 150 mmの立方体とした．高温側水槽の上部にはスコッチヨークの出力軸に取り付けられたアルミ製ピストンがちょうど入る内径 42 mmのアクリル製円筒を設置し，下面のみ厚さ 1 mmの銅板とした．低温側水槽の上面はピストンの上下動に合わせて容易に上下動ができるように全面を厚さ 1 mmの弾力性のあるゴム板で覆った．高温側水槽は水槽の中心のK熱電対と温度調節器（スリーハイ製、THC-15）により 60±2℃に制御した．両水槽の外面は厚さ 5 mmの発泡スチロール板（スタイロフォーム）で断熱した．

長さ 120 mm，内径 1 mm，外径 1.5 mm の透明なガラス製毛細管を外径 18 mm，内径 14 mmの透明なアクリル管内に密に詰めた．その本数は 63 本であった．詰め終わった各毛細管の外周をお互いにシリコン接着剤で覆って塞ぎ，毛細管内のみを水が移動できる空間とした上で，内径 42 mmの透明なアクリル管の中に管軸を一致させて高温側と低温側の両水槽間に連結した．両アクリル管の間の空間は真空ポンプを用いて真空断熱した．

振動流は一定の回転速度の AC サーボモータ（オリエンタルモータ製，BX230A-5，最大出力 30 W）の回転をスコッチヨークによりピストンの単弦運動に変換することによって発生させた．



(a) 低温側水槽の中心に毛細管（改善前）



(b) 低温側水槽の最下部に毛細管（改善後）

図 2　低温水槽設置位置と温度測定点

水槽内の正面からみた温度測定点位置を図 2 に示す．(a)は両水槽の向かい合う面の中央に毛細管が設置された場合であり，(b) は毛細管を低温側水槽の最下部に配置して自然対流によって，一様温度になることを利用したものである．各水槽の両側面の各位置に熱電対が通る小さな穴を開け，測温接点が水槽中央の鉛直面上に来るよう通して張り，シリコン接着剤で固めた．温度測定にはエナメル被覆の素線径 0.32 mmの T 熱電対を使用し，温度をデジタルマルチメータ（KEITHLEY 社，2700 型）で読み取り，RS232C ケーブルで接続したパソコンに取り込む方法をとった．

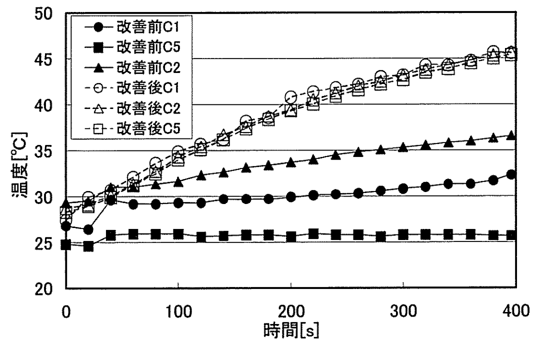


図 3　低温側水槽内各部の温度変化測定例

低温側水槽と毛細管取り付け位置の関係が適切であることを確認するため改善前（毛細管が低温側水槽の中央）と改善後（毛細管が低温側水槽の最下部）として，振幅と振動数を同一にしたときの各点における温度変化を測定し，図 3 のように，C1, C2, C5 について比較すると，改善前に比べ，改善後は水槽内温度分布がほぼ一様になっている．測定中の 3 点間の最大温度差が，改善前の 11℃に対して改善後は 3℃であった．

このことから低温側水槽の最下部に毛細管を接続することは適切であることが確認できた．なお，温度変化が最も安定していた点を代表点として決めた．それらは，高温側 H6，低温側 C3 である．

起動した時の両水槽内の温度測定結果例(サンプリング周期 1 s)を図 4 に示す．これより，高温側が約 60±2℃に保たれている事が確認できる．

振幅 Δx を約 50 mm，100 mmにし，振動数 f を 0.1，0.5，1，5，10，20 Hz について実験を行った．管内径 1 mmに対してのみ管長より長い Δ

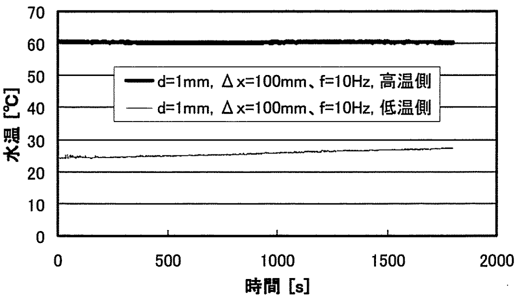


図4　水槽温度変化の測定結果例
（$\varDelta x$=100 mm,　f=10 Hz）

x=150 mmも測定した．また，それ以外に管内形状を変化させるために1 mmの内径の管に素線径0.28 mmのスパイラル状の銅線を挿入したものと，素線径0.28 mmの銅線を四つ編みにしたものをそれぞれ挿入し，有効熱伝導率の違いを調べた．図5に挿入した銅線等の写真を示す．

低温水槽の温度上昇の時間的割合から高温水槽から低温水槽への熱流量は式(1)で求まる．

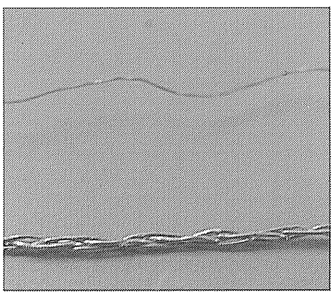


図5　毛細管内に挿入したスパイラル銅線（上）と四つ編み銅線（下）

$$Q = c\rho V\frac{dT}{dt} \tag{1}$$

ここで，c: 水の比熱，ρ：水の密度　V: 低温側水槽の容積，dT/dt：低温側水槽の上昇温度勾配である．

また，この熱流量Qの値から有効熱拡散率κ_eが次式(2)で算出できる．

$$\kappa_e = \frac{L}{\Delta T}\times\frac{1}{\rho c}\times\frac{Q}{N}\times\frac{1}{\pi R^2} \tag{2}$$

ここで，L：毛細管長さ，$\varDelta T$：両水槽間温度差，N: 毛細管本数，R: 毛細管の内半径である．

また，有効熱伝導率λ_eは式（3）で算出する．

$$\lambda_e = \kappa_e \times (c\times\rho) \tag{3}$$

さらに，熱流束qは，

$$q = \rho c \kappa_e \Delta T / L \tag{4}$$

である．

3. 実験結果および考察

水槽の水を振動させない状態で直径14 mm，長さ120 mmのアルミニウム丸棒を毛細管の束の代わりに挿入して実験した結果，図6のような結果が得られた．この結果より，アルミニウムの熱伝導率を算出すると，1.5×10^2 W/mKとなった．文献値[5]は300 Kの時237 W/mKである．このことより，この実験装置によってある程度信頼できる値が得られることが検証されたと言える．また，$\varDelta x$=100 mm，f=1 Hzの例もプロットしてあるが，アルミよりも早く低温側の温度が上昇している．

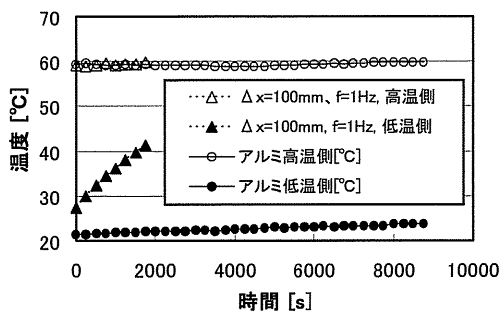


図6　アルミ丸棒との温度変化の比較

実験結果から求めた熱流束qを図7に示す．fに比例してqは大きくなるが，fが5から10 Hzあたりがピークでその後減少に転じている．また，$\varDelta x$が大きい方がqは大きい．$\varDelta x$=150 mmでは10 Hzで5100 kW/m^{2}に及んでいる．振動数

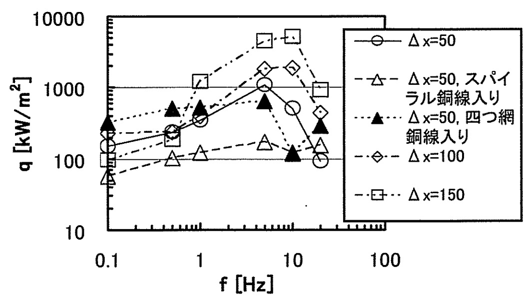


図7　熱流束

などの条件を変えることによって，幅広い熱流束の制御ができることを示している．

算出した有効熱伝導率λ_eを図８に示す．Δxが大きい場合，1～10 Hz の領域で大きなλ_eが得られている．本実験条件の中での最小値は 130 W/mK，最大値 19000 W/mK であるが，最大値は本実験における最大のΔx=150 mm の場合に対応する．毛細管の長さと振幅を大きくすることが有効と言える．

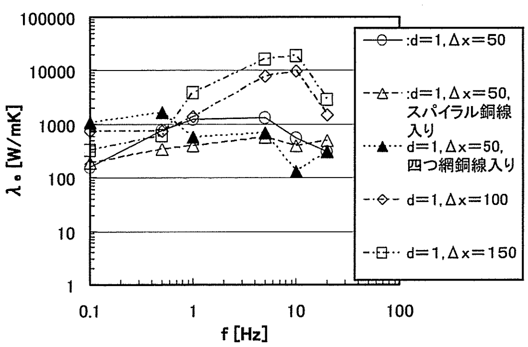


図８　有効熱伝導率

同様に角振動数ωとΔxの２乗の積で無次元化したκ_eを無次元振動数である Womersley 数α $(=a\sqrt{\omega/\nu})$に対してプロットしたグラフを図９に示す．本実験の結果のオーダーは長さ 427 mm の毛細管を用いた Kaviany ら[3)]の結果とほぼ一致している．Δx=150 mm の場合，低いαの領域で非常に小さくなってしまっている．毛細管の管長 120mm よりもΔxの方が大きかったため管端からお互いの水槽に流れがはみ出しているが，低いαの領域では，ゆっくりした流れになるため，半径方向の分子拡散の効果が現れ、さらに流れ込んだ水槽内での混合によって半径方向の拡散が助長されることで，軸方向拡散が抑制されてしまい（Taylor 拡散[6)]），大きく低下しているものと考えられる．スパイラル銅線を挿入した場合，直管よりも有効熱拡散率は低い．一方，四つ編みにした銅線を挿入した場合は低いαの領域で突出しているが，高いαになると急激に低下している．銅線の挿入による熱伝導増進のメカニズムははっきりしないが，四つ編みの場合に低い振動数領域で効果があることがわかった．工夫次第で熱伝導をさらに増進させる可能性を秘めていると言える．

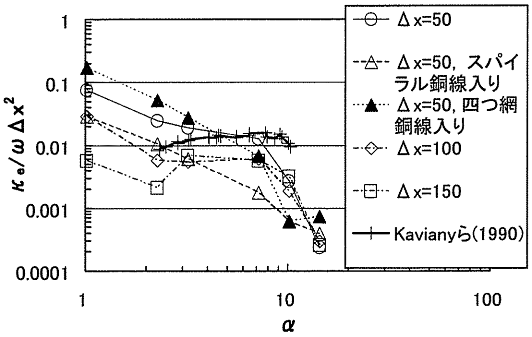


図９　無次元化した有効熱拡散率

4. まとめ

高温側と低温側の両水槽の温度分布を均一にする工夫をしたドリームパイプについて，直管と管内に銅線を挿入した場合について，振幅と振動数を変えて実験した結果，本実験の範囲内で次の結論を得た．

(1)条件の違いにより，有効熱伝導率 130～19000 W/mK を得た．

(2)毛細管長よりも長い振幅の振動流に対しては，低振動数領域で熱伝導増進は阻害される．

(3) スパイラル状の銅線装着は効果的ではないが，四つ網の銅線は，低振動数領域で効果的である．

参　考　文　献

1) M. J. Jaeger and U. H. Kurzweg, Determination of the longitudinal dispersion coefficient in flows subjected to high–frequency oscillations, Phys. Fluids, **26** (1983), 1380-1382.

2) U. H. Kurzweg, and L. D. Zhao, Heat transfer by high-frequency oscillations: A new hydrodynamic technique for achieving large thermal conductivities, *Phys. Fluids*, **27**－**11** (1984), 2624－2627.

3) M. Kaviany and M. Reckker, Performance of a Heat Exchanger Based on Enhanced Heat Diffusion in Fluids by Oscillation: Experiment, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, (1990), 56-63.

4) X. Ye, M. Shimizu, Augmented longitudinal diffusion in grooved tubes for oscillatory flow, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **44**,(2001), 633-644.

5) 日本機械学会編，伝熱工学資料（改訂第４版）．

6) G. I. Taylor, Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube, *Proc. R. Soc. London,* **A219**(1953), 186-203

(平成 20 年 9 月 25 日受理)

マイクロ領域における摩擦特性
（第１報：摩擦速度および押付け荷重の影響）

福田勝己*，小林光男**，鈴木健司**，堤　博貴*，飯田貴大***，小澤直樹****

Friction Characteristics of Micro Area
(1st Report : Effect of Friction Velocity and Normal Load)

Katsumi FUKUDA, Mitsuo KOBAYASHI, Kenji SUZUKI, Hirotaka TSUTSUMI, Takahiro IIDA and Naoki OZAWA

This paper describes development of a low-load tribo-device in order to obtain micro-scale friction force. Friction is a phenomenon to have between two objects which contact and sliding by all means. In studying friction, we can raise efficiency of energy and necessary for machine movement stability. Important in the research and development of the micromachine in particular. In this study, I use a glass wafer for a sample and make an experiment to clarify a friction characteristic in micro load area.
(Keywords: Parallel leaf spring, Friction coefficient, Tribology, Wear, Friction)

1. 緒言

トライボロジー(Tribology)とは，摩擦・摩耗・潤滑を総合的に取り扱う学問領域である．中でも摩擦は，２面が接触して相対運動する場合に，２つの物体間で必ず起こる現象である．特に工業分野においては，機械の高効率化・高性能化のために，摩擦のメカニズムを解明することが重要である．[1)2)]

近年，機械要素の小型化が進むに伴って，マイクロマシンや MEMS の技術が広く使われるようになってきた[3)]．しかし，機械のしゅう動部が微小になればなるほど，マクロ空間では無視されてきた表面エネルギー等が大きく働き，マクロ空間における摩擦のメカニズムだけではミクロ空間の摩擦を明らかにすることは，不十分であると考える．

本研究では，マイクロマシンや MEMS 等の研究で不可欠な微小領域における摩擦特性について実験的に考察する．マイクロマシンや MEMS では，通常，表面が非常に平坦で且つ化学反応を受けにくいシリコンウエーハやガラスウエーハ等の材料上で作成される場合が多い[4)5)]．しかし，ウエーハ表面との接触が避けられない場合，結晶方位性を持つシリコンウエーハでは，駆動方向により摩擦力等に影響を及ぼすことが懸念される．

そこで本実験では，結晶状態等を考慮する必要のないガラスウエーハ表面と触針（先端曲率半径が 2μm のダイヤモンド触針）とを微小な領域で接触・摩擦させ，その摩擦の変化について考察する[1)6)]．

本報では，雰囲気一定の状態下において，摩擦速度や押付け荷重を変化させた場合の摩擦力（摩擦係数）の変化を中心に考察する．また，摩擦痕を走査型電子顕微鏡（以下 SEM）で観察し，それぞれの条件下での摩擦状態についても考察する．

2. 実験

2.1 実験装置

Fig. 1に実験装置の概観を示す． 装置全体は，外部からの振動を除去するために除振台の上に設置し．実験はクリーンブース内で行った．

実験装置は，測定試料を固定し，一定速度で駆動するステージ部と，平行平板板ばねにダイヤモンド触針を取り付け，その変位量から押付け荷重，摩擦力を測定する測定部とに大きく分かれる．

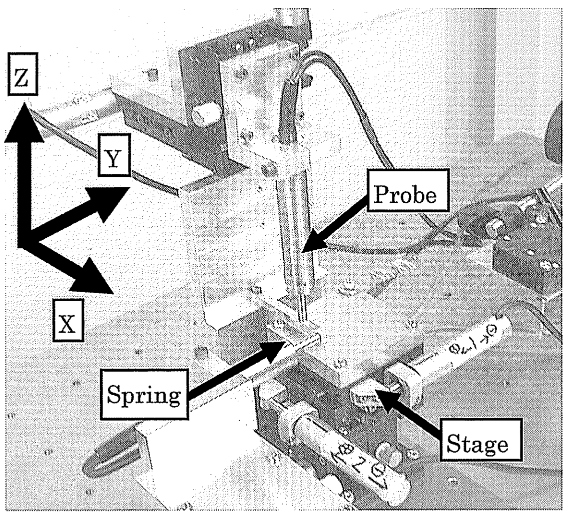


Fig. 1　Experimental setup

＊機械工学科　＊＊工学院大学　＊＊＊機械情報システム工学専攻
＊＊＊＊2008年３月　機械工学科　卒業生（現　東京工業大学工学部　３年生）

2.2 平行平板板ばね

本実験で使用した平行平板板ばねは，ジュラルミンのブロックより一体製作したもので，摩擦力と押付け力とを同時に測定するためのばね部を持ち，各ばね部は板厚 0.1mm，長さ 10mm である．Fig. 2 に製作した平行平板板ばねを示す．

この平行平板板ばねを使用して，摩擦力をばね 1 の変位より，押付け力をばね 2 の変位より測定した．

ばねは，押付け荷重によって交換し，より広範囲の荷重の測定を可能にした．押付け荷重が 10～57mN の場合には，押付け方向のばね定数が 1860N/m，摩擦方向のばね定数が 410N/m である．また，押付け荷重が 64～134mN の場合には，押付け方向のばね定数が 4550N/m，摩擦方向のばね定数が 3950N/m である．なお，ばねの変位測定には静電容量型変位計を使用した．

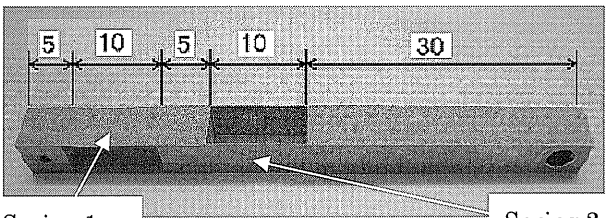


Fig. 2 Parallel leaf Spring

2.3 実験方法

実験は，平行平板板ばねの先端に取り付けたダイヤモンド触針（先端曲率半径 2μm）をステージ上に固定した試料表面に押付け，ステージをＹ軸方向に移動させることによって触針と試料表面とを摩擦させた．Fig. 3 に使用したダイヤモンド触針先端部の光学顕微鏡写真を示す．

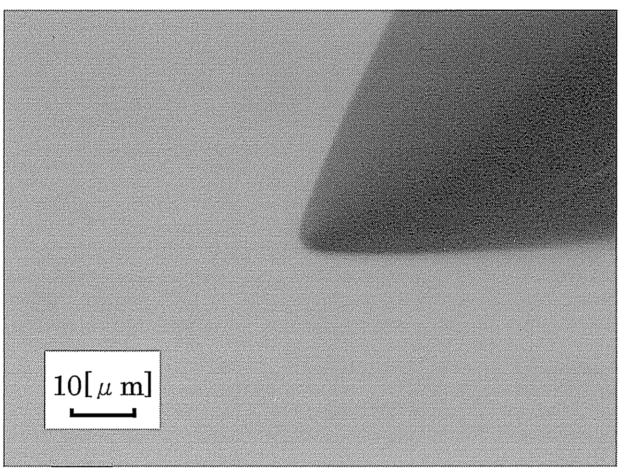


Fig. 3 Diamond tip (radius of curvature:2μm)

また，Ｙ軸テーブルは，移動速度を一定に保つために電動式とし，テーブルの移動速度は距離センサで測定した．

2.4 試料

本実験で使用した試料は，マイクロマシンや MEMS 等に使用される石英ガラスウエーハである．試料表面の算術平均粗さ *Ra* は 0.0046μm である．本実験は，半導体洗浄液，純水の順に，各 5 分間超音波洗浄を行った面で実施した．

2.5 実験条件

Table 1 に雰囲気条件を，Table 2 に実験条件を示す．この雰囲気条件は，クリーンブース内で一般的に設定されている値である．

なお，摩擦速度は±2μm/s の，押付け荷重は±2mN の範囲内で制御した．

Table 1 Atmosphere condition

Temperature [℃]	25±1
Relative humidity [%]	50±5

Table 2 Experimental condition

Normal load [mN]	10	20	30	38	49	57
	64	86	111	120	134	
Friction velocity [μm/s]	42		120		240	

3. **実験結果および考察**

3.1 摩擦力，押付け荷重と時間との関係

Fig. 4 に，ばねの変位量から算出した押付け荷重，摩擦力と時間との関係を示す．

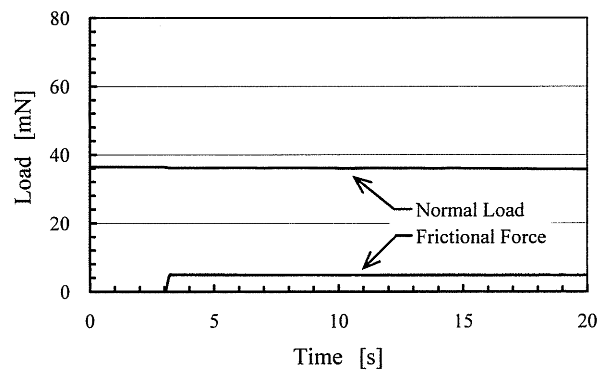


Fig. 4 Relationship between load and time
(Friction velocity 120μm/s)

摩擦速度は，実験開始後 3s 間は 0μm/s，3s 以降は 120μm/s である．

これより，押付け荷重は，摩擦速度が変化した直後に若

干の減少が見られるが，時間経過による大きな変化はほとんど見られず，約 36mN 一定である．また摩擦力は，摩擦速度が 120μm/s の場合に，約 4.8mN で安定した値を示している．この傾向は，押付け荷重が 10～38mN でも確認された．

しかし，押付け荷重が 49mN 以上の場合には，Fig. 5 に示すように，押付け荷重，摩擦力がある幅を持って変動する傾向を示した．この変動幅は，押付け荷重よりも摩擦力の方が大きいことが確認された．

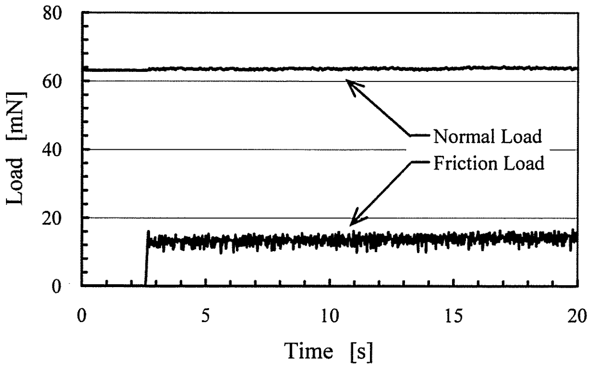


Fig. 5　Relationship between load and time (Friction velocity 120μm/s)

3.2 摩擦係数と時間との関係

本研究では，摩擦係数は，摩擦力を押付け荷重で除すことにより算出した．

Fig. 6 に，押付け荷重 38mN の時の摩擦係数と時間との関係を示す．なお，本実験では，3s 以降の 10～20s の摩擦係数の算術平均値を各々の測定における平均摩擦係数とした．

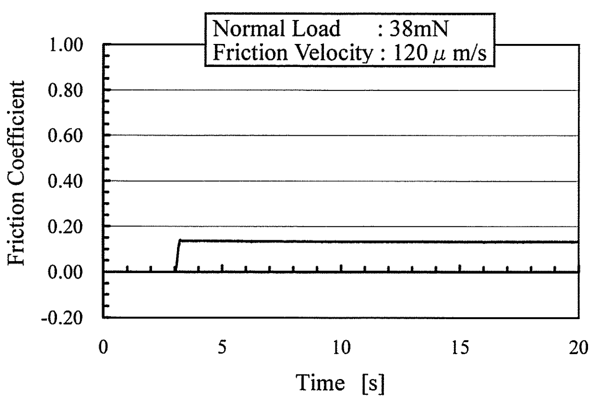


Fig. 6　Relationship between friction coefficient and time (Normal Load : 38mN)

これより，摩擦係数は，時間の経過によらずほぼ一定の値を示し，ほとんど変動しないことが分かる．この変動がほとんどないことは，押付け荷重が 10～49mN の範囲の実験結果でも確認された．

Fig. 7 に，押付け荷重が 57mN の場合の摩擦係数と時間との関係を示す．これより，38mN の場合と比較して，摩擦係数がある幅で変動していることが分かる．

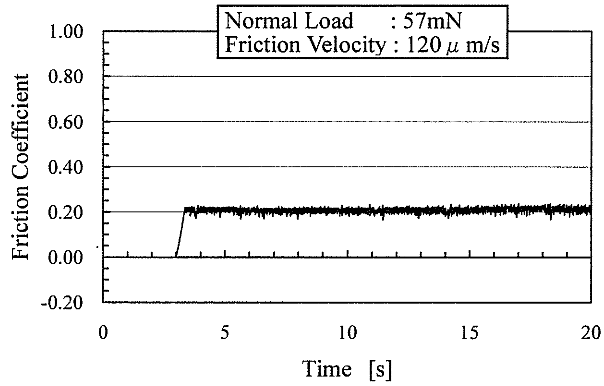


Fig. 7　Relationship between friction coefficient and time (Normal Load : 57mN)

この摩擦係数の変動は，本実験範囲内では 57～134mN で発生し，押付け荷重が大きい程，変動幅も大きいことが確認された．

また，実験中に摩擦係数が大きく変化し，ある値で安定する現象が見られた．これは，特に 86mN 以上の押付け荷重の場合に見られた．Fig. 8 に，押付け荷重が 120mN の場合の摩擦係数と時間との関係を示す．

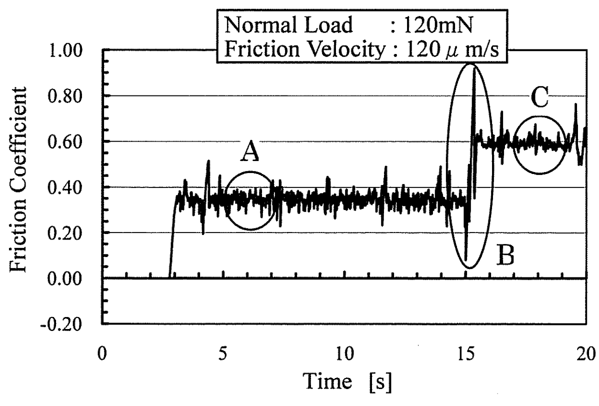


Fig. 8　Relationship between friction coefficient and time (Normal Load : 120mN)

これより，摩擦速度が 0μm/s から 120μm/s に達した直後から 15s までの間では，摩擦係数は約 0.34 の値を示しているが，15s 以降では摩擦係数は上昇し，約 0.59 の値で安定していることが分かる．

この上昇（場合によっては下降）した値で安定する傾向は，押付け荷重が大きくなるほど頻繁に確認された．

Fig. 9 に，摩擦係数の標準偏差を 3 倍にした値(以下 3σ値と呼ぶ)と押付け荷重との関係を示す.

これより，押付け荷重が 9～49mN における摩擦係数の 3σ値は，0.02 以下であることが分かる．また，押付け荷重が低いほど，摩擦係数の 3σ値が大きくなる傾向があるが，これは，押付け荷重が低いほど，ばねの変位量が少なくなるために，それを測定する静電容量型変位センサの電気的ノイズの影響を大きく受けてしまうためと考える．これに対して，押付け荷重が 57mN 以上の場合の摩擦係数の 3σ値は，すべて 0.02 以上であり，ほとんどが 49mN 以下の押付け荷重の場合の摩擦係数の 3σ値より大きな値を示すことが分かる.

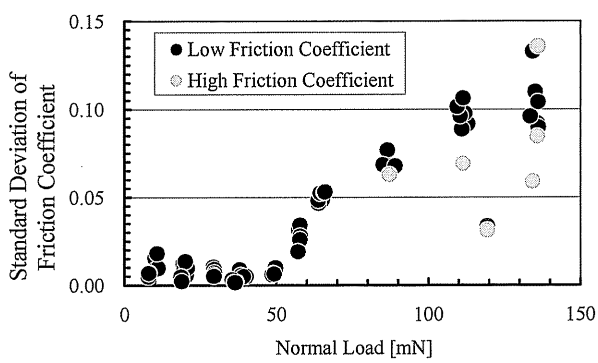


Fig. 9　Relationship between Standard Deviation of friction coefficient and Normal Load

3.3 摩擦係数と摩擦速度との関係

Fig. 10 に，押付け荷重が 38mN の場合の平均摩擦係数と摩擦速度との関係を示す.

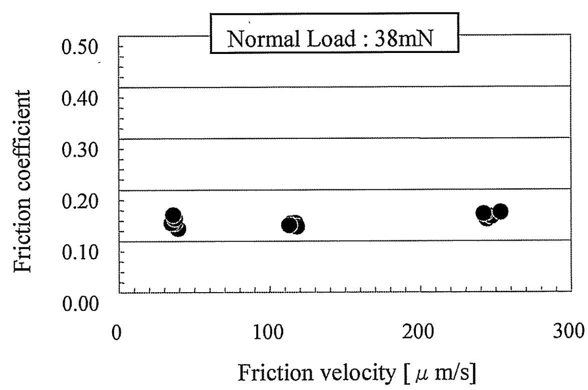


Fig. 10　Relationship between friction coefficient and friction velocity

図中には，摩擦速度が 42，120，240μm/s の 3 段階について示してある．これより，どの摩擦速度の場合においても，平均摩擦係数は 0.14 から 0.16 の間にあり，摩擦速度の違いによる摩擦係数の変化はほとんど見られない．本実験条件である摩擦速度が 42～250μm/s の間では，摩擦係数は摩擦速度に依存しないことが分かる．この傾向は，押付け荷重が 10mN や 20mN の場合でも同様のことが確認された.

3.4 摩擦係数と押付け荷重との関係

Fig. 11 に，摩擦速度が 120μm/s の場合の平均摩擦係数と押付け荷重との関係を示す．これより，平均摩擦係数は，押付け荷重の増加とともに増加する傾向があることが分かる.

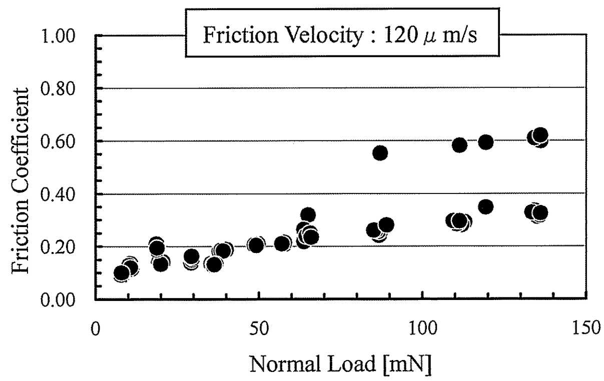


Fig. 11　Relationship between friction coefficient and normal load

また，86mN 以上の押付け荷重において，摩擦係数は 2 つの異なる高低の値を示している．高い値は Fig. 8 の A 部に，低い値は C 部に該当する摩擦係数である.

3.5 SEM 観察

Fig. 12，13 に，摩擦痕の SEM 写真を示す.

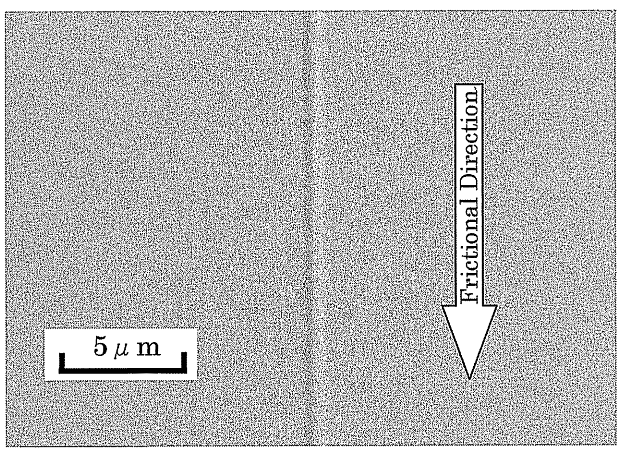


Fig. 12 Photograph of glass wafer
(Normal load 10mN, Friction velocity 42μm/s)

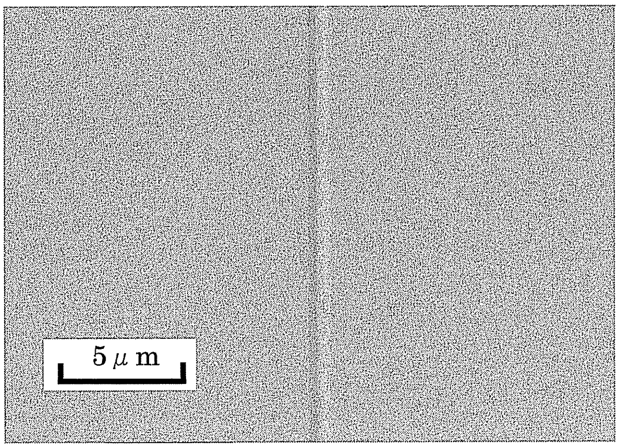


Fig. 13 Photograph of glass wafer (Normal load 10mN, Friction velocity 240 μm/s)

押付け荷重は，Fig. 12，13 ともに 10 mN であり，摩擦速度は，Fig. 12 が 42 μm/s, Fig. 13 が 240 μm/s である．摩擦方向は，Fig. 12 中に示すように，上方向から下方向である．

これより，Fig. 12，13 ともに，摩擦痕幅は約 0.8 μm であり，一定の幅で摩擦されていることが分かる．摩擦痕の観察結果から，摩擦速度が変化しても，42〜240 μm/s の間では，摩擦痕の様子にほとんど変化が見られないことが確認できる．この傾向は，押付け荷重が 20 mN，38mN の場合においても確認された．これより，押付け荷重が 10〜38mN の場合には，本観察から，その摩擦形態は凝着が支配的な摩擦であると考える．

Fig. 14〜16 に，Fig. 8 の摩擦実験の摩擦痕を観察した SEM 写真を示す．摩擦方向は，Fig. 16 中に示すように，左方向から右方向である．

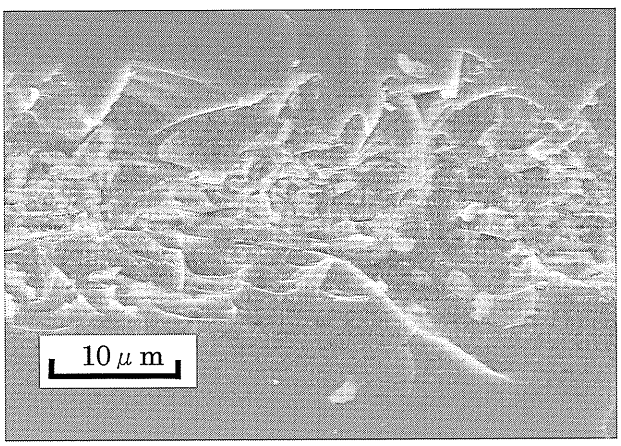


Fig. 14 Photograph of glass wafer (Normal load 120mN, Friction velocity 120 μm/s, Area A)

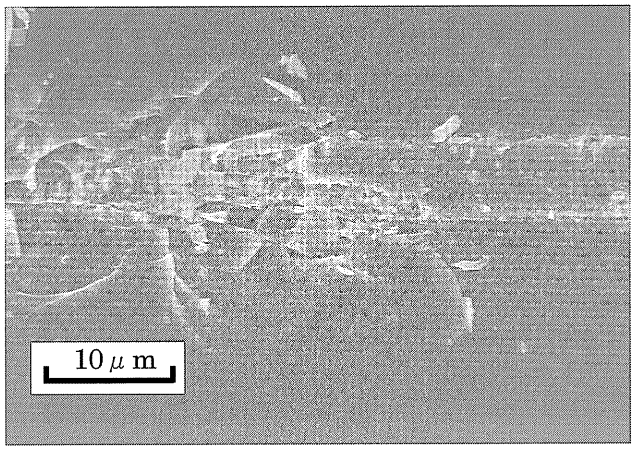


Fig. 15 Photograph of glass wafer (Normal load 120mN, Friction velocity 120 μm/s, Area B)

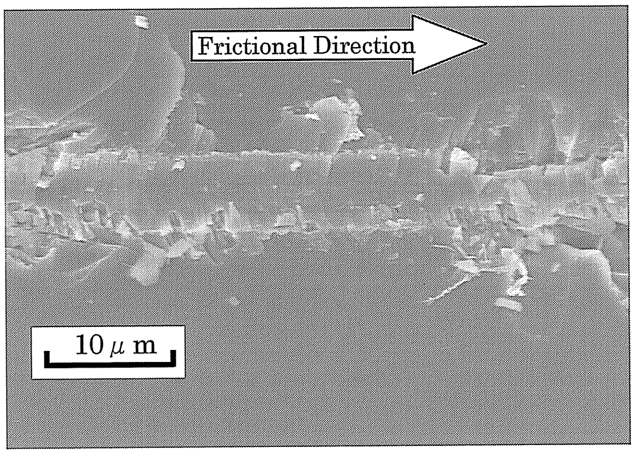


Fig. 16 Photograph of glass wafer (Normal load 120mN, Friction velocity 120 μm/s, Area C)

Fig. 8 にある A，B，C 部分の観察結果がそれぞれ Fig. 14，15，16 に対応している．

A 部分は，摩擦係数が 2 つの値で安定する場合の摩擦係数が低い状態である．

Fig. 14 は，A 部分の摩擦状態時における摩擦痕で，これより，ガラスウエーハ表面が激しく破壊していることが分かる．触針の先端曲率半径(2 μm)よりも激しくガラスウエーハ表面を破壊している摩擦痕は，押付け荷重が 86mN 以上の場合に確認された．

B 部分は，摩擦係数が 2 つの値で安定する場合の状態が低い方から高い方へ遷移する状態である．

Fig. 15 は，B 部分の摩擦状態時における摩擦痕で，これより，激しく破壊した摩擦痕からある一定幅の摩擦痕に遷移していることが分かる．

C 部分は，摩擦係数が 2 つの値で安定する場合の摩擦係数が高い状態である．Fig. 16 は，C 部分の摩擦状態時に

おける摩擦痕であり，ほとんどの部分は，ほぼ一定の摩擦痕幅であることが分かる．なお，摩擦係数が高い部分の摩擦痕は，ほとんどがFig. 16に示すような状態であった．

これらの傾向から，押付け荷重が86mN以上の場合には，摩擦面が激しく破壊し，本観察から，その摩擦形態は掘り起こしが支配的な摩擦であると考える．

4. 結言

ガラスウエーハ表面とダイヤモンド触針との微小摩擦実験を行い，摩擦速度，押付け荷重の違いが微小領域の摩擦特性に及ぼす影響について検討した．その結果，以下のことが明らかになった．

(1) 摩擦速度が変化しても，摩擦係数はほとんど変化しない．
(2) 押付け荷重が増加するに従って，摩擦係数も増加する．
(3) 押付け荷重が8～38mNの場合には，凝着が支配的な摩擦形態である．これに対して，押付け荷重が64～134mNの場合には，摩擦面が激しく破壊していることから，掘り起こしが支配的な摩擦形態であることが確認された．

参考文献

1) 福田勝己，小林光男，鈴木健司，小磯宏行，澤田　崇，山田洋路；マイクロオーダーにおける摩擦特性評価（第3報），日本機械学会東北支部第42回総会・講演会講演論文集，pp. 209-210(2007. 3)
2) Hokkirigawa, K. and Kato, K.；Tribology Int.， 21-1, pp. 51-57 (1988)
3) 福田勝己，加藤孝久；単結晶シリコンの微小摩擦特性に及ぼすSiO_2酸化膜の影響，日本機械学会論文集（C編）65巻629号，pp. 354-360 (1999. 1)
4) 安藤泰久；極小摩擦・摩耗測定の技術動向，月刊トライボロジ，pp. 14-16 (1999. 6)
5) 安藤泰久；微小荷重下のトライボロジー，トライボロジスト，vol.49 No.2, pp. 122-127 (2004. 2)
6) バウデン・テイバー（曽田範宗訳）；固体の摩擦と潤滑，丸善，pp. 5-6 (1961)

（平成20年9月25日　受理）

LPG･ガソリンエンジン搭載原動機付自転車の性能比較試験

志村　穣*，松林勝志**，筒井健太郎*

Performance Comparison between Motor Scooters Driven by LPG and Gasoline Engines

Jyo SHIMURA, Katsushi MATSUBAYASHI, Kentaro TSUTSUI

In this paper, some performance comparison tests between gasoline engine scooter and LPG engine one is described. They are the driving test on the public road, the constant speed running test on an oval course and the measurement of performance by a chassis dynamometer. Gasoline scooter could keep more than the speed of 40 km/h even when it ran steep uphill of Ohtarumi pass but LPG scooter made driver's feel lack of power because of its low torque and the speed of less than 30 km/h. The difference of fuel consumption between gasoline scooter and LPG one was very little, and there were both about 57 km/L. Fuel cost of LPG engine is approximately 2/3 times compared with gasoline one because of the difference of their prices. On the other hand, the generated horsepower of LPG engine was 2/3 times compared with gasoline one.

(Keyword: LPG engine, Environmental Protection, Fuel Efficiency)

1. はじめに

昨今，地球環境の悪化，温暖化が顕著になってきている．人間の経済活動による CO_2 の排出が大きな原因とされており，1997 年の京都議定書において，先進各国の CO_2 排出量を規制することになった．現在，産業界，特に車両分野では多方面からのアプローチで対策を講じている．燃料電池，電気，ハイブリッド，天然ガス，水素および LP ガス等，様々な車両の研究が盛んに行われている．

LPG 車両は家庭でよく使われているプロパンガスとブタンガスを混合したガスを燃料として走るものである．黒煙・PM(粒子状物質)を排出せず，NO_X，騒音および振動もディーゼル車両と比較して低減されている．今のところ，タクシー車両で活路が見出されている．

帝都産業株式会社では，従来から宅配サービス用車両のレンタルおよび販売を業務としているが，この世界的な CO_2 排出規制を鑑み，大手メーカー製の市販スクーターを LPG 動力源に改造することで環境性能および経済性の向上に取り組んでいる．しかしながら，諸性能を示す数値的データの蓄積がなされておらず，ガソリンエンジンに対する優位性を明示できていないのが現状である．そこで本研究では，帝都産業株式会社からの依頼を受け，LPG およびガソリンエンジン搭載原動機付自転車の性能比較試験を実施した [1]．試験内容は実地走行試験(公道走行)，定速走行試験，シャーシダイナモによる諸性能測定の 3 種類である．本報告はそれらの結果および考察を記したものである．

図 1 (a)　HONDA ZOOMER LPG エンジン搭載車

図 1 (b)　HONDA ZOOMER ガソリンエンジン搭載車

表 1 HONDA ZOOMER メーカー仕様

燃料消費率(km/L)	75 (30km/h，定地走行テスト値)
最高出力($kW[PS]/rpm$)	3.1[4.1]/8500
最大トルク($N \cdot m[kg \cdot m]/rpm$)	4.0[0.41]/5500

＊機械工学科　＊＊情報工学科

2．使用車両

本試験で使用した車両を図1に，メーカーによるガソリンエンジン車の仕様を表1に示す．図1に示す車両はいずれも新車であり，燃料とカラーリング以外は同スペックである．

3．試験方法

3．1 実地走行試験

LPGおよびガソリン車を同一ドライバーが運転し，異なる動力源によって走行中のフィーリングにどのような差異が生じるか調査を行う．本試験の走行経路は大垂水峠を経由するように設定し，車両に大きな負荷を与えるものとした．

3．2 定速走行試験

本試験は走行速度を一定に保ちながら決められた距離を走破し，その際の車両の燃料消費量を計測することによって燃費を算出するものである．燃料消費量の計測方法はLPGの場合が質量計測法，ガソリンの場合は満タン法とした．定速走行試験時の条件を表2に示す．試験はLPG車とガソリン車2台同時に行うが，運転者の体重差についてはウェイトにより調整し，同じ負荷(60kg)となるよう調整した．走行場所は八王子市スポーツ施設「滝ガ原サッカー場兼自転車練習場」を利用した．

3．3 シャーシダイナモによる諸性能測定

車両を二輪車専用ショップに持ち込み，シャーシダイナモによって最高速度到達時間および最高馬力の計測を行う．作業はショップのスタッフが実施した．

4．試験結果

4．1 実地走行試験結果

表3に公道走行試験の実施状況および結果を示す．

(1) LPG車

ガソリン車と比較してもう少しパワーがあると余裕を持って運転できる．大垂水峠の走行は可能であったが，登坂中の最高速度は30km/hであった．街乗りなら現状の出力で問題ないが，アップダウンの激しい道路を走行する場面では絶えずミラーを使って後続車の様子を注視しなければならず，走行にかなりの気遣いを要する．また，ガソリン車に比べて，アクセルを戻した際に車体の振動が気になる時がある．

LPG車では燃料を満タンにした場合，100kmの走行距離を確保できると事前に聞いていた．しかしながら最初の試験(4/29)では，燃料の残量を示す警告灯が50km走行あたりから点滅するようになり，燃料補給地が限定的であるという現実から，その後の走行に不安を感じた．この警告灯が点滅する現象は，燃料タンクの傾きおよび車体への設置方法に起因している．その後の走行試験ではこの点を踏まえ対処している．

(2) ガソリン車

平坦路および坂道ともにLPG車より力強い走行ができ，余裕を持って運転することができる．大垂水峠登坂中の走行速度は40km/hを下回ることはなかった．

4．2 定速走行試験結果

図2に定速走行試験の様子を，表4に定速走行試験の測定結果を示す．LPG消費量は質量計測法で，ガソリン消費量は満タン法で計測した．そのため，LPGは±2g(±3.4cc相当),ガソリンは±20cc程度の誤差が含まれる．したがって，燃費において0.6km/L程ガソリン車が上回ったが，完全に測定誤差範囲である．100円当たりの走行距離では，LPG車がガソリン車の約5割増しとなっている．燃料1L当たりの燃費はLPG車とガソリン車に差はなく，約57km/Lとなった．また，100円当たりの燃費ではLPG車は53.3km，ガソリン車は36.7kmであり，LPG車はガソリン車の約1.5倍の経済性をもつと言える．

4．3 シャーシダイナモによる諸性能測定結果

二輪車専門ショップでシャーシダイナモによる最高速度到達時間および最高馬力の測定を行った．図3に

表2 定速走行試験の設定条件

実験日	2008年5月8日	
	天気	晴れ
	気温	22℃
ドライバー体重	2名	65kg
LPG	体積密度	0.587kg/L
燃料単価	LPG	107円/L
	Gasoline (regular)	157円/L
走行コース	直線	80m
	コーナー	41R(m)
	周長	417.6m
	周回	80周
	走行距離	33408.85m
走行速度	一定	30km/h

表3 公道走行試験実施状況および結果

燃料種別	日時	天候	気温[℃]	走行経路	距離[km]	時間[min]
LPG	4/29(火)	晴れ	18	学校→上野原(城山経由)	42.8	100
LPG	4/30(水)	晴れ	14	上野原→学校(大垂水峠経由)	27	60
Gasoline	4/30(水)	晴れ	17	学校→上野原(大垂水峠経由)	27	45
Gasoline	5/1(木)	晴れ	13	上野原→学校(大垂水峠経由)	27	40

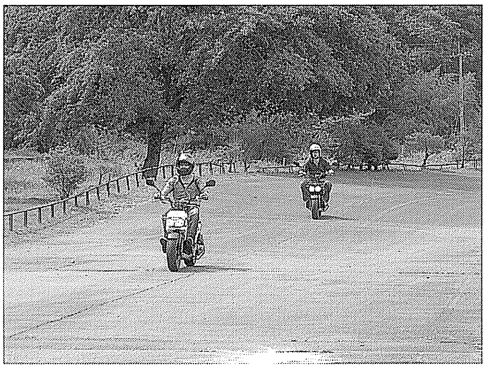


図２ 定速走行試験の様子

表４ 定速走行試験測定結果および算出結果

LPG タンク 質量	試験開始時	5950g
	試験終了時	5606g
LPG タンク 表面温度	試験開始時	34℃
	試験終了時	18℃
燃料消費量	LPG	0.344kg
	LPG	0.59L
	Gasoline	0.58L
燃費	LPG	57.0km/L (質量計測法)
	LPG	53.3km/100 円
	Gasoline	57.6km/L (満タン法)
	Gasoline	36.7km/100 円
燃費比	LPG/Gasoline	1.45

計測の様子を示す．使用車両はＶベルト駆動でありギア比が常に変動するため，横軸をエンジン回転数にとった測定はできない．したがって，横軸を速度とした速度 - 出力線図および時間 - 速度線図の測定をアクセル全開で実施した．その結果を図４，５に示す．

図４より後輪最大出力はガソリン車が 3.2PS，LPG 車が 2.0PS であり，ガソリン車は LPG 車の 1.6 倍となることがわかる．図５を要約すると表５のようになり各速度到達時間については，LPG 車はガソリン車のほぼ 1.6 倍となっている．

５．まとめ

本研究では，帝都産業株式会社からの依頼を受け，LPG およびガソリンエンジン搭載原動機付自転車の性能比較試験を実施し，以下の知見を得た．

(1) 実地走行試験

大垂水峠のような連続した坂が続く道路では，ガソリン車は 40km/h 以上を継続走行できるが，LPG 車は 30km/h しか出ずパワー不足である．燃料タンクは正しく設置しないと燃料残量警告灯が点滅する恐れがある．LPG 車はガソリン車と比較してパワー不足を感じるが，市街地走行では特段の問題はないと思われる．

(2) 定速走行試験

燃料 1L 当たりの走行距離は，LPG 車もガソリン車も差はなく，約 57km/L となった．ただし，100 円あたりの走行距離は LPG 車の方がガソリン車より約 1.5 倍

図３ シャーシダイナモによる計測風景

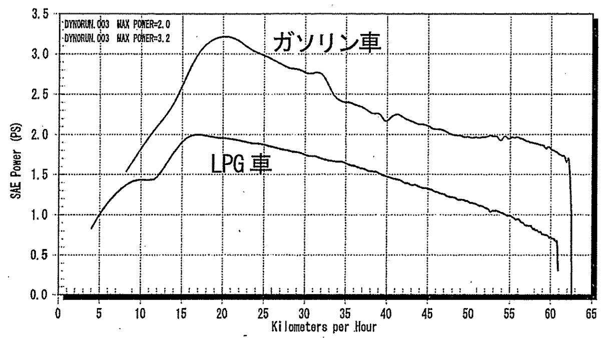


図４ 速度 - 出力線図

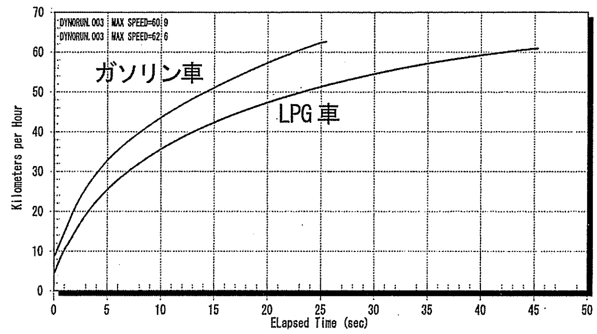


図５ 時間 - 速度線図

表５ 各速度到達時間

車 種	30km/h	40km/h	50km/h	60km/h
Gasoline 車	4.1 秒	8.1 秒	14.2 秒	22.4 秒
LPG 車	6.9 秒	13.0 秒	23.0 秒	40.1 秒

優れている．また，LPG 車はガソリン車に比較してほぼ 1.5 倍(5 割増)の経済性を有する．

(3) シャーシダイナモによる諸性能測定

後輪出力は，ガソリン車の方が LPG 車より約 1.6 倍優れている．アクセル全開での 30, 40, 50 および 60km/h への到達時間については，LPG 車の方がガソリン車より約 1.6 倍の時間を要する．最大馬力に関しては，LPG 車はガソリン車のほぼ 2/3 倍である．

参考文献

1) 松林勝志，筒井健太郎，志村 穣，受託研究報告書“LPG・ガソリンエンジン搭載原動機付自転車の性能比較試験”，pp.1-8, 2008.5.

(平成 20 年 9 月 25 日 受理)

短納期デザイン試作の検討
——光造形法、NC 切削法およびゴム型エポキシ注型の比較——

木村　南*，坂本　俊**

Comparison of Rapid Prototype Manufacturing Technology

Minami KIMURA, Shun SAKAMOTO

The cellular phone case was made for trial purposes by three methods that the epoxy resin molding using silicon rubber mold, the laser beam machining, and were the NC miller processing, and externals and the cost were compared. The merit of the epoxy resin mold tells the image in addition to the creativity's cheap, handy, and existing easily, and the size of the manufacture is additionally free. A laser forming can mold the thing of complex shape in a short time, and the shaped article is a make near the NC milling or any more. As for a laser forming, 37 times and NC milling increased by a factor of 43.5 when the epoxy resin molding was assumed to be one in the comparison of costs.

(Keywords: rapid proto typing, silicon rubber molding, laser molding)

1. はじめに

樹脂部品の試作としてはウレタンゴムによる試作注型技術が開発されている．そして光造形によるデザイン試作が盛んに行われるようになってきた．その一方自動車のデザイン開発では粘土モデルによるデザイン検討が欠かせない．著者らはシリコンゴム型や粘土型による CFRP の簡易成形法を開発してきた [1)-3)]．そこで粘土モデルを原型とするシリコンゴム型でのエポキシ注型と光造形によるデザイン試作を比較検討した．同時に NC フライス切削という従来からデザイン試作に用いられてきた方法と比較した．

2. 試作デザイン

2-1　アンケート調査

光造形機，NC フライスともに製品寸法に制約があるので，PC マウス，携帯電話，PDA などを対象にしてレンダを作成することにした．機械工学科 5 年生 5 名にインタビュー形式でアンケートをとった結果，携帯電話筐体のデザイン試作を行うことにした．

まず機械工学科 5 年生に携帯電話に関するアンケートを実施し，よく使う機能の結果を Table1 に示した．

Table 1 Result of the questionnaire

Function	number
mail	14
Web	7
talk	5
alarm	2
PC site viewer	2
camera	1

携帯電話の機能としてメールや web の閲覧が多く使われ，あまり会話には使われていない．またカメラ機能については 24 人中 1 名しか使っていないことがわかった．ただしアンケート時期が 2007 年 6 月の時点であり，まだワンセグ機能付きの携帯電話が少なく使用状況については変化があると思われる．

携帯電話のデザインに際して東京高専機械工学科 5 年生 24 名へのアンケート(2007 年 7 月実施)の結果から一番評価の高かった Fig.1 にはアンケート実施時に発売されていた携帯電話について 4 分法で X 軸にデザインイメージとしてシャープとかわいいを配置し,Y 軸に多機能と単機能に分類した.学生が実際に使用している機種は機能があまり多くなく,どちらかというとかわいい傾向の機種が多かった.またアンケート調査時点ではワンセグ機能搭載モデルは市販されておらず,メール機能が重視されボタンの押しやすさやホールディング性などへの関心が高かった．

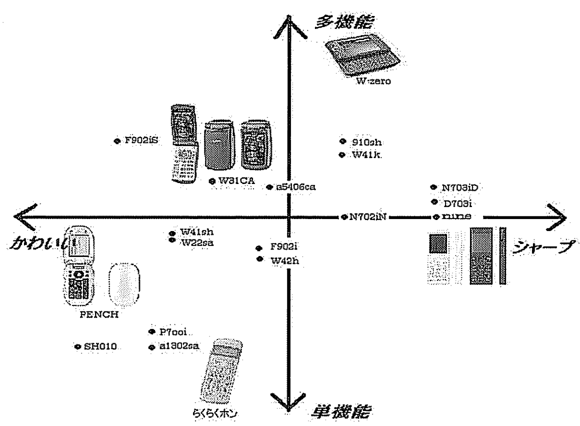


Fig.1 Mobile phone image analysis (2007)

特に学生に使いやすいという評価が高かったモデルが au-W31CA という Fig. 2 に示すモデルであった．全体的には小ぶりで，ある程度厚みがあるのでボタンが押しやすいモデルであった．

＊機械工学科　＊＊機械工学科2007年度卒業生

Fig.2 Recommended mobile phone au-W31CA

2.2 デザイン検討

デザインコンセプトとして，メールなどが打ちやすいボタン入力がしやすい形状のデザインのレンダを起案した.

そこでボタンを押しやすくするための階段状ボタンを考えてFig.3 にレンダを示した.

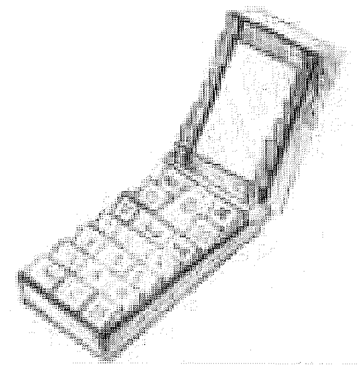
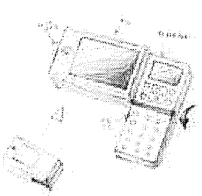
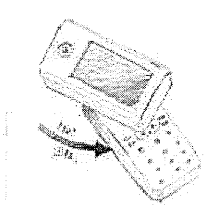


Fig.3 Design sketch of mobile phone with step button





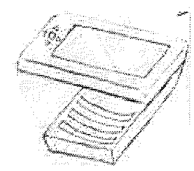


Fig.4 Type B　　Fig.5 Type C　　Fig.6 Type D

そこでこれらのデザインニーズから 8 種類のスケッチを描き Fig.2～Fig.6 にその一部を示した.

まず段階 1 で検討した Fig. 3 に示すように階段状ではボタンが押しやすい反面，見た目や通話への支障が危惧され，ソフト面においても困難だと推測された.

次に段階 2 で検討した Fig. 5 に示すような両手操作型は，ターゲットである高専生（20 代学生）はゲーム世代なのでゲームコントローラーのように操作ができるように狙ったが，実際に作画を何人かの学生に見せたところ，評価はあまり良くなかった．これはメールを入力する際には片手で行う学生が多く，メールに対してすばやく返信することが求められているので，両手入力は好まれなかったと考えられる. 日本でのスマートフォンとしてウィルコム 03 がスライド式キーボードにより両手入力を可能にしたが，パソコン世代の中高年には支持されたが，20 代の所有者は少なかった. 従って現在市場に出ている携帯電話と似たような形状かつ，ボタンの押しやすい形を模索した.

その結果が Fig. 8 に示すボタンのサイズによる検討である. これは現在のボタン配置で，ボタンの大きさを変えたものである．この形状ならば馴染みもあり，かつボタンも押しやすいと思われる．以上の構想により，プロトタイプのデザインは Fig. 7 に決定した.

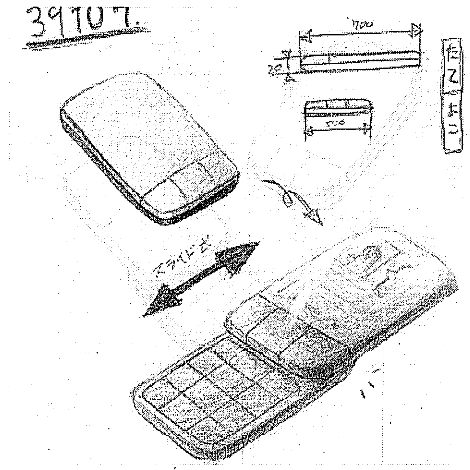


Fig.7 Prototype design

3. 1 シリコンゴム型エポキシ注型

まず美術用粘土(plus)で Fig. 1 のレンダに基づき Fig. 2 上部に示すベースとなる携帯電話形状を作製し容器内に静置し，次にシリコンゴム(信越シリコーン KE-12)を流し込み Fig. 2 下部に示すシリコンゴム型を作製した. 50 分硬化型硬化剤を混合したエポキシ樹脂(日新レジン製 Z-1)を流し込み，硬化させた.

Fig. 8 Clay model

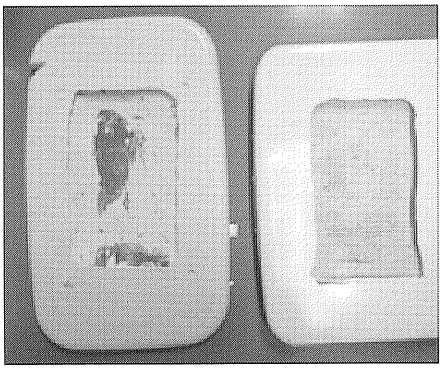


Fig.9　Silicon rubber mold

Fig.10 に粘土モデル(左)から作製したエポキシ注型品(右)は粘土モデルと同程度の形状には作製できたが,その表面性状は粘土モデルの仕上がりに依存した.粘土モデルの形状のゆがみと同程度のゆがみがエポキシ注型品に存在した.陶器などの独特の肌触りもシリコンゴムを使った転写成形では可能であるとされているので,粘土モデルの製作技術の向上が課題であった.

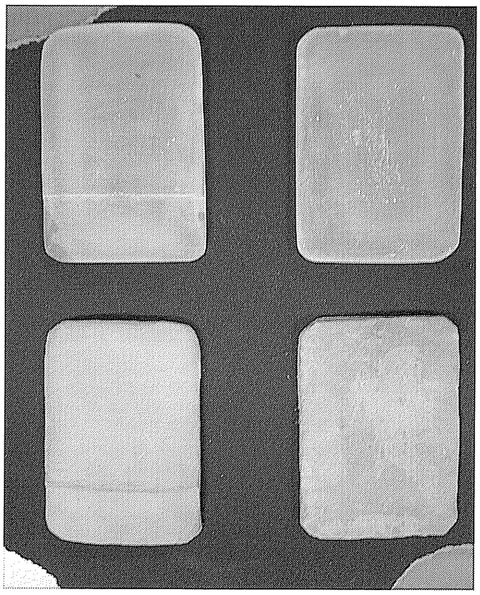


Fig.10 Clay models (left) and epoxy resin molded samples(right)

このようにして作製したエポキシ注型品について,模型工作用のプラ板による形状修正，エポキシパテによる凹みなどの修正，ヤスリがけによる面の仕上げ，塗装などを行なうことにより完成品を仕上げ Fig.11 に示した．デザイナーの意図が粘土モデルに反映されれば，そのデザイン意図に沿ったエポキシ注型品を簡易に得ることができた．しかし本来は筐体の空隙部分もエポキシ樹脂で中実に仕上がっているため，手に持ったときにずっしりとくる重量感がありアンケート結果(後述)ではあまり評判がよくなかった．また光造形法による試作や NC フライスによる試作では曲面が階段状に形成されてしまう問題が発生したが，エポキシ注型では粘土モデルの曲面が転写されるためにデザイナーの意図した自然な曲面が形成されていた.

Fig.11 Painted epoxy resin sample

3.2 光造形による試作

3D-CAD(Solid works)でデータを作製し,Fig.12 に示す光造形機(SONY SOLID CREATER SCS)により試作品を製作した. Solid works による設計作業では,CAD の学習時間が 20h 程度必要であった.CAD の使用方法に慣れてから,今回のモデルの CAD 設計時間は 5h であった.

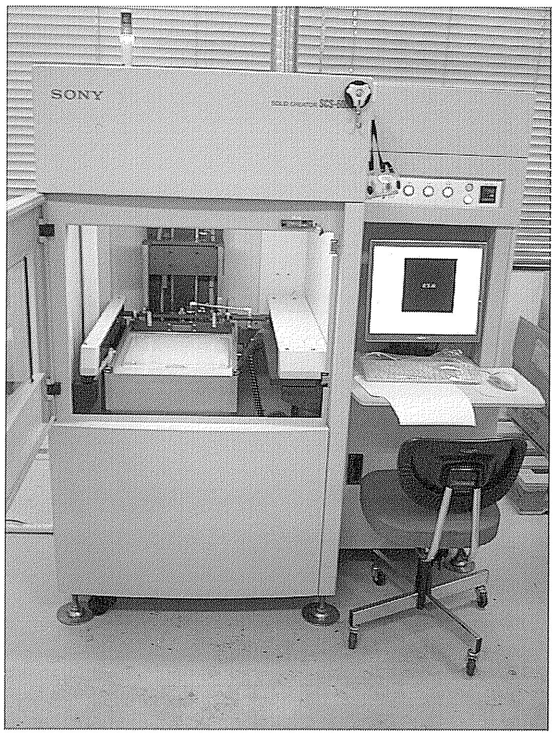


Fig.12 Laser　rapid prototyping machine

光造形機の成形品を Fig.13 に示す.その特徴は黄色がかった半透明で組立て時に曲げ応力を加えるとほとんど弾性変形せずにそのまま割れを生じた.光造形では垂直方向に 0.1mm 単位で造形するために曲面は高さ 0.1mm 単位の階段状になった.また光造形は短時間でほぼ図面に等しい造形品が得られるが，光造形機それ自体の価格が高く，さらに 1kg が 1 万円という大変高

価な紫外線硬化樹脂と光造形機を維持するために一年間を通して室温を 24℃に保たなくてはならず光造形のランニングコストは比較的高額である.

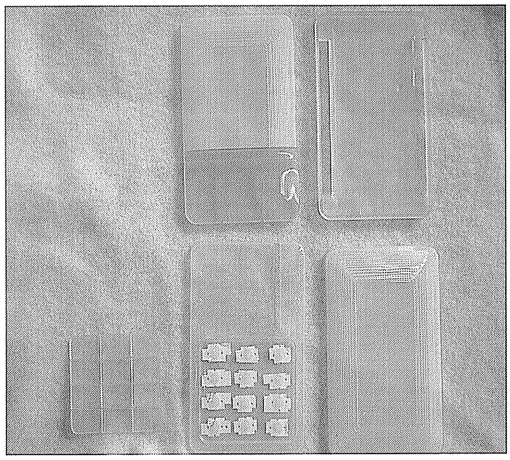


Fig.13 Laser molding parts

次に，エポキシ注型品と同様に塗装を行い液晶表示部のスライド機構部品を取り付け,完成した光造形性試作品を Fig.14 に示す.これらの造形品を粘土ベースで作ったエポキシ成形品と同様,本物らしさを出すために修正を行なった.形としては,ほぼ図面通りに造形されたので問題は無かったが,多少の寸法誤差はあった.具体的な補正としては,機構部品の取り付け・塗装などを行なった. プッシュ感を出すために基板のシールを貼ったわけだが,ボタンとなる部品は透明なため薄いプラ板を黒く塗り,基板とボタン部品の間にそれを挟みこむなどの工夫も試みた.

Fig.14 Painted sample of cellar by laser molding

前述のように光造形で製作したサンプルは寸法形状が 0.1mm 単位で製作可能であり曲面には 0.1mm の段差が存在した.アンケートでは多くの人が光造形での 0.1mm 高さでの段差を模様と感じており,曲面だとは認識していなかった>

3. 3NC フライスによる製作

Fig.15 に示す NC フライス(MODELA MDX-40)により試作品を製作した.

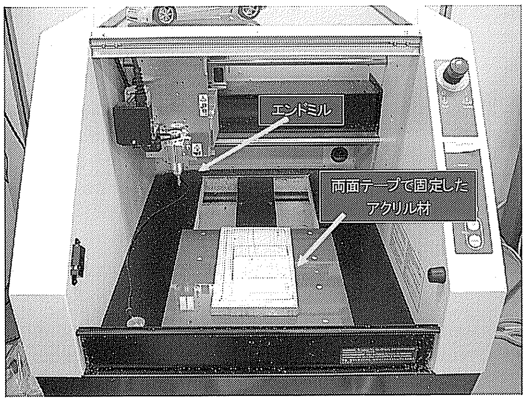


Fig.15 NC milling machine

アクリル材の上下を削り出す両面削り出しで行なった.片面を機械に両面テープで設置し切削する.ゼロ点がずれない様にするためにピン穴を空けピンを通し裏面を切削した.具体的には両面テープで固定された裏面を切削する.表面を切削した時のゼロ点合わせは,裏面を削るときの障害となる.なぜならばアクリル材をひっくり返す時にゼロ点がずれてしまうからだ.そこで,アクリル材は削り出される部品より一回り大きいものを使用し,裏面を切削する前に,余っているサイドにピン穴を空ける.ここにピンを通し,アクリル材をひっくり返すことで,ゼロ点はずれない.

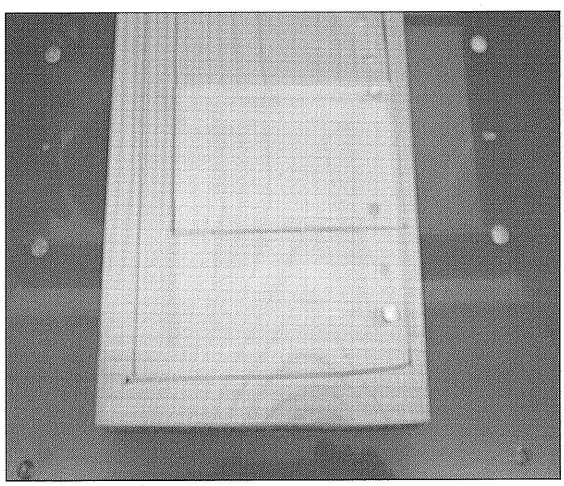


Fig.16 Pin fixing

切削データは光造形機同様, Solid works データを使用した. NC 切削部品を Fig.16 に示した.塗装などの補正を行なって完成した NC 切削性試作品をそれぞれ Fig.17 と Fig.18 に示した.NC 切削機自体の価格はさほど高く無く,材料の価格も安かった.しかし,その反面,機械の構造上両面切削に手間が掛かる上,小さな部品も削り出しなければならず,1 部品当りの平均加工時間は 6h を要した. 切削誤差は数値としてみれば

ほぼゼロだったが,機械の構造上サイド部分は切削できなかった.また，0.5㎜溝の切削に至っては，仕様エンドミル直径も 0.5 ㎜であったにもかかわらず,まったく切削がなされていなかった.

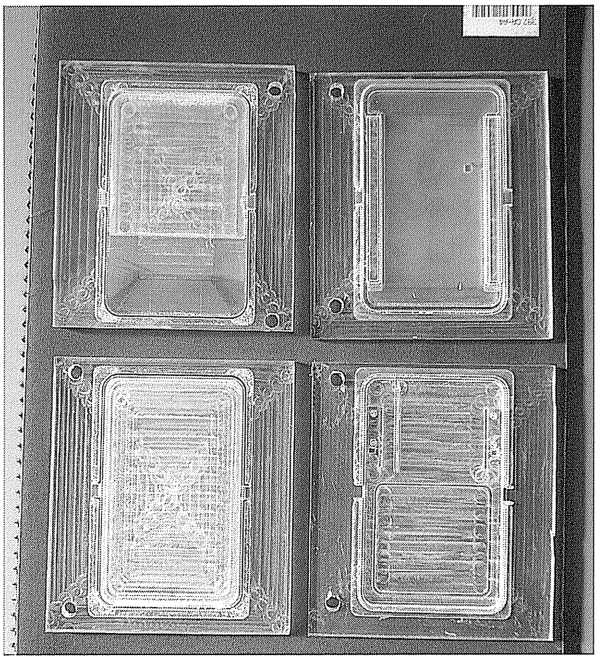


Fig.16 NC milling parts

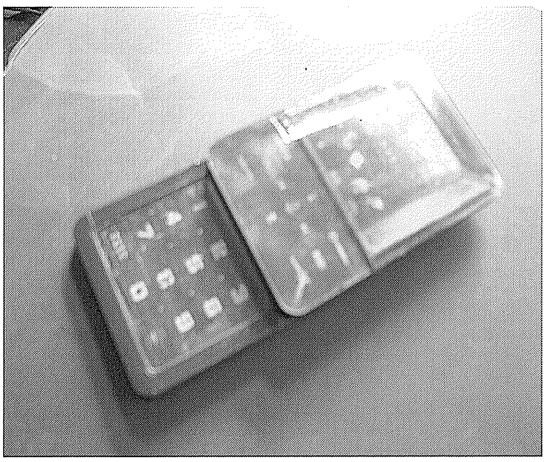


Fig.17　Painted sample by NC-milling.

4.CFRP を外皮とするエポキシ製品の試作

ノートパソコン筐体では耐衝撃性や耐荷重性向上のために炭素繊維強化プラスチック(CFRP)が用いられているが,携帯電話ケースではカーボンファイバー模様を転写した製品などがある.そこでシリコンゴム型でのエポキシ注型工程においてカーボンクロスを挟み込むことにより,CFRP 層を含むエポキシ製プロトタイプを製作した.

シリコンゴム型はエポキシ成形品と同じものを使用した.まず,カーボンクロスにエポキシを良く馴染ませる.次にシリコン型にエポキシを馴染ませたカーボンクロスを敷き,指で型に合わせる.その上からエポキシ樹脂(Z-1)を流し込み硬化させる．成形の模式図を Fig.18 に示した.成形品の余分なカーボンクロスを切り取り,エポキシ注型品と同様に塗装をした完成品を Fig.19 に示した.

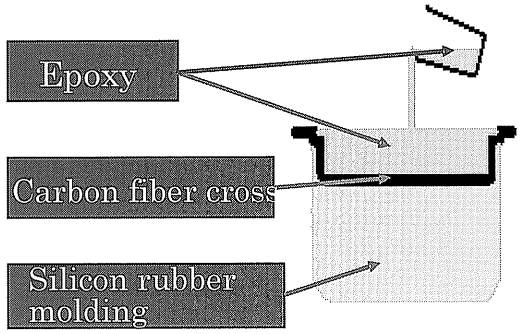


Fig.18 Schismatic diagram of CFRP molding.

Fig.20 CFRP molding cellar phone parts.

5. デザイン試作方法の比較検討

5. 1 設計・製作・仕上げ時間およびランニングコスト

粘土原型によるエポキシ注型に加え,光造形と NC 切削それぞれによる試作の総製作時間・価格のまとめを Table.1 に示す．光造形機は本体価格が 3500 万円と非常に高額である．今回使用した簡易NCフライスは73 万円と安価であったが,モータ出力が小さく金属加工はできなかった.

5. 2 寸法・形状の再現性

粘土型によるエポキシ注型品の形状はデザイナーの意図するものとなったが表面が多少いびつであった.光造形による試作品の外形寸法は図面どおりであったが曲面が 0.1mm 単位の階段状になるという問題点があった.スライド機構を組み込むことはできたがボタンのプッシュ感を再現するまでに至らなかった.NC切削によるアクリル製の試作品は,他の二つの試作品と比べ材料の特性上透明度が高く,曲面も美しくできていたが 0.5 ㎜以下の溝が切削されていなかった.スライド機構は光造形品と同様に容易に実現できた.

Table.2 Comparison of cost and price of samples.

Method	Epoxy molding	Laser molding	NC-milling
Price of machine [yen]	0	35,000,000	730,000
Accuracy[㎜]	0.5	0.5	0.1
Size[㎝]	No limit	28×28×20	28×28×10
Price of material [yen/kg]	3,670	20,000	2,200
Unit price of manufacturing [yen/h]	0	3,500	300
Total processing time [h]	21	17.0	51.3
Price of sample[yen]	387.5	14400	16850.5

なお総加工時間の詳細は,図面製作時間・造形及び切削時間・仕上げ時間である.

5. 3 簡便性

シリコンゴム型エポキシ注型品は粘土原型がそのまま転写されるので意図したデザインを直ちに形にできる.またイメージが涌いた瞬間から製作ができるので創作性に富んでいると言える.光造形による試作は図面さえあれば直ちに形状を再現できる.製作時間も他の二つに比べ短い.即効性があり,なおかつ簡便性もある製作方法であると言える.

5. 4.試作品に関するユーザー評価アンケート

レンダ選定時にアンケート調査した東京高専機械工学科5年生24人を対象に試作品に関するアンケートを行なった. 粘土型によるシリコンゴム型エポキシ注型品,光造形品,NC 切削それぞれの試作品を手にとって見てもらい, 仕上がり, 質感, レンダの再現性などを5段階で評価してもらった.評価は 5 段階として,非常に良い=5,良い=4,どちらとも言えない=3,悪い=2,非常に悪い=1というポイントを与えた. これらの質問によって, デザイナーの意図が伝わっているかを探った.評価の総合ポイントをTable.3 に示した.

仕上がり・質感評価において,光造形品の評価が一番高く,続いて NC 切削品,差が開いてエポキシ製品の評価が一番低いものとなった.これらの結果にも関わらず, エポキシ製品は再現性に至って他の二つと評価があまり変わらない.

ここで,回答者から良く出た意見をとして,エポキシ製はディスプレイに丸みがあってイメージは伝わるが形が悪い.また,NC 切削は溝が彫れていないが,光造形より曲面がきれいである,などといった意見が上がった. エポキシ製において見た目は悪いがイメージは伝わるとされる理由,そして,NC 切削品が光造形品に評価が劣る理由はここにあると思われる.

Table.3 Result of the questionnaire.

Method	Epoxy molding	Laser molding	NC-milling
Finish	2.4	4.2	3.9
Quality	2.6	4.0	3.6
Button	3.6	3.7	3.4
Image of renda	3.5	4.0	3.8
Sliding mechanism	1.5	3.9	3.3
Total	13.6	19.8	18.0

6.結言

三種類の試作品についてデザイナーサイド及びユーザーサイドからの評価ではエポキシ注型の長所は値段が安く手ごろであり,その創造性があることに加えイメージを伝えやすい,加えて製作品の大きさは自由である.短所は粘土の造形が手作業であるため図面どおりの形状を形成することが困難であった.

ただし自動車のデザイン試作のように粘土を NC 切削後に手作業で仕上げる方法をとれば自由曲面の再現はもっとも適している.

光造形の長所は短時間で複雑な形状の物を成形でき,その造形品はNC 切削に近い,もしくはそれ以上の出来栄えである.短所は初期費用が高額であること,NC 切削同様サイズ制限があることである.それぞれの長所を活かして概略の形状確認は粘土原型から転写したシリコンゴム型を用いたエポキシ注型で行い,詳細設計後に光造形で機構を含めて確認し,曲面などについては NC 切削部品を組合せてデザイン試作をする方法が適当と考えられる.

コストの比較ではシリコンゴム型エポキシ注型を 1 とすると光造形は 37 倍,NC フライス切削は 43.5 倍となった.

また試作品に炭素繊維などを用いる場合には, シリコンゴム型注型法においてシリコンゴム型に未硬化のエポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維クロスを配置することで容易に試作が可能であった.

参考文献

1) こんなデザインが使いやすさを生む―商品開発のためのユーザビリティ評価, 三菱電機株式会社デザイン研究所,(2002),工業調査会

2)木村南,坂本俊: デザイン試作としてのシリコンゴム型エポキシ注型と光造形の比較検討, 平成20年度塑性加工春季講演論文集(2008)

(平成 20 年 9 月 25 日　受理)

電源構成最適化のための評価モデルの検討

土井　淳*，先崎卓也**

A Study of Evaluation Model for Best-Mix of Power Sources

Atsushi DOI, Takuya SENZAKI

About half of the primary energy sources such as coal and oil used by Japan are converted into the secondary energy source of electricity. When the first oil crisis occurred in 1973, oil supplied approximately 75% of the nation's electricity requirements. The transition from the use of oil to nuclear power and natural gas in the generation of electricity has made significant progress, and in FY 2005 these were the major power sources, with nuclear power 30.8% and natural gas 23.7% of the nation's electricity. This paper discusses the evaluation model of best-mix of power sources in future in consideration of the following three issues.

(1) Stable Supply : Japan's energy self-sufficiency remains at the low level of around 4% (16% if nuclear power is included).

(2) Economy : When crude oil prices increase and oil production reduces, Japan's stable supply of electricity becomes impaired.

(3) Environment : We are also required to reduce emissions of CO_2 generated by energy consumption in order to prevent global warming.

(Keyword: best-mix of power sources, stable supply, economy, environment)

1. はじめに

電気エネルギー（電力）は二次エネルギーであり，化石燃料に代表される一次エネルギーを変換し，発生（発電）されることから，利用する一次エネルギーにより，火力発電，水力発電，原子力発電などの発電の方式に分類される。総発電電力量に対する各発電方式の占める割合を電源構成という。それぞれの国の電源構成は，エネルギー資源の有無，地理的条件，エネルギー政策，環境問題への対応などにより異なっている。

石炭の豊富な米国，ドイツでは，発電電力量のうち 5 割以上を石炭火力でまかなっている。これにより，ドイツのエネルギー自給率は，40%が維持されている。水資源の豊かなカナダでは，水力発電が約 6 割を占めている。化石燃料の乏しいフランスでは，エネルギー自給率を高めるという基本政策により原子力開発を進め，約 8 割を原子力発電が占め，自給率も 50%を超え，エネルギー輸出国となっている。

日本の電源構成は，二度のオイルショックの経験を踏まえ，石油代替エネルギーの開発に注力された結果，電源の多様化が進み，1973 年には石油火力の割合が全体の約 3／4 を占めていたが，現在は表 1 に示すようにバランスのとれた組み合わせ（ベストミックス）になっている。しかしながら，以下のようなエネルギーを巡る課題に対応した今後の電源の「ベストミックス」の検討は，電力の安定供給の維持に不可欠である。

（1）自国にエネルギー資源をほとんど持っていないため，海外への輸入依存度が高く，全エネルギーの約 84%（原子力を除くと約 96%）を輸入に頼っている。

（2）原油価格の高騰などエネルギー価格が上昇しその利用が制約される可能性，さらにそもそも化石燃料の供給が不足し，必要なエネルギーが手に入らなくなる可能性が考えられる。

（3）エネルギー需要の増大に伴う化石燃料の大量消費に起因する地球温暖化問題は，火力発電が約 6 割を占めることから，その対応を迫られることは避けられない。

本論文では，今後のエネルギー情勢（安定性，環境性，経済性）を評価指標に，将来の電源の最適構成を検討するためのベストミックス評価モデルを示す。

*電気工学科　**京セラオプテック株式会社

表1 発電方式別年間発電電力量(2005年度)〔億 kWh〕と構成比率

発電方式	石炭	石油	LNG※1		LPｶﾞｽ他	原子力	水力		新エネ	地熱	合計
			一般	複合			一般	揚水			
発電電力量	2529	933	2339		139	3048	813		56	32	9889
			(1415)	(924)			707	106			
比率〔%〕	25.6	9.4	23.7		1.4	30.8	8.2		0.6	0.3	9889
			(14.3)	(9.4)			7.1	1.1			

資源エネルギー庁「電源開発の概要」による

※1「電気事業便覧 平成19年版」、pp.218～222のLNG火力発電所一覧より、コンバインドサイクルの認可出力合計(23622〔千 kW〕)の比率を算出し、「一般」と「複合」にわける

2. 電源構成最適化の制約条件

2.1 制約式

電源構成は，総発電電力量に対する各発電方式の比率（α_i）を変数に，それらの組み合わせで表される。日本の 2005 年度の各発電方式別の比率を表 1 に示す。

構成比率を求めるための制約条件は，次の（1）式および（2）式で表される。

$$\Sigma \alpha_i(T) = 1.0 \tag{1}$$

（$i=1, 2, \cdots, n$:発電方式）

α_i（T）：電源構成の発電方式別比率

T：年度

$$0 < W(T)\,\alpha_i(T) < W_{MAX\,i}(T) \tag{2}$$

（$i=1, 2, \cdots, n$:発電方式）

W（T）：年間総発電電力量〔億 kWh〕

$W_{MAX\,i}$（T）：発電方式別年間の潜在発電電力量（，実績発電電力量）〔億 kWh〕

ここで，（2）式において，石炭，石油，LNG，LP ガス他の発電方式（火力発電）は，実績発電電力量を上限（$W_{MAX\,i}$）とし，それ以外の発電方式は，潜在発電電力量上限（$W_{MAX\,i}$）とする。

2.2 年間総発電電力量

上記 2.1 節の（2）式における将来年度の年間総発電量（W）は，毎年作成される電力供給計画から得られる。平成 18 年度の電力供給計画の実績及び 2015 年度までの計画値を表 2 に示す。

表 2 のデータから，最小二乗法による線形近似により，次式が求められ，

$$W(T) = 79.82(T-2000) + 9418.1 \text{〔億 kWh〕} \tag{3}$$

これより，2020 年度の年間総発電電力量は，11015 〔億 kWh〕と想定する。

表2 年間総発電電力量〔億 kWh〕の実績及び見通し

年度	2000	2005	2010	2015	2020
発電電力量	9396	9889	10139	10643	(11015)

「平成 18 年度電力供給計画の概要」他による

2.3 発電方式別年間潜在発電電力量

上記 2.1 節の（2）式における火力発電以外の各発電方式の年間（8760 時間）の潜在発電電力量上限（$W_{MAX\,i}$）は，表 3 に示すその潜在出力（P_i）から，次の（4）式により算出できる。

$$W_{MAX\,i}(T) = 0.8760\, P_i(T)\ \eta_i \text{〔億 kWh〕} \tag{4}$$

（$i=1, 2, \cdots, n$:発電方式）

P_i（T）：発電方式別潜在出力〔万 kW〕

η_i：発電方式別利用率

この算出のもととなる各発電方式の将来年度の潜在出力は，表 3 の脚注に示す方法により想定する。

表3　発電方式別潜在出力〔万 kW〕・利用率

年度	原子力	水力	太陽光	風力	地熱
2005(開発済)	4958.0	2205.0	142.2	149.0	53.3
2010	5049.2	2279.5	482.0	300.0	53.3
2015	5876.6	2582.9	4200.0	400.0	53.3
2020	6681.0	2886.3	8600.0	500.0	53.3
利用率〔%〕	80	45	12	20	80

原子力:「平成 19 年度電力供給計画の概要」における原子力発電の開発計画による想定
水力:「エネルギー白書 2006 年版」、p.198 より、工事中 74.5〔万kW〕を 2010 年度に、未開発 1213.6〔万kW〕の 25〔%〕を 2015 年度に、50〔%〕を 2020 年度に想定
太陽光:「エネルギー白書 2006 年版」、p.79 の導入目標を 2010 年度に、NEDO作成「新エネルギー賦存量」(2001 年)の物理的限界潜在量の 25〔%〕を 2015 年度に、50〔%〕を 2020 年度に想定
風力:「エネルギー白書 2006 年版」、p.79 の導入目標を 2010 年度に、NEDO作成「新エネルギー賦存量」(2001 年)の物理的限界潜在量の 50〔%〕を 2020 年度に、それらの中間値を 2015 年度に想定

3. 電源構成最適化の評価指標

3.1 安定性

電力の安定供給には，一次エネルギーの安定供給が不可欠であり，それに対しては，多種多様なリスク・脅威が考えられる。それらを大別すれば，現状の供給源が一時的にでも途絶するリスク（物理的なリスク）と需給逼迫、価格高騰するリスク（経済的なリスク）に分類できる[1]。

本節では，物理的リスクを評価の対象とし，経済的なリスクへの評価は 3.3 節にて行う。物理的なリスクは，エネルギー供給国での政治・軍事的問題の発生，政治的意図による禁輸措置，供給チェーン上における事故・自然災害・テロ等の地域に起因するものと考えられ，エネルギー自給率を上げること，輸入においては供給地域（国）を極力，分散させることが良いと考えられる。

ここでは，各発電燃料の海外依存度をその輸入割合，供給地域（国）のバラツキの度合いをその供給比率の二乗和（分散）とし，物理的なリスク（I_{ss}）を次の（5）式で評価する。

$$I_{ss}(\alpha) = \Sigma \sigma_i \gamma_i \alpha_i (T) \quad (5)$$

γ_i：発電燃料別輸入割合
σ_i：発電燃料別供給地域（国）の分散

発電燃料別の輸入割合と供給地域の分散を表 4 に示す。ここでは，原子力を含むその他のエネルギーの自給率は 100％とする。

表4　発電燃料別輸入割合〔%〕・供給地域の分散

発電燃料	石炭	原油	天然ｶﾞｽ	LP ｶﾞｽ
輸入割合	99.0〔%〕	99.6〔%〕	96.3〔%〕	77.0〔%〕
分散	0.3700	0.8165	0.1796	0.7214

「エネルギー白書 2006 年版」、pp.171～173、pp.193～197 により算定

3.2 環境性

近年，環境問題への懸念が高まり，エネルギー起源の環境問題はエネルギー政策の重要な要素の一つである。エネルギー消費に伴う二酸化炭素（CO_2）の排出量の増加により，地球温暖化が進むことによって，様々な影響が懸念されている。今後の電源構成の検討においても，エネルギー起源の CO_2 の排出量（I_{en}）をいかに抑えるかは重要な課題であり，表 5 に示す発電方式別 CO_2 排出係数により，次の（6）式で評価する。

$$I_{en}(\alpha) = \Sigma E_i W(T)\, \alpha_i(T) \ \ [\text{t-CO}_2 \times 10^2] \quad (6)$$

E_i：発電方式別 CO_2 排出係数〔g-CO_2/kWh〕

表5　発電方式別 CO_2 排出係数〔g-CO_2/kWh〕

	石炭	石油	LNG		原子力	水力		太陽光	風力	地熱
			一般	複合		一般(中小)	揚水			
設備・運用	88	38	130	111	22	11	(11)	53	29	15
発電燃料燃焼	887	704	478	408	0	0	0	0	0	0
合計	975	742	608	519	22	11	(11)	53	29	15

「電中研ニュース No.338」及びその見直し(2001.7.10 プレスリリース)による
http://criepi.denken.or.jp/jp/pub/news/pdf/den338.pdf

表6　発電方式別発電コスト〔円/kWh〕

年度	石炭	石油	LNG		原子力	水力		太陽光	風力	地熱※1
			一般	複合		一般(中小)	揚水			
2005	3.226	5.304	5.353	4.053	3.550	2.000	5.226	65.8	23.4	13～16
2010	3.346	6.201	6.030	4.930	3.550	2.000	5.349	18.9	23.4	13～16
2015	3.686	7.396	6.933	5.631	3.550	2.000	5.555	18.9	23.4	13～16
2020	4.261	8.891	8.062	6.508	3.550	2.000	5.555	18.9	23.4	13～16

戒能一成、「電源構成試算モデルと発電コスト比較について」、JAPAC 講演(2003-7)による
http://eneken.ieej.or.jp/japac/document/1310301120715_jp.pdf
※1「21 世紀に向けた発電技術懇談会地熱部会資料」による

3.3 経済性

経済的なリスク（I_{ec}）は，原油価格の高騰など燃料費の上昇による発電コスト増により高まることから，表6に示す発電方式別発電コストの推移により，次の（7）式の総発電コストで評価する。

$$I_{ec}(\alpha) = \Sigma C_i(T)\ W(T)\ \alpha_i(T)\ 〔億円〕 \quad (7)$$

$C_i(T)$：発電方式別発電コスト〔円/kWh〕

4. ベストミックス評価モデル

電源の最適構成を検討するためのベストミックス評価モデルは，3章における（1），（2）式の制約関数に，次の（8）式に示す（5）～（7）式の3個の目的関数をもつ多目的計画モデルで表される。

$$f(\alpha) := (I_{ss}(\alpha),\ I_{en}(\alpha),\ I_{ec}(\alpha)) \rightarrow \mathrm{Min} \quad (8)$$

このような複数の目的関数をもつ多目的計画問題の場合，一方が良くても他方が悪くなることが生じるため，全体のバランスのとれた解を見いだすこと（トレードオフ）が必要であり[2]，このトレードオフ分析により，電源の最適構成を検討することができる。

5. まとめ

本稿では，将来の電源の最適構成を検討するため，数理計画の最適化問題として定式化（モデル化）するとともに，その解法に必要なデータの準備を終えた。作成されたモデルは多目的計画問題であり，コンピュータによる候補解の算出と意思決定者による選好情報の提示を交互に繰り返していくことにより選好解を探索する対話型解法によるトレードオフ分析を、今後行っていく予定である。その結果は次稿で報告する。

参考文献

1）経済産業省編，“エネルギー白書 2006 年版”，（株）ぎょうせい，2006.7，pp.22－25
2）田村坦之著，“システム工学”，オーム社，1999.2，pp.65－73

（平成20年7月23日　受理）

MATLAB による信号処理解析
――電気回路の過渡応答を例にして――

伊　藤　　　彰*

Analysis of Signal Precessing by MATLAB
――An Example of Transient Response on Electric Circuits――

Akira ITO

Signal processing is very important technology in the field of electrical engineering. This paper is dealed with transient responce on electric circuits for signal processing using by a mathematical method which is Laplace transform. The results are calcurated transient response on the high pass filter using by MATLAB.
(Keywords: Signal Processing, Transient Responce, Electric Circuits, MATLAB)

1. はじめに

電気工学の分野では，音波や電磁波，電圧電流などの信号を処理することは重要な技術である．信号処理には，アナログ―ディジタル信号の相互変換や周波数― 時間領域の相互変換などがある．特に後者は電気現象を多角的に解析したり，目的の現象を得るための回路合成に有用である．

そこで，本論文では電気回路の時間応答特性を解析するための複素周波数―時間領域変換について，数学的一手法であるラプラス変換法を適用した例を述べる．具体例として，高域通過型濾波器に単位ステップ関数の電圧波形が入力された場合にどのような出力電圧波形になるかという過渡応答特性を解析し数値結果を示す．回路解析の数学的手法は，ラプラス変換法を用いて回路の伝達関数を表現し時間領域へ逆変換をして応答波形を求める．高速数値逆ラプラス変換法（Fast Inversion of Laplace Transform Method，略して FILT 法）[1]–[3] を用いた結果は文献 [4] で述べた．ここでは，理工学の分野でシミュレーション，データ解析，モデリング，可視化などで広く用いられているコンピュータ・ソフトウェア MATLAB（米国の MathWorks 社製）[5] を用いて計算した結果について述べる．

2. ラプラス変換

関数 $f(t)$ のラプラス変換は次式で定義されている．

$$F(s)=\int_0^{\infty} f(t)e^{st}\,dt \tag{1}$$

$$f(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{\gamma-j\infty}^{\gamma+j\infty} F(s)e^{st}\,ds \tag{2}$$

$f(t)$ を原関数，$F(s)$ を像関数といい，両者を合わ

＊電気工学科

せてラプラス変換対という．$f(t)$（時間応答関数）と $F(s)$（複素周波数信号関数）がラプラス変換対であることを記号で次式のように記述する．

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}F(s) \tag{3}$$

2.1 電気回路への適用

電気回路の応答解析を行う場合，通常は微分方程式を立ててそれを解いて行く．微分方程式の解法にラプラス変換法を用いることにより，通常の解法に比べて以下の優位点がある．

(1) ラプラス変換法では斉次方程式を考えなくて良い．
(2) ラプラス変換法では一般解の未定係数を決める連立方程式を解く必要がない．

ラプラス変換法の具体的手続きは，つぎの 3 手順である．

(1) 問題を原空間から像空間へ写像する（正変換）．
(2) 像空間での解を求める．
(3) 像空間での解を原空間へ逆写像する（逆変換）．

一般に上記 (1)，(2) は簡単であるが，(3) が問題である．(3) を行うには，以下の方法がある．

(1) 変換表を使う．ただし，変換表に掲載されていないときは困難である．
(2) 複素積分を使う．ラプラス変換の逆を表す関係（前述の式 (2) の Bromwich 積分）から求めるが，像関数が少し複雑になると，きわめて困難になる．
(3) 数値的に行う．種々の方法がある．

本論文では，電気回路へのラプラス変換を適用する方法として上記 (3) のうち，簡単なプログラミングにより計算結果が得られる MATLAB[6] を用いる．

2.2 MATLAB とは

本論文で用いる数値逆ラプラス変換法である MATLAB について述べる．MATLAB（マットラブあるいはマトラボ，マトラブなどと呼ぶ）は，米国の MathWorks 社が開発・販売している数値解析ソフトウェアである．また，その中で使うプログラミング言語の名称でもある．

MATLAB は，MATrix LABoratory を略したものであり，行列計算，ベクトル演算，グラフ化や 3 次元表示などの豊富なライブラリを持ち，インタプリタ形式の高性能なテクニカル・コンピューティング言語，環境としての機能を持つ．MATLAB を用いると，C 言語や FORTRAN といった従来のプログラミング言語よりも短時間で簡単に科学技術計算を行うことができる．

2.3 電気回路の過渡応答解析例

4 端子からなる電気回路（入力 2 端子，出力 2 端子からなる高域通過型濾波器）を考える．高域通過型濾波器は高い周波数成分のみを通過させ，低い周波数成分を除去するような機能をもつフィルタであり，一般に広く使用されている．回路内の素子は，入力側から直列にコンデンサ C [F]，出力側に並列にインダクタ L [H]，終端抵抗 $R = 600$ [Ω] が接続されている．除去しはじめる周波数を決定する遮断周波数 f_c，遮断角周波数 $\omega_c = 2\pi f_c$ を与え，動作減衰量の回路素子を次の計算式 [7] を

用いてコンデンサとインダクタの値を求めた．

$$L = \frac{R}{\sqrt{2}\,\omega_c} \qquad (\mathrm{H}) \qquad (4)$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{2}\,\omega_c R} \qquad (\mathrm{F}) \qquad (5)$$

以下はこの高域通過型濾波器に1ボルトの単位ステップ関数の電圧波形が入力された場合に，どのような出力電圧波形が得られるかをMATLABにより計算した結果である．図1はここで使用したMATLABプログラム・リストである．

```
1: % 高域通過型濾波器のステップ応答
2: fc = 20; wc = 2*pi*fc;...
   % 遮断周波数，遮断角周波数の定義
3: R=600; L=R/(1.41421356*wc);...
   C=1/(1.41421356*wc*R);...
   % 抵抗，インダクタ，コンデンサ値
4: sysP=tf([L*C*R 0 0],[L*C*R L R]);...
   % 高域通過型濾波器の伝達関数の定義
5: t = 0:0.0001:0.2;...
   % 計算時刻指定 0秒から0.0001刻み0.2秒
まで
6: y = step(sysP,t);...
   % 指定時刻のステップ応答計算
7: plot(t,y);...
   % 計算結果の図を画面表示
8: xlabel('time[s]');ylabel('E2[V]');...
   % 図のx軸y軸の見出し設定
9: grid on  ...
   % 図に目盛り線補助の格子描画指定
10: figure(1); print -deps fig20.eps...
   % 画面表示の図をEPSファイルで保存
```

図1: MATLABプログラム・リスト
(高域通過型濾波器のステップ応答)

図2は遮断周波数 $f_c = 5$ [Hz] の高域通過型濾波器の過渡応答特性である．時刻 $t = 0$ [s] の時，出力電圧 $E2 = 1$ [V] であり，その後時間の経過とともに緩やかな右下がりで振幅が減衰していく応答になっていることから，高域の信号成分が通過し，低周波成分は除去されていることがわかる．

図3は遮断周波数 $f_c = 10$ [Hz]，図4は遮断周波数 $f_c = 15$ [Hz]，図5は遮断周波数 $f_c = 20$ [Hz] の場合である．遮断周波数が高くなるほど，図2に比べて急峻な応答波形となり高い周波数の信号成分が通過していることがわかる．この結果から，MATLABにより高域通過型濾波器の特性が正しく求められていることがわかる．

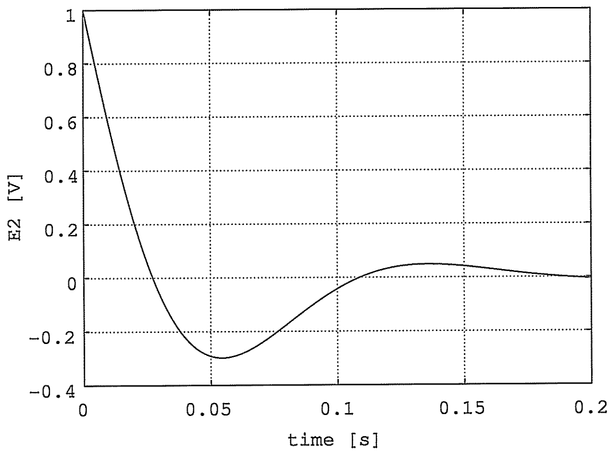


図2: 高域通過型濾波器の過渡応答特性
(遮断周波数 $f_c = 5$ Hz)

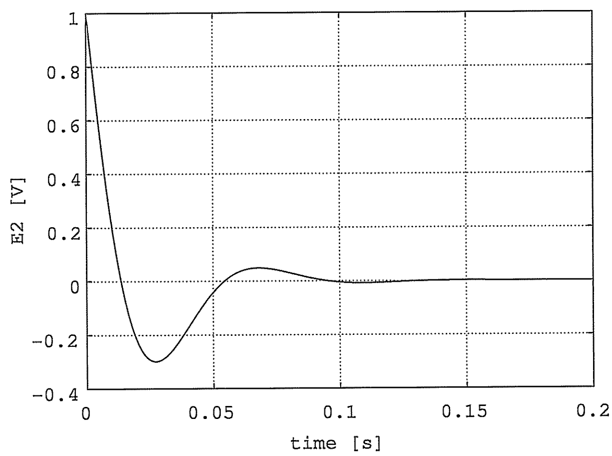


図3: 高域通過型濾波器の過渡応答特性
(遮断周波数 $f_c = 10$ Hz)

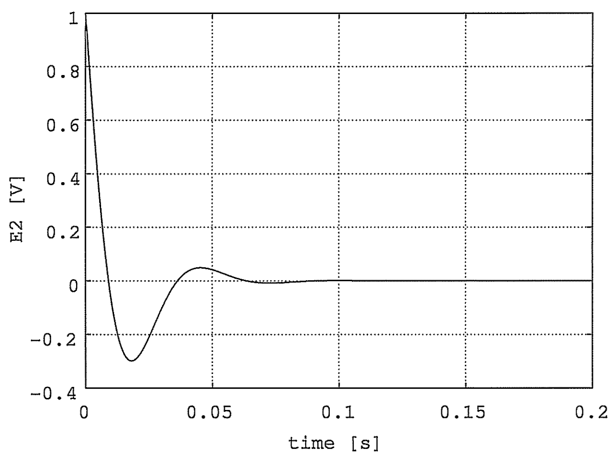


図 4: 高域通過型濾波器の過渡応答特性

（遮断周波数 $f_c = 15$ Hz）

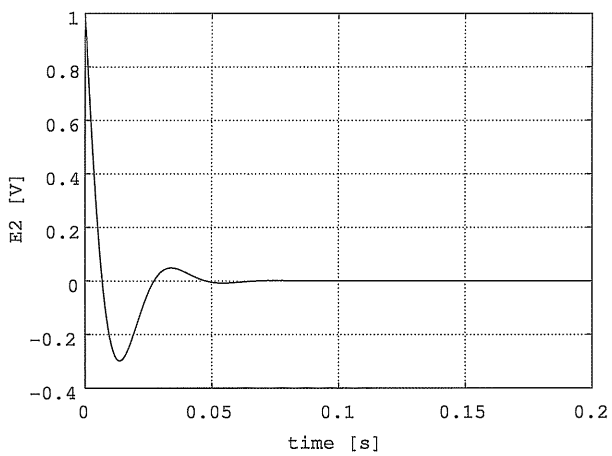


図 5: 高域通過型濾波器の過渡応答特性

（遮断周波数 $f_c = 20$ Hz）

3. まとめ

本論文では，信号処理について，特に電気回路の時間応答特性を解析するための複素周波数—時間領域変換のための数学的一手法であるラプラス変換法を適用した例を述べた．

具体例として，電気工学で有用な高域通過型濾波器に単位ステップ関数の電圧波形が入力された場合にどのような出力電圧波形になるかという過渡応答特性について，MATLAB を使って数値結果を示した．得られた結果から，MATLAB によって高域通過型濾波器の過渡応答特性が正しく求められていると判断できた．したがって，MATLAB による電気回路の時間応答解析は有用な手法であることがわかった．

文　献

[1] Toshio Hosono, “Numerical inversion of Laplace transform and some applications to wave optics”,Radio Science,16,6,pp.1015–1019, Nov.,1981.

[2] 細野 敏夫, 数値ラプラス変換 [I]，電子通信学会誌，Vol.65,No.8,pp.849–854 (1982)

[3] 細野 敏夫, BASIC による高速ラプラス変換, 共立出版 (1984)

[4] 伊藤 彰, 数値ラプラス変換法による信号処理, 東京工業高等専門学校研究報告書，第 38(2) 号,pp.63–66 (2007)

[5] 上坂 吉則，MATLAB プログラミング入門, 牧野書店 (2000)

[6] 河田 昌克，西岡 勝博，MATLAB/Simulink によるわかりやすい制御工学，森北出版 (2001)

[7] 伊藤 彰, フィルタの設計と伝送特性の実験およびパソコンによる数値実験，創造電気工学実験Ⅳテキスト，国立東京工業高等専門学校電気工学科版 (2008)

（平成 20 年 8 月 18 日　受 理）

Si 中へ拡散する P 濃度の特異性に関する統計論的解釈

柚　賀　正　光*

The interpretation of statistics for peculiarity of diffusible P concentration in Si

Masamitsu YUGA

In IC technology of production, it is very important to put impurities in a semiconductor. Especially, when forming exact n-type area, it is necessary to study especially behavior of phosphorus diffused in silicon. The diffusion state of impurities is determined by temperature, diffusion time, and the diffusion coefficient. Therefore, if the differential equation about a substance being conveyed is solved, the concentration of impurities to the depth direction will be calculated from the silicon surface. In this case, the solution to becomes like Gaussian or Complementary error function by an initial condition.

However, in diffusion of phosphorus in silicon, it may be in the strange state of not being in agreement with a general solution, by temperature or diffusion time. Although the singularity of this phosphorus behavior was reported from before, the cause to produce is not specified.

In this paper, silicon sample measured using SIMS analysis the data of inner phosphorus diffusion profile was analyzed in detail, and the cause which singularity produces was considered. This time, phosphorus was diffused at 900 degrees in Si. When the sample was analyzed, the portion which is not in agreement with the solution to appeared. The simulation was carried out using this profile.

As a result, it became clear that the singularity of phosphorus was brought about because the solution Gaussian and Complementary error function to appears by turns. Since impurities of enough were shown in the shallow portion, it was set to Gaussian, and in the deep portion, impurities decreased, it was in agreement with Complementary error function. As a result, phosphorus profile will show a singular point in the boundary domain in which two solutions adjoin. However, when diffusion time was short, it also checked shifting from this tendency. From now on, the examination to this problem will be required.

(Keyword: silicon, phosphorus, diffusion)

1.　はじめに

シリコンSi中に不純物を拡散させる工程は、IC 作製技術の上で非常に重要である。不純物は、Si に相性のよいものが用いられ、基板内の適切な深さに、設定した形で n 型や p 型の部分が形成される。不純物の拡散は、800℃以上の高温で行われ、時間と温度の厳密な管理により、微細な構造の IC が作製できる。

一般に、Si 表面から、どのくらいの深さに、どの程度の濃度で不純物が拡散するかは、統計論的に解釈され厳密に計算できる。しかし、一部の不純物は、拡散温度により、ある深さ

*電子工学科

において、計算される理論的値にならないことがある。

Si 基板を n 型にする際、リン P は、拡散の相性が良いので広く使われている。ところが、P 拡散においては、1000℃より低い温度で拡散したとき、微分方程式を解いて得られる濃度から、かなりずれる現象があるのがわかっていた。この特異点が存在する深さは、拡散の時間に影響され、表面から少しはなれた場所に存在する。表面や深い部分では生じない。そして、この現象が生じる原因は良くわかっていない。

そこで本報告では、P の特異点の現象を考察するため、まず、Si 中に 900℃で P を拡散させた試料を作製した。この試料を SIMS 分析し、表面からの深さ方向に対して、P の濃度を詳細に測定した。SIMS 分析は、ESCA 分析よりさらに高精度で元素濃度の測定が可能であるので、半導体中の元素濃度の測定によく用いられている。

P の深さと濃度の関係は、予想したとおり、特異点が観測されたので、この試料を、統計論的解釈から濃度ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝした。その結果、ある程度、特異点が生じる原因が考察されたので、報告する。

2. 拡散の理論

一般に拡散は、Fick の法則から得られる微分方程式(1)を満足する [1]。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial n}{\partial x}\right) \qquad (1)$$

ここで、n は濃度，x は深さ，t は拡散時間，D は拡散定数である。この微分方程式の解法は複雑であるが、適当な初期条件により、一つの解として式(2)を得ることができる。

$$n = A\exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \qquad (2)$$

ここで、A=1 としたとき、n≡Gaussian(x)と定義する。さらに、確率統計的な解釈により、式(3)のように規格化すると、

$$A\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-ax^2)dx = 1 \qquad (3)$$

A の値が計算できる。ここで、a＝1/4Dt であるが、簡単のため a=1 として求めると、式(4)になる。

$$A = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \qquad (4)$$

exp(－x^2)が y 軸に関して対称なので、積分範囲を 0～∞にすれば、式(5)を得る。

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\infty}\exp(-x^2)dx = 1 \qquad (5)$$

式(5)の積分の上限を x にして、式(6)のように定義する [2]。

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{x}\exp(-x^2)dx \equiv erf(x) \qquad (6)$$

erf(x)は、誤差関数(error function)と呼ばれるが、さらに、erfc(x)(complementary error function)を式(7)のように定義する。

$$erfc(x) \equiv 1 - erf(x) \qquad (7)$$

Gaussian(x)と erfc(x)は、不純物が拡散する際の典型的な解になる。Fig.1 に二つの解の結果を示す。縦軸は規格化されていて最大 1 になる。横軸は深さに対応する。x=0 が表面になる。

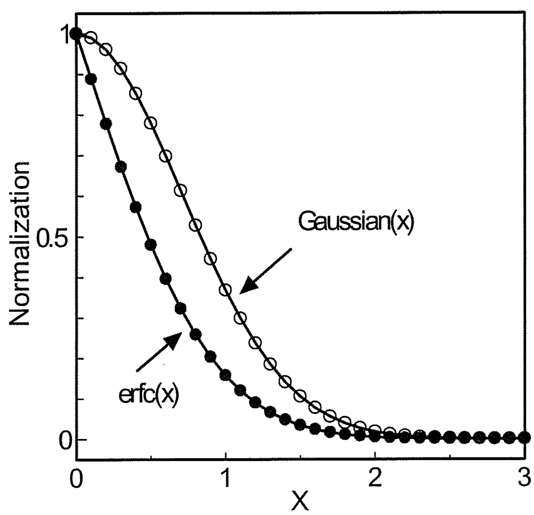


Fig.1 Gaussian and complementary error function

Gaussian の形は、正規分布 [3] と同じであるが、erfc は、表面から急激に減少するのがわかる。

実際の拡散では、濃度の範囲が広いので、濃度をわかりやすく表示するため、縦軸は対数表示が良い。そこで、Fig.2 に、二つの関数を対数表示した結果を示す。

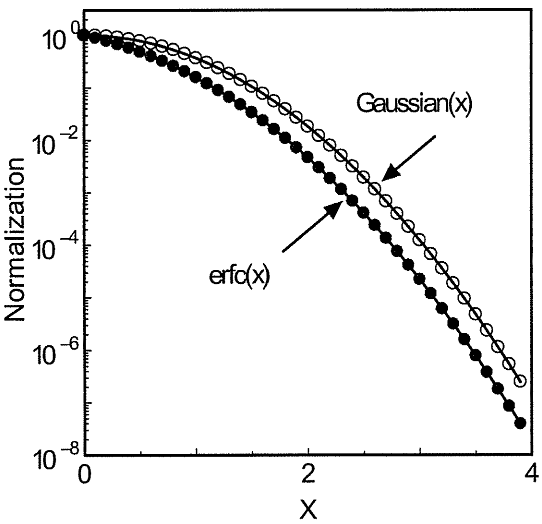


Fig.2　The function expressed by logarithm.

二つの関数は、良く似ているが意味するところは大きく異なる。実際の拡散では、Fig.2 のような結果になることが多い。

3.　P 拡散ﾌﾟﾛﾌｧｲﾙのｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ

Fig.3 に Si 中に P を拡散したﾌﾟﾛﾌｧｲﾙを示す。拡散温度は 900℃で、10，20，30 分の場合を示す。

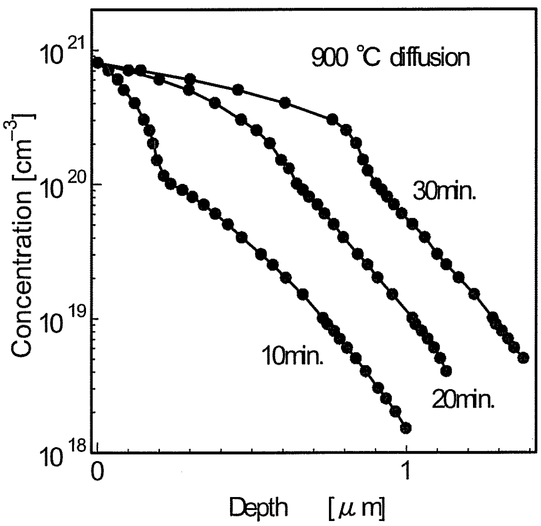


Fig.3　The profile of P diffused into Si.

Fig.3 において、縦軸は濃度を示し、横軸が深さで、0 は表面に相当する。表面では 10^{21}[cm^{-3}]の濃度を持っている。

Fig.3 を Fig.2 と比較すると、それぞれ表面から少し入った場所に、不自然な曲がりが見られた。これが、P 拡散の特異点である。拡散時間 30 分では、およそ不可さ 0.8[μm]付近に観測された。

この特異点が生じる原因は、良くわかっていないが、生じる位置は、ほぼこの場所になる。そこで、10〜30 分拡散した試料について、理論で示した Gaussian(x)と erfc(x)を用いて、適当な拡散定数 D により解析してみた。D の値は 7.5×10^{-13}[cm^2/s]であり妥当な数値である [4]。この試料の表面濃度は、分析の結果 8×10^{21}[cm^{-3}]であるので、Gaussian(x)と erfc(x)に表面濃度を掛ければよい。

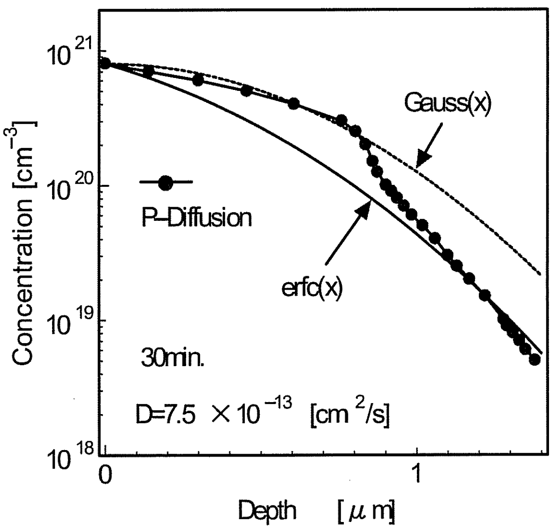


Fig.4　The simulation for diffusion time 30 minutes

Fig.4 は、拡散時間 30 分の試料についての結果である。特異点が生じる前後において、浅い部分では Gaussian(x)が、深い部分では erfc(x)がそれぞれ適しているのが確認された。

この意味するところを考察してみた。式(1)の微分方程式を解く際、表面に充分な拡散素材があるとした初期条件の場合 Gaussian(x)が得られる。表面から比較的浅い部分では、こうした条件が適している。また、初期条件として拡散素材が一定値であるとしたとき、微分方程式の解は erfc(x)になる。つまり深い場所では、拡散素材の P の供給が少なくなり erfc(x)になるのではないかと推論される。拡散温度が高ければ、一気に深い部分に達するので erfc(x)で近似されるようである。ただし、特異点が生じる場所の解析は非常に困難である。

Fig.5 は、拡散時間 20 分の試料に同様の解析を

した場合である。

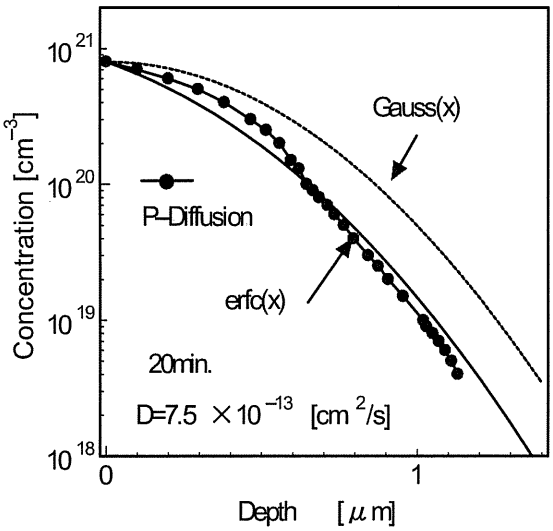


Fig.5　The simulation for diffusion time 20 minutes

Fig.5 の結果も、ほぼ今述べた理論に一致している。ただし、Fig.4 と比較して、完全に一致していない。この原因は、D の値の変化によるものと考え、僅かにDの値を変え 6.75×10^{-13}[cm²/s]として、もう一度解析した。Fig.6 は、その結果である。

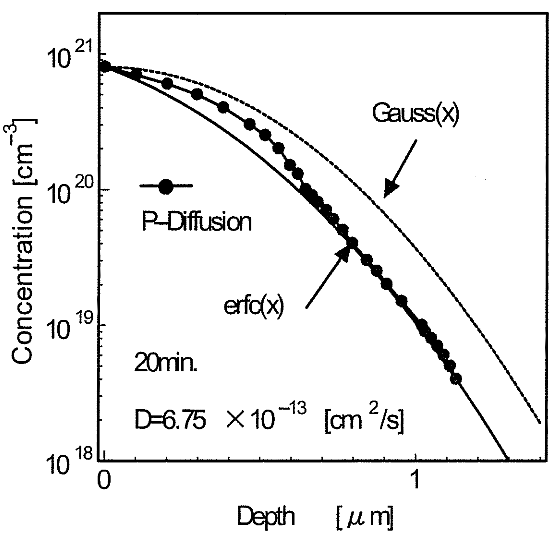


Fig.6　The simulation in different D

この場合は、良く一致している。したがって、このことから、拡散定数も時間とともに変化することが考えられた。

4. 拡散時間が短い場合のｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ

拡散時間が非常に短い場合として、拡散時間 10 分の場合を解析してみた。拡散時間が短いと、まだ安定した状態になっていないため、今までの考察から、理論値とはかなり異なるﾌﾟﾛﾌｧｲﾙになることが予想される。

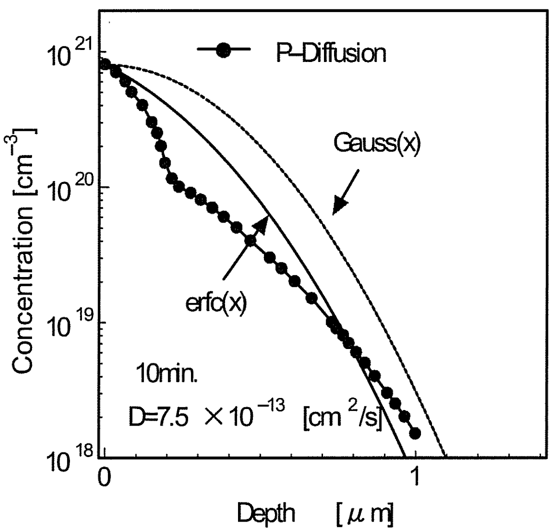


Fig.7　The simulation for diffusion time 10 minutes

Fig.7 は、Fig.4, Fig.5 と同じ $D=7.5\times10^{-13}$[cm²/s]を用いた場合である。この場合は、Gaussian(x)や erfc(x)では完全に一致しなかった。D の値を変化させても一致させることは不可能である。

そこで、比較的浅い部分であるので、Gaussian(x)で近似できるものとして解析してみた。Fig.8 は、その結果である。

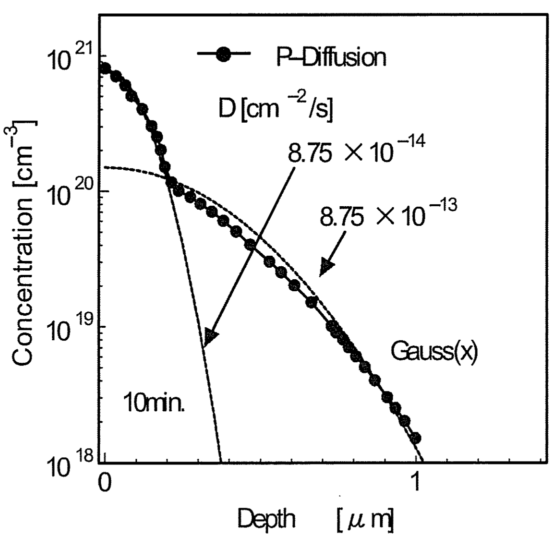


Fig.8　The simulation of short diffusion time

Fig.6 で示したように、拡散時間が短いと D の値が小さくなることが予想される。とりわけ、10 分という時間は拡散後間もないので、D の値をほぼ一桁下げてｼﾐｭﾚｰｼｮﾝした。その結果、特異点より浅い部分では、非常に良く一致した。このことは、初期条件から予想される考察をほぼ示唆するものである。

しかし、特異点より深い部分では、今回の考察では理解することはできなかった。解析の結果は、D の値は、20 分以上の場合とほぼ同程度であるが、仮想的な表面濃度がかなり下がった値になった。表面濃度の操作により、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝとしてはかなり、良く一致したが、この原因は明確にできなかった。おそらく、拡散時間が短いため、拡散種の量が不十分であるためと推論されるが、今後の解析が必要である。

5. 結論

Si 中に n 型部分を形成するため不純物として P を拡散する場合、P は Si と非常に相性が良く安定して拡散できるが、ある条件で特殊な挙動をとる。

拡散現象は、統計的に扱うことができ、微分方程式の解として、いくつかの解が得られる。したがって、その中の解の一つとして拡散の様子は計算される。ところが、Si 中に拡散する P は、拡散温度が低い場合や、拡散時間が短い場合に、その一般的な解に一致しない部分が生じる。

この特異性は、Si 表面から適当な深さで生じ、表面や深い部分では見られない。不純物拡散は IC 作製に不可欠であり、古くからこの現象が知られていたが、その原因は良くわかっていなかった。

本報告で、SIMS 分析から得られた P 拡散ﾌﾟﾛﾌｧｲﾙを用いて、統計的解釈から得られる解によりｼﾐｭﾚｰﾄしてみた。その結果、Gaussian(x)と erfc(x)という典型的な解に、表面や深い部分が一致することがわかった。また、P が特殊な挙動をとる深さでは、その両者の解の境界領域に該当し、初期条件による違いから得られる二つの解の変化により生じる様子が推論できた。

しかし、同じ拡散温度で拡散時間を短くすると、さらに特殊な挙動が観測された。今回のｼﾐｭﾚｰｼｮﾝでは、拡散定数 D が関係している。D の値は、良く知られている数値を用いたが、拡散時間が短いと D の値は変化することが確認された。さらに、拡散時間が非常に短いと、二つの解の変化という考え方では充分でないことも理解された。こうした場合も、大幅な仮定を導入して、ある程度のｼﾐｭﾚｰｼｮﾝには成功したが、その意味するところは、さらに厳密な計算が要求され、現時点では困難であった。なお、この領域に関する P 拡散のモデルの提唱[5)]があり参考にして、今後の研究課題としたい。

参考文献

(1) 城塚正，平田彰，村上昭彦
移動速度論，オーム社 p21-22
(2) 犬井鉄郎　特殊関数，岩波全書 P35
(3) 一石賢　統計解析，日本実業出版社 p84-90
(4) Helmut F.Wolf, “Silicon Semiconductor Data”
PERGAMON Press　p143,p526 (1976)
(5) R.B.Fair, J.C.C.Tsai
J.Electrochem.Soc.Vol.124 p1107 (1977)

(平成 20 年 6 月 23 日　受理)

理工系学生を対象とした文章作成能力向上のための支援システム

鈴木雅人*，松本章代**，北越大輔*，田中大輔*，山田未央佳*，山田　翔*

A Support System Aimed at an Improvement of Sentence Making Ability For Science Course Students

Masato SUZUKI, Akiyo MATSUMOTO, Daisuke KITAKOSHI, Daisuke TANAKA, Mioka YAMADA, Syo YAMADA

It is very important ability to make the engineering documentation for engineering course students. Since there are a lot of rules should be obeyed in the engineering documentations and the students in recent years are not doing the training to write the sentences according to these rules, it is very serious that teacher corrects the students' documents. Therefore, teacher spends the large time to checks of the erratum and omission of a word, and can not comment on the point of an argument.

In order to assist the teachers and students, we have developed the software to check the rules should be observed and to detect the incomprehensible sentences. It is available to make visible these sentences to the way in the class chart of the object-oriented programming languages. In this paper, we introduce our developed software and verify its effectiveness.

(Keyword: writing engineering documents, visible making sentences, parsing of sentences)

1．はじめに

技術者を目指す理工系学生にとって，論文などの技術文書を執筆する能力は必要不可欠である．我が高専では，技術の最先端で即戦力となるトップエンジニアの育成を目標として，低学年のうちから実験レポート，実習報告書，卒業研究論文など，数多くの技術文書作成を通して，指導教員がきめ細かい添削指導を行っている．しかし，年々，学生の文書作成能力は低下の傾向をたどっている．本来，技術文書の添削指導では，内容や論旨の展開などを主として指導すべきであるが，実際の添削指導では，誤字・脱字の指摘や文法的に誤った文章の指摘や，書くべき内容に関する基本的な指導から始めなければならないのが現状である．

著者らが所属する情報工学科では，学科の特色から，プログラミングに関する授業が多く，それらを得意とする学生も多い．特にオブジェクト指向言語を独学で習得する学生も多い．プログラミングは，アルゴリズムを実装する手段であり，そこには精密な論理的思考力が要求される．このような論理的思考力は，技術文章を書く場合にも全く同様に要求される力であるが，近年の学生は，論理的な思考を必要とするプログラミングはできても，技術文章を書くのは不得意であることが多い．

一方，塚本らは，理工系学生を対象とした技術文書の添削指導に精力的に取り組んでいる．文献[1]では，技術文章は一般の文章と違い，必ず守らなければならない規則が幾つかあり，それらを遵守した上で，簡潔明瞭な文章を書かなければならないと述べられており，そのような文章を書くためのポイントが集約されている．添削指導では，これらのポイントを基準とした地道な根強い指導により，学生の技術文書作成能力は飛躍的に向上することを検証しているが，依然として，教員による添削指導にかける労力は，並大抵のものではない．

このような状況を支援するシステムとして，推敲支援システム[2]の開発や，長い文章をを対象とした係り受け関係の可視化法[3]についても研究されているが，ユーザである学生の文章作成能力の育成を目的としたシステムを開発した事例はあまりない．

＊情報工学科　＊＊青山学院大学理工学部

このような背景の中で，本研究では，学生が書いた卒業研究論文などの技術文書を対象として，学生の文章作成能力の向上をねらいとした，技術文書作成の支援システムを構築する．開発するシステムでは，文献[1]に示されている，技術文書を書く上で守るべき基本ルールに関して自動チェックを行い，学生に訂正を促す機能を実装する．また，書いた文章が簡潔明瞭であるかどうかをチェックし，各自が推敲する仕組みも実装する．その手段として，本研究では自然言語処理技術を応用し，決定木を用いた「わかりにくさ」の自動判断方法を実装する．また，学生に「わかりにくい文章」の文章構造を視覚的に理解させ，より良い文章に訂正させる仕組みとして，プログラミングで用いるクラス図と同じような図の自動生成法も検討し実装する．

本稿では，2章で開発するシステムの概要を述べ，3章で実装した基本ルールについて述べる．また4章では，簡潔明瞭な文章を書くための支援方法について検討事項も含めて述べ，5章で成果をまとめる．

2．システム概要

開発するシステムは，学生が執筆した技術文書に対する教員の添削指導を支援するものである．本システム導入により，技術文書として守らなければならない基本ルールに関する訂正や，明らかに簡潔明瞭でない文章を学生自らが発見・訂正することができるため，教員は論文の中身に立ち入った，本来あるべき指導に多くの時間を費やすことが可能となる．

開発したシステム[4]の概要を図1に示す．本システムでは，ウェブアプリケーションとして実装されており，執筆した文章を画面左側にコピー&ペーストし，実行ボタンを押すことで文章が自動解析され，結果が画面右側に表示される．

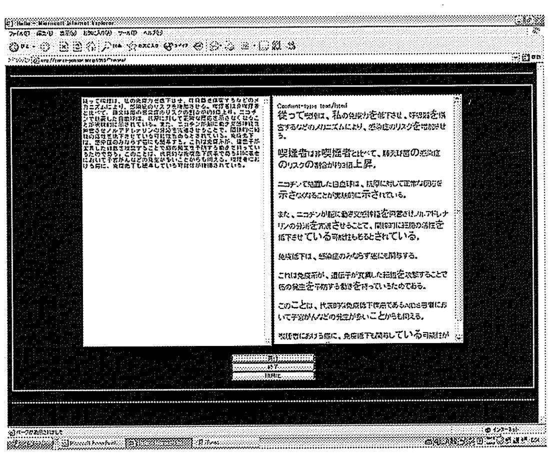


図1　開発したシステムの概要

```
勉強するうえで必要なのは忍耐力である。
勉強する/うえ/で/必要な/の/は/忍耐力/で/ある/。/
見出し        :品詞:左活:右活:活形: i d   :意味素
勉強する      : 301:  33:  33:   8: 36014:OR:行為
うえ          : 103: 100: 100:   0: 40818:
うえ          : 101: 100: 100:   0: 67180:
で            : 701: 103: 103:   0:     8:
ある          : 301:  73:  73:   4:   960:OR:断定
←で          : 701: 103: 103:   0:     8:
必要だ        : 504:  95:  95:   8: 31401:OR:状態・保持
の            : 103: 100: 100:   0:  1920:
は            : 711: 110: 110:   0:   212:
は            : 701: 101: 101:   0:    48:
忍耐力        : 101: 100: 100:   0: 56686:OR:状態・保持
で            : 701: 103: 103:   0:     8:
ある          : 301:  73:  73:   4:   960:OR:断定
←で          : 701: 103: 103:   0:     8:
ある          : 302:  73:  73:   7:   962:
ある          : 304:  73:  73:   7:   410:
ある          : 301:  73:  73:   7:   959:OR:存在
ある          : 301:  73:  73:   7:   960:OR:断定
ある          : 301:  73:  73:   7:482247:OR:存在
。            : 902: 155: 155:   0:   357:
```

図2　形態素解析の例

```
構文解析成功
<S> [任意－SENTENCE－SENTENCE－文]
|-ある [任意－VERB_PH－VERB－動詞]
  |-忍耐力[で] [達成状態格－KAKUJO_PH－NOUN－名詞]
  |-の[は] [主格－KAKUJO_PH－NOUN－準文名詞]
    |-必要だ ある*< [PN]  (sbj) > [主格関係節属性－VERB_RENTAI_PH－ADJ_SYUUSI－連体形容動詞]
      |-うえ[で] [場所・位置格－KAKUJO_PH－NOUN－準文名詞]
        |-勉強する*< [PN]  (sbj) > [主格関係節属性－VERB_RENTAI_PH－VERB_RENTAI－動詞]

単語訳:勉強する(study,work)うえ(top)で()必要な(necessary)の(one)は()忍耐力()で()ある(be)

ある [任意－動詞]
|-忍耐力[で] [達成状態格－名詞]
|-の[は] [主格－準文名詞]
  |-必要だ ある[ (sbj) ]<< [PN] >> [主格関係節属性－連体形容動詞]
    |-うえ[で] [場所・位置格－準文名詞]
      |-勉強する[ (sbj) ]<< [PN] >> [主格関係節属性－動詞]

■原文の語数   :   [     10]  :
■形態素の数   :   [     19]  :
■宇宙の数     : 実[     80]  :  続[    24]
■多義候補木数 :   [      1]  :
■多義判定LOOP :   [     27]回:
■制約判定機会 : 機[      0]回:  実[     0]回
■係りチェック : ◎[     19]回: ※再[     0]回
■解析時間     : 形[  0.004]秒: ◎構[ 0.001]秒
```

図3　構文解析の例

文章解析処理では，日本語構文解析ソフト CSK-PARSER を用いて形態素解析（図2参照）・構文解析（図3参照）を行って文節間の係り受け構造や単語の品詞情報を抽出する．そして解析結果を次章で述べる基本ルールと照合し，ルールを遵守しているかどうかの判定を行う．もし基本ルールを遵守していない箇所がある場合には，赤字で問題箇所を指摘する．ただし，本システムは，学生の技術文書作成能力の向上をねらいとしているため，訂正方法は学生に考えてもらうことを念頭において，訂正案は示さないよう設計している．

3．基本ルール

技術文書を執筆する上で遵守しなければならない規則の多くは，文献[1]に集約されている．本システムでは，これらの規則のうち，論文執筆の際に学生が比較的破りやすく，また，最低限度，必要と思われるものを選定し実装した．実装した基本ルールの概要は以下の通りである．

１．句読点に関する規則
２．当て字に関する規則
３．文書主語の一人称に関する規則
４．同一単語の頻出に関する規則
５．文章中の「の」の使用回数の規則
６．体言止めに関する規則
７．文末表現に関する規則
８．接続詞の表記に関する規則
９．副詞の表記に関する規則
１０．常用漢字に関する規則
１１．補助動詞に関する規則
１２．形式名詞に関する規則

これらの規則は，図２・３の解析結果をもとに，正規表現を用いたパタンマッチングによりチェックが可能である．そのため本システムでは，正規表現による強力なパタンマッチング処理が可能なオブジェクト指向言語，Ruby を用いて実装している．

４．簡潔明瞭な文章作成指導

塚本らは文献[1]において，内容がわかりにくい文章や，意味が曖昧な文章に関する指導についても触れている．このような文章の指導は，３に述べた規則と違い，明確な規則で表現することが難しいため，ソフトウェアによる自動添削は困難である．

本研究では，「わかりにくい文章」が具備する性質について調査・検討し，以下の８項目が文章の「わかりやすさ」と密接な関係にあると考えた．

１．自立語の数
２．動詞の数
３．動詞・準動詞・表明思考動詞などの総数
４．連体修飾用法の動詞の数
５．連用修飾用法の動詞の数
６．動詞数と自立語数の割合
７．主語と述語の物理的距離(単語数)
８．解析器による構文解析の試行回数

これらの項目を考慮して文章の「わかりにくさ」を定量的に評価するため，クインランの決定木学習アルゴリズム[5]を用いて，決定木の自動生成を行った．決定木生成に使用したデータは，東京高専情報工学科2007年度卒業研究の第1回中間発表の予稿集30人分(506文)であり，その中から「わかりにくい文章」を目視により抽出し，学習データとした．生成した決定木を図４に示す．この結果から，文章の「わかりやすさ」を判断するために，自立語の数などは重要であるが，動詞数と自立語数の割合などは，重要でないことがわかる．

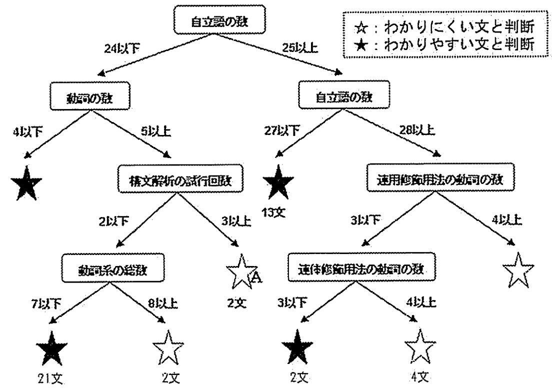


図４　決定木の例

このような手法で生成した決定木の妥当性を検証するために実験を行った．学習データとして用いた506 文について決定木による判定を行ったところ，目視による判定との一致率は99.4%であった．更に，学習データとは別に886文を収集し，同様の判定を行ったところ，決定木によって「わかりにくい」と判定された文は26文であり，そのうち19文は目視によってもわかりにくいと判断され，全体として決定木による判別が有効であることがわかった．しかし，現行のシステムでは，わかりにくい文章に対して，単に「わかりにくい」ことを指摘するのみである．本来ならば，わかりにくい理由を提示すべきであるが，そのためには，本研究の範囲をはるかに超える高度な技術が必要であると考えている．

そこで本研究では，わかりにくいと判断された文章を，可視化することにより，「わかりにくい」原因を学生が自ら解析する手助けを行うための枠組みを提案する[6]．文章の可視化の例を図５に示す．この図は，CSK パーザーによって得られた単語間の係り受け関係をもとにして重要な単語のみを抜き出し，Graphviz を用いて図化したものである．オブジェクト指向プログラミング言語のクラス図にならって，単語間の矢印によって２つの単語の間の係り受け関係を示している．文章が非常に長い場合や，文法的に誤っている場合，パーザーによる解析結果の一部に誤りが生じる可能性もあるが，この図と文章を比

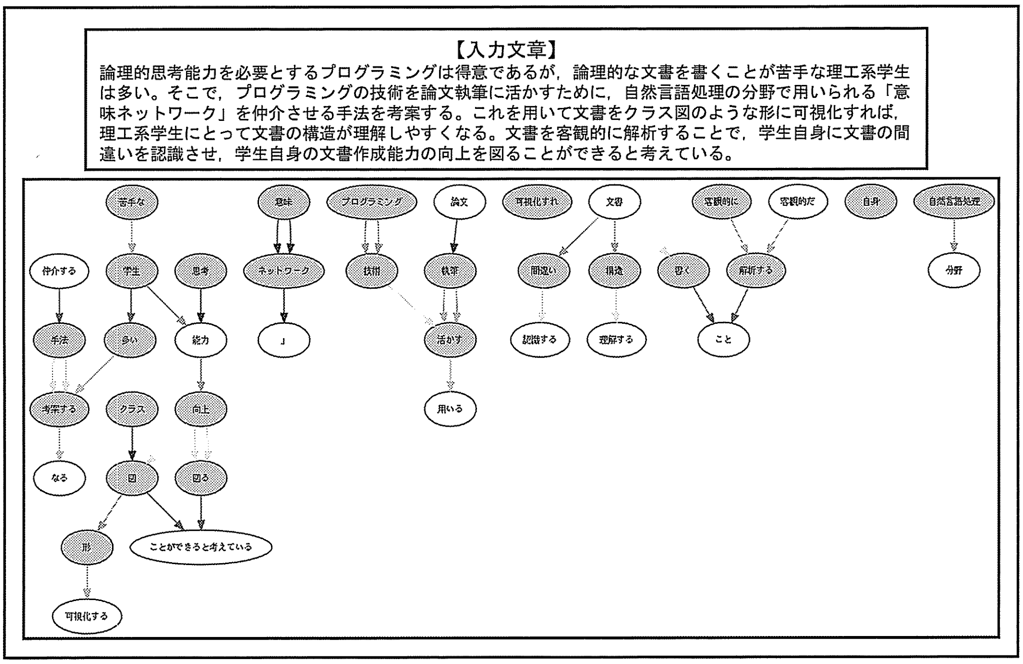


図５　文章の可視化例

較することによって，強い係り受け関係がある２つの単語が文章中では離れていたり，ある特定の単語に多くの単語がかかっていたりするなど，文章の「わかりにくさ」の要因を解析する上で，大きな手助けになるものと考えている．しかし，現在の出力結果では，グラフが大きく複雑であるため，人手による解析はあまり容易ではない．そのため，今後は，学生の文書作成能力向上を支援するシステムとしての実用化を目指すため，文章の骨子または最重要単語を抽出し，グラフの可読性をあげる検討を行う．また，グラフを用いた「わかりにくさ」の検証において，自動化できる部分は自動化し，図１に示すシステムで適切なコメントを与えられるよう検討を行う予定である．

５．むすび

本研究では，理工系学生の技術文章作成能力の向上を目的とした支援システムの開発を行っている．技術文書を執筆する上で，守らなければならない規則等を自動チェックするための仕組みをシステムに組み込むだけでなく，簡潔明瞭な文章を作成するために，「わかりにくい文章」の抽出方法と，その文章を学生が推敲するための支援方法を検討した．「わかりにくい文章」の抽出方法については，決定木自動生成による方法を提案したが，実際の検証実験でも高い抽出精度が得られ，その有効性が確認できた．また，「わかりにくい」と判定した文章を可視化することにより，クラス図に馴染み深い理工系学生が，容易に推敲できるための支援方法についても検討した．今後，文章の可視化については，文章の骨子を抽出する手法の検討し，実用化を念頭においてソフト改良を進める予定である．

参考文献

[1] 中島利勝，塚本真也，“知的な化学・技術文書の書き方”，コロナ社，1996
[2] 菅沼明，石田朗子，倉田昌典，牛島和夫，“日本語文章推敲支援ツール『推敲』における字面解析手法とその評価”，情処学自然言語処理研究会，68-8，Sept. 1988
[3] 大野博之，稲積宏誠，“技術文章作成能力の育成を目指した教育支援ツールの開発”，信学第 18 回データ工学ワークショップ，2007
[4] 田中大輔，松本章代，鈴木雅人，“理工系学生を対象とした論文における文章作成能力の向上を促すシステムの開発”，2008 年信学総大学生ポスターセッション，145，2008
[5] http://www.rulequest.com/Personal
[6] 松本章代，鈴木雅人，市村洋，″理工系学生の論文作成支援を対象とした文書可視化システム”，情報処理学会第６９回全国大会講演論文集，1J-4，2006

（平成 20 年 9 月 25 日　受理）

「テクノ・ガールズ！」
――事業の成果報告と将来への展望――

小嶋徹也*，阿久沢　昇**，大野秀樹***，津田　潔***，相澤俊行***

Techno Girls : Present and Future Report in TNCT

Tetsuya KOJIMA, Noboru AKUZAWA, Hideki OHNO,
Kiyoshi TSUDA, Toshiyuki AIZAWA

Since 2006, the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) has promoted the educational policy for supporting female students to choice the science careers. “Techno Girls”, proposed and carried out by Tokyo National College of Technology in 2007, is one of the projects funded by MEXT according to this policy. In this project, open seminars only for girl students in junior high schools have been held once in a month from September through December in 2007. The purpose of this project is not to increase the girl students in KOSEN, but to enlighten them on the pleasure of science and to increase the female candidates for students and researchers in science and engineering fields. In this paper, the results of this project are reported. Some plans for the future are also discussed.

(Keyword: open seminar, female students, educational project, science career)

1. まえがき

「科学技術創造立国」日本を支える人材として，科学技術分野への女性の進出を推進することは急務であるが，理工系分野における女性の比率は未だに低いのが現状である。このような状況に対し，文部科学省は平成 18 年度より「女子中高生の理系進路選択支援事業」[1] を公募型の委託契約事業として推進している。東京工業高等専門学校（以下，本校）では，平成 19 年度，「テクノ・ガールズ！～マンスリー・サイエンス・フェスタ in TOKYO-KOSEN」という企画を提案し，同事業としては，高専として初めてかつ唯一の採択例となった。この事業は，女子中学生のみを対象とした公開講座を 4 ヶ月連続月 1 回のシリーズで開講したものである [2]。この事業の目的は，高専への女子受験生，女子入学者を増加させるということではなく，もっと広い視野で，科学や工学の楽しさを知ってもらい，科学や工学の進路を選択する女子学生のすそ野を広げるということにある。

各講座は，参加する中学生のほか，保護者や中学校の教員にも公開した。加えて，毎回，関連分野の女性研究者や技術者をゲストとして招待し，講座の合間にティーブレークを催して，参加中学生らと懇談することも試みた。また，本校の女子学生 16 名が参加者の補助を行った。毎回，講座の実施前と実施後にアンケート調査を行い，科学や工学への関心があるか，理系の進路を選択したいか，などの項目について，参加者の意識の変化を調査し，本事業による効果を数値的に評価した。

本報告では，平成 19 年度に実施した講座の内容とその効果，および，実際に実施する上で明らかになった問題点などについて述べるとともに，平成 20 年度の計画および将来への展望についても論じる。

2. 事業の目的と概要

本事業は，女子中学生の科学や工学に関する関心を喚起することを主たる目的として，本校を会場に，女子中学生のみを対象とした公開講座をシリーズで開講するものである。身近なものを題材に実験や工作を体験することで，中学生の年代から女子生徒にも科学・技術への関心を喚起するとともに，参加する中学生の他，保護者および中学校の教員にも公開することにより，女子生徒の理系進学に関する保護者や中学校教員の誤解を是正することも大きな目的の一つとした [2]。

実際に講座で扱ったテーマは，「空気の液体を作ろう」「七宝焼き」「暗号の仕組みを知ろう」など，

＊情報工学科　＊＊物質工学科　＊＊＊一般教科

多岐にわたっており，これらに加えて，著名な女性研究者，技術者を招いた講演会も実施した。

毎回の講座には，関連分野の女性研究者や大学教員，本校の卒業生をはじめとする企業の女性技術者らをゲストとして招待し，講座の内容を見学してもらった。また，講座の合間にティーブレークを催し，これらのゲストに自らの体験談などを語ってもらい，参加中学生や実験補助員である本校の女子学生との懇談も行った。

本事業では，以上のような取組みを通して，女子中学生およびその保護者らに対し，科学や工学が身近なものであることを伝え，これらの分野特有の「楽しさ」を発見する手助けとなることを目指した。

3. 事業実施内容

3.1 実施体制と経費

本事業の実施体制を**表１**に示す．各講座の実施担当教員に加え，講座補助の女子学生に対する連絡やケアを行なうため，2 名の女性教員が参加した。また，総務課企画係の 3 名の事務職員（うち 2 名が女性職員），講座の実施補助として情報工学科と物質工学科の女子学生が参加した。

本事業の総予算は 3,993,300 円である。その内訳を**図１**に示す。経費のうち広告費が最も金額が大きく，全体のおよそ 30%を占めている。

3.2 第 1 回講座「空気の液体を作ろう」

第 1 回講座の実施内容を**表２**に示す。この講座では，ガラス管から試験管を作成し，実験装置を参加者自身が組み立てた上，空気を液体窒素で冷却して，液体になった空気の色や磁性について調べることを主な目的とし，参加者全員に全工程を体験してもらった。また，銀線を使ってアクセサリーを作る体験も取り入れた。

講座は休憩を含み合計 3 時間で行った。最初と最後の 1 時間で実験を行い，その間に 40 分のティーブレークをはさんだ。ティーブレークでは，お茶やお菓子を楽しみながら，ゲスト講師から女性研究者としての体験談を聞き，その後，実験補助員の女子学生を交え，参加女子中学生および保護者との懇談を行った。また，参加した女子中学生全員が白衣を着用した上で実験に参加してもらった。

3.3 第 2 回講座「七宝焼き」

第 2 回講座の実施内容を**表３**に示す。この講座では，下絵の作成，銀線による模様付けと焼付け，ゆう薬による色付けと電気炉による焼上げまで，七宝焼きの全工程を参加者が体験し，色や表面の変化などを観察した。焼き上がった作品は，参加者自身の手でバッジやペンダントに加工した後，持ち帰って

表１　本事業の実施体制

実施責任者	水谷　惟恭　校長
実施担当教員	小嶋　徹也（代表，情報工学科准教授） 阿久沢　昇（物質工学科教授） 大野　秀樹（一般教科准教授） 工藤　節子（物質工学科教授） 松本　章代（情報工学科助手）
実施補助	総務課企画係事務職員 女子学生（物質・情報工学科）

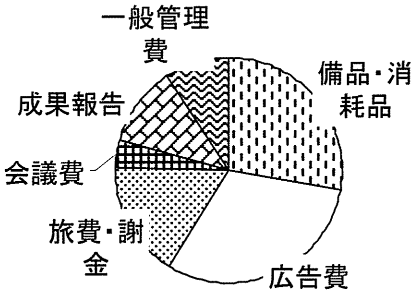


図１　本事業の実施経費

表２　第 1 回講座の実施内容

実施日	平成 19 年 9 月 16 日（日）
題目	空気の液体を作ろう
講師	阿久沢 昇（物質工学科）
ゲスト	松本 里香 氏（東京工芸大）
参加者	女子中学生 20 名（定員 50 名）
内容	試験管作成，酸素の冷却・観察， 銀線アクセサリーの製作

表３　第 2 回講座の実施内容

実施日	平成 19 年 10 月 21 日（日）
題目	アートを科学する ～デザイン工作『七宝焼き』～
講師	大野 秀樹（一般教科（物理））
ゲスト	小原 ひとみ 氏（産総研）
参加者	女子中学生 26 名（定員 50 名）
内容	七宝焼きのデザイン，ゆう薬の塗布， 焼き上げまでの過程を体験

もらった。電気炉での焼き付けなど，集中した作業時間を確保するため，ティーブレークは講座終了後に実施した。ティーブレークでは，第1回講座と同様にゲストの体験談などを聞き，補助員の女子学生を交え，参加女子中学生および保護者と懇談を行った。また，第1回と同様に参加者には白衣を貸与し，科学者気分を味わってもらった。

3.4 第3回講座「講演会」

第3回講座の実施内容を**表4**に示す。この講座は，他の3講座とは趣向を変え，理工系の各分野で活躍する著名な女性研究者・技術者を招き，体験談や女子中学生へのメッセージを語ってもらう講演会として実施した。講師として招いたのは，東北大学数学科教授の小谷元子氏，(株)三菱電機静岡製作所の平岡利枝氏，および(財)日本水路協会海洋情報研究センターの江川晋子氏の3名である。聴講者としては，一般から募集した女子中学生や保護者のほか，本校学生や教職員も参加した。

小谷氏は，優れた女性科学者に贈られる猿橋賞を平成17年に受賞しており，女性のキャリアパス形成に関する活動にも積極的に参加しておられる方である。講演では，ご自身の数学や科学・技術に関する考え方やご経験を語っていただいたほか，東北大学で実施している女子科学教育の取り組みについても紹介していただいた。

平岡氏は，(株)三菱電機で家庭用冷蔵庫の開発に従事されており，「切れちゃう冷凍」「ビタミン増量冷蔵庫」などの開発者として知られ，平成18年には，日経 WOMAN 主催の「ウーマン・オブ・ザ・イヤー2006」において，ヒットメーカー部門第2位，総合でも第9位にランキングされた方である。講演では，企業の開発現場における自らのご経験や，現在の職業に就くまでのご経験のほか，小中学校で習う身近な科学現象が冷蔵庫などのものづくりに活きる例として，最新の冷蔵庫の原理などを平易に語っていただいた。

江川氏は，平成16年11月から平成18年3月まで，第46次南極観測隊越冬隊員として昭和基地に滞在され，人工衛星からの観測データ収集などに従事されたご経験をお持ちの方である。氏は学生時代に科学館でのボランティアを経験されたり，科学に関する書籍の執筆に関わったりしたご経験もあり，講演では，主に昭和基地での生活とそこで見られる理科現象について，分かりやすくお話ししていただいた。また，南極観測隊員の越冬服やデータ観測に使用した機器，南極の氷なども展示し，参加者は南極の氷に触れ，氷が溶ける音も身近に聞くことができた。

表4　第3回講座の実施内容

実施日	平成19年11月11日（日）
題目	私と科学との出会い～女性研究者・技術者による講演会～
講師・演題	小谷 元子 氏（東北大学） 『夢を形にする力～壁はいらない～』 平岡 利枝 氏（(株)三菱電機） 『私と冷蔵庫との出会い～商品企画・開発の仕事～』 江川 晋子 氏（(財)日本水路協会） 『毎日を楽しくする理科～南極・昭和基地編～』
参加者	27名（うち，女子中学生3名）

表5　第4回講座の実施内容

実施日	平成19年12月16日（日）
題目	秘密のメッセージの作り方・伝え方～暗号の仕組みを知ろう～
講師	小嶋 徹也（情報工学科）
ゲスト	松嶋 智子 氏（職業能力開発総合大） 藤原 亜希子 氏（本校卒業生，(株)NTT コミュニケーションズ）
参加者	女子中学生30名（定員50名）
内容	紙筒や型紙を利用した暗号の紹介， 紙筒を用いた暗号器の作成， 暗号解読ゲーム大会

これまでの講座と同様，3氏の講演終了後にティーブレークを催し，聴講者と講師の間でざっくばらんに懇談を行った。単なる懇談にとどまらず，参加者からもさまざまな質問がなされた。本講演会の模様については，実施後に講演内容と質疑応答の様子を紙上採録し，保存および配布を行った[3]。

3.5 第4回講座「暗号の仕組みを知ろう」

第4回講座の実施内容を**表5**に示す。この講座では，まず，普通の手紙の文章中に秘密のメッセージが埋め込まれている実例や，紙筒を用いた古代のスキュタレー暗号，サンドルフ伯爵の型紙と呼ばれる暗号[4]などについて紹介した。また，紙筒を用いて，カエサル暗号やヴィジネル暗号という置換式の暗号を生成・解読できる暗号器を作成した。さらに，4人1組のチームに分かれてトーナメント形式の暗号文解読ゲーム大会を行い，暗号に親しむ試みも取り

入れた。最後に，これらの暗号を応用して暗証番号を安全に記憶する方法などについても教え，IDやパスワードの管理が重要であることにも言及した。

講座の実施スケジュールは第1回講座と同様であり，途中にティーブレークを設け，ゲスト2名の体験談などを語っていただき，補助員の女子学生や参加中学生と懇談した。さらに，第1回，第2回講座と同様に参加者には白衣を貸与した。

3.6 成果報告

全4回の講座終了後，講座の実施内容やアンケート調査の結果などをまとめ，成果報告を行った。

まず，平成20年2月にお茶の水女子大で開催された女性研究者支援モデル育成事業等合同シンポジウムに参加し，本事業における成果を口頭およびポスターで発表した[5]。

さらに，平成20年3月には，**表6**に示す要領で，本校外の会場にて本事業の成果報告会を開催した。「TOKYO-KOSEN サイエンス・ステージ『理科する女子ってカッコイイ！』」と題されたこの報告会では，第一部で本事業の内容や得られた成果に関する報告を，第二部ではこれに加えて，ゲスト講師を招いた実験ショーや講演会，パネルディスカッションを実施した。

第一部の事業報告では，担当教員による事業実施報告のほかに，参加した女子中学生2名による参加報告も行われた。また，第4回講座で行われた暗号解読ゲーム大会で優勝および準優勝したチームの中学生を招待し，表彰式もとり行われた。

第二部は「サイエンス・ステージ」と題し，理科の楽しさを伝え，考えるイベントを実施した。まず初めに，テレビなどでも活躍している気象予報士の小越久美氏にご講演いただいた。講演では，身近な例も示しながら，中学生にもわかりやすく環境問題や地球温暖化の問題についてお話しいただいた。

続いて，京都府にあるきっづ光科学館ふぉとんの辻本久美講師をお招きして光の実験ショーを実施した。ここでは，レーザー光線や偏光フィルムを用いた公開実験を行った。実験ショーの補助員として本校の女子学生が数名参加した。また，来場した中学生たちをステージに上げて参加させる場面もあった。

最後に中学生の理系進路選択に関するパネルディスカッションを行った。パネリストとしては，講師としてお招きした小越氏，辻本氏に加え，立川第六中学校教諭で，サイエンスクラブの顧問を務め，NPO 法人ガリレオ工房などでも活躍されている岡村幸保氏，さらには第4回講座のゲストでもあった本校卒業生の藤原亜希子氏に参加していただいた。ここでは，中学生が理系進路を選択する際のハードルや壁について，また，いわゆる「理科離れ」の問題についても議論された。この中で，現代の中学生たちが部活や塾などで非常に忙しいこと，さらに，潜在的に子どもたちは理科の題材には興味を持っているが，中学校の授業や実験の中で面白みを見つけられずに「離れている」実態に関する指摘もなされた。そのため，本事業のような取組みを通して，子どもたちの関心をかき立てるような多様なテーマを取り扱い，男女，および理科への関心の有無を問わず，子どもたちに対し理科に目を向けさせる機会が増えていくことが重要であろうという結論に達した。

表6　成果報告会の実施内容

実施日	平成20年3月16日（日）
題目	TOKYO-KOSEN サイエンス・ステージ 『理科する女子ってカッコイイ！』
会場	八王子学園都市センター
来場者数	53名（うち女子中学生6名）
ゲスト	小越 久美 氏（気象予報士） 辻本 久美 氏 （きっづ光科学館ふぉとん） 岡村 幸保 氏 （立川市立第六中学校教諭） 藤原 亜希子 氏（本校卒業生, (株) NTT コミュニケーションズ）
内容	(1) 事業実施報告 (2) 女子中学生による参加報告 (3) 講演「お天気キャスターから見た環境問題」（小越氏） (4) 光の実験ショー（辻本氏） (5) パネルディスカッション

以上，本事業で実施した内容と成果については，最終的に成果報告書[2]の形で冊子としてまとめ，文部科学省へ提出するとともに関係各機関へ配布した。

4. 事業の評価

4.1 アンケート実施方法

本事業では，参加者およびゲストや講師に対するアンケート調査を行って事業の成果を評価することとした。特に参加した中学生に対しては，講座受講前と受講後の2回にわたり調査を行い，

(1) 講座で扱った内容が難しいと感じるか

(2)　科学や工学に関する興味があるか

(3)　理系の進路を選択する意志があるか

の3点について，講座を受講することでどのような変化が生じたかを数値的に検証することとした。一方，ゲストや講師からは，本事業に参加した感想や，内容に関する提言などについてコメントを求めた。

4.2 アンケートの結果および考察

本節では，本事業で行ったアンケート調査結果を踏まえ，本事業で目的として掲げたことが達成されたかどうかを数値的に評価する。アンケートは講座ごとに実施したが，紙数の都合上，すべてを紹介することはできないため，本論文では，全講座のアンケート結果を集計した総合的なデータについてのみ報告することとする。講座ごとの詳細な調査結果については，成果報告書[2)]に掲載されている。

まず，テーマの難易度に関するアンケート調査結果を図2に示す。このグラフは事前・事後アンケートにおいて，各回答を選んだ受講者数の全回答者数に対する割合を百分率で示したものである。この結果から，講座を実施することで，参加者は講座の内容をより平易に感じるというよりは，むしろ難しく感じていることがわかる。この結果は，事前にリーフレットや Web ページなどを見て抱いていたイメージよりも，実際に講座で実施した内容が参加者にとっては難しかったことを示しているといえる。

次に，科学や工学への関心，および理系進路選択への考え方がどのように変化したのかを検証する。図3に理系分野への興味に関するアンケート集計結果を，図4に理系の進路選択に関するアンケート集計結果をそれぞれ示す。これらのグラフも図2と同様に，各回答を選択した受講者数の全回答者数に占める割合を，事前・事後アンケート毎に百分率で示したものである。

図3より，本事業に参加した中学生は，そもそも理系分野への関心が強い傾向があったことが伺え，講座受講後の変化からは，「わからない」と回答した受講者が減少していることがわかる。このことにより，本事業により理系分野への関心が喚起できたと言えるほどの効果は見出せないが，少なくともこれらの分野への関心がより明確になったと考えることはできる。

一方，図4からは，講座を受講することで，理系進路を選択しようという意志を持った参加者が増加しており，結果として，受講者の半数以上が理系進路選択の意志があると回答していることがわかる。

なお，実施した各講座のうち，複数の講座に参加した中学生もいたが，その場合でも受講した講座ごとに事前と事後のアンケートを実施しており，図2～4の結果には，これらの結果も含まれている。特に図3において，科学や工学への関心があると回答した受講者が受講以前の時点で多いのは，こうしたいわゆる「リピーター」の回答が含まれていることによる影響もあると考えられる。

以上をまとめると，本事業で扱った講座の内容は，参加者にとって必ずしも平易なものではなかったに

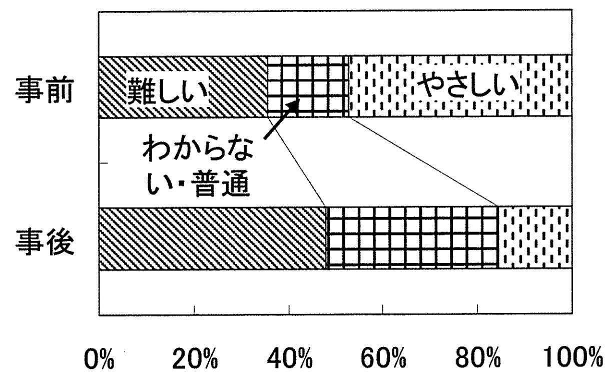


図2　テーマの難易度に関する調査結果

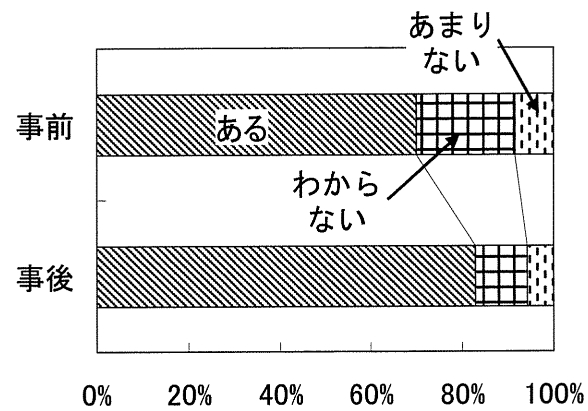


図3　科学や工学への興味に関する調査結果

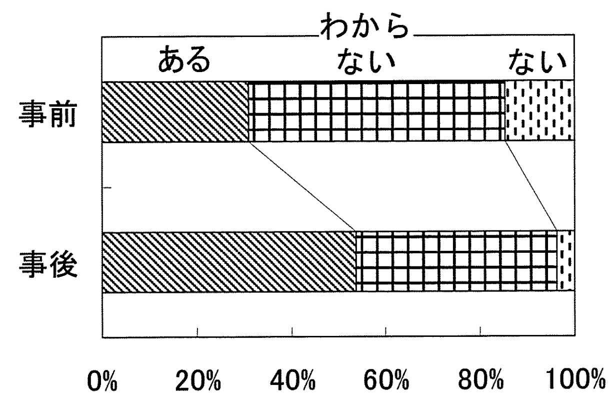


図4　理系進路選択の意志に関する調査結果

も関わらず，講座を受講することで理系分野に関する関心が維持され，理系の進路を選択する意志が明確になる傾向が見られたと考えることができる。

また，参加者へのアンケートにおける自由記述欄や，ゲスト講師などから寄せられたコメントも以下に紹介する。まず，参加者からは，「楽しかった」「理科が好きになった」「少しだけ理系進路を考えるようになった」など，上記の数値的結果を裏付けるような感想が寄せられた。一方，ゲストや講師からは，「参加者が自然体で楽しんでいた」「有意義なイベントだった」「補助員の学生たちの対応が良かった」など，本事業の意義や実施方法に関しておおむね好意的なコメントを多くいただくことができた。

4.3 平成19年度における問題点

本節では，本事業を進める上で明らかになった問題点について簡潔にまとめる。

大きな問題点としては参加者の確保に関する点が挙げられる。実際，すべての講座で定員を満たすことができず，当初見込んでいた中学校教員の参加もほとんど得られなかった。計画時点で定員の見積もりが不十分であったこともあるが，アンケートやその後の調査の結果から，受講者の多くが受験先として本校を志望ないし検討していたことがわかった。したがって，本来，ターゲットとすべきである，理系分野にあまり関心のない層に十分アピールできなかったことが大きな問題であったと考えられる。また，本事業の会計においては，広報費が全体の30%以上を占めており，広報面での費用に対する効果が非常に低かったと言わざるを得ない。したがって，今後は，本事業でターゲットとする受講者像を明確にした上で，広報戦略を練り直し，より多くの幅広い層の参加者を確保できるような工夫が必要であるといえる。

また，ゲストを招いて行ったティーブレークに関しても，講演会以外の3つの講座では，ゲストには講座を見学し，体験談を語ってもらうだけであった。ティーブレークの話題も画一的になる傾向があった上，中学生からはあまり積極的に質問が出ないなどの問題も見受けられ，ゲスト講師へ期待する内容やティーブレークの実施方法などについて，再検討する必要があると考えられる。

この他，参加者が女子に限定されることに関する違和感があるという感想も寄せられており，事業の一環として，男女を問わず参加できるイベントを取り入れるなどの工夫も今後必要になると考えられる。

5. 平成20年度の計画および今後の展望

前節で述べた平成19年度における問題点を踏まえ，本節では，平成20年度における実施計画について詳細に述べる。

5.1 平成20年度の基本方針

まず，平成20年度の事業の基本方針を以下のように定めた。

(1) 理科好きとも理科嫌いともいえない女子生徒を主なターゲットに，理科や数学の面白さに気づかせ，少しでも理系分野に振り向かせる。

(2) 理系キャリアへの入口において，感動や楽しさの原体験を形成する。

(3) 身構えて参加するのではなく，ちょっと立ち寄るような，気軽に遊び感覚で参加できるイベントを展開する。

平成19年度の事業においては，前節で述べたとおり，本校を受験対象として考えているような，当初から理系に関心のある女子生徒が多く参加していたことが見て取れた。したがって，平成20年度は，事業のターゲットとする層を，理科好きとも嫌いともいえない，いわゆる「浮動層」に絞り，広報活動などを行なうこととした。

このため，理系分野へのハードルや壁を感じる，というよりはむしろ，「こんな面白い世界もあったのか」「科学の世界がこんなに身近なところで体験できるのか」といったような感動体験を，講座を通して伝えられるようなテーマを厳選することとした。

また，平成19年度は，主に本校を会場として実施したが，気軽に家族ぐるみで参加できるよう，会場の設定などについても柔軟に計画することとした。

5.2 平成20年度実施計画の特徴

平成20年度の実施計画において特徴的な点について以下に詳細に説明する。

5.2.1 実施会場

平成20年度は，本校のみを会場とするのではなく，積極的に外部の会場を利用することとする。このことにより，従来よりもアクセスが便利で，商業施設にもより近く，家族ぐるみで休日に出かけ，気軽に参加できるような形態を目指す。

5.2.2 募集形態

女子中学生のみならず，保護者や中学校教員とのペア，またはグループ単位での参加を受けつけ，保護者や教員も講座に参加できることとする。これに

より，女子中学生の進路選択に大きな影響力を持つ保護者や中学校教員にも，科学や工学分野の魅力が身近なところにあふれており，楽しいものであることを実感してもらえることを目指す。

5.2.3 講座の実施形態・内容

各講座においては，本校教員による従来の講座のみならず，外部講師によるミニ講座も実施し，毎回，2 本立ての講座として開催する。外部講師による講座は，調理を伴うものや，アート系のものなど，本校教員ではカバーしきれない分野から講師を選定し，打診することとする。

また，成果報告会は，男女を問わず参加できる形式とし，不特定多数の参加者を集められるような内容，形態で実施することを検討する。

5.2.4 補助学生の構成

平成 19 年度の事業においても，本校女子学生が講座実施補助員として参加することが重要な目玉であり，実際に中学生と触れ合いながらアットホームな雰囲気で講座を進行できるなどの効果をあげることができた。平成 20 年度においても，この形態は継続して実施することとする。ただし，平成 19 年度に本事業で実施した講座を受講し，その後，本校に入学した学生（1 年生）が複数名いることから，彼女たちも平成 20 年度の補助員として参加するよう，検討する。このことにより，参加する中学生に最も年齢的に近い層の学生が講座を支えることになり，参加者にとっては，より身近で，安心感のある講座を実現できることが期待される。

5.2.5 広報戦略

平成 19 年度の事業における広報においては，駅貼りポスターなどを実施したが，費用対効果が決して高いとは言えなかった。したがって，今年度は，より効果的な広報戦略を練る必要がある。

一つには，近隣の中学校や教育委員会と連携して，組織的に参加者を募集すること，もう一点は，インターネットなどを利用した広報戦略を強化し，迅速で効果的な情報提供を行なうことが挙げられる。特に，公式ホームページにおいては，携帯サイトの設置と QR コードを利用したアクセス性の向上に加え，担当教員や補助学生のコメントなどを掲載したブログや，テクノ・ガールズ受講者としての適正を測ることのできる「テクノ・ガールズ・チェック」などの企画などを掲載し，身近で，かつ多様性に富んだコンテンツを掲載することを試みる。

また，ポスターやリーフレットなどの印刷媒体でも，多様な写真などをふんだんに盛り込み，講座の内容や企画の雰囲気が実感できるようなデザインになるよう，検討することとした。

5.2.6 実施内容

以上のことを踏まえ，平成 20 年度は，下記の要領で本事業を推進することとした。

(1) 第 1 回講座
　日時：2008 年 8 月 9 日(土) 13:00
　会場：東京高専
　内容：(a) 「空気の液体を作ろう」
　　　　（講師：物質工学科・阿久沢　昇）
　　　(b) 「光の実験ショー」
　　　　（講師：きっづ光科学館ふぉとん　辻本　久美　氏）

(2) 第 2 回講座
　日時：2008 年 9 月 28 日(日) 10:30／14:30
　会場：イトーヨーカドー八王子店
　内容：(a) 「アートを科学する　～デザイン工作『七宝焼き』～」
　　　　（講師：一般教科・大野　秀樹）
　　　(b) 「マジックカラーケーキを作ろう」
　　　　（講師：くらしとバイオプラザ 21　佐々　義子　氏）

(3) 第 3 回講座
　日時：2008 年 10 月 19 日(日) 13:30
　会場：八王子学園都市センター
　内容：(a) 「秘密のメッセージの作り方・伝え方～暗号の仕組みを知ろう～」
　　　　（講師：情報工学科・小嶋　徹也）
　　　(b) 「跳ね星で遊ぼう&不思議なトゲトゲ」
　　　　（講師：電気通信大学　児玉　幸子　准教授）

(4) 成果報告会
　日時：2008 年 11 月 1 日(土) 13:00
　会場：東京高専

5.2.7 今後の展望

以上，「テクノ・ガールズ」の実施報告および計画について述べてきたが，今後，さらに継続して本事業を推進するために必要と考えられることをいくつか挙げてみたい。

(1) 実施体制と内容，予算

今後も文部科学省による委託契約事業として実施

できる保証はなく，予算規模を縮小せざるを得なくなっても継続して実施できるような体制作りを行なう必要がある。予算規模が縮小されれば，外部ゲストの招聘などは困難になるため，本校教員で実施できる講座で，女子中学生にとって魅力のあるテーマを設定する必要があると思われる。そのためにも，現行の3テーマのみならず，多様な題材を準備し，担当教員についても固定せず，柔軟に運用できるような仕組みを作っていく必要があると考えられる。

さらに，補助学生についても，今年度と同様，本事業における受講経験をもつ学生を代々メンバーに加えていくことにより，向こう5年間で，本科生5学年による補助学生チームが結成できる。このような，本事業についてよく知る学生による運営母体を結成することにより，より円滑に事業を展開していくことができるものと期待される。

また，外部資金を獲得することが目的ではなく，あくまでも科学教育の普及を目的とする以上，予算獲得のために奇をてらった企画や実施体制を組むことは本末転倒である。したがって，内容や実施形態がオーソドックスなものであっても，本校には「テクノ・ガールズ」がある，ということを一般に認知させ，地域に根ざした事業となるような工夫を取り入れる必要があろう。そのためには，八王子市をはじめとする近隣都市の教育委員会などと協力体制を築き，事業を展開していくことも一案であろう。

(2) 多様なロールモデルの提示

本事業をはじめとする女子中高生の理系進路選択支援事業では，単に講座を実施するだけでなく，理系の技術者や研究者というのがどのような人物で，そのような職業に就くためにはどうすべきか，といったことを提示することも重要である。このため，講師やゲストを中心に多様なロールモデルを提示していく必要がある。

本事業における本校側の講師は男性教員のみで，女性のロールモデルとしては，ゲストや本校女子学生のみしか存在しないのが現状である。このため，事業実施組織における女性教員の登用は非常に大きな課題と言えよう。

また，男女共同参画社会においては，女性のみの意識改革や努力のみならず，男性の協力が不可欠である。したがって，男女が共に働く現場における男性のロールモデルや具体的なアクションの事例を提示することも重要であると考えられる。

これらを踏まえて，男女が一緒に参加し，楽しめるイベントを実施することが理想形と言えよう。

5. むすび

本校で実施した事業「テクノ・ガールズ！」の成果と問題点について報告し，平成20年度の計画と将来の展望について述べた。以上で述べたとおり，理系進路の選択について前向きな意志を持つ参加者を増加させることができた，という意味である程度の効果があり，平成19年度は，初年度の事業として最低限度の目標がおおむね達成されたといえる。

一方で，参加者の多くが当初から理系に強い関心を持っていたことも明らかとなったことから，科学や工学の分野に関心のない層の中学生に対してどのような働きかけをしていくべきであるのか，中学校における授業や実験の実態なども調査しながら，講座の内容や実施形態，広報戦略の改善を行なう必要があることが浮き彫りとなった。これらの問題点を克服すべく，平成20年度も事業を計画し，推進しているところである。平成20年度の成果については，また別の機会に報告することとしたい。

今後は，受講者が実際にどのような進路を選択したか追跡調査を行う必要もあり，文部科学省との委託契約の有無に関わらず，本校において継続的に本事業を実施し，本校の地域連携の一環として定着させることができるよう，努力を続けていく必要があると考えている。

参考文献

1)文部科学省ホームページ,「女子中高生の理系進路選択支援事業」, http://www.mext.go.jp/a_menu/jinzai/001.htm

2)東京工業高等専門学校：テクノ・ガールズ！〜マンスリー・サイエンス・フェスタ in TOKYO-KOSEN〜 成果報告書 (2008)

3)東京工業高等専門学校：テクノ・ガールズ！〜マンスリー・サイエンス・フェスタ in TOKYO-KOSEN〜 第3回講座『私と科学との出会い』 −女性研究者・科学者による講演会− リーフレット (2008)

4)ルドルフ・キッペンハーン（赤根洋子 訳）：暗号攻防史，文春文庫 (2001)

5)小嶋徹也：テクノ・ガールズ！〜マンスリー・サイエンス・フェスタ in TOKYO-KOSEN〜，女性研究者支援モデル育成事業等合同シンポジウム −女性研究者等の活躍促進のために− 資料集, pp.14-15 (2008)

（平成20年9月25日　受理）

界面活性剤添加によるオゾン水の殺菌効果の向上

北　折　典　之*

Improvement of Sterilization Performance of Ozonated Water by Surfactants Addition

Noriyuki KITAORI

Ozonated water is one of the most useful and important sterilizers, which are used in a wide-range of fields. It has high sterilizing power even in very low concentrations and with various bacteria. However, very large equipment is necessary in order to produce the ozonated water. Therefore, the development of small-size appliances for synthesizing of ozonated water was investigated. Then, it was found that this equipment was able to form ozonated water by electrolyzing the water directly using an electro-conductive diamond electrode and a consumer dry cell. It is possible to make the concentration of ozone over of 3 ppm and high sterilization performance on bacteria was shown. In addition, the additional effect of the surfactant for the improvement of ozone sterilization power was demonstrated. As a result, it was shown that ozonated water with the surfactant has high sterilization performance under an unclean environment.

(Keyword: ozonated water, sterilization, diamond electrode, surfactant)

1. はじめに

毎年後を絶たない大腸菌 O157 による被害に加え、近年、メチシリン耐性黄色ブドウ球菌（MRSA）、重症急性呼吸器症候群（SARS）および鳥インフルエンザウイルス等、今までにない生態環境の変化が流行し、社会的な大きな課題として注目されている[1-2]。そこで、殺菌力に選択性の少ない殺菌剤の開発が急務となっている。その殺菌剤の中で特に近年注目を集めているものの一つにオゾン水があげられる。

オゾン水は、近年注目されている機能水の一つであり、溶存オゾンによる効果によって、高い殺菌力や消臭効果を有する。また、塩素系殺菌剤などと比較して残留性が無く、生体への影響が少ないという特長も持つ。これらのことから、オゾン水は現在、工業分野をはじめ医療や食品工業など様々な分野への応用が検討されている[3-6]。

本研究室では、オゾン水の家庭への普及を目的とし、乾電池で駆動するスプレータイプの小型オゾン水生成装置を開発した（Fig. 1）[7-8]。本装置は、導電性ダイヤモンド電極と電解質としてプロトン伝導性膜を用いることによって、純水を効率よく電気分解できるため、高濃度のオゾン水を簡単に得ることができる特長を有する。本装置は、市販の 9 V 乾電池で殺菌に十分な濃度である 3～4 mg/L（3～4ppm）のオゾン水を容易に生成することができる。しかしながら、実際の殺菌にオゾン水を用いる際、親水性でない対象物質においては、菌とオゾンが接触しにくく、オゾン水の殺菌効果が十分に発揮されない場合があることがわかった[9]。

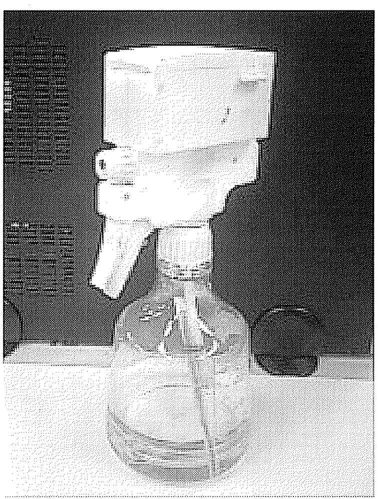


Fig. 1 Overview of generator of ozonated water

＊物質工学科

この原因は、殺菌剤であるオゾン分子が、殺菌対象物の表面に付着している汚れやバイオフィルム等によって、菌と接触する前に分解してしまうことに起因する。そこで、殺菌剤の効果を向上させるために、殺菌剤の濡れ性の向上[10]が必要であると思われる。

そこでオゾン水の菌との濡れ性を向上させるため、界面活性剤の添加を検討した。現在用いられている塩素系殺菌剤などでは、一般的に濡れ性向上のために界面活性剤が用いられている[10-12]。しかしながら、純水の電気分解によるオゾン水の生成では、水中の不純物による影響で、生成するオゾン水の濃度が大幅に低下することが懸念される。

本研究では、界面活性剤共存下での電気分解によるオゾン発生について、および界面活性剤添加に伴う殺菌力の改善について検討した。まず、陰イオン性、非イオン性、陽イオン性、両性の 4 種類の界面活性剤を用い、それぞれの濃度を変化させてオゾンの発生する条件を検討した。加えて、実際に界面活性剤を含有したオゾン水を生成し、殺菌実験を行った。その結果、界面活性剤存在下においてもオゾンの発生は可能であり、特に、本研究においては非イオン性界面活性剤を用いた場合、生成するオゾン水の濃度低下が最も少なかった。さらに、実際に殺菌試験を行った結果、界面活性剤を含有するオゾン水は高い殺菌効果を示すことが分かった。以上の実験結果について詳細に報告する。

2. 実験

2.1 界面活性剤存在下のオゾン生成

界面活性剤を添加したイオン交換水を電気分解し、オゾン水の生成を検討した。なお、本研究では界面活性剤濃度は 0～1.0 %の範囲で実験を行った。また、界面活性剤として、陰イオン性界面活性剤、非イオン性界面活性剤、陽イオン性界面活性剤、両性界面活性剤を用いた。用いた界面活性剤を Table 1 に示す。なお、いずれの界面活性剤も花王（株）製のものを使用した。実験装置を Fig. 2 に示す。電極は、導電性ダイヤモンド(50×10 mm)を陽極として、その上にプロトン伝導性膜（Nafion350, DuPont 社製）と陰極である白金線（φ=0.5 mm）をらせん状に巻きつけたものを用いた。

イオン交換水に界面活性剤を濃度が 0～1.0% となるように添加した。この溶液 100 mL を 1.0 A の電流で 1 分間、撹拌子で溶液を撹拌しながら電気分解を行った。なお、この電解条件は、3～4 mg/L のオゾン水（作製したスプレーによって生成するオゾン水と同程度の濃度）が生成する条件である。電気分解後、258 nm におけるオゾンの UV 吸収スペクトルによって、

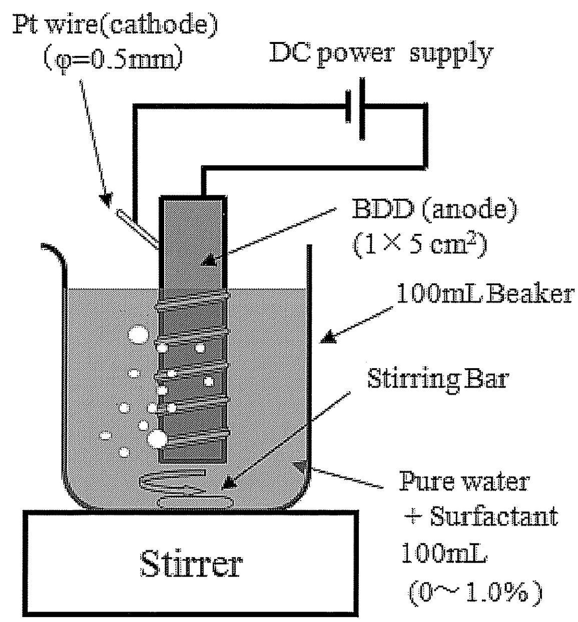


Fig. 2 Schematic of electrolysis equipment

Table 1 Surfactants used in this experiment

Type	Surfactant name	Composition
Anionic	Emal 20CM	Polyoxyethylene alkyl ether sodium sulfonate
	Poiz 521	Polycarboxylate polymer type surfactants
Nonionic	Emulgen 1135S-70	Polyoxyethylene alkyl ether
	Emulgen 108	Polyoxyethylene lauryl ether
Cationic	Quartamin 24P	Lauryltrimethyl ammonium chloride
Amphoteric	Amphitol 20BS	Lauryl Betaine

オゾン発生を確認し、オゾン水の濃度はKI法によって測定した[13-14]。

2.2 殺菌実験

2.1 項において最もオゾン濃度が高かったエマルゲン 1135S-70 を用いて殺菌実験を行った。本実験では、菌で汚染した平滑な面を殺菌対象とした。

水道水、1.5 mg/L オゾン水、1.5 mg/L オゾン水＋0.13 wt%界面活性剤、0.13 wt%界面活性剤を 10 mL ずつ対象物にかけ、キムワイプで拭き、その後、SCDLP 寒天培地を用いてスタンプ試験を行った。なお、本実験では、各殺菌液と菌との接触時間を 5 秒間とした。採取した菌は、インキュベーターを用いて 35 ℃で 24 時間培養した。発育したコロニー数をカウントし、殺菌効果を評価した。

3. 結果および考察

3.1 界面活性剤存在下におけるオゾンの生成

陰イオン性および非イオン性界面活性剤存在下におけるオゾン水生成の結果を Fig. 3 に示す。図より、陰イオン界面活性剤および非イオン性界面活性剤のいずれにおいても、界面活性剤を添加したことによって生成したオゾン水の濃度が減少していることが分かる。これは、界面活性剤が存在することによりオゾンの発生が阻害されたものと考えられる。特に、高分子界面活性剤であるポイズ 521 を用いた場合では、すべての濃度範囲においてオゾンは検出できなかった。非イオン性界面活性剤を添加した場合、いずれの濃度範囲においても、陰イオン性界面活性剤と比較してオゾン水濃度の低下は少なかった。特に、非イオン性界面活性剤であるエマルゲン 1135S-70 においては、すべての濃度範囲で高いオゾン濃度を得ることができた。これは、非イオン性界面活性剤は、水溶液中ではイオン解離していないため、水溶液中でイオンとなっている陰イオン性界面活性剤と比較して、電気分解への影響が少なかったためであると考えられる。なお、ポイズ 521 以外の陰イオン性および非イオン性界面活性剤においては、UV スペクトルによってオゾンの発生を確認することができた。陽イオン性界面活性剤および両性界面活性剤におけるオゾン水生成結果を Fig. 4 に示した。図より、陽イオン性と両性界面活性剤のいずれの場合においても、界面活性剤添加によって生成したオゾン水の濃度が低下した。しかし、界面活性剤濃度の増加によってオゾン濃度も増加するという結果を得た。陽イオン性界面活性剤および両性界面活性剤の UV 吸収スペクトルを Fig. 5 に示す。図より、陽イオン界面活性剤

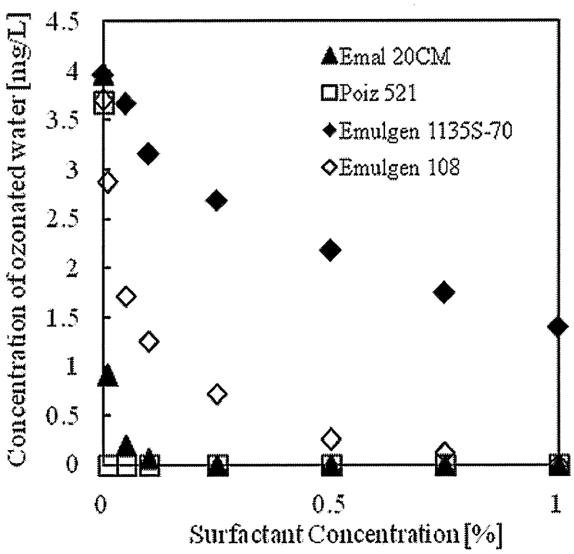


Fig. 3 Concentration change of ozonated water by surfactant addition
(anionic and nonionic surfactants)
▲: Emarl 20CM (Anionic), □: Poiz 521 (Anionic), ◆: Emulgen 1135S-70 (Nonionic), ◇: Emulgen 108 (Nonionic)

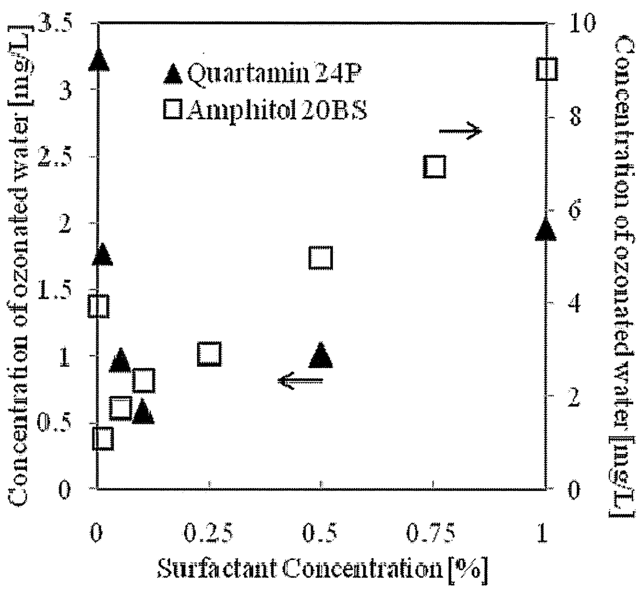


Fig. 4 Concentration change of ozonated water with surfactant concentration
(cationic and amphoteric surfactants)

と両性界面活性剤のいずれにおいても、界面活性剤濃度が 0.01%の場合においては、258 nm に最大吸収があることから、界面活性剤が低濃度の場合においてはオゾンが生成しているものと思われる。しかしながら、界面活性剤濃度が 0.5%の場合、最大吸収波長が高波長側にシフトしていることから、オゾン以外の物質も生成していることが考えられる。これは、電気分解において、純水だけでなく界面活性剤分子自体も電気分解され、酸化性の物質に変化したと考えられる。界面活性剤は有機物であるため、オゾン水中に界面活性剤が存在することにより、界面活性剤未添加のオゾン水と比較して、オゾン濃度の減衰が早まることが予想される。そこで、界面活性剤存在下におけるオゾン水の濃度の減衰を測定した。Fig. 6 に空気中に放置した時のオゾン濃度の減衰を示す。図より、オゾン水のみ（界面活性剤未添加）では、オゾン濃度は時間とともに緩やかに減少している。一方、界面活性剤の存在下においては、陰イオン性および非イオン性のいずれの場合においても、時間とともにオゾン濃度は急激に低下していることがわかる。これは、水溶液中に存在する界面活性剤分子をオゾン分子が攻撃してしまうため、オゾン濃度の減衰が早まると考えられる。このことから、界面活性剤が存在していることによって、生成したオゾン水の濃度の減少が加速されることがわかる。

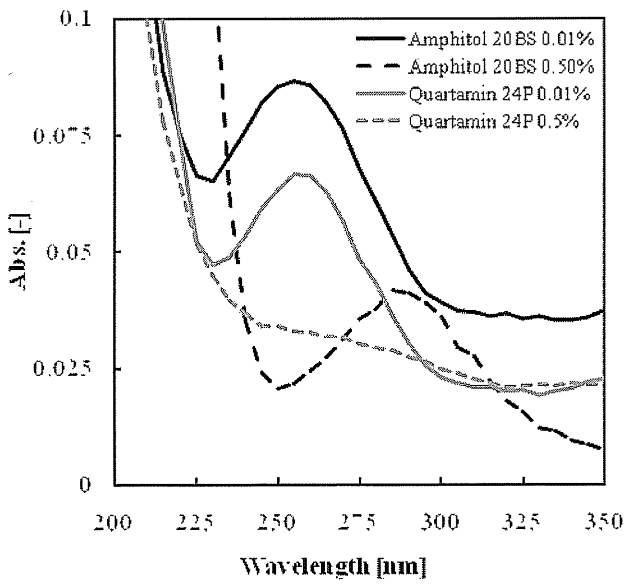


Fig.5　UV absorption spectra of cationic and amphoteric surfactants

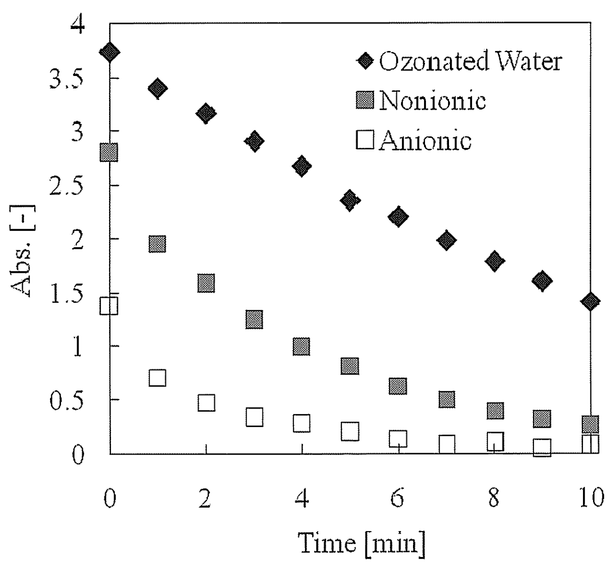


Fig. 6 Changes of UV absorption of ozne with surfactant addition

3.2　殺菌試験

Table 2 に殺菌試験結果を示す。培地 10 cm^2 当たり、コントロールでは 1000 cfu 以上の菌が検出されたが、水道水で処理することにより 50 cfu 以下、オゾン水と界面活性剤それぞれ単独で処理することにより 10 cfu 以下になった。しかし、これらの操作では完全に殺菌することはできなかった。一方、界面活性剤が添加されているオゾン水で処理したものにおいては、菌の検出は認められなかった。以上の結果より、界面活性剤の添加によってオゾン水の殺菌効果を向上させることが確認できた。

Table 2　Sterilization result with using surfactant

Treating method	Number of bacteria [cfu/10cm^2]
Control	Over 1000
Tap water	Less than 50
Only surfactant	Less than 10
Ozonated water	Less than 10
Ozonated water + Surfactant	Not detected

そこで、開発したオゾン生成スプレーを用いて実際に殺菌実験を行った。スプレーのボトル内部に濃度が 0.1 wt%となるように非イオン性界面活性剤であるエマルゲン 1135S-70 を添加し、同様に、菌で汚染したフラットな面を対象に殺

菌実験を行った。スプレーを用いて、電解液約10 mL（20 ショット分）を殺菌対象に吹き付けた。その後、キムワイプで拭き、同様にSCDLP寒天培地を用いてスタンプ試験を行った。なお、本実験においても上記実験と同様に、電解液と菌との接触時間を5秒間とした。採取した菌を、インキュベーターを用いて同様に培養し、発育したコロニー数によって殺菌評価を行った。結果をTable 3に示す。

Table 3　Sterilization result by using spray

Treating method	Number of bacteria [cfu/10cm^2]
Control	Over 1000
Ozonated water	Less than 30
Ozonated water + Surfactant	Not detected

表より、コントロールにおいて、1000 cfu/10cm^{2}以上の菌が検出された。これをオゾン水のみで処理した場合、菌数は激減したが、完全に殺菌することはできなかった。しかし、界面活性剤を用いた場合では、菌は検出されなかった。これは、界面活性剤によってオゾン水の濡れ性が向上したためであると考えられる。また、界面活性剤を添加しない場合のオゾン水の濃度は約4 mg/Lであった。一方、界面活性剤を添加した場合は約3 mg/Lのオゾン濃度であった。このように、生成したオゾン水の濃度が約1 mg/Lも低下しているにもかかわらず、界面活性剤を用いることによってオゾン水の殺菌効果が向上していることがわかった。

4. まとめ

本研究では、広い範囲でオゾン水が殺菌剤として活用できるように、その殺菌力の向上を検討した。そこで、オゾン水と菌との接触を改善するために界面活性剤の添加を検討した。加えて、界面活性剤の添加に伴う殺菌力の向上に関しても実験を行った。その結果を以下にまとめて示す。

（1）界面活性剤存在下においてオゾンを発生させられる条件を検討した。その結果、界面活性剤存在下においてもオゾンの発生は可能であるが、界面性剤濃度に伴いオゾン濃度は著しく減少した。

（2）界面活性剤の中でも、最もオゾンの生成を妨げない界面活性剤は、非イオン性界面活性剤であることがわかった。

（3）陽イオン性および両性界面活性剤では、界面活性剤自体が変化し、オゾン以外の酸化性物質が生成している可能性が示された。

（4）界面活性剤を含有しているオゾン水では、放置時間に伴うオゾン濃度の減少が加速されることがわかった。

（5）界面活性剤を含有しているオゾン水の殺菌力は予想通り向上した。

謝辞

本研究は平成１９年度東京工業高等専門学校校長重点配分研究経費によって行われました。関係各位に心から感謝致します。

なお、本報告書に使用しました導電性ダイヤモンド電極はペルメレック株式会社様より、ご提供頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 小野一男,*神戸常磐短期大学紀要*,第 26号,93-94(2004).

2) 前崎敏文,山口敏行,山崎勉,*内科*,Vol.98, No.6, 1058-1065(2006).

3) Kazuki Arihara, Chiaki Terashima, Akira Fujishima, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.154, No.4 E71-E75 (2005).

4) 伊佐山哲也, *醤研*, Vol.28, No.4 179-183 (2002)

5) 西村喜之, 金谷隆文, 大久保典昭, 岡田和久, 花田圭司, *日本食品工業学会誌*, Vol.2, No.3, 103-113 (2001).

6) *食品と開発*, Vol.41, No.3, 76-80 (2006).

7) 関戸広太, 佐藤正樹, 北折典之, 錦善則, 宇野雅晴, 柴田友康, 古田常人, *第 30 回電解技術討論会要旨集*,5-8 (2006).

8) 北折典之, 宇野雅晴, 錦善則, 古田常人, 特開 2006-346203(2006).

9) 関戸広太, 北折典之, 錦善則,柴田友康, 古田常人, *第 31 回電解技術討論会要旨集*,81-84 (2007).

10) 古田太郎, *防菌防黴*, Vol.33 No.12, 677-683 (2005).

11) 福崎智司, *食品工業*, Vol.49, No.16, 36-43 (2006).

12) 小野朋子, 三宅真名, 山下光治, *防菌防黴*,

Vol.33, No.6, 257-262 (2005).
13）佐藤義雄，清水博則，*月刊フードケミカル*, Vol.5, No.8, 88-97 (1989).
14)岡崎幸子，小駒益弘，杉光英俊，静電気学会誌,Vol.7, No.3, 176-183(1983).

（平成 20 年 6 月 16 日　受理）

表面粗さと濡れ性に関する研究

鈴木慎也*，菊地　章**

Relations of surface roughness to wet characteristics

Shinya SUZUKI, Akira KIKUCHI

Various phenomena are caused in the solid surface and the interface. In that, the phenomenon of the wet is important as the phenomenon that is basic on the practical use side that a solid and a liquid interface participated.

The phenomenon of the wet influences the solid surface roughness. Chose glass and acrylic as a solid board and gave it a physical change and roughened the surface. Then, measured the surface roughness of the solid board and observed the phenomenon of the wet of that.

(Keyword: surface, roughness, wet characteristics)

1　緒言

固体表面および界面では様々な現象が起こる。多くの現象は実用面で極めて重要である。吸着、触媒、電気伝導、濡れ、摩擦、磨耗、不導体、光の吸収、腐食、などである。その中でも固体表面の濡れは、液体が固体表面の気体を排除して、固体表面の気体が液体に置換する現象であり、固体と液体の界面が関与する実用面で基本的な現象として重要である。濡れの調節を、固体表面および液体との界面や液体の物性と関連づけて論述することが濡れの研究の条件であり、目的である。

まず、濡れ性というのはその名称どおり、固体表面が濡れやすいか濡れにくいかを表していて、いわゆる親水性なのか撥水性なのかを表している。親水性ならば濡れ性は大きい、もしくは濡れやすいといい、撥水性ならば、濡れ性は小さい、もしくは濡れにくいという。

この濡れ性は表面の粗さに大きく影響している。例えばハスの葉や水鳥の羽根などは大きな撥水性を示すが、これは表面の構造が大きく関与していることがわかっている。

研究方法としては数種類の固体基板に対して粗面化処理を施してから表面の粗さを計測し、その表面状態に対する濡れ性を評価するという手順で行った。粗面化の方法、表面の粗さ評価および濡れ性の評価方法などの詳細は次章で述べる。

本研究では測定結果と過去の濡れの理論などから、粗さの変化に対してどの程度またはどのような挙動で濡れ性が変化するのか調べることを目的として行い、固体基板としてガラス、アクリルについて調査した結果を報告する。

2　実験

2－1　実験原理

2－1－1　表面粗さ

よく研磨された鏡のように見える表面でも、分子や原子の単位、あるいはそこまで下らないまでもマイクロメーター（μm）の尺度に表面を拡大して眺めることできたとすれば、おそらく完全な平滑面は存在しえずちょうど地勢図のように山・谷・平野の凹凸起伏に富む表面地形を形成しているものと思われる。このことは、吸着、ぬれ、接着、触媒作用、摩擦、磨耗などできわめて重要な因子となる一例を挙げると宇宙工学では宇宙船内外部との気密が当然大問題であるが、固体材料を密接した時の気体の漏れを研究するには、まず表面粗さの定量的表示が課題となる。

このような3次元表面を観測するには光学顕微鏡、反射あるいは走査型の電子顕微鏡によるものが一般的であるが、数値的に指示、評価することは容易ではない。そこで、この表面を垂直にある任意の方向で裁断し、この断面に現れる2次元の断面波形情報を定量的に統計処理することにより、表面粗さ情報を抽出しようとするのが現在最も普及した、表面粗さの評価方法である。

本研究では、その中でも一般的である、中心線平均粗さ Ra を用いて測定した。中心線平均粗さとは、粗さ曲線の平均線から測定曲線までの偏差の絶対値を合計し、平均した値である。この方法では、一つの傷が測定値に及ぼす影響が非常に小さくなり、安定した結果が得られる。

＊物質工学科卒業生（大和製罐㈱）　＊＊物質工学科

２－１－２　接触角

接触角は固体のぬれ性を表す指標の一つであり、静止している液体の自由表面と固体の表面に接する所で、液面と固体面とのなす角度である。以下のFig.2-1に概略図を示した。

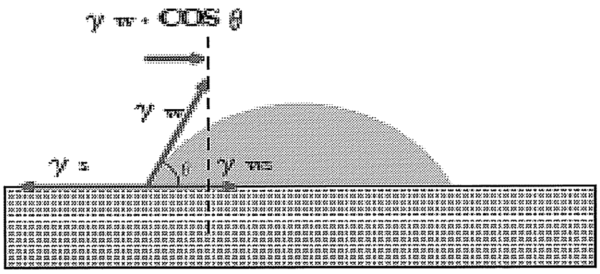


Fig.2-1 表面および界面張力と接触角の関係

ここでγsは固体の表面張力、γwは水(液体)の表面張力、γwsは固液界面張力である。液滴の接触角をθで表すと、水の表面張力であるγwは固体表面上ではγw・cosθとして作用する。よって、3つの張力は次式のYoung-Dupreの式で表される。

$$\cos\theta = \frac{\gamma_S - \gamma_{WS}}{\gamma_W} \quad \cdot\cdot\cdot (2.1)\text{式}$$

cosθが1の時、接触角は0°であり、逆にcosθが－1の時、接触角は180°である。つまり、接触角が大きい時はぬれ性は小さく、接触角が小さい時は濡れ性は大きいことになる。

また、液適法による接触角測定の際には固体表面のわずかなコンタミ、汚染で値が大きく変わることが多い。外的要因の影響、つまりは温度、湿度、固体表面の粗さ、静電気など様々なファクターが絡んでくるのでなるべく測定環境を一定にすることがバラつきを少なくすることができる。

２－１－３　Wenzelの理論

固体表面が繊細な凹凸構造を有しており、その上に置かれた液体がその固体表面と完全に接触する場合について、Wenzelの理論が適用される。

表面の凹凸構造によって、実表面積が見かけの表面積に比べて大きくなると、濡れが強調される。もし微細な微細な凹凸構造によって、表面積の増加率がRとすると、(2.1)式中の固体表面張力γsと固液界面張力γwsにRを乗じる必要がある。

$$\cos\theta_R = \frac{R(\gamma_S - \gamma_{WS})}{\gamma_W} = R\cos\theta \quad \cdot\cdot\cdot (2.2)\text{式}$$

$$\text{ただし}R = \frac{\text{実際の表面積}}{\text{見かけの表面積}}$$

ここで、θ_Rは粗い表面上での接触角の値である。Rは表面積の増加率、つまり、固体表面を粗くさせた場合においては、Rは常に1より大きな値であるから、cosθが正(θ<90°)か負(θ>90°)かによって、cosθ_Rはより大きな正または負の値となる。つまり固体表面が粗くなることによって、濡れる表面はより濡れる様になり、はじく表面はよりはじく様になるということを表している。

２－１－４　Cassie-Baxterの理論

この理論では、固体表面がモザイク状の二種類の物質からなると仮定されるときに適用される。また、固体表面の溝が深くなり、毛管現象によって水が深い溝の底まで到達できずに固体表面と液体との間に空気がトラップされた場合には、液体と接触している界面が固体表面と空気の二種類の物質と仮定できるので、これもCassie-Baxterの理論が適用される。

固体表面はモザイク状の二種類の物質1と2からなると仮定すると、その各々の純粋成分の液体との接触角をθ_1、θ_2とすれば、以下のCassie-Baxterの式が成り立つ。

$$\cos\theta_R = f_1\cos\theta_1 + f_2\cos\theta_2 \quad \cdot\cdot\cdot (2.3)\text{式}$$

ここで、f1とf2は固体表面上での物質1と2の面積分率でf1＋f2＝1である。

深い凹凸構造の固体表面上で液滴が溝の底まで到達できない場合には、第2成分が空気であるとみなせる。空気と水との接触角は180°とみなせるので、(2.3)式は以下の(2.4)式となる。

$$\cos\theta_c = f_1(\cos\theta_1 + 1) - 1 \quad \cdot\cdot\cdot (2.4)\text{式}$$

この(2.4)式より、空気がトラップしやすい凹凸構造を有する個体表面の接触角θR は平滑表面のときのぬれ性cosθ_1の正負（親水または撥水性）に関わらず、撥水性の向上を示すことがわかる。

2－2 試料

本研究では、任意の表面粗さをもった固体表面に対する濡れ性を測定する上で、ガラス、アクリルの二種類を固体基板として用いた。二種の固体基板の仕様は以下の Table2-1 および Table2-2 に示した。

Table 2-1 ガラスの仕様

メーカー	松浪ガラス
縦×横サイズ [mm^2]	76×26
厚さ [mm]	1.2～1.5
型番	S-1214 水縁磨

Table 2-2 アクリルの仕様

メーカー	三菱レイヨン
縦×横サイズ [mm^2]	76×26
厚さ [mm]	2.0
型番	001

ガラス、アクリルの選定理由として、素材の入手が容易で、どちらも傷がつきやすいこと、つまり機械的な粗面化が容易だということが挙げられる。また、比較検討ができるように、平滑面での濡れ性が異なるということが挙げられる。

2－3 粗面化

ガラス、アクリルの表面は購入時にはほぼ平滑な状態なので、任意の粗さに設定するために粗面化を行った。

本実験ではまず始めに、モーターを用いた固体基板の研磨を行った。その装置概略図を以下の Fig.2-2 に示した。

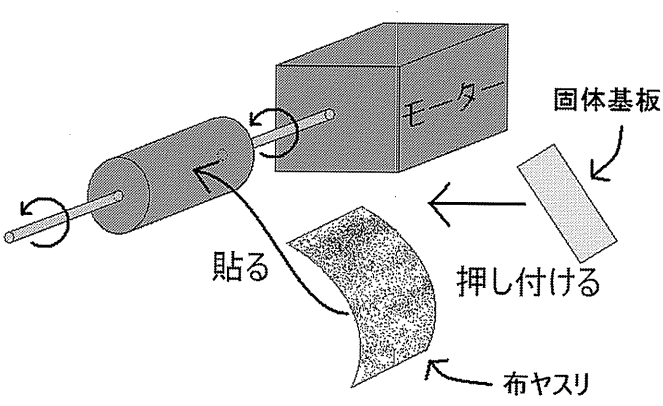


Fig.2-2 モーターを用いた粗面化の方法

しかし、この研磨方法では固体基板に一定方向の研磨傷が付いてしまった。研磨傷に方向性があると、接触角測定の際の液滴の濡れ広がりにも方向性が付いてしまう。つまり、研磨傷の方向に液滴が広がり易く、研磨傷と垂直の方向には広がり難い。またこの研磨方法では上記理由等の店からガラスの測定しか行わずに測定方法を変更したため、アクリルでの研磨は行わなかった。

次に、オービタルサンダー（日立工機、rpm11000）を用いての研磨を行った。オービタルサンダーはヤスリを貼り付けた面全体が円形の軌道を描いて研磨するため研磨傷の方向性がなくなる。またヤスリの面全体、つまりは固体基板の面全体を同時に研磨できるため場所による粗さのバラつきも防げると考えたためである。

使用した布ヤスリは＃40～＃400 までのもので、仕上げ面の粗さによって使い分けることができます。また粗さの小さい面を仕上げるときも一度研磨剤の粒度の大きな布ヤスリ（＃40～＃80）で研磨し、徐々に粒度の小さな布ヤスリを用いて目的の粗さまで研磨するといった方法をとった。これは始めから粒度の小さなヤスリで研磨を行うと、もとの平滑の面が残り研磨布紙加工特有の表面構造をもった仕上げ面ができないと予想されるからである。

2－4 洗浄および乾燥

次に表面を研磨した個体基板の洗浄行った。布ヤスリでの研磨によって粗さを持った表面には、研磨剤の残留物および研磨によって生じた固体基板自体の粉塵が付着している。それらを除去するために超音波洗浄を行った。

まず、ガラスでは、蒸留水での超音波振動を 10 分、アセトンでの超音波振動を 10 分行った。それに対しアクリルではアセトンによる脱脂洗浄はできないため、蒸留水での超音波振動を 20 分行った。

次に洗浄した固体基板の乾燥を行った。洗浄によって吸水した固体基板では、接触角測定が正確に行えないからである。方法は 50℃の恒温乾燥機に入れ、キムタオルなどのパルプくずがでにくい布を上から被せ、20 時間程度の乾燥を行った。

乾燥後は空気中の水分を吸水しないように測定時以外はデシケーター中で保存した。

2－5　表面粗さの測定

測定には、簡易表面粗さ計(TIME group Inc. , TR200)を用いた。

測定箇所はモーターを用いた研磨では８箇所、オービタルサンダーを用いた研磨では 10 箇所の測定を行い、その平均値をその固体基板の表面粗さとした。ただし、モーターを用いた研磨では、研磨傷の方向が図の左右の方向についているので、それに対して垂直に測定箇所をとった。また、測定箇所はなるべく粗さのバラつきが少ない基板の中心付近を選んだ。

2－6　接触角の測定

b 接触角は接触角計（(株)協和界面科学、CA-M2）を用いて液滴法で測定した。原理は２－１－３項に前述した。また、本実験では液滴に蒸留水を用いて測定した。以下の Fig.2-3 に接触角計の写真を示した。

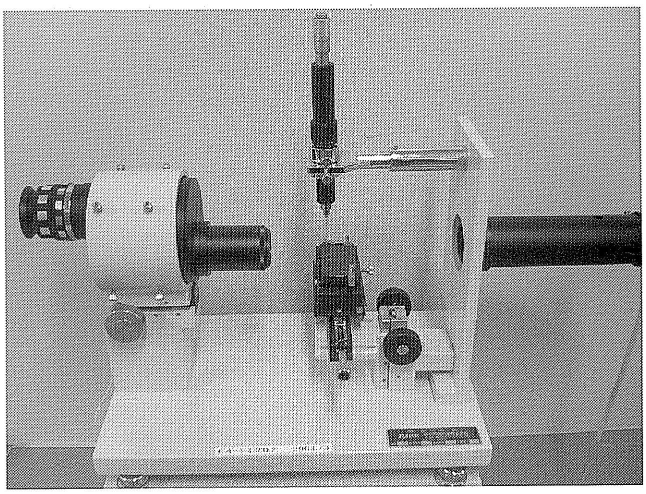


Fig.2-3 接触角計

写真中心にある注射筒から試料台上の固体基板に液滴を滴下する。滴下といっても試料台が上下できるので、注射筒の先に付着している液滴を固体基板に接触させれば固体基板に付着するので重力による落下速度の影響はほぼ無視して測定できる。その液滴像を写真左側のレンズから観測し、接触角を測る。

測定箇所は表面粗さと同様に中心付近を選び８箇所の測定を行った。その平均値をその固体基板の接触角とした。

3　実験結果

固体基板としてガラスとアクリルの粗面化を施したものを試料としているが、参考までにガラスとアクリルの工場出荷時の状態（粗面化の工程を省いただけで、洗浄および乾燥は行った）の表面粗さと接触角の測定値を先に述べておく。ガラスのでは表面粗さ 0.004 μm、接触角 28.3° であり、アクリルでは表面粗さ 0.004 μm、接触角 72° である。

以降はこの両者の値を平滑表面での値として取り扱っている。これは、接触角の測定値の信頼度は実験環境に左右される点が大きいため、文献値を使用するよりも本実験には適していると考えたからである。しかし、工場出荷時の状態では UV 処理等も行われているので、粗面化処理を施したものと同等に扱うことはせず、粗面化によって濡れ性が大小したかの判断材料として用いた。

3－1　モーターを用いた研磨方法による結果

ここでは、粗面化方法として、モーターを用いた研磨を施した場合における、固体基板の粗さおよび接触角の測定値をグラフにしてまとめた。

２－３項でも述べたが、この研磨方法による粗面化は、接触角の測定困難や新しい研磨方法（オービタルサンダーを用いた研磨方法）の発見によりガラスの測定しか行わなかった。以下の Fig.3-1 にガラスの測定結果を示した。

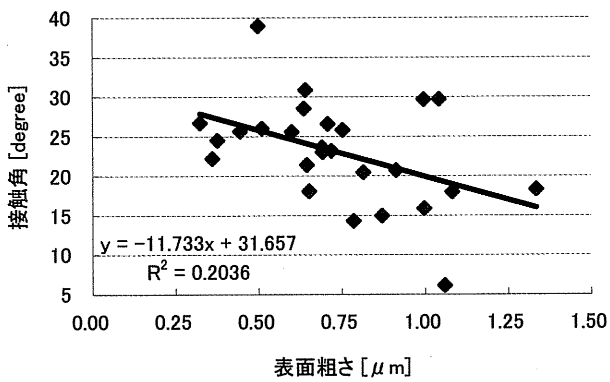


Fig.3-1 表面粗さ対接触角
（モーターによる研磨、ガラス）

黒の直線はプロット値を線形近似したものである。

このグラフでは、表面粗さの平均測定値に対する相対標準偏差が 15%以内のガラスについてのみプロットした。表面粗さと接触角に相関関係があるのだとすれば、粗さのばらつきが大きいガラスの場合、接触角の値の信頼度が下がると予想されるからである。

3－2　オービタルサンダーを用いた研磨方法による結果

ここでは、粗面化方法として、オービタルサンダーを用いた研磨を施した場合における、各種固体基板の粗さおよび接触角の値をグラフにしてまとめた。以下の Fig.3-2 にガラスの測定結果を、Fig.3-3 にアクリルの測定結果を示した

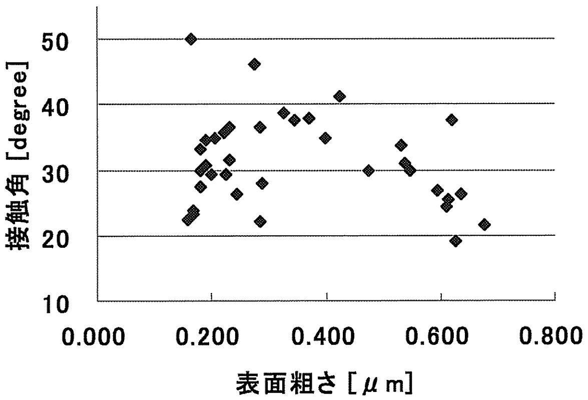


Fig.3-2 表面粗さ対接触角
(オービタルサンダーによる研磨、ガラス)

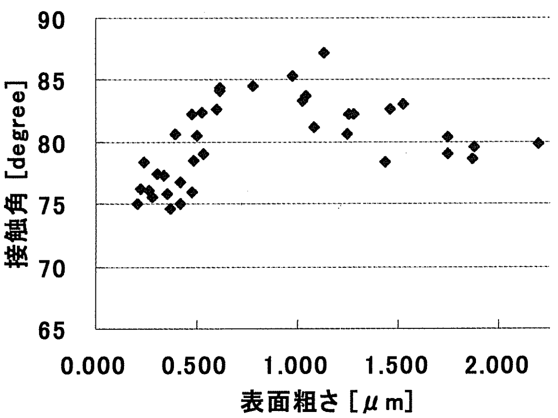


Fig.3-3 表面粗さ対接触角
(オービタルサンダーによる研磨、アクリル)

Fig3-1 同様に、Fig3-2,3-3 ともに表面粗さの測定値に対する相対標準偏差が 15%以上のガラスはプロットしていない。

4　考察

4－1　固体基板の違いによる測定結果の比較

ここでは、オービタルサンダーによる粗面化を行った場合のガラスの測定結果(Fig.3-2)とアクリルの測定結果(Fig.3-3)を比較し、また Wenzel の理論(2－1－4)と Cassie-Baxter の理論(2－1－5)による本実験結果への適用を考察した。

Fig3-2 ガラスの場合の表面粗さ対接触角のグラフでは、山型の放物線状の挙動を示している。また、同様に、Fig3-3 アクリルの場合の表面粗さ対接触角のグラフでも山型の挙動を描いている。しかし、山型の極大値を示しているときの表面粗さの値はそれぞれ異なっている。ガラスの場合においては約 0.30μm、アクリルの場合においては約 0.75μm である。

次にこの山型の挙動を Wenzel の理論と Cassie-Baxter の理論から解析する。

Cassie-Baxter の理論で考えると、表面の粗さの増加とともに徐々に固液界面に空気が入り込む量が大きくなり、空気成分の表面積分率が増加すると予想されるので粗くなるに連れて接触角の値が増大、つまり撥水性の向上が起きる。さらに凹凸が激しくなると凹部の深部にのみしか空気が入り込まなくなるので、徐々に液体と接触している固体の表面積分率が大きくなるため、接触角の増加量は減衰していくと思われる。

次に Wenzel の理論より、ガラスやアクリルは表面エネルギーが低い物質(親水性)なので、表面が粗くなるに連れて接触角の値が減少、つまりは親水性の向上が起こる。しかし、固液界面に空気がトラップし、その表面積分率が大きい場合は Cassie-Baxter の式が優先される。表面粗さが増加し、液体と接触する固体の表面積分率が大きくなってくると Wenzel の式が優先され、粗くなるに連れて接触角の値が小さくなる。

平滑表面でのガラスの接触角は 28.3°、アクリルの接触角は 72.0° であり、上記の 2 種類の挙動を示すグラフを足し合わせると山型のグラフとなり、実験の結果と一致する。以下の Fig4-1,4-2 にそれぞれガラスとアクリルの測定結果に対する Wenzel の理論と Cassie-Baxter の理論を適用した場合におけるグラフの概略図を示した。

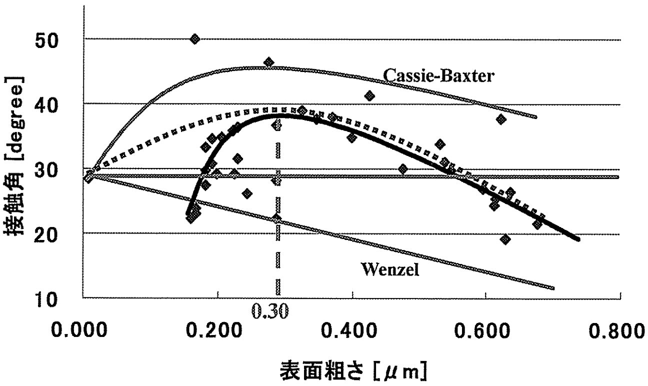


Fig.4-1 ガラスの測定結果と各理論の適用

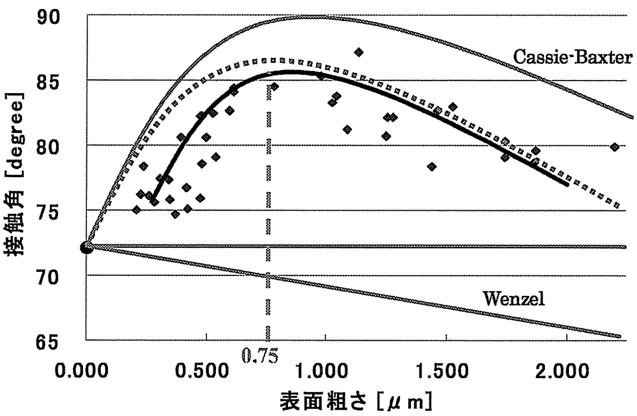


Fig.4-2 アクリルの測定結果と各理論の適用

Fig4-1,4-2 は固体基板別の測定結果と Wenzel の理論および Cassie-Baxter の理論を適用した時のグラフの予想挙動を示している。この 2 つの理論の予想挙動を足し合わせたものが中心の点線で表した曲線である。また測定値のプロット上に表した黒の曲線は実測値の示す挙動である。

ただし、Wenzel の理論においては表面積の増加率が、Cassie-Baxter の理論においては固液界面にトラップされた空気と接触している液滴との表面積分率がわからないので、どちらの理論がどの程度寄与しているかと言うのはわからない。

しかし、実測値が示す挙動の極大値は、固体基板が親水性材料であるのにもかかわらず、平滑表面のときの濡れ性に対して撥水性が増している。つまりは、固液界面に空気がトラップされて Cassie-Baxter の理論が適用されていると言うことがわかる。また、実測値が示す極大値のときの粗さは Cassie-Baxter の理論が最大限寄与されるときの表面粗さであることもわかる（ただし、測定範囲内で）。

ここで、実測値のグラフで極大値のときの表面粗さの値がガラスとアクリルで違うことに焦点を当てる。これは、Cassie-Baxter の理論と平滑表面での固体表面の濡れ性が関係していると思われる。アクリルよりもガラスのほうがより親水性であるので、同じ凹凸でも凹部に空気がトラップされる量はアクリルのほうが多くなる。つまり、平滑表面での接触角の値と Cassie-Baxter の理論による寄与が最大になるときの表面粗さの値には比例の関係が有ると考えられるからである。

これは同時に、撥水性材料のほうが Cassie-Baxter の理論による撥水性の向上率が大きいことがわかる。ガラスの場合は、平滑表面の時の接触角の値に対して撥水性の向上率が Wenzel の理論により抑えられている。それに対し、アクリルでは、全体的に撥水性の向上が見られる。

つまり、Cassie-Baxter の理論は固体基板の平滑表面での濡れ性によって左右され、固液界面に空気がトラップされるような粗さを持った表面では、Wenzel の理論による寄与よりも Cassie-Baxter の理論による寄与が大きいと考えられる。

4－2　研磨方法の違いによる測定結果の比較

ここでは、モーターによる粗面化を行った場合におけるガラスの測定結果(Fig3-1)とオービタルサンダーによる粗面化を行った場合におけるガラスの測定結果(Fig3-2)を比較した。

Fig3-1 と Fig3-2 を足し合わせたグラフを以下の Fig4-3 に示した。

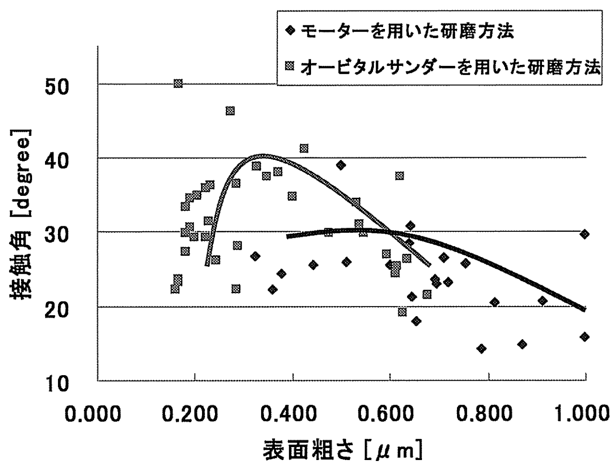


Fig.4-3 研磨方法の違いによるガラスの測定結果

このグラフは比較し易いように表面粗さの値を 0～1.0μm の範囲に絞ってある。また、それぞれの測定値が示す挙動を曲線で描いている。

Fig4-3 で表面粗さが 0.3〜0.6μm の時は測定範囲が重なっているので比較してみる。

オービタルサンダーを用いた研磨方法におけるガラスの測定値のグラフは4－1項でも説明したように、Cassie-Baxter の式が大きく寄与されて、平滑表面の時の濡れ性よりも撥水性が向上している。それに対し、モーターを用いた研磨方法におけるガラスの測定値のグラフは、平滑表面の時の接触角の値を上回ることなく、また、全体的に見ても撥水性の向上は見られない。これは、モーターを用いた研磨では固体基板に方向性を持った研磨傷があることが原因と思われる。固体基板に液滴が接触した際に、液滴は研磨傷の方向に濡れ広がり固液界面に空気がトラップされにくい。つまり、Cassie-Baxter の理論による寄与を受けられないということである。そのため、粗さ変化に対して Wenzel の理論のみが寄与されて、徐々に親水性の向上が起こっていると考えられる。

よって、モーターを用いた研磨では、研磨傷の影響により固体基板の表面が空気のトラップされにくい形状になり、Wenzel の理論に大きく影響されるということがわかった。

5 結論

モーターを用いた粗面化の方法による固体基板では、表面が粗くなるに連れて親水性の向上を示した。これは、表面の形状特性により Wenzel の理論の作用が表れ、もともと親水性材料であるガラスでは濡れ性が大きくなったことを示している。

オービタルサンダーを用いた粗面化の方法による固体基板では、ある表面粗さの値で撥水性の向上度合いのピークが有ることが示された。表面粗さの値として、中心線平均粗さでガラスでは 0.3μm 付近、アクリルでは 0.75μm 付近である。これは、Cassie-Baxter の理論の作用が表れ、粗さ変化とともに固液界面に空気がトラップされる量が変化し、それにより、液体と接触している固体基板の表面積分率が増減していることを示している。

固体基板がアクリルの場合には、濡れ性の減少度合いがガラスの場合と比べて大きいことがわかった。これは、平滑表面での濡れ性がガラスよりもアクリルの方が小さく、固液界面に空気がトラップされる量が大きくなるため、Cassie-Baxter の理論による寄与がより大きくなったことを示している。

また、これらの結論から、Wenzel の理論および Cassie-Baxter の理論による寄与の度合いと表面の粗さおよび形状との関係性を明らかにすることである程度の濡れ性の調整が可能であることが示された。

6 参考文献

1) 砥粒化工学会、“図解 砥粒加工技術のすべて”、工業調査会、pp70〜119、(2006)
2) 材料技術研究協会、“表面改質技術総覧”、産業技術サービスセンター、pp585〜589、(1993)
3) 渡辺信淳・渡辺晶・玉井康勝、“表面および界面”、共立出版、pp101〜127、(1973)
4) 大西考治・堀池靖浩・吉原一紘、“固体表面分析Ⅰ” pp1〜15、(1995)
5) 桜井俊男・玉井康勝、“応用界面科学”、朝倉書店、pp77〜81、(1967)
6) 村田好正・八木克道・服部健雄、“固体表面と界面の物性” pp19〜26、(1999)
7) R. N. Wenzel, Ind. Eng. Chem., 28, 988 (1936)
8) A. B. D. Cassie and S. Baxter, Trans. Faraday Soc., 40, 546 (1944)

(平成 20 年 8 月 4 日 受理)

物質工学科および物質工学専攻学生に対する電池評価技術教育の導入

城石英伸*，工藤節子*

An Introduction of Battery Technology for Students of Chemical Science and Engineering and its Advanced Course

Hidenobu SHIROISHI, Setsuko KUDO

The basics of electrochemistry for the estimation of battery performance were introduced to the 4th year students in the Chemical Science and Engineering Department and the 1st year students taking its Advanced Engineering Course, at Tokyo National College of Technology. For the 4th year students, we introduced the basics of electrochemistry, basic measurement methods such as cyclic voltammetry and potential-step measurements, and impedance spectroscopy. For the first year students in the Advanced Course, we explained the impedance spectroscopy and had the students perform an experiment of the conductivity measurement for a Nafion membrane.

(Keyword: electrochemistry, impedance analysis)

1. はじめに

東京高専が社会から必要とされ続けるためには，企業・大学から必要とされ続ける優秀な学生を輩出するよう心がけなければならない。そのためには，教育内容を時代に合わせて絶えず刷新していくことが必須となる。

電池技術は残された数少ない日本のお家芸の一つといわれており，高専学生への知識導入は重要である。他大学の 2-3 年次ならびに他の一部の高専では，化学および工業化学系の学科において，電池評価法が座学・実験に取り入れられているところもある。しかしながら本校物質工学科では，電池評価関連技術の学生への教育はほとんどされていないのが現状であった。

本研究では，物質工学専攻 1 学年の「物質工学特別実験」と本科 4 年生の「機器分析 I」および「機器分析 II」の実験及び座学に「電気化学測定入門」と「交流インピーダンス測定入門」を導入した。導入に伴って注意した点や，アンケートの結果について報告する。

2. 「交流インピーダンス測定法」の導入

交流インピーダンス法の学習においては，Fig. 1 に示すようなプリントを物質工学専攻 1 年の「物質工学特別実験」ならびに本科 4 年の「機器分析 II」の際に配布した。プリントの構成は次の通りである。

(a) 測定原理 [1]
(b) 交流インピーダンスの測定結果はどうみる?
(c) 自分で考えた等価回路で解析するには?
  1) ちょっぴり数学の復習 [2]
  2) ちょっぴり電気に関する豆知識 [3-4]
  3) インピーダンスの周波数変化を求める

プリントには空欄を適宜設けることによって書き込み式とした。書き込み式の部分は，授業の進度と学生の理解度に合わせてこちら側から解答してしまったり，学生に解答させたりした。こうすることによって，授業が双方向となり，学生が緊張感を保つことができると考えた。

測定原理では，交流インピーダンス法がどのような用途で使われているのかを説明し，Nyquist プロットや Bode プロットなど，測定結果がどのようなプロットで出力されるのかを説明した。

次に，「自分で考えた等価回路で解析するには?」と題し，等価回路を作って，Nyquist プロットを描くまでを順序立てて説明していった。まず，物質工学専攻や物質工学科の学生では通常使用しない複素数や複素平面等の数学の知識が必要になるため，それらの復習を行った。

次に，電気回路の基礎である交流理論について説明を行った。ここで 4C の学生から，コンデンサやコイルの基本式を物理で習っていないという指摘があった。

最後に，数式処理ソフト Maple や Maxima を用いて，任意の等価回路で Nyquist プロットを表示する手順について説明した。Maxima については Maple 用に開発したものを当研究室の坂本克矢君が移植したものを紹介した。

*物質工学科

07 年度 1AC 物質工学特別実験&4C 機器分析 II (城石担当箇所)

交流インピーダンス測定入門

交流インピーダンス測定は電気化学反応，腐食反応，電池，電解質，電気化学センサーの解析など幅広い解析に用いられている。非常に強力で有用な解析法である。

測定原理

たとえば電解質に交流電圧を印加すると，位相と振幅がずれた電流が得られる。この「ずれ」は印加する周波数によって変わる。この変わり方から様々な情報を得ることができる。

この「ずれ」からの情報を得るために，反応系を，電気回路を使って表した等価回路とよばれる回路を使って，データが解析される。よく使われる等価回路を図 2 に示す。

ここで

R_{CT} (Ω) (　　　　　　　)

・・・電極との反応の起こりやすさの度合いを示す

C_{dl} (F) (　　　　　　　)

・・・電圧を印加したときにイオンが引き寄せられ，電気二重層が形成される。引き寄せられたイオンの電荷を相殺するために電流が流れる。

R_{sol} (Ω) (　　　　　　　)

・・・イオンの泳動などに由来する抵抗。通常電解質の濃度を高くすると小さくなる。

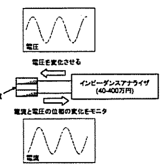


図 1 交流インピーダンス測定の原理

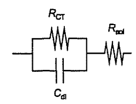


図 2 よく使われる等価回路

交流インピーダンス測定結果はどう見る?

交流インピーダンス測定した結果は，①複素平面に表示する方法(ナイキストプロット)と②縦軸にインピーダンスの振幅と位相差をとる方法(Bode プロット)がある。

図 2 の等価回路で示される

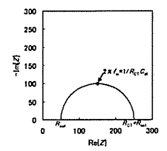


図 3 ナイキストプロット

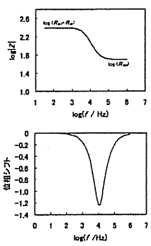


図 4 Bode プロット

1

07 年度 1AC 物質工学特別実験&4C 機器分析 II (城石担当箇所)

自分で考えた等価回路で解析するには?

ここでは，交流インピーダンス測定によって得られた結果を，自分で考えた等価回路を使ってどのように解析するのかについて説明する。

ちょっぴり数学の復習

複素平面

・・・直角座標の x 軸を実数軸とし，y 軸を虚数軸としたもの。

(問)

(1)右の複素平面で A 点と B 点に $j = \sqrt{-1}$ をかけるとどうなるだろうか?図示してみよう。

※電気の分野では i は電流を表すので $\sqrt{-1}$ は j で表す。

⇒j をかけると(　　　　)方向に(　　　)° 回転する。

(2)右の複素平面で A 点と B 点に $-j$ をかけるとどうなるだろうか?図示してみよう。

⇒j をかけると(　　　　)方向に(　　　)° 回転する。

(3)右の複素平面で A 点と B 点に $1/j$ をかけるとどうなるだろうか?図示してみよう。

⇒$1/j$ をかけると(　　　　)方向に(　　　)° 回転する。

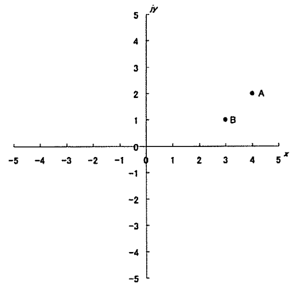


図 3 複素平面

複素数の和と積

複素数 $Z = x + jy$ を考える。

複素数 Z の絶対値 R は

Z = (　　　　　　　　　　)　　(1)

また，複素数 Z の偏角 ϕ は

$\tan\phi$ = (　　　　)　　(2)

と表すことができる。

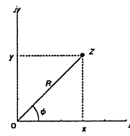


図 4 複素数 Z

複素数の和

$Z_1 = x_1 + jy_1$, $Z_2 = x_2 + jy_2$ とおく

これらの複素数の和 Z は

Z = (　　　　　　　　　　)　　(3)

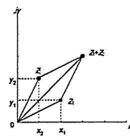


図 5 複素数の和

2

07 年度 1AC 物質工学特別実験&4C 機器分析 II (城石担当箇所)

これを複素平面に図示すると図 5 のようになる。

複素数の積

$Z_1 = x_1 + jy_1$, $Z_2 = x_2 + jy_2$ とおく

これらの複素数の積 Z は $j^2 = -1$ であるから

Z = (　　　　　　　　　　)　　(4)

複素数 Z の絶対値 R は(1)式を用いると

$R = \sqrt{(x_1x_2-y_1y_2)^2+(x_1y_2-x_2y_1)^2}$

$= \sqrt{x_1^2+y_1^2}$ (　　　　) = (　　　　)　　(5)

複素数 Z の偏角 ϕ は(2)式を用いると

$$\tan\phi = \frac{x_1y_2-x_2y_1}{x_1x_2-y_1y_2} \quad (6)$$

タンジェント加法定理を使うと

$\tan\phi$ = (　$\tan(\phi_1+\phi_2)$　)　　(7)

> タンジェントの加法定理
>
> $$\tan(\phi_1+\phi_2) = \frac{\tan\phi_1+\tan\phi_2}{1-\tan\phi_1\tan\phi_2}$$

オイラーの公式(超重要!)

$$\boxed{e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta} \quad (8)$$

(問) オイラーの公式を使って，$\cos\omega t$ と $\sin\omega t$ を表せ。

$\cos\omega t$ = (　　　　　　　)，　$\sin\omega t$ = (　　　　　　　)

ちょっぴり電気に関する豆知識

交流電圧

$V(t) = V_0\cos\omega t$　　(9)

V_0：交流電圧の(　　　　)という

T：周期

f：周波数　(　　　　　)

ω：角周波数　(　　　　　)

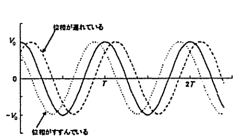


図 6 交流電圧の波形

交流電流

$I(t) = I_A\sin(\omega t+\theta)$　　(10)

振幅と位相を取り扱うために、(10)式を複素数を用いて表す。

$$\boxed{I = I_A e^{j\theta}} \quad (11)$$

これを複素平面にあらわすと、図 7 のようになる。

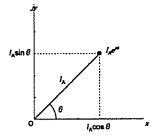


図 7 正弦波交流の複素数表示

3

07 年度 1AC 物質工学特別実験&4C 機器分析 II (城石担当箇所)

(8)式のオイラーの公式を使うと(11)式は

$I = I_A e^{j\theta}$ = (　　　　　　　　　　)　　(12)

で表すことができる。これをまとめると表 1 のようになる。

表 1 正弦波交流の表現方法

三角関数	極座標表現	直交座標表現
$A\sin(\omega t+\theta)$	$Ae^{j\theta}$	$A\cos\theta + jA\sin\theta$
$\sqrt{a^2+b^2}\sin(\omega t+\varphi)$ $\tan^{-1}\frac{b}{a} = \varphi$	$\sqrt{a^2+b^2}e^{j\varphi}$ $\tan^{-1}\frac{b}{a} = \varphi$	$a + jb$

(問) 次の正弦波波形を直交座標表現および極座標表現を用いて表せ

(1) $3\sin(\omega t + \frac{\pi}{3})$　　　(2) $2\sin(2t - \frac{\pi}{3})$

正弦波交流波形が合流した場合

> (重要)
>
> - 正弦波交流電流が分流や合流しても，振幅や位相は変化するが，角周波数は同じ正弦波交流電流となる。
> - 正弦波交流電圧が印加されているとき，2 つの回路素子の電圧の和は振幅や位相は変化するが，おなじ角周波数 ω の正弦波交流電圧になる。

複素数表示の合流

正弦交流波形の三角関数表示

$A\sin(\omega t+\theta)$ = 　　　　　$\sin\omega t$ + 　　　$\cos\omega t$

複素数表示

$A\sin(\omega t+\theta)$ = (　　) = (　　　　) + (j　　　)

> ∵正弦波の合成
>
> $A_1\sin(\omega t+\theta_1) + A_2\sin(\omega t+\theta_2)$ =
>
> $(A_1\cos\theta_1 + A_2\cos\theta_2)\sin\omega t + (A_1\sin\theta_1 + A_2\sin\theta_2)\cos\omega t$
>
> = 　　　$A_3\cos\theta_3\sin\omega t$ + 　　　$A_3\sin\theta_3\cos\omega t$
>
> $= A_3\sin(\omega t+\theta_3)$　　(13)
>
> ただし　$A_3\cos\theta_3 = A_1\cos\theta_1 + A_2\cos\theta_2$
>
> $A_3\sin\theta_3 = A_1\sin\theta_1 + A_2\sin\theta_2$

4

Fig. 1 交流インピーダンス測定入門のプリント(1)

07 年度 1AC 物質工学特別実験&4C 機器分析 II (城石担当箇所)

⇒複素数表示の実数部と虚数部は，正弦波形を分解したときの sin 関数と cos 関数の係数に対応している。

よって(13)式を複素数表示すると

$$A_1e^{j\theta_1} + A_2e^{j\theta_2} = A_3e^{j\theta_3} \qquad (14)$$

つまり，正弦波波形の加算はそれぞれに対応する複素数表示の加算で求められることがわかる。

回路素子の交流応答

抵抗の場合

$$V(t) = RI_A\sin\omega t \qquad (15)$$

・・・抵抗の電圧は，常にそのときの電流を抵抗値 R 倍した電圧が発生する。

⇒ 振幅は抵抗値 R 倍され，位相は変化しない。

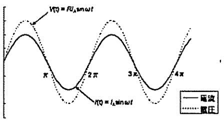


図 8 抵抗の電流–電圧の位相関係

コンデンサの場合

$$V(t) = \frac{1}{C}\int I_A\sin\omega t dt = \frac{I_A}{\omega C}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \qquad (16)$$

・・・電荷および電圧は，流れ込んだ電流の積分値に比例する。

⇒ 振幅は(　　　　)倍され，位相は(　　　　)電圧波形となる。

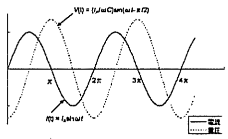


図 9 コンデンサの電流–電圧の位相関係

コイルの場合

$$V(t) = L\frac{d(I_A\sin\omega t)}{dt} = \omega LI_A\sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \qquad (17)$$

・・・電流の変化スピードに比例して起電力が発生する。

⇒ 振幅は(　　　　)倍され，位相が(　　　　)電圧波形となる。

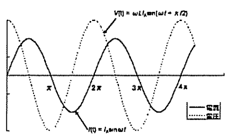


図 10 コイルの電流–電圧の位相関係

複素数による計算

5

07 年度 1AC 物質工学特別実験&4C 機器分析 II (城石担当箇所)

正弦波交流波形 i(t) = IAsin(ωt+θ)=IAejθ の振幅を k 倍に，位相をφすすめるには

三角関数　: $v(t) = kI_A\sin(\omega t+\theta+\varphi)$

複素数　: $V = ke^{j\varphi}\times I_Ae^{j\theta} = kI_Ae^{j(\theta+\varphi)}$

これを複素数平面で表すと図 11 のようになる。

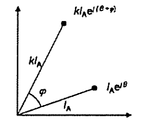


図 11 複素数表示の振幅と位相の変換

抵抗の複素数表示は $I_R = I_Ae^{j\theta}$ とすると

$$V_R = RI_R \qquad (15')$$

また，コンデンサの複素数表示は $I_C = I_Ae^{j\theta}$ とすると

$$V_c = \frac{1}{\omega C}e^{-j\pi/2} = \frac{1}{j\omega C}I_R \qquad (16')$$

また，コイルの複素数表示は $I_L = I_Ae^{j\theta}$ とすると

$$V_L = \omega Le^{j\pi/2} = (JWL)I_R \qquad (17')$$

インピーダンス

(15')から(17')式はどれも V = ZI という形をしている。直流電流の場合は Z にあたる部分は抵抗といった。交流電流においてはこれを(　　　　　　　)といい，単位はΩである。

逆に(15')から(17')式は Z で割ることによって I = (1/Z)V = YV という式に変形できる。この Y を(　　　　)とよび単位は S (ジーメンスと呼ぶ)である。インピーダンスとアドミタンスは(　　　)の関係にある。

それぞれの回路素子の抵抗成分をまとめると表 2 のようになる。

表 2 回路素子のインピーダンスとアドミタンス

回路素子	インピーダンス Z(Ω)	アドミタンス Y(S)
抵抗	R	$1/R$
コンデンサ	$1/(j\omega C)$	$j\omega C$
コイル	$j\omega L$	$1/j\omega L$

インピーダンスの合成

直列回路の直列抵抗や並列抵抗の取り扱いは，交流回路の世界でもそのまま適用できる。

6

07 年度 1AC 物質工学特別実験&4C 機器分析 II (城石担当箇所)

直列回路における抵抗の合成

$$Z_{直列} = Z_1 + Z_2 \qquad (18)$$

並列回路における抵抗の合成

$$Y_{並列} = Y_1 + Y_2 \qquad (19)$$

$$\frac{1}{Z_{並列}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \qquad (19')$$

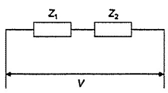


図 13 直列インピーダンス

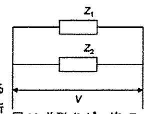


図 14 並列インピーダンス

インピーダンスの周波数変化をもとめる

上記の方法を使えば，自分で考えた等価回路の分析をすることができることがわかったと思うが，数式処理ソフトを用いると楽に等価回路の分析をすることができる。

数式処理ソフトとして有名なものに Mathematica(通常版 445,200 円)通常版と Maple(ステューデント版 21,000 円，通常版 299,250 円)がある。大学や企業などでよく使われている。価格はどちらも高価であるが，信頼性の高いソフトである。

たとえば Maple を用いて図 15 の等価回路のナイキストプロットを描くには，次のようにする。

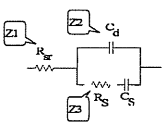


図 15 等価回路

```
restart;                    Mapleを初期化します
Z1:=Rsr;                    Z1にRsrを代入します。
Z2:=1/(I*w*Cd);             Z2にCdのインピーダンスを代入します。Iは虚数単位。
Z3:=Rs+1/(I*w*Cs);          Z3にRsとCsのインピーダンスの和を代入します
assume(Rsr,real);           Rsrを実数と仮定します。(宣言しないと複素数とみなされます)
assume(Cd,real);
assume(Rs,real);
assume(Cs,real);
assume(w,real);             ギリシャ文字は使えないのでwは周波数としています。
Z:=Z1+Z2*Z3/(Z2+Z3);        全体のインピーダンスZを式で表します。
evalc(Z);                   Zを実数と虚数に分けて表示します。
```

$$Rsr^{\sim} - \frac{Rs^{\sim}}{w^{\sim2}Cd^{\sim}Cs^{\sim}\left(Rs^{\sim2}+\left(-\frac{1}{w^{\sim}Cd^{\sim}}-\frac{1}{w^{\sim}Cs^{\sim}}\right)^2\right)} - \frac{Rs^{\sim}\left(-\frac{1}{w^{\sim}Cd^{\sim}}-\frac{1}{w^{\sim}Cs^{\sim}}\right)}{w^{\sim}Cd^{\sim}\left(Rs^{\sim2}+\left(-\frac{1}{w^{\sim}Cd^{\sim}}-\frac{1}{w^{\sim}Cs^{\sim}}\right)^2\right)}$$
$$+I\left(-\frac{Rs^{\sim2}}{w^{\sim}Cd^{\sim}\left(Rs^{\sim2}+\left(-\frac{1}{w^{\sim}Cd^{\sim}}-\frac{1}{w^{\sim}Cs^{\sim}}\right)^2\right)} + \frac{-\frac{1}{w^{\sim}Cd^{\sim}}-\frac{1}{w^{\sim}Cs^{\sim}}}{w^{\sim2}Cd^{\sim}Cs^{\sim}\left(Rs^{\sim2}+\left(-\frac{1}{w^{\sim}Cd^{\sim}}-\frac{1}{w^{\sim}Cs^{\sim}}\right)^2\right)}\right)$$

実数と仮定した部分は~が表示されています。

```
g:=subs({Rsr=50,Cd=1e-6,Rs=100,Cs=1e-5},Z);     Zに値を代入し、代入したものをgとしま
```

7

07 年度 1AC 物質工学特別実験&4C 機器分析 II (城石担当箇所)

す。

```
re:=Re(g);                                  gの実数部をreに代入します。
```

$$re := 50 + \frac{.1000\ 10^{15}}{10000\ w^{\sim2} + .121\ 10^{13}}$$

```
im:=(-1)*Im(g);                             gの虚数部をimに代入します。
```

$$im := .1\ 10^7\ \frac{w^{\sim2} + .11000000\ 10^8}{w^{\sim}(w^{\sim2} + .121000000\ 10^9)}$$

```
lot([re,im,w=1e-3...1e+6],x=0..200,y=0..100,numpoints=1000);
```

re を縦軸に、im を横軸に周波数は 1×10^{-3} から 1×10^{6} までをプロットします。

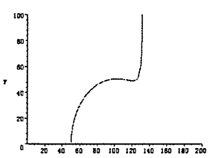


図 15 Maple でシミュレーションした等価回路のナイキストプロット

ところで，フリーの数式処理ソフトである Maxima を使っても同様なことができる。

城石研の坂本克矢君が，Maxima 版を作ってくれた。

Maxima では以下のようにする。

```
display2d:false$               :出力される数式の表示形式を変える(例. 1/2 → 1/2)
Rsr:50$                        :Rsrに抵抗Rsrの抵抗値を代入(今回は50Ωを代入)
Cd:1e-6$                       :Cdにコンデンサ―Cdの静電容量を代入(今回は1e-6Fに代入)
Rs:100$                        :Rsrに抵抗Rsrの抵抗値を代入(今回は50Ωを代入)
Cs:1e-5$                       :Cdに抵抗Cdの静電容量を代入(今回は1e-6Fを代入)
w:A3$                          :後でするExcelでの計算のために振動数wにA3を代入
Z1:Rsr$                        :①部分のインピーダンスを計算したものの代入
Z2:1/(%i*w*Cd)$                :②部分のインピーダンスを計算したものの代入
Z3:Rs+1/(%i*w*Cs)$             :③部分のインピーダンスを計算したものの代入
Z:Z1+Z2*Z3/(Z2+Z3)$            :回路全体のインピーダンスを計算したものを代入
re:realpart(Z);                :回路全体のインピーダンスの実部を出力
im:-1*imagpart(Z);             :回路全体のインピーダンスの虚部を出力
```

出力された結果を元に Excel などでグラフを書けばよい。

8

Fig. 2 交流インピーダンス測定入門のプリント(2)

I．実験概要および目的

本実験では，電気化学インピーダンス法を用いて，固体高分子形燃料電池内のある高分子膜(Nafion，米国デュポン社製)中の高分子電解質のプロトン導電率を測定することを目的とする。また，その結果を用いての活性化エネルギーも算出も行う。

II．基本知識および実験原理

（i）電気化学的測定法(測定原理)

電気化学測定は，セル(サンプル)に対し電気的な信号を印加して化学的な反応を起させたり，応答信号から内部で起こっている化学的反応を考察する方法である。その方法には直流を用いる場合(直流分極測定，ex. サイクリックボルタンメトリー(CV 法))と，交流を用いる場合とがある。

本実験で採用する交流インピーダンス法は後者に該当し，セルに非常に微小な交流信号を印加し，電圧/電流の応答信号からセルのインピーダンスを測定する電気化学測定手法である。本法は，直流分極測定に比べて Table 1 に示すような優位点があることから，様々なアプリケーションで広く採用されている。

Table 1 交流インピーダンス法の利点

○ セルに与えるダメージが少ない
○ 測定時間が短い
○ 得られる情報量が多い

試料となる電解質に交流電圧を印加すると，位相と振幅がずれた電流が得られ，このズレは印加する周波数により変わる。したがって，この変化の度合いから様々な情報が読み取れる。

（ii）インピーダンス

インピーダンスは，交流回路における電圧と電流の比であり，単位としてオーム[Ω]が用いられる。直流電流におけるオームの法則の電気抵抗の概念を拡張し，交流電流に適用したものである。

いま，抵抗R，容量(キャパシタンス)C，インダクタンスL が直列に接続した回路に，その両端から電圧を与え，電流$I = I_0 e^{j\omega t}$（j：虚数単位，ω：交流の角振動数)が流れているとする。このとき，前述の 3 つにおける電圧 V は，以下により与えられる。

$$V_R = RI,\quad V_C = \frac{1}{C}\int I dt = -j\frac{I}{\omega C},\quad V_L = L\frac{dI}{dt} = j\omega LI$$

各電圧の単位は V_R [Ω]，V_C [F]，V_L [H]である。ここで I に対して，V_Rは同位相，V_Cは 90° 遅れ，V_Lは 90° 進んだ位相関係である。全電圧は各電圧の和で与えられるから，以下のようになる。

$$V = V_R + V_C + V_L = RI - j\frac{I}{\omega C} + j\omega LI = \left\{R + j\left(\omega L - \frac{I}{\omega C}\right)\right\}I$$

ここで，前述の定義により VとIの比がインピーダンス Zと定義される。

$$Z = \frac{V}{I} = R + j\left(\omega L - \frac{I}{\omega C}\right)$$

1/5

前式から分かるように，インピーダンスは複素数の形で表され，周波数ωに依存しない抵抗成分(実数，“レジスタンス”)と，依存する成分(虚数，“リアクタンス”)の和で表される。単位はいずれも[Ω]である。

なお，インピーダンス $Z(=V/I)$に対して，その逆数 I/Vはアドミッタンス Yと定義される。アドミッタンスも複素数であり，実数成分(“コンダクタンス”)と虚数成分(“サセプタンス”)の和で表される(単位はいずれも[S])。

交流インピーダンスの測定結果は，複素平面に表示する方法(“ナイキスト・プロット”)と縦軸にインピーダンスの振幅と位相差をとる方法(“Bode(ボーデ)プロット”)とがあるが，本実験では前者のナイキスト・プロットを採用する。このとき，リアクタンス(Im[Z])がゼロとなるときの抵抗値は，溶液抵抗 $R_{sol.}$である。

（iii）データの解析

前述の要領で求めた溶液抵抗 $R_{sol.}$から，次式により膜の導電率 κが算出される。

$$\kappa = \frac{1}{R_{sol.}}\times \text{セル定数}K_{cell} = \frac{1}{R_{sol.}}\times\frac{\text{電解質膜の長さ}[cm]}{\text{電解質膜の断面積}[cm^2]}\quad\cdots(1)$$

さらに，ここで算出した導電率κから，高分子膜中のプロトン移動に伴う活性化エネルギーE_aが算出される。このとき，Arrhenius の式を以下のように変形して用いる。

$$\kappa = \kappa_0 e^{-E_a/RT}\quad(\text{Arrhenius の式})$$

$$\therefore\quad \ln\kappa = \ln\kappa_0 - \left(\frac{E_a}{R}\right)\frac{1}{T}\quad\cdots(2)$$

ここで，Rは気体定数(=8.3145JK^{-1}mol^{-1})，Tは絶対温度である。この(2)式より，$\ln\kappa \propto T^{-1}$の関係があるから，Arrhenius プロットを行ったときのグラフの傾きに$-R$を乗じることにより，活性化エネルギーE_aが算出される。

III．実験操作

（i）白金黒電極の調製

事前にエタノールおよび水で洗浄した白金箔 2 枚をメッキ液(0.025N HCl 12mL，酢酸鉛 2-4mg，塩化白金酸 $H_2PtCl_6\cdot 6H_2O$ 0.4g)に浸し，浴電圧 3V，電流 10-20mA cm^{-2}でメッキを行い，先端約 5mm の部分に白金黒を析出させた。本操作は 1 分毎に電極の＋－を入れ替えながら，約 30 分間行った。得られた白金黒電極は 10%希硫酸中に浸し，3V の電圧下にて通電することにより，残存メッキ液や吸着塩素を除いた。その後，純水中に保存した。

2/5

（ii）高分子膜の洗浄

試料となる高分子膜(1cm×2cm)を 1M 硫酸中にて 30 分間還流し，吸着した有機物を酸化除去した。処理後の試料膜は Milli-Q により充分に洗浄した。

（iii）導電率の測定

前項で洗浄した試料膜を Fig.1 に示すセルにセットし，水 1 滴を滴下して湿潤状態を確保した。このセルをマントル・ヒーターに覆われた容器中に入れて温度を一定とし，測定装置により交流インピーダンスを測定した。なお，温度は 25-65℃の範囲で 10℃毎に 5 点を設定し，昇温および温度安定化時間として 30 分を設けた。

測定終了後には，マイクロ・メーターを用いて試料膜の厚さを測定した。

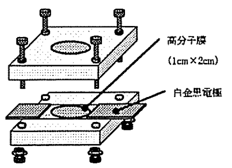


Fig.1 導電率測定セル

IV．結果と考察

（i）各温度における抵抗値の算出

Fig.2 には各測定温度におけるナイキスト・プロットを示す。また，各温度における x 軸切片から溶液抵抗値 $R_{sol.}$を求めるとともに，前述の(1)式から導電率を算出し，Table2 に示した。なお，試料膜の厚さは 200μm であった。

本結果について，測定温度の上昇とともに導電率の増加が観られたが，65℃においてはその限りではなかった。

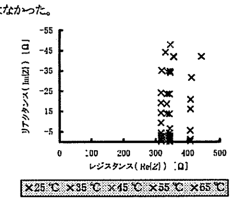


Fig.2 各温度での交流インピーダンス Z に対するナイキスト・プロット

Table2 各温度での溶液抵抗および導電率

測定温度 [℃]	溶液抵抗 [Ω]	導電率 [S/cm]
25	408	1.23×10^{-1}
35	345	1.45×10^{-1}
45	334	1.50×10^{-1}
55	318	1.57×10^{-1}
65	343	1.46×10^{-1}

3/5

（ii）活性化エネルギーの算出

Table2 に示した導電率の値からアレニウス・プロットを作成し，線形近似を行った(Fig.3)。このとき，他とは傾向が異なった 65℃でのデータは除いた。

この結果，$\ln\kappa = -773.8/T + 0.5$ の関係式が得られた(R^2＝0.88)。前述の(2)式で示したように，本グラフの傾きは$(-E_a/R)$に相当することから，試料膜中のプロトンの活性化エネルギー E_aは 6.43kJ mol^{-1}と求まった。

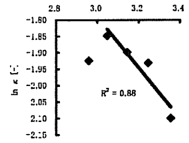


Fig.3 アレニウス・プロット

(横軸にとった温度 Tは絶対温度である)

V．総括

固体高分子形燃料電池に使用される高分子膜について，電気化学インピーダンス法により高分子電解質のプロトン導電率を測定した結果，以下のことが分かった。

- プロトン導電率は，温度の上昇に伴い増加する。
- 試料高分子膜中プロトンの活性化エネルギーは 6.43kJ mol^{-1}である。

VI．参考文献

- 交流インピーダンス測定入門，本実験用配布プリント
- 日本化学会 編：“新実験化学講座 5 基礎技術 4 電気”，pp.277-279，丸善(1981)
- 井上直樹：“電気の測定”，愛媛大学理学部物理学科 実験テキスト，http://www.esnet.ed.jp/center/4000kenkyusitu/4200kagakubu/4220rika/rikakennkyuusitu/SPP/buturijikkenn/03dennkinosokutei.pdf
- 東陽テクニカ：“電気化学測定 概説”，https://www.toyo.co.jp/solartron/qa.html
- ウィキペディア，http://ja.wikipedia.org/
- 町澤健司，平田陽 ・ ほか：“臭化リチウム水溶液中での炭素鋼電極のインピーダンス”，表面技術，57(5)，pp.61-66，(2006)，http://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/57/5/373/_pdf/-char/ja/

4/5

Fig. 3 山崎君の Nafion®膜の電導度測定のレポート

物質工学専攻 1 年の学生に，実際に固体高分子形燃料電池の電解質として使われている Nafion®の伝導度を測定する実験を紹介し，測定セルを組み立て，伝導度の温度依存性について測定する実験を実施した。実験レポートの例として，Fig. 3 にこの実験科目を受講した専攻科生の山崎賢一君が書いたレポートを彼の許可を得て原文のまま示す。

これらの講義および実験について，専攻科生に次のようなアンケートを行った。

1) あなたはこの実験の測定原理が理解できましたか?
2) あなたはこの実験の実験方法および解析方法が理解できましたか?
3) この実験では書き込み式のプリントを配布しましたがこれについてはどう思いますか?
4) プリントでは，複素数に関する数学の復習をいれましたが，それについてはどう思いますか?
5) プリントでは，交流理論に関する基礎知識について学習しましたがこれについてはどう思いますか?
6) 意見・感想など

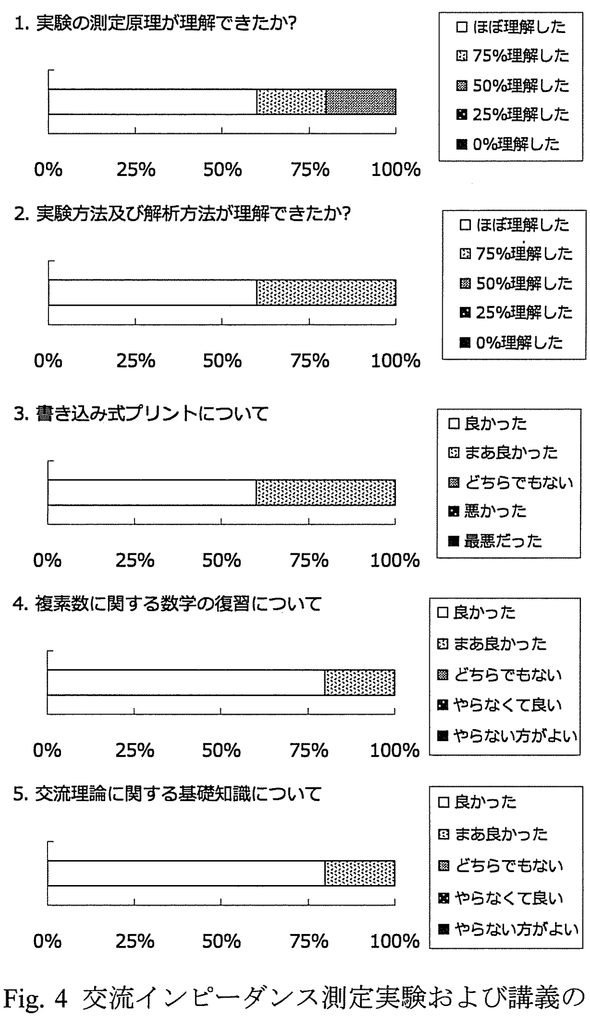


Fig. 4 交流インピーダンス測定実験および講義のアンケート結果

アンケートの集計結果を Fig. 4 に示す。おおむね学生の間では好評価であったことがわかった。

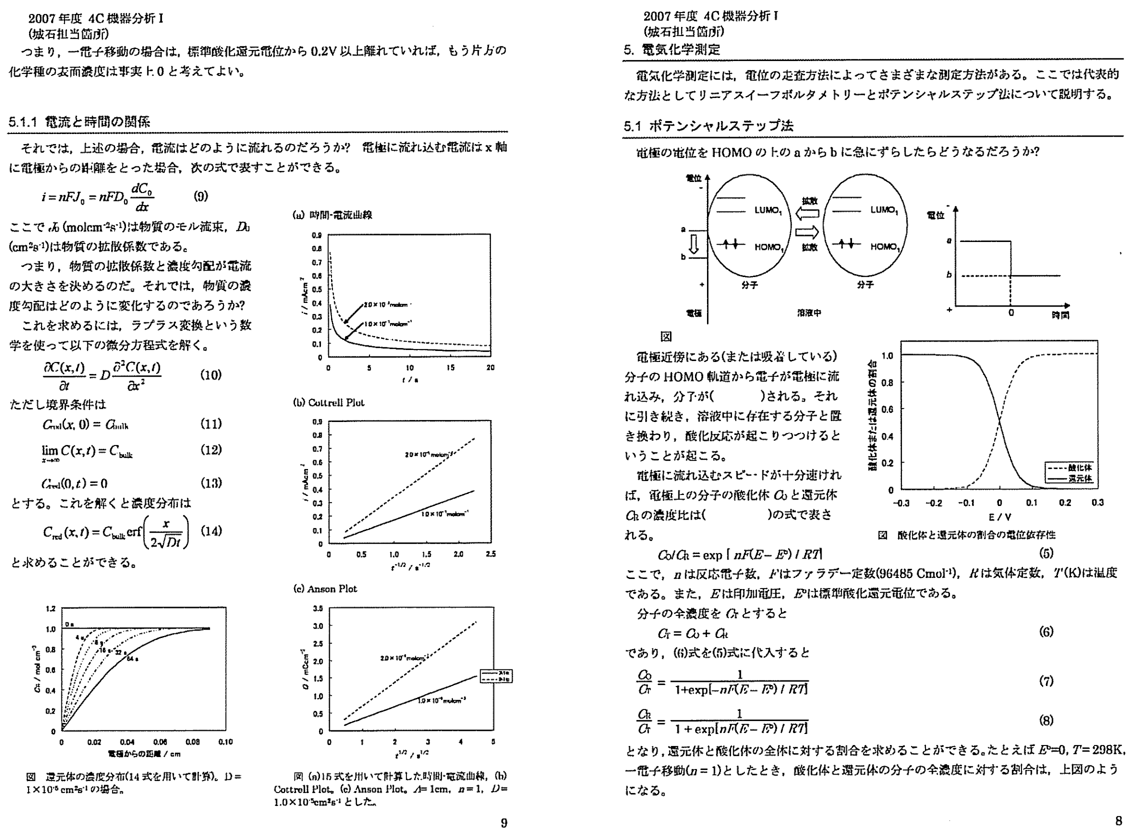
また，6)の意見・感想などでは，次のような意見が得られた。

- 複素数などの復習ができてよかった。講義のプリントは実験に大変役立つものであった。もっと応用的な実験もしてみたいと思った。
- 時間等の都合もあるが、せっかく工業分析化学等で処理ソフトの使用法も習ったため、測定ソフトに関してももう少し触れてよかったのではないか。本科生と違い実験プロセス自体から組み立てるような感じでも。
- 本レポートを通して，データの解析方法（原理）などについて理解できた。しかし，交流インピーダンスの測定原理（何故インピーダンスが生じるのか？，etc...）については理解が不充分のままで終わってしまった。
- 複素数の復習の頁など非常に丁寧な内容であった。ただプリントの枚数が多く、この点が気になった。

3. 「電気化学測定入門」の機器分析 I への導入

電池評価技術の基礎となる電気化学測定に関する導入を座学の「機器分析 I」の時間に行った。導入するに際して次の内容で構成される 18 ページの講義用資料を作成した。この講義用資料は次のような内容で構成されている。

1) 電気化学法は基準法のひとつ
2) 電気化学測定法の特徴
   a) 利点
   b) 注意点
   c) 応用分野
3) 電気化学測定を理解するための復習
   a) 金属電極と電子エネルギー
   b) 分子中に存在する電子のエネルギー
   c) 電位の基準
   d) 基準電極
   e) 電極を 3 本使う測定
   f) 電気化学測定装置の構成
   g) 作用電極の呼び方
4) 電極界面の構造



2007 年度 4C 機器分析 I
(城石担当箇所)

つまり，一電子移動の場合は，標準酸化還元電位から 0.2V 以上離れていれば，もう片方の化学種の表面濃度は事実上 0 と考えてよい。

5.1.1 電流と時間の関係

それでは，上述の場合，電流はどのように流れるのだろうか? 電極に流れ込む電流は x 軸に電極からの距離をとった場合，次の式で表すことができる。

$$i = nFJ_0 = nFD_0\frac{dC_0}{dx} \qquad (9)$$

ここで J_0 (molcm^{-2}s^{-1})は物質のモル流束，D_0 (cm^{2}s^{-1})は物質の拡散係数である。

つまり，物質の拡散係数と濃度勾配が電流の大きさを決めるのだ。それでは，物質の濃度勾配はどのように変化するのであろうか?

これを求めるには，ラプラス変換という数学を使って以下の微分方程式を解く。

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \qquad (10)$$

ただし境界条件は

$$C_{red}(x,0) = C_{bulk} \qquad (11)$$

$$\lim_{x\to\infty} C(x,t) = C_{bulk} \qquad (12)$$

$$C_{red}(0,t) = 0 \qquad (13)$$

とする。これを解くと濃度分布は

$$C_{red}(x,t) = C_{bulk}\,\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \qquad (14)$$

と求めることができる。

(a) 時間-電流曲線

(b) Cottrell Plot

(c) Anson Plot

図　還元体の濃度分布(14 式を用いて計算)。D = 1×10^{-5} cm^{2}s^{-1} の場合。

図 (a)15 式を用いて計算した時間-電流曲線，(b) Cottrell Plot。(c) Anson Plot。A= 1cm，n = 1，D= 1.0×10^{-5}cm^{2}s^{-1} とした。

9

2007 年度 4C 機器分析 I
(城石担当箇所)

5. 電気化学測定

電気化学測定には，電位の走査方法によってさまざまな測定方法がある。ここでは代表的な方法としてリニアスイープボルタメトリーとポテンシャルステップ法について説明する。

5.1 ポテンシャルステップ法

電極の電位を HOMO の上の a から b に急にずらしたらどうなるだろうか?

図

電極近傍にある(または吸着している)分子の HOMO 軌道から電子が電極に流れ込み，分子が(　　　)される。それに引き続き，溶液中に存在する分子と置き換わり，酸化反応が起こりつづけるということが起こる。

電極に流れ込むスピードが十分速ければ，電極上の分子の酸化体 C_O と還元体 C_R の濃度比は(　　　　)の式で表される。

図　酸化体と還元体の割合の電位依存性

$$C_O/C_R = \exp[nF(E-E^0)/RT] \qquad (5)$$

ここで，n は反応電子数，F はファラデー定数(96485 Cmol^{-1})，R は気体定数，T(K)は温度である。また，E は印加電圧，E^0 は標準酸化還元電位である。

分子の全濃度を C_T とすると

$$C_T = C_O + C_R \qquad (6)$$

であり，(6)式を(5)式に代入すると

$$\frac{C_O}{C_T} = \frac{1}{1+\exp[-nF(E-E^0)/RT]} \qquad (7)$$

$$\frac{C_R}{C_T} = \frac{1}{1+\exp[nF(E-E^0)/RT]} \qquad (8)$$

となり，還元体と酸化体の全体に対する割合を求めることができる。たとえば E^0=0, T= 298K, 一電子移動(n = 1)としたとき，酸化体と還元体の分子の全濃度に対する割合は，上図のようになる。

8

Fig. 5 「電気化学測定入門」配布プリントの一部

5) 電気化学測定
   a) ポテンシャルステップ法
   b) リニアスイープボルタメトリー
6) 電気化学測定をする上で注意すること
   a) 電位窓
   b) 代表的な作用電極の特徴

授業で使用したプリントの一部を Fig. 5 に示す。インピーダンスのプリントと同様に書き込み式とし，できるだけ双方向の授業となるように努めた。

しかしながら，時間の関係で，学生がほぼ理解したといえるところまでは到達することができなかったという印象を持った。今後の改善課題としたい。

4. 結言

物質工学科 4 年次の「機器分析 I, II」および物質工学専攻 1 年の「物質工学特別実験」に電池評価関連技術の講義および実験を導入した。物質工学科の授業の特性を考え，数学や電気の基礎知識の学習を取り入れ，書き込み式プリントとすることで授業の双方向性を高めた。アンケートの結果，学生の間で好評価を得ることができた。

5. 謝辞

この研究は，平成 19 年度重点配分経費(個人研究費)の支援の下で行われた。関係各位に深く感謝申し上げる。

参考文献

[1] 電気化学会編，「電気化学測定マニュアル基礎編」，丸善，(2002) p.95.
[2] 岩瀬　重雄,「高校数学公式活用辞典」, 旺文社, (1994).
[3] 後藤　尚久,「なっとくする電気数学」, 講談社, (2001).
[4] 國枝　博昭,「なっとくする電気回路」, 講談社, (2001).

（平成 20 年 9 月 2 日　受理）

ラマン分光法を用いた Pd 内重水素間相互作用の観測

土屋賢一*，渡辺　彩*，浅野清之介**
尾崎政男***，笹部　薫****

Observation of the D-D interactions in Pd using Raman spectroscopy

Ken-ichi TSUCHIYA, Aya WATANABE, Shinnosuke ASANO,
Masao OZAKI, Shigeru SASABE

In this study, optical phonons in deuterium storage Pd induced by D-D interactions were observed by using Raman spectroscopy. This measurement was done for the sample completely sealed in a glass tube cutting off the influence of the external air. In the measurement chamber of the spectroscopy, scattered laser light from the optical phonons in deuterium storage Pd were detected and Raman shifts including the information about the D-D interactions were obtained. If nuclear reactions are happened in the sample, large changes of Raman spectra should be observed. However, they were not seen here.

(Keyword: Raman scattering, hydrogen storage metal, cold fusion)

1. はじめに

レーザー光が固体の格子振動により散乱された時、ほとんど全てのフォトンは弾性散乱される。これを Rayleigh 散乱と呼ぶ。しかし、ほんのわずかではあるが、光学フォノンとの相互作用により、入射光とは異なった周波数での散乱が起こる。この周波数の変化$\Delta\nu$をラマンシフトと呼ぶ。その際周波数が、増加する場合と減少する場合があり、それぞれ anti-Stokes 散乱、Stokes 散乱と呼ばれる。この両者をラマン散乱と称する。この概念図を Fig.1 に示す。また、エネルギー図を Fig.2 に示す。Stokes 散乱においてはエネルギー$h\nu$の入射光により基底状態のフォノンが一時的にバーチャルな状態に励起され、その後第 1 励起状態に落ちる。その際、周波数$\nu-\Delta\nu$の散乱光を発する。また、anti-Stokes 散乱では第 1 励起状態にあったフォノンが入射光により一時的にバーチャルな状態に励起され、その後基底状態に落ち込む際に周波数$\nu+\Delta\nu$の散乱光を発する。これらは非弾性散乱であり、入射波とフォノンの間のエネルギーのやり取りで生じたラマンシフト$\Delta\nu$は固体中の光学フォノンの状態に関する情報を含んでいると言える。

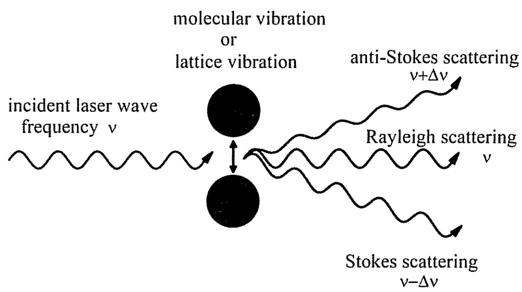


Fig. 1. Scattering of laser light from lattice vibration. Stokes and anti-Stokes scatterings are called Raman scattering.

＊物質工学科　＊＊明治乳業株式会社研究本部　＊＊＊東京農業大学　＊＊＊＊首都大学東京

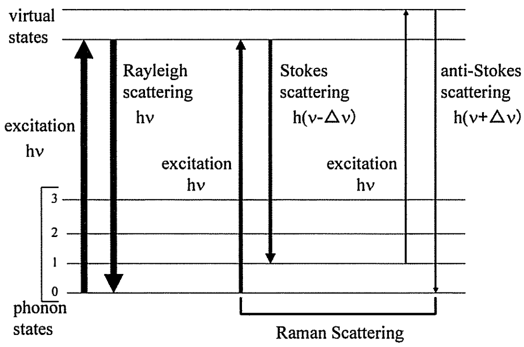


Fig. 2. Energy diagram of Raman scattering. The thicknesses of the arrows roughly show the population.

ところで、純粋なPdでは基本単位胞中に1個のイオンしか存在しないため、その格子振動は音響モードのみであることが知られている。ところが、音響モードはラマン不活性であり、ラマン分光により測定できない。これに対し、重水素を吸蔵したPdは重水素間の相互作用により音響モードに加えて光学モードが発生し、この方法により測定ができる[1,2]。

本研究においては重水素を吸蔵させたPdの光学フォノンをラマン分光法で観測する。これにより、重水素間の相互作用が観測されることになり、固体内核反応について考察が可能となり得る。固体内核応はFleishmann, Pondsの研究[3]に端を発するもので、Pdのような重水素を大量に吸蔵する金属中で、重水素が核融合反応を起こすとするものである。現在のところ再現性が悪いことが指摘されており、検証が続けられている。しかし、微弱な反応であることが予想されるため、生成熱や生成物質の測定も困難である。本研究の手法によれば、微弱な反応であってもフォノンが影響を受けてラマンシフトが変化するはずなので、効率の良い検出ができることが期待される。

2. 実験方法

2.1 重水素吸蔵

Pdへの重水素吸蔵はFig.3に示すガラス製の装置により定容法及び積分法を用いて行った。使用ガスは純度99.6%重水素である。また、Pdとしては田中貴金属製の純度99.9%のものを使用した。Pdの形状は結果と共に示す。

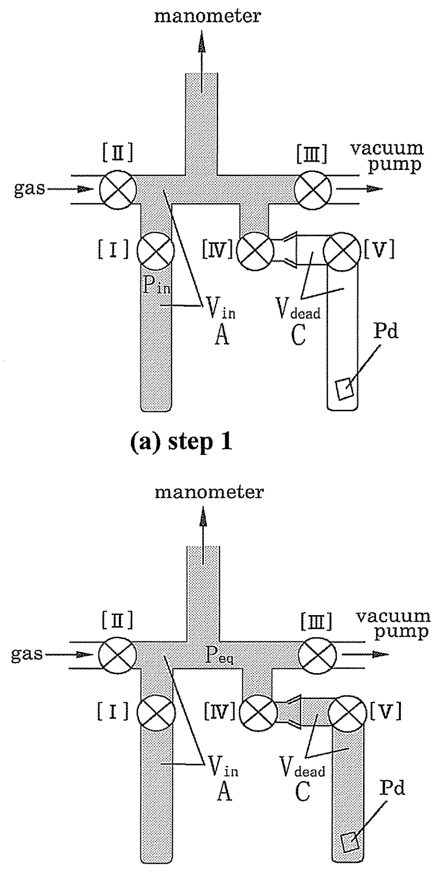


Fig. 3. Sketch of the deuterium storage apparatus. (a) D_2 gas is injected into the tube A. The pressure is measured by manometer. (b) Then the cock IV is opened and the gas is injected into the tube C. The pressure is decreased due to the expansion of the total volume of the tube and to the deuterium storage into Pd in the tube C. The storage rate is obtained from the equilibrium pressure using state equation.

2.2 ラマンシフトの測定

本研究で使用したラマン分光装置の全景を Fig.4 に、ディテクター部分を Fig.5 に示す。

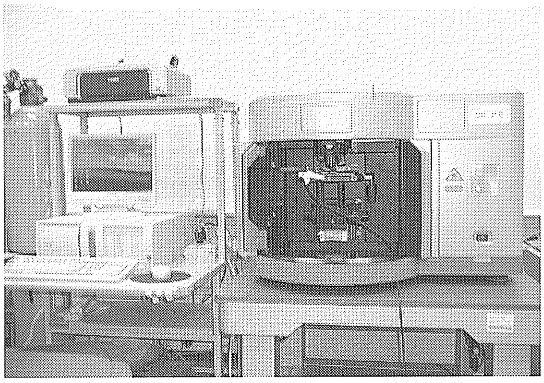


Fig. 4. Raman spectroscopy system (NRS-3100, JASCO).

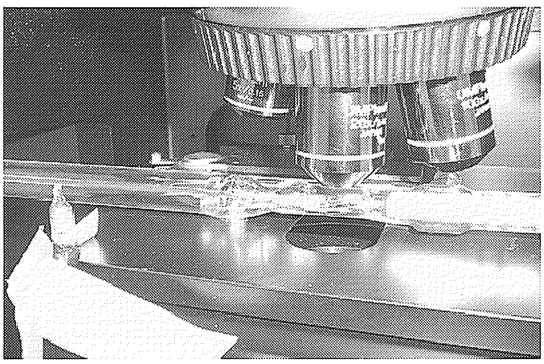


Fig. 5. Detection setup in the sysytem.
Deuterium storage Pd sealed in a grass tube is put on the stage.
The conditions for the measurements are following.

Exposure time :	50.00 sec
Integration times :	5
Objective lens :	UMPLFL 20×
Excitation wavelength :	532.25 nm

Ne lamp is used as a reference signal.

Fig.5 において、ガラス管内には重水素を吸蔵した Pd が封管されている。これは Fig.3(b)の tube C を、コック V を閉めた上でそのまま取り外したものであり、吸蔵の際の条件がそのまま保たれている。ここに直接レーザー光が照射されラマンシフトが測定される。前述のようにここで観測されたラマンシフトは重水素間の相互作用の情報を含んでいる。

3. 結果及び考察

重水素吸蔵実験結果を Fig.6 及び Fig.7 に示す。Pd サンプルとしては 5×5×0.5mm の板状のものと平均直径が 0.5mm 程度の粉末状のものを用いた。粉末状サンプルは板状サンプルを鑢で削ることにより作製した。Fig.6 に示すように吸蔵には約 2 日を要し、Fig.7 に示すように D/Pd 原子比は板状サンプルの場合 0.16、粉末状サンプルの場合 0.9 であった。

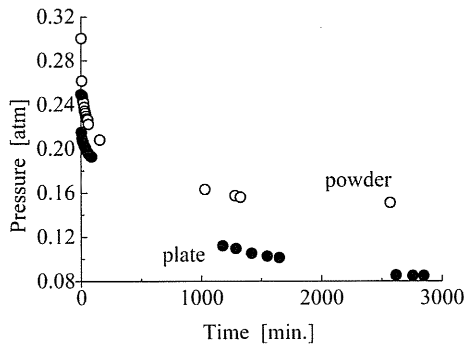


Fig. 6. The pressure of the deuterium gas in the tube C as a function of the storage time. The shape of the plate sample is 5x5x0.5mm, and the average radius of the powder sample is 0.5mm.

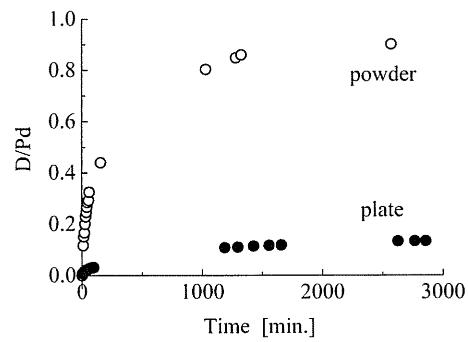


Fig. 7. D/Pd atomic ratio as a function of the storage time. The equivalent D/Pd ratios for powder and plate samples are 0.90 and 0.14, respectively.

次に Fig.8 にラマンシフトの測定結果を示す。ここで、横軸はプランク定数を掛けてエネルギーに換算したものを用いた。また、縦軸は毎秒あたりのカウントで示した。これらは主に入射光が Pd 中の重水素間相互作用により Stokes 散乱された結果を測定したものであり、第 1 励起状態と基底状態のエネルギー差を示していると考えられる。

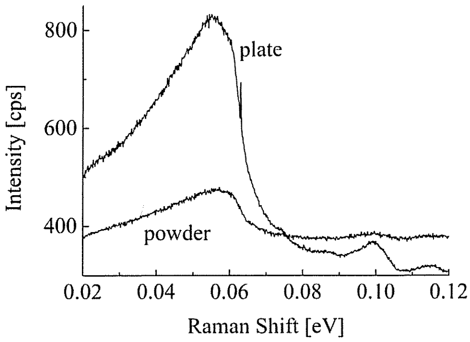


Fig. 8. Raman shift for deuterium storage powder and plate Pd. The peak positions of plate and powder samples are 57 and 59 meV, respectively.

Fig.8 を見ると板状サンプルの場合シャープなピークが存在し、ピーク位置は 57meV であることがわかる。また、粉状サンプルの場合ブロードなピークが存在し、そのピーク位置はほぼ 59meV であることがわかる。両者でピークの形状や高さが異なるのはその表面常態がまったく異なるためと考えられる。ピーク位置の違いは重水素の濃度が異なっていることを反映している可能性もあるが、本実験の結果だけからは断言できない。

本研究と同様の測定は 1977 年に Sherman らにより行われている[2]。彼らの測定は D/Pd 比が 0,75 の試料に対して温度 18K 及び 84K で行われ、ピーク位置はいずれも 39.7meV であった。これに対し、我々の測定ではピーク位置は上述のように彼らよりも大きな位置に出ている。これは我々の測定が室温で行われていることが主たる原因と考えられる。すなわち、これらのことより重水素間相互作用は温度の影響を受けることが推察できる。どのような温度依存性があるかを厳密に調べるためにはラマンシフトの測定中も試料を低温環境に保つ装置が必要となる。したがって、現在は行えないが、今後の課題として考えてゆく予定である。また、Kalman らが D-D 間の光学フォノンの交換により引力が生ずるとの理論を発表しており[4]、これの検証も本実験の延長上においてできると考えられる。Kalman らの理論は[5]フォノンの交換により電子間に引力が生ずるとする超伝導理論を D-D 間に置き換えたものであるが、ここで生じた引力がクーロン斥力に打ち勝つことができるかどうかは核反応の可能性を論ずる上で最も重要な点となる。

核反応検出の可能性については本実験からはまだ言及することはできない。しかし、様々な波長のレーザー光の照射や強力な超音波の照射などによって重水素吸蔵 Pd を刺激してからラマンシフトを測定すれば刺激前と何らかの違いが現れ、それが核反応の影響を反映している可能性もある。この点も今後の課題として考えていく予定である。

4. 結論

本研究において我々は重水素吸蔵 Pd のラマンスペクトルの測定を行った。これらは間 D-D 相互作用に関する情報を含んでいると考えられる。スペクトルのピーク位置は Sherman ら[2]のものとは異なったが、それは彼らが低温において実験を行ったのに対して我々が室温で実験を行ったからであ

ると考えられる。

今後は本研究をさらに続けるとともに、重水素吸蔵 Pd にレーザー光や超音波で刺激を与える前後でスペクトルが変化するかを調べ、核反応との関連性を調べたい。更に、重水素吸蔵 Pd 内での Bose-Einstein Condensation が核融合反応を誘発するとの理論[6]や、固体内で、Coulomb 相互作用が弱まる可能性があるとの理論[7]との関連性も調べる予定である。

謝 辞

本研究は平成 19 年度東京高専校長裁量経費により行われました。ここにそのことを報告し、感謝の意を表します。

また、本研究において重水素吸蔵を行う際、本校物質工学科、阿久沢昇教授から貴重なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

References

1. J.M.Rowe, J.J.Rush, H.G.Smith, M.Mostoller and H.E.Flotow, “Lattice Dynamics of a Single Crystal of $PdD_{0.63}$”, Phys. Rev. Letts., **33**,1297(1974)
2. R.Sherman, H.K.Birnbaum, J.A.Holy and M.V.Klein, “Raman studies of hydrogen vibrational modes in palladium”, Phys. Lett., **62A**,353(1977)
3. M. Fleischmann and S. Ponds, “Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium” J. Electroanal. Chem. **261**(1989)301
4. P.Kalman and T.Keszthelyii, “Attractive d-d interaction via phonon exchange in deuterated Pd”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **B240**, 781(2005)
5. C.Kittel, *Quantum theory of Solid*s, Wiley, New York, 1963.
6. K.Tsuchiya, "Quantum States of Deuterons in Pd.", International Journal of Hydrogen Energy, **29**,1513 (2004)
7. S.Sasabe and K.Tsuchiya, “What is spin-magnetic moment of electron?”, Phys. Letts. **A372**, 381(2008)

（平成 20 年 9 月 25 日受理）

カーボンナノチューブ修飾電極による $[Fe(CN)_6]^{3-}/[Fe(CN)_6]^{4-}$ のサイクリック・ボルタンメトリー

工藤節子*，小杉健一朗**

Cyclic Voltammetry of $[Fe(CN)_6]^{3-}/[Fe(CN)_6]^{4-}$ at Carbon Nanotube Modified Electrodes

Setsuko KUDO, Kenichiro KOSUGI

It is known that the electrochemical properties of carbon nanotube (CNT) ensembles depend on various factors. A parameter for the rate of electron transfer in cyclic voltammetry, the separation of peak potentials (ΔE_p), for a $[Fe(CN)_6]^{3-}/[Fe(CN)_6]^{4-}$ system was obtained at each of the glassy carbon electrodes modified with three different CNTs. When the CNT suspension prepared in dimethylformamide (DMF) was used for the modification, the ΔE_p values were dependent on each person who did the experiments, with a good repeatability for each of the three CNT modified electrodes. When the CNT suspension prepared in DMF containing water was used, one of the electrodes showed Nernstien behavior and therefore fast electron-transfer kinetics. These results have been discussed.

(Keywords: carbon nanotube, modified electrode, cyclic voltammetry)

1. はじめに

カーボンナノチューブ（CNT と略記）はその特異な物性が明らかにされたことにより，ナノテクノロジーへの応用に関心が高まっている．電気化学の分野では，CNT を生体関連物質や環境汚染物質の計測に利用しようという試みが増加している．計測用電極材料としての CNT は，電子移動促進効果，電極表面の汚れにくさ，バックグラウンドの増大などの特徴を有する[1]．さらに分析化学的選択性[2]についても報告されている．基板電極表面に CNT 粉末を修飾した研究例が多いのは，生体関連物質のような電子移動速度が遅い系に対する CNT の電子移動促進効果（電気的触媒効果），CNT が高価ではあっても少量で十分であり，この種の修飾電極の作製が簡便であることによると考えられる．CNT 修飾電極の応用への興味と関心が高まる一方で，基礎的研究は少ないのが現状である．

本研究では，異なる CNT を修飾したグラッシーカーボン（GC）電極を用いて，代表的な酸化還元系である $[Fe(CN)_6]^{3-}/[Fe(CN)_6]^{4-}$ のサイクリック・ボルタンメトリー（CV と略記）を行った．特に酸化ピーク電位（E_{pa}）と還元ピーク電位（E_{pc}）との差（ΔE_p）について検討したので報告する．

2. 実　験

2.1 CNT とその前処理

（有）筑波物質情報研究所から 3 種類の CNT を入手した．一つは多層中空型であり，CNT1 と略記する．他はカップ積層型[3]であり，CNT2 および CNT3 と略記する．

CNT は使用前に化学的前処理を行った．4.0 M HCl 中で超音波処理し，吸引ろ過によって得られた CNT を超純水によって繰り返し洗浄した．次に，得られた CNT を真空乾燥し，体積比 $(HNO_3/H_2SO_4)=7/3$ の酸化性酸中で超音波処理し，上記と同様に洗浄・乾燥を行った．この二段階の

＊物質工学科　＊＊物質工学科卒業生（長岡技術科学大学工学部材料開発工学課程）

前処理では，化学的不純物（主として触媒として用いられた鉄）の除去と CNT 切断を目的としている．M = mol dm^{-3}.

2.2 CNT 修飾電極の作製

基板電極として GC ディスク電極（内径 : 3.0 mm, 外径 : 6.0 mm）を用い，アルミナ懸濁液で研磨し，超純水で洗浄後，水分を拭き取った電極表面に CNT を修飾した．Zhao ら[4]と同様に，N,N-ジメチルホルムアミド（DMF と略記）を用いて，CNT 懸濁液（2.5 mg /5 mL）を調製した．目安として，15 μL の懸濁液を GC 電極表面に 4 回滴下した後，赤外線ランプ下（60～80℃）で乾燥させた．必要に応じて滴下量を調整した．

2.3 電気化学的測定

CV はサイプレス・システムズ社のアナログ・ポテンショスタット OMNI101 を用いて，三電極方式で行った．作用電極は CNT 修飾電極，参照電極は水系 Ag/AgCl(3M NaCl)電極，補助電極は Pt 線であった．比較のため，作用電極として裸の GC，Pt，PFC（40%グラファイト含有プラスチック焼成炭素）ディスク電極も使用した．測定溶液には 5.0 mM $K_4[Fe(CN)_6]$（特級品，和光純薬）を含む 0.50 M Na_2SO_4 または 1.0 M KCl を用いた．測定はこれらの水溶液中に窒素ガスを通じることによって除酸素し，主に予備実験を室温で行い，必要に応じて(25.0±0.2)℃の恒温槽中で行った．

2.4 SEM 観察

SEM 観察は，平成 16 年度および 19 年度に，釜谷 隆氏および石井正夫氏により日立電界放射形走査電子顕微鏡 S-4100 を用いて行われた．試料表面にはわずかに Pt を蒸着した．

3. 結果と考察

3.1 SEM 観察

化学的処理前の CNT の SEM 像を同一倍率で図 1～3 に示す．CNT1 はスパゲッティー状[5]であった．カップ積層型の CNT2 および CNT3 は，SEM 像による形状は同様であったが，平均的に CNT3 のチューブの方が長かった．

3.2 サイクリック・ボルタンメトリー

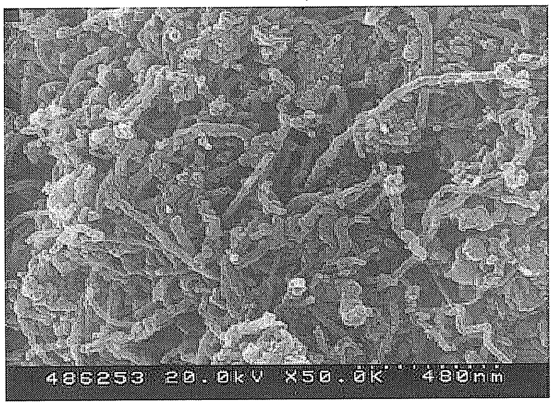


図 1　CNT1 の SEM 像

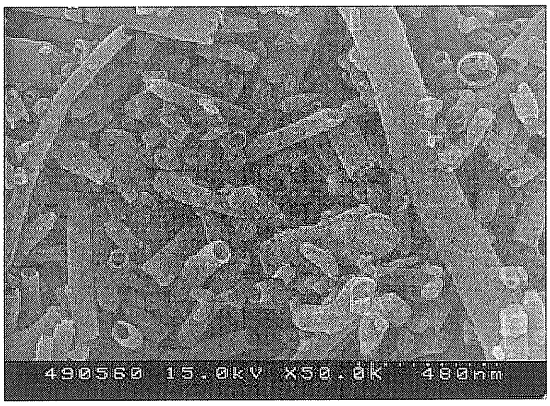


図 2　CNT2 の SEM 像

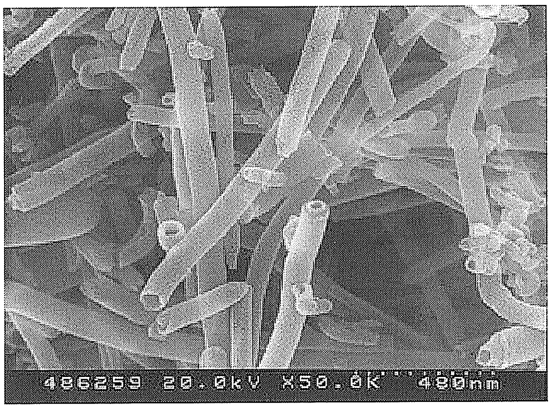


図 3　CNT3 の SEM 像

$[Fe(CN)_6]^{3-}/[Fe(CN)_6]^{4-}$ 系は比較的遅い掃引速度で可逆的 1 電子移動反応を示すことから，しばしばボルタンメトリー用装置の動作や測定法，電極の性能などを調べるのに用いられる．CNT 電極についても報告されている[6]．本研究で得られた裸の GC 電極および各 CNT 修飾 GC 電極（CNT/GC と略記）によるサイクリック・ボルタモグラムの一例を図 4 に示す．

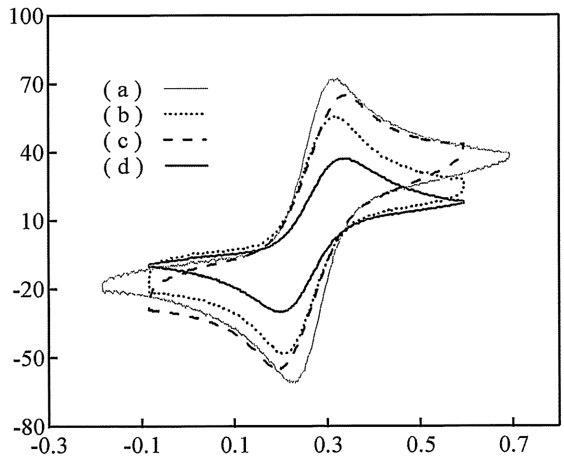


図 4 0.50 M Na_2SO_4 中における 5.0 mM $K_4[Fe(CN)_6]$のサイクリック・ボルタモグラム. (a) CNT1/GC, (b) CNT2/GC, (c) CNT3/GC, (d) GC. 50 mV s^{-1}.

よく知られているように，裸の GC 電極の場合には研磨の状態によって電気化学的パラメータが変化するため [7]，代表的なものを示した．GC 電極に CNT を修飾することによりバックグラウンド電流，ファラデー電流ともに増加した．バックグラウンド電流は主として電極と溶液界面に形成される電気二重層の充電電流である．これは電極の表面積，電気二重層の容量および掃引速度の積で表される[8]．ここでは修飾電極による一定電位での二つのバックグラウンド電流値の差がほぼ等しくなるように CNT の修飾量を調整した．本実験条件下では CNT1/GC 修飾電極による i_{pa} が最も大きく，CNT2/ GC 修飾電極と CNT3/GC 修飾電極による i_{pa} はほぼ等しかった．

表 1-1 は，図 4 に代表される CV パラメータを 2 種類の掃引速度（v）に関して示したものである．ΔE_p は，本実験条件下ではいずれも可逆的 1 電子移動過程に対する理論値 59 mV（25℃）より大きく，準可逆過程に相当するものであった．図 5 に示すように，i_{pa} は掃引速度（10～150 mV s^{-1}）の平方根と直線関係にあった．

表 1-1 の CV パラメータは同一実験者において誤差範囲内で再現した．5 名の実験者のうち他の 1 名は，表 1-2 に示すように可逆的 1 電子移動過程の理想的な値により近いΔE_p を得た．他の 3 名のΔE_p は表 1-1 と表 1-2 の値の間にあり，同一条件下で得られる繰り返し精度（repeatability）は，相対標準偏差 2～6%（n=3～5）であった．一方，

表 1-1　0.50 M Na_2SO_4 中における$[Fe(CN)_6]^{3-}$/$[Fe(CN)_6]^{4-}$に対する CV パラメータ*（実験者 A）

電 極	v /mV s^{-1}	i_{pc} / i_{pa}	ΔE_p / mV	($E_{1/2}$ vs. Ag/AgCl) / mV
CNT1/GC	20	1.0	88	+267
	100	1.0	102	+267
CNT2/GC	20	1.0	100	+261
	100	1.0	130	+263
CNT3/GC	20	1.0	121	+268
	100	0.91	169	+270
GC	20	0.91	116	+265
	100	0.91	155	+268

*$E_{1/2} = (E_{pa} + E_{pc})/2$

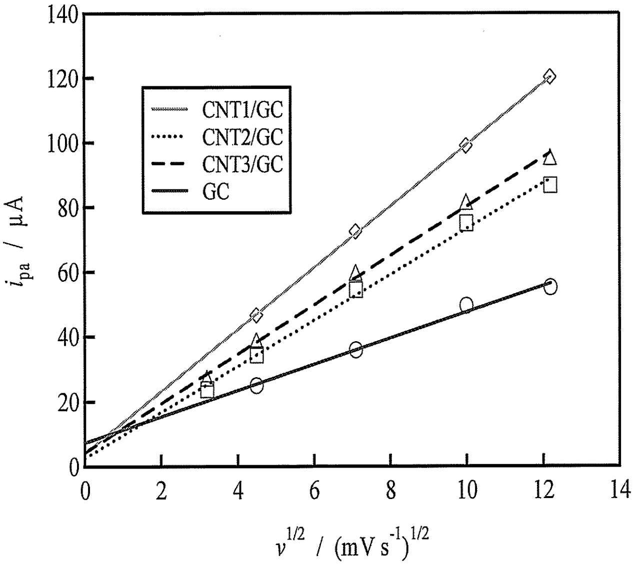


図 5　掃引速度の平方根に対する $[Fe(CN)_6]^{3-}/[Fe(CN)_6]^{4-}$ 系の酸化ピーク電流 i_{pa} の依存性．図 4 参照．

異なる実験者による値に測定誤差以上の差を生じた理由の一つとして，CNT 修飾の際の加熱条件（昇温速度など）が実験者によって異なったことが考えられる．また，図 6 は CNT2 修飾電極について CNT 量の影響を調べた結果である．曲線(b)と(c)の比較は，修飾する CNT の量を増加させることによってバックグラウンド電流が増加し，ファラデー電流が減少することを示している．

表 1-2　0.50 M Na_2SO_4 中における$[Fe(CN)_6]^{3-}$/$[Fe(CN)_6]^{4-}$に対する CV パラメータ（実験者 B）

電極	v / mV s^{-1}	i_{pc} / i_{pa}*	ΔE_p* / mV
CNT1/GC	20	0.98±0.01	71±2
	100	0.97±0.01	80±2
CNT2/GC	20	0.96±0.02	65±4
	100	0.95±0.02	71±2
CNT3/GC	20	0.98±0.03	62±2
	100	0.96±0.01	68±2
GC	20	0.96±0.01	97±4
	100	0.94±0.01	127±3
PFC	20	1.0	63
	100	0.97	65
Pt	20	0.98	60
	100	0.97	65

*データ数（n）= 3 で，平均値±標準偏差

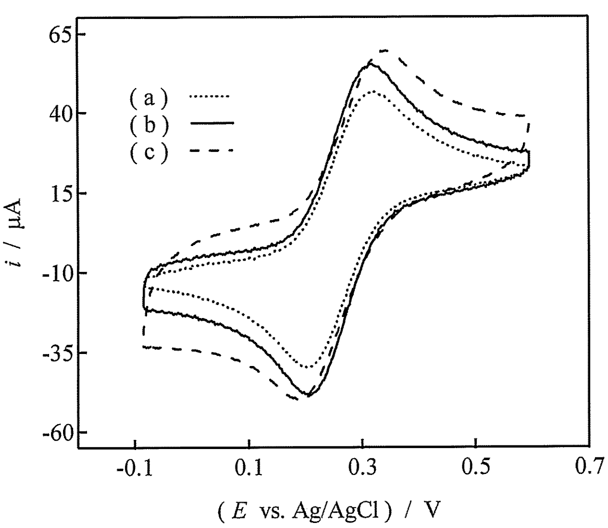


図 6　0.50 M Na_2SO_4 中における 5.0 mM $K_4[Fe(CN)_6]$のサイクリック・ボルタモグラムに対する CNT 修飾量の影響．バックグラウンド電流：(a) < (b) < (c). CNT2/GC 電極, 50 mV s^{-1}.

体積比(DMF/水)=7/3 で調製した CNT2 懸濁液を用いて修飾電極を作製した場合には，掃引速度 20 mV s^{-1} におけるΔE_pは実験者に依存せず，68～73 mV（0.50 M Na_2SO_4 中），58～62 mV（1.0 M KCl 中）であった．後者は誤差範囲内でネルンスト式の勾配と一致し，注目される．CNT が疎水性であることから，修飾電極先端部を水溶液中に浸漬させた際に表面に生じる空気層[6b]のΔE_pに対する影響が測定溶液によって異なることが考えられる．水を含む DMF で調製された CNT2 懸濁液を用いた場合には，SEM により CNT が強く凝集している様子が観察された．

ΔE_pに関して上記のような結果が得られた理由の一つとして，基板電極と CNT，修飾量の増加に伴って CNT が重なりあった場合のチューブ同士の密着度により電極の抵抗に差を生じたことが考えられる．

本研究の一部は，平成 19 年度重点配分経費（東京高専学内予算，プロジェクト名：高専生がナノバイオセンサーの基本的な問題点に迫る）により行われました．また，SEM 観察には東北大学多元物質科学研究所 進藤大輔教授の御理解と御支援を賜りました．ここに深く感謝致します．

参考文献

[1] 例えば, (a) J. Wang, M. Li, Z. Shi, N. Li, Z. Gu, *Anal. Chem.*, **74**, 1993-1997, 2002. (b) X. Yu, D. Chattopadhyay, I.Galeska, F. Papadimitrakopoulos, J. F. Rusling, *Electrochem. Commun.*, **5**, 408-411, 2003.

[2] F. Kurusu, H. Tsunoda, A. Saito, A. Tomita, A. Kadota, N. Kayahara, I. Karube, M. Gotoh, *Analyst*, **131**, 1292-1298, 2006.

[3] 柳沢　隆, 遠藤守信, ナノカーボンハンドブック, 遠藤守信, 飯島澄男監修, エヌ・ティー・エス（2007), pp.117-125.

[4] Q. Zhao, Z.-N. Gu, Q.-K. Zhuang, *Electrochem. Commun.*, **6**, 83-86, 2004.

[5] Z.-h. Wang, Q.-l. Liang, Y.-m. Wang, G.-a. Luo, *J. Electroanal. Chem.*, **540**, 129-134, 2003.

[6] 例えば, (a) J. M. Nugent, K. S. V. Santhanam, A. Rubio, P. M. Ajayan, *Nano Lett.* **1**, 87-91, 2001. (b) J. Li, A. Cassell, L. Delzeit, J. Han, M. Meyyappan, *J. Phys. Chem. B*, **106**, 9299-9305, 2002. (c) 文献[3], pp.469-473.

[7] M. Aihara, M. Komatsu, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **60**, 1911-1912, 1987.

[8] 大堺利行，加納健司，桑畑　進，ベーシック電気化学（2001），化学同人，p.119.

（平成 20 年 9 月 25 日　受理）

平成19年度全教員教育研究業績

この教育研究業績の論文等に、ゴシック体により標記した者は、本校教職員である。

1．研究論文・著作物（著書・翻訳書など）

一般教科（人文社会系・英語系）

応用英文法学序説(1)―ネクサスと動詞語彙文法を中心にした英文法自学自習オンライン教材開発の可能性―
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(1)号，2008年1月，pp. 29－35）……………………………相澤俊行
ポーズ有りとポーズ無しの「聞きながら読み」および「繰り返し読み」の読解力への効果を判定するための基礎的調査
（『論文集「高専教育」』第31号，2008年3月，pp. 189－194）……………………………………………相澤俊行
戦時末期における文部省の戦時科学政策―陸海軍技術運用委員会の下での変化―
（『イル・サジアトーレ』No. 36，pp. 47－63，2007年9月）…………………………………………………河村　豊
日豪学生交流の役割について―アンケート調査から見えてくるもの―
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(2)号，2008年3月，pp. 17－22）
……………………竹田恒美，佐藤義隆，小中澤聖二，黒田一寿，一戸隆久，吉本定伸，John Wade GATES
『新撰万葉集』注釈稿（上巻　冬部　七九～八〇）
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(1)号，2008，1，pp. 1－10）…………………津田　潔，半澤幹一
『新撰万葉集』注釈稿（上巻　冬部　八一～八二）
（『共立女子大学文芸学部紀要』第五十四集，2008，1，pp. 67－80）………………………半澤幹一，津田　潔
キャンパスの里山再生プロジェクトの実践報告
（『論文集「高専教育」』第31号，2008，3，pp. 867－872）………古屋正俊，鈴木智之，黒田一寿，佐藤義隆
平時経済における中小企業政策形成への模索―1950年中小企業法案の意義と限界―
（『アメリカ経済史研究』6号，2007年10月，pp. 23－34）……………………………………………………浅野敬一
徳育としてのリスクコミュニケーション―技術者倫理教育のために―
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(1)号，2008，1，pp. 15－27）………………………………川北晃司
技術者倫理教育に関する全国高専アンケート結果の一考察―自由記述欄回答から学べること―
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(2)号，2008，3，pp. 23－34）
……………………………………………………………川北晃司，浅野敬一，河村　豊，木村　南，庄司　良
チャレンジウォークの13年間の経緯と「任意参加型」から「全員参加型」への移行に伴う課題
（『論文集「高専教育」』第31号，2008，pp. 879－883）……………鈴木智之，古屋正俊，黒田一寿，佐藤義隆

一般教科（数学系・物理系）

Theory of lanthanum copper oxide (LSCO) superconductors
（『Physica C』460-462, 2007, pp. 991-992）…………Hiroshi KAMIMURA, Hideki USHIO, Shunichi MATSUNO
『図解入門　よくわかる微分方程式』（秀和システム，2007年5月）……………………………………………潮　秀樹
三角形におけるビジャースの定理の四面体への拡張（『数理科学会論文集』vol. 9　No. 1，2007，12，pp. 9－14）
…………………………………………………………向山一男，五十嵐　貫，佐藤義隆，杉江道男，豊成敏隆
エルデスの不等式とその周辺（『日本数学教育学会高専・大学部会論文誌』第14号，2007，8，pp. 72－82）
………………………………………………………………………五十嵐　貫，佐藤義隆，豊成敏隆，向山一男
An Expression for Minimum Seminorm Generalized Inverses
（Bull. Polytechnic University No. 37-A, 2008, 3, pp. 147-151）
……………………………………Kan IGARASHI, Tatsuo HONDA, Yoshitaka SATO, Toshitaka TOYONARI
国費留学生出身国における数学教育
（『日本数学教育学会高専・大学部会論文誌』第14号，2007，8，pp. 95－110）…………………………佐藤義隆
卒業生からみた東京高専の教育について
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(2)号，2008，3，pp. 35－42）…………………佐藤義隆，加藤　格
高専第3学年学習到達度試験（数学）の実施と評価について

（『論文集「高専教育」』第31号，2008，３，pp. 583－588）
……………………………………………………………………佐藤義隆，梅野善雄，長水壽寛，松田　修，柳井　忠
Vanishing cohomology theorems of SL_2 and the weak Leopoldt Conjecture for elliptic curves
（『早稲田大学整数論研究集会　2007　報告集』，2007，７，pp. 125－128）……………………………中里　肇
On Bashmakov's theorem for elliptic curves without complex multiplication
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39⑵号，2008，３，pp. 9 －15）………………………………中里　肇

機械工学科

CFRP 製品の低コスト化技術開発（『自動車技術』・61巻・10号，2007年10月，pp. 63－69）…………………木村　南
講義資料としての新聞技術情報の構築
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39⑴号，2008年１月，pp. 51－56）……………………………木村　南
著書：『実験力学ハンドブック』
（朝倉書店，2008年２月，pp. 228－232）……………………共著：井口　学，松井剛一，横山　隆，黒崎　茂
高専間の学習状況比較―交流事業から見えるもの―
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39⑴号，2008，１，pp. 1 － 5 ）……………………………小中澤聖二
制御方式の異なる２種類の風力発電システムの過渡的性能
（エバラ時報　第216号，2007年７月，pp. 3 －10）………………………………関塚　智，岡崎　裕，斉藤純夫
Computational Cavitation Flows at Inception and Light Stages on an Axial-Flow Pump Blade and in a Cage-Guided Control Valve（Journal of Thermal Science, vol. 16, No. 4 2007-11, pp. 337-345）
…………………………………………………Sumio SAITO, Masahiro SHIBATA, Hideo FUKAE, Eisuke OUTA
Influence of Nut Length on Load Distribution of Bolted Joints
（ICMDT 2007 : JSME-KSME Joint International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, A23, 2007, 7）………Yoshihiro KUBOTA, Mitsuo KOBAYASHI, Kenji SUZUKI, Katsumi FUKUDA
Generalized Full Adder Circuits (GFAs),（: Part I ; Formalized Mathematics, vol. 13, No. 4, 2008, pp. 549-571）
…………………………………………………Shin'nosuke YAMAGUCHI, Katsumi WASAKI, Nobuhiro SHIMOI
ロボット工学の運動学解析とその理解支援―可視化した計算機上運動学モデルの効果的活用―
（『日本数学教育学会高専・大学部門論文誌』vol. 14，No. 1，2007，８，pp. 67－76）………………多羅尾　進
Prototyping of a Motion Base for a Desktop Interaction System, Consisting of a Combination of a Wheel Drive and a Parallel Mechanism
（『Proc. of SPIE (ICMIT2007)』vol. 6794, 2007, 12, pp. 1Q1-1Q6）…………Susumu TARAO, Toshihiko KOIWA
高専における小型ヒューマノイドロボットの設計と試作
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39⑴号，2008，１，pp. 43－50）………………多羅尾　進，小岩俊彦
Spin polarization and chiral symmetry breaking at finite density
（Progress of Theoretical Physics, vol. 118, No. 4, 2007, pp. 729-748）………………………………Shinji MAEDAN
スカーフ接着継手の衝撃引張り強度特性
（『材料試験技術』52巻３号，2007年７月，pp. 145－153）……………………………………志村　穣，田宮高信
JAVA を用いたコースティックス法測定システムの開発―応力拡大係数測定システムの開発と検証―
（『材料試験技術』52巻３号，2007年７月，pp. 139－144）……………田宮高信，鈴木恭平，朴　宏，志村　穣

電気工学科

電磁界解析のための数学的一手法―平面回折格子からの散乱を例にして―
（『日本数学教育学会高専・大学部会論文誌』vol. 14，No. 1，2007年８月，pp. 77－82）……………伊藤　彰
PICNIC イーサネット・シリアル変換器を使用した広帯域電磁環境測定システム
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39⑴号，2008年１月，pp. 57－60）…鈴木　渉，山内峯生，大貫繁雄
XPort イーサネット・シリアル変換器を使用した広帯域電磁環境測定システム
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39⑵号，2008年３月，pp. 43－44）………………山内峯生，大貫繁雄
民生部門におけるエネルギー有効利用の検討
（『東京工業高等専門学校研究報告』第39⑴号，2008年１月，pp. 61－64）……土井　淳，坂本和弥，高井岳利
熟練ノウハウの継承を目指した電力技術者教育方法のシステム化検討

（『電気学会論文誌 B』128巻１号，2008年１月，pp. 235－241）…………………………京本寿美恵，土井　淳

電力系統解析技術をテーマにした高学年・専攻科電気工学実験への試み

（『論文集「高専教育」』第31号，2008年３月，pp. 223－228）　…………………………………………土井　淳

『電験三種　理論　ベスト攻略』（リックテレコム，2008年３月）………………………佐藤勝雄，土井　淳，伊庭健二

『電験三種　電力　ベスト攻略』（リックテレコム，2008年３月）………………………佐藤勝雄，土井　淳，伊庭健二

電子工学科

表面テクスチャ画像の回転角と拡大縮小倍率の高精度計測

（『東京工業高等専門学校研究報告』第39(2)号，2008年３月，pp. 55－58）…………………青木宏之，三木　明

新入生必修科目としての電子工学導入教育―東京高専全新入生対象の工学基礎教育として―

（『日本設計工学会誌』第42巻，第５号，2007，５，pp. 241－247）…………………………大塚友彦，正木　進

Fingerprint Core and Delta Detection by Candidate Analysis

（『Proceedings of IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA2007)』2007, 05, pp. 130-134）

……………………………………………………Tomohiko OHTSUKA, Daisuke WATANABE, Hiroyuki AOKI

交流による過渡現象を理解するための立体図表示

（『東京工業高等専門学校研究報告』第39(1)号，2008年１月，pp. 65－70）………………………………柚賀正光

Evaluation of Multi MPPT Thermoelectric Generator System

（Proceedings of 26th International Conference on Thermoelectronics, Chedu, 2007, B02-2）

……………………………………………Hiroshi NAGAYOSHI, Kenta TOKUMITSU, Takenobu KAJIKAWA

Fabrication of TiO_2/poly (3-hexylthiophene) Hetero Junction Solar Cell

（Proceedings on 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2007, 495）

……………………………………………………Hiroshi NAGAYOSHI, Shotaro MASUDA, Daisuke SUZUKI

Evaluation of Blocking Layer Insertion Effect on Dye Sensitized Solar Cells

（Proceedings on 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2007, 557）

……………………………………………………………………………Hiroshi NAGAYOSHI, Kenji SADAKUNI

Comparative Analysis of The Surface Texturing of Silicon by Hydrogen Plasma Treatments or Hydrogen Radicals Generated by Tungsten Hot Filament

（Proceedings on 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2007, 1686）

…………………………………………………Heidi NORDMARK, Hiroshi NAGAYOSHI, John C. WALMSLEY, Randi HOLMESTAD, Alexander ULYASHIN

Novel Maximum Power Point Tracking Control Syatem for Thermoelectric Generator and Evaluation of Mismatch Power Loss Reduction（Proceedings of the 5th European Conference on Thermoelectronics, 2007, 80）

……………………………………………Hiroshi NAGAYOSHI, Kenta TOKUMITSU, Takenobu KAJIKAWA

Fabrication of TiO_2/poly (3-hexylthiophene) Hetero Junction Solar Cell

（Proceedings on 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 2007, 1018）

……………………………………………………Takayuki IIZAWA, Daisuke SUZUKI, Hiroshi NAGAYOSHI

Blocking Layer Insertion Effect on Dye Sensitized Solar Cells

（Proceedings on 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 2007, 1198）

…………………………………Hiroshi NAGAYOSHI, Takayuki IIZAWA, Rikiya MIDOH, Kenji SADAKUNI

情報工学科

蓄積型放送におけるハイブリッド型コンテンツ配信スケジュール

（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(1)号，2008，１，pp. 75－80）……青野正宏，古賀千恵，小嶋徹也

電子レポート収集システムのプログラミング言語演習科目への適用

（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39号(1)，2008，１，pp. 71－74,）…小坂敏文，吉本定伸，松林勝志

廃棄物を出さない魚と野菜の同時生産システムの開発―水質調整からアクアポニックスシステムの開始まで―

（東京工業高等専門学校研究報告書第39(2)号，2008，３，pp. 73－77）

…………………………………………………………………………松林勝志，中川文寛，小坂敏文，三谷知世

八王子市科学教育センターと連携した工学教育

―ロボットをテーマとしたスーパーサイエンスパートナーシッププロジェクト報告―
（東京工業高等専門学校研究報告書第39(2)号，2008，３，pp. 79－85）
……………………………………………………松林勝志，多羅尾　進，小池清之，吉本定伸，津田　潔，小坂敏文
e ラーニングの導入と授業での試行（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39号(2)号，2008，３，pp. 63－71）
…………………………………………………………………………………………横山繁盛，福井繁雄，関根紳太郎
A Method to Estimate the Multimedia Communication Bands Based upon Multi-Order Markov Model
（『Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics』vol. 11, No. 6, June, 2007, pp. 655-661）……………………Tetsuya KOJIMA, Lkhamsuren ENKHTUR, Akiko FUJIWARA, Masahiro AONO
高専における情報理論教育に関する考察―実例やゲームを導入した授業の提案―
（『東京工業高等専門学校　研究報告書』第39(1)，2008，１，pp. 81－86）………………………………小嶋徹也
微分方程式の解の分岐理論（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(2)号，2008，３，pp. 1 － 6 ）………拝田　稔
Nominally Piecewise Multiple Regression Using a Four-Layer Perceptron
（『Lecture Notes in Computer Science』vol. 4694, 2007, 9, pp. 969-976）
…………………………………………………Yusuke TANAHASHI, Daisuke KITAKOSHI, Ryohei NAKANO

物質工学科

Change of Electrical Resistivity of graphitized Cathode Block During and After Electrolysis in Alumina Molten Salts
（『Light Metals』2008, March 2008, 979-984）
………………………………Yoshinori SATO, Hiroshi IMAGAWA, Manabu HAGIWARA, Noboru AKUZAWA
循環流動層ボイラー焼却灰からのゼオライト合成
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(2)号，2008，３，pp. 93－96）…………………石井宏幸，川上春菜
微量天秤を用いた洗剤の評価（『Material Technology』vol. 26，No. ２，2008年３月，pp. 85－89）
………………………………………………………………佐伯康介，関戸広太，北折典之，高橋三男，中村幹彦
微量天秤を用いた洗剤の評価（『Material Technology』24巻２号（３，４月），2008，pp. 19－23）
………………………………………………………………佐伯康介，関戸広太，北折典之，高橋三男，中村幹彦
ラマン分光の物質工学実験への導入（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(2)号，2008，３，pp. 87－92）
………………………………………………………阿久沢　昇，小島洋一郎，土屋賢一，高橋三男，中野雅之
Study on Compatibility of Fullerene C_{60} Derivative with Polymers and Estimation of Electron Trapping Ability
（『Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.』vol. 32, No. 2, June 2007, pp. 325-328）
…………………………………T. Ide, K. Yamada, R. Yoshimura, T. Tada, H. Nishizawa, K. Todori, S. Machida
表面荒さがぬれ性に与える影響（平成19年度日本素材物性学会講演論文集，2007，pp. 43）……鈴木慎也，菊地　章
前処理が及ぼす摩擦力への影響
（平成19年度日本素材物性学会講演論文集，2007，pp. 46）……………………村松宗来，堀田信一，菊地　章
基板の表面強化に関する研究（平成19年度日本材料強度学会学術講演論文集，2007，pp. 1 ）……山内悠司，菊地　章
金属薄膜の成膜条件と密着性の関係
（平成19年度日本材料強度学会学術講演論文集，2007，pp. 3 ）……………………………井家上　修，菊地　章
摩擦力の測定法に関する研究
（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(1)号，2007，pp. 87）…竹中寛輝，堀田信一，積田裕介，菊地　章
プラスチック光ファイバーを用いた膜厚測定
（表面技術協会　第117回講演大会要旨集，2008，pp. 101）……松井はづき，菊地　章，松本茂昭，星野光男
移動型大気粉塵採取測定自動車“Snifer”により収集された道路粉塵の簡便迅速な遺伝子毒性測定装置による有害性評価（『学会誌「EICA」』12・2/3，2007年11月，pp. 90－91）
………………………………………………………………庄司　良，瀧上祐介，田口和之，田中良春，L Pirjola
Cadmium (Cd) and Lead (Pb) concentrations effects on yields of some vegetables due to uptake from irrigation water in Ghana（『International Journal of Agricultural Research』2008年１月）
………………………………………Mensah E., Allen HE, Shoji R, Odai SN, Kyei-Baffour N., Ofori E., Mezler D.
Effect of dissolved organic matter source on phytotoxicity to Lemna aequinoctialis
（『Aquatic Toxicology』87・２，2008年２月，pp. 210－214）…………………………………………………R. Shoji
Proton Conducting Solid Electrolytes Based on Diphosphates（*Phosphorous Research Bulletin* 21 (2007) pp. 31-37）

……………Takaaki Shirai, Shunsuke Satou, Yasukazu Saito, Morihiro Saito, Jun Kuwano, Hidenobu Shiroishi

Passive micro tubular direct formic acid fuel cells (DFAFCs) with chemically assembled Pd anode nano-catalysts on polymer electrolytes（*Electrochim. Acta,* 53 (2007) pp. 59-65） ……………………H. Qiao, H. Shiroishi, T. Okada

Effects of the Substitution of B-Site Ion on Oxygen Reduction Electrode Properties of $Pb_2Ru_2O_{7-\delta}$ in Aqueous Solutions（*Key Eng. Mater.,* 350 (2007) pp. 171-174）

………………………………Kenji Yoshihara, Yoshinobu Saito, Morihiro Saito, Jun Kuwano, Hidenobu Shiroishi

Oxygen Reduction Electrode Properties of the Ba (Ce, Gd, Ru) $O_{3-\delta}$ Oxides in Alkaline Aqueous Solution（*Key Eng. Mater.,* 350 (2007) pp. 183-186）

…………………………………Haruhiko Toda, Takeshi Chuma, Morihiro Saito, Jun Kuwano, Hidenobu Shiroishi

Oxygen Reduction Electrode Properties of Pyrochlores $Ln_2Ru_2O_{7-\delta}$ (Ln=Pr, Nd, Sm) in Aqueous Solutions（*Key Eng. Mater.,* 350, (2007) pp. 167-170）

……………Yoshinobu Saito, Kenji Yokota, Kenji Yoshihara, Morihiro Saito, Jun Kuwano, Hidenobu Shiroishi

Oxygen Reduction Electrode Properties of Perovskite-related Oxides Sr (Fe, Co, Ru) $O_{3-\delta}$ in Alkaline Aqueous Solution（*ITE letters on Batteries, New Technology・Medicine,* 8, No. 1, (2007) pp. 30-33）

…………………………………Takeshi Chuma, Haruhiko Toda, Morihiro Saito, Jun Kuwano, Hidenobu Shiroishi

物質工学科における基礎化学的知識の習得度と実験授業改善(1)（『東京工業高等専門学校研究報告書』第39(1)号，2008，１，pp. 93－98）……城石英伸，雑賀章浩，工藤節子

東京高専における新入生向け体験重視型専門基礎教育～その５　物質工学分野～（『平成19年度工学・工業教育研究講演会講演論文集』(2007) pp. 574－575）

……………………………………………………………………………………………城石英伸，雑賀章浩，中野雅之

パイロクロア型酸化物の光化学的水の酸化能ならびにプロトン還元能の研究（『太陽／風力エネルギー講演論文集』(2007) pp. 261）

…………………………………………………………………森　尚久，城石英伸，斉藤芳信，齋藤守弘，桑野　潤

中温作動型プロトン導電性リン酸塩電解質の研究（『太陽／風力エネルギー講演論文集』(2007) pp. 279）

…………………………………………………坂本克矢，城石英伸，白井貴章，佐藤俊輔，齋藤守弘，桑野　潤

固体高分子形燃料電池の長寿命化の研究（『太陽／風力エネルギー講演論文集』(2007) pp. 287）……………岡谷一輝，城石英伸，羽地聖和，松田直樹

光導波路分光法による固／液界面への色素吸着様式の研究（『太陽／風力エネルギー講演論文集』(2007) pp. 307）…………井上友里江，城石英伸，綾戸勇輔，松田直樹

What is spin-magnetic moment of electron?（『Physics Letters A』vol. 372，2008年１月，pp. 381－386）……………Sigeru SASABE, Ken-ichi TSUCHIYA

２．学会における口頭発表

一般教科（人文社会系・英語系）

ポーズ有りとポーズ無しの「聞きながら読み」および「繰り返し読み」の読解力への効果調査―補足調査（国立高専機構主催平成19年度教育教員研究集会，2007年８月９日，岐阜）………………………………相澤俊行

オーセンティック教材を使った「聞きながら読み」によるリーディング指導―実践とその効果―（全国高専英語教育学会第31回研究大会，2007年９月２日，京都）………………………………………相澤俊行

アンケートに見る全国高専の技術者倫理教育の現状分析（その１）―東京工業高等専門学校技術者倫理教育の実践的取り組み―（日本工学教育協会，平成19年度工学・工業教育研究後援会，2007年８月５日，pp. 458－459）

…………………………………………………………………河村　豊，川北晃司，浅野敬一，木村　南，庄司　良

Wartime Science Policy in Japan, 1931-1945 Ruhr-Universitat Bochum, Research Seminar, 4th December, 2007（ルール大学ボッフム東アジア学部，日本史学科主催研究会，2007年12月４日）………………………河村　豊

多読を授業にとりいれてみよう（高校・高専の部）（日本多読学会第６回多読教育ワークショップ新人セミナー，2007年８月）……………………………竹田恒美

国際コミュニケーションスキルとしての英語力（国立高専機構主催教員研究集会最終報告書『高専における国際性豊かな人材育成の現状と課題』

2008年３月，pp. 119－125）……竹田恒美

高専における国際交流行事――東京高専の場合

（関東工学教育協会高専部会第６回部会特別講演会，2007年12月）……竹田恒美

内部告発と予防原則―技術者倫理教育にいかに取り入れるか―

（日本工学教育協会第55回年次大会『平成19年度工学・工業教育研究講演会講演論文集』，2007，８，pp. 212－213）……川北晃司，河村　豊，浅野敬一，木村　南，庄司　良

The Effect of Shadowing on Prosody（日本英語音声学会，2007年12月２日，pp. 208－217）……Tomoko HORI

一般教科（数学系・物理系）

エルデスの不等式について

（日本数学教育学会全国大会（高知）2007，８，pp. 504）……豊成敏隆，佐藤義隆，五十嵐　貫

エルデスの不等式とある行列の固有値（第26回数理科学講演会，2007，９）……豊成敏隆，佐藤義隆，五十嵐　貫

国費留学生出身国における数学教育（スリランカ，ラオス，モンゴル）

（日本数学教育学会全国大会（高知）2007，８，pp. 502）……佐藤義隆

国立高専第３学年学習到達度試験とその周辺（数学教育の会（学習院大），2008，１）……佐藤義隆，長水壽寛

3-Interval Exchange Transformations and its Odometer Representation

（研究集会「数論とエルゴード理論」，2008年４月，金沢大学サテライトプラザ）……Yuko ICHIKAWA

On 3-Interval Exchange Transformations

（研究集会「数論とエルゴード理論」東京セミナー，2007年９月，文京学院短期大学）……Yuko ICHIKAWA

機械工学科

CFRP 製品の低コスト化技術開発（第２報）

（自動車技術会2007年度春季講演大会，2007年５月，前刷集 No. 50－07，高分子材料・塗装，pp. 7－12）……木村　南

バルジ成形を用いた CFRP サンドイッチ構造角パイプの試作

（平成19年度日本塑性加工学会春季講演大会，2007年５月，pp. 266－265）……木村　南，成瀬太一

超塑性アルミ5083合金の金型凹凸の転写性

（平成19年度日本塑性加工学会春季講演大会，2007年５月，pp. 301－302）……木村　南，杉林秀之

ユニモルフ型アクチュエータの試作

（2007年度マイクロメカトロニクス学術講演会，2007年９月，pp. 13－14）……木村　南，岡田健志

HDD 内蔵型携帯電子機器筐体の試作

（2007年度マイクロメカトロニクス学術講演会，2007年９月，pp. 27－28）……木村　南

CFRP 製スポーツ用ボードの試作（第58回塑性加工連合講演会，2007年10月，pp. 393－394）……木村　南

バルジ成形を利用した CFRP 製環状部品の試作

（第58回塑性加工連合講演会，2007年10月，pp. 565－566）……木村　南，清水悠太

IC タグ・個人認証をめぐる情報倫理の課題と配慮型設計―東京高専技術者倫理教育の実践的とりくみ―

（平成19年度工学・工学教育研究講演会，2007年８月）……木村　南，河村　豊，川北晃司，浅野敬一，庄司　良

ノート PC 用外付けアルミ外板サンドイッチパネル筐体の試作

（軽金属学会第113回秋期大会，pp. 331－332）……木村　南

ピエゾフィルムを利用した機械式動ひずみ検出器の試作

（日本非破壊検査協会2007年度春期講演大会講演概要集，2007年５月，pp. 221－222）…石塚耕三，黒崎　茂

ピエゾケーブルを用いた動ひずみ測定法

（日本非破壊検査協会2007年度春期講演大会講演概要集，2007年５月，pp. 223－224）…黒崎　茂，齋藤久嘉

圧電フィルムを用いたひずみ分布計測データの画像処理による可視化

（日本実験力学会2007年度年次講演会講演論文集，2007年８月，pp. 212－216）……清水　智，黒崎　茂

ピエゾケーブルを利用した一定繰返し負荷によるひずみ測定法

（日本機械学会2007年度年次大会講演論文集，2007年９月，pp. 289－290）……黒崎　茂，齋藤久嘉

ピエゾケーブルを利用した一定繰返し荷重下によるひずみ測定法（第２報：負荷周波数の補正実験式）

（日本機械学会・M&M2007材料力学コンファレンス講演論文集，2007年10月，pp. 344－345）
……齋藤久嘉，黒崎　茂
ピエゾケーブルを用いた自動車用ハブボルトの軸力検出の試み
（日本非破壊検査協会2007年秋期講演大会講演概要集，2007年10月，pp. 211－212）……田村信一，黒崎　茂
ピエゾフィルムシートを利用したフランジ継手締結強度の信頼性検出
（日本非破壊検査協会2007年秋期講演大会講演概要集，2007年10月，pp. 213－214）
………………………………………………………………………………………………黒崎　茂，吉住直也，下井信浩
ピエゾフィルムを用いた動ひずみ聴診器の試作
（日本非破壊検査協会2007年秋期講演大会講演概要集，2007年10月，pp. 215－216）……須永直樹，黒崎　茂
ピエゾケーブルを用いた自動車用ハブボルトの軸力検出の試み―第二報　ひずみゲージとの比較―
（日本非破壊検査協会第39回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム，2008年１月，pp. 53－58）
……田村信一，黒崎　茂
ピエゾフィルムシートを利用したフランジ継手部の強度検出モニタリング
（日本非破壊検査協会第39回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム，2008年１月 pp. 147－150）
……花枝　賢，黒崎　茂
ピエゾケーブルを用いたボルト継手部分の締結モニタリング
（日本非破壊検査協会第39回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム，2008年１月，pp. 143－146）
……宮坂拓矢，黒崎　茂
ピエゾケーブルを用いた自動車用ハブボルトの軸力検出の試み
（八王子産学公連携機構・第７回研究成果発表講演会，2007年12月，pp. 200－201）……田村信一，黒崎　茂
ピエゾフィルムを用いたフランジ継手部の強度検出モニタリング
（八王子産学公連携機構・第７回研究成果発表講演会，2007年12月，pp. 202－203）……花枝　賢，黒崎　茂
高分子圧電フィルムを用いた動ひずみ聴診器の試作
（八王子産学公連携機構・第７回研究成果発表講演会，2007年12月，pp. 220－221）……須永直樹，黒崎　茂
応力聴診器を利用した欠陥の検出の試み
（八王子産学公連携機構・第７回研究成果発表講演会，2007年12月，pp. 238－239）……長田真紀，黒崎　茂
接着剤硬化によるゴム材料の特性試験
（日本機械学会・関東学生会第47回学生員卒業研究発表講演会，2008年３月，pp. 75－76）
……坪根広大，黒崎　茂
応力聴診器を利用した欠陥の検出の試み
（日本機械学会・関東学生会第47回学生員卒業研究発表講演会，2008年３月，pp. 83－84）
……長田真紀，黒崎　茂
Computational Study on Cavitation Flow at Inception and Light Stages
―Test Cases of Axial-Flow Pump Blade and Cage-Guided Control Valve―
(8th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Lyon, France, July 2-5, 2007, pp. 921-929)
……………………………………………………Masahiro SHIBATA, Hideo FUKAE, Sumio SAITO, Eisuke OUTA
風車翼特性と流動状態に関する研究（八王子産学公連携機構　第７回研究成果発表講演会，2007，12，pp. 190－191）
………………………………………………………………………………………………市川達也，山科貴裕，斉藤純夫
風車用翼型の流体力学的特性と流動状態
（第15回関東高専卒業研究発表交流会講演論文集，2008，３，No. 101）………山科貴裕，市川達也，斉藤純夫
風車用翼型の特性評価と流動状態の検討
（日本機械学会・関東学生会第47回学生員卒業研究発表講演会，2008，３，pp. 183－184）
………………………………………………………………………………………………市川達也，斉藤純夫，山科貴裕
非調質ボルトの強度評価について
（日本機械学会東北支部第43期総会・講演会講演論文集，2008，３，pp. 135－136）
………………………………………………………………………………小林光男，福田勝己，田中　稔，田中道彦
高圧設備におけるねじ構造の荷重分布の解析
（日本機械学会東北支部第43期総会・講演会講演論文集，2008，３，pp. 141－142）

……………………………………………………………………………田中　稔，田中道彦，小林光男，福田勝己

衝撃荷重を受けるねじ締結体の軸力挙動について（第２報：初期締付け力の影響）

（日本機械学会中国四国支部第46期総会・講演会講演論文集，2008，３，pp. 345－346）

……………………………………………………………………………………………小林光男，大石久己，福田勝己

マイクロ・ナノ転写法によるパターニング評価

（日本機械学会北陸信越支部第45期総会・講演会講演論文集，2008，３，pp. 341－342）

…………………………………………………福田勝己，下山　勲，尾上弘晃，西嶋拓哉，小林光男，鈴木健司

小ねじの締付け特性に及ぼす潤滑の影響

（日本機械学会北陸信越支部第45期総会・講演会講演論文集，2008，３，pp. 383－384）

……………………………………………………………………………………………福田勝己，小林光男，鷹津俊史

微小領域におけるトライボロジー評価（第１報：摩擦速度の影響）

（日本機械学会北陸信越支部第45期総会・講演会講演論文集，2008，３，pp. 385－386）

…………………………………………………福田勝己，小林光男，鈴木健司，堤　博貴，飯田貴大，小澤直樹

微小領域におけるトライボロジー評価（第２報：押付け荷重の影響）

（日本機械学会北陸信越支部第45期総会・講演会講演論文集，2008，３，pp. 387－388）

…………………………………………………福田勝己，小林光男，鈴木健司，堤　博貴，飯田貴大，小澤直樹

部分安定化ジルコニアの生理食塩水中にトライボロジー特性評価

（日本機械学会北陸信越支部第45期総会・講演会講演論文集，2008，３，pp. 389－390）

……………………………………………………………………………福田勝己，小林光男，堤　博貴，神津友貴

地域教育を通して子供達との連携（第７報）

（日本機械学会技術と社会部門講演会（技術と社会の関連を巡って：過去から未来を訪ねる）講演論文集，

No. 07－97，2007，12）………………………………………………………………亀井秀也，大澤英一，福田勝己

衝撃荷重を受けるねじ締結体の軸力挙動の検討

（日本設計工学会平成19年度秋季大会研究発表講演会論文集，No. A－９，2007，９，pp. 29－32）

…………………………………………………………………小林光男，福田勝己，鈴木健司，丹羽直毅，北郷　薫

衝撃荷重を受けるチタン合金製ボルトの強度

（日本機械学会関東支部第３回埼玉ブロック大会（講演会）講演論文集，2007，９，pp. ３－４）

……………………………………………………………………小林光男，斉藤　望，八戸英夫，福田勝己，久保田義弘

衝撃荷重を受けるねじ締結体の強度

（日本機械学会関東支部第３回埼玉ブロック大会（講演会）講演論文集，2007，９，pp. ５－６）

…………………………………………………………………小林光男，保田拓郎，青木孝浩，福田勝己，堤　博貴

トルク法による小ねじの締付け特性に及ぼす潤滑の影響

（日本機械学会2007年度年次大会講演論文集(4)，2007，９，pp. 57－58）

……………………………………………………………………………福田勝己，小林光男，岡本恭明，近松宏行

ねじの規格における材料試験法の問題（第１報：衝撃強度）

（日本機械学会2007年度年次大会講演論文集(4)，2007，９，pp. 69－70）

……………………………………………………………………小林光男，一之瀬和夫，福田勝己，田中道彦，丹羽直毅

マイクロオーダーにおける摩擦特性評価（第４報）

（日本機械学会2007年度年次大会講演論文集(4)，2007，９，pp. 141－142）

…………………………………………………………………福田勝己，小林光男，鈴木健司，澤田　崇，堤　博貴

小ねじの締付け特性（第２報）（日本設計工学会2007年度春季研究発表会講演論文集，2007，５）

……………………………………………………………………………真山　知，小林光男，福田勝己，舟山義弘

東京高専における新入生向け体験重視型専門基礎教育～その１　機械工学分野～

―自動車模型製作と完成品のコンテストを通した学生のエンジニアマインド育成の取り組み―

（日本工学教育協会平成19年度工学・工業教育研究講演会，2007年８月，pp. 556－557）

…………………………………………………清水昭博，福田勝己，森下達哉，堤　博貴，鈴木塔二，米谷雄介

圧電シートを用いたフランジ継手締結強度の信頼性モニタリング

（第38回応力・ひずみ測定と強度評価のシンポジウム予稿集，2007，１，pp. １－６）

…………………………………………………………………………吉住直也（東京高専），黒崎　茂，下井信浩

非破壊検査機器の現状と将来動向（財務省税関局，税関検査機器の検討委員会，2007，３）…………………下井信浩
移動機構を備えたモーションベースの試作
（2007年度マイクロメカトロニクス学術講演会講演論文集，2007，９，pp.９－10）……多羅尾　進，小岩俊彦
地域の小学生科学教室と連携したロボット製作体験講座
（第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，2007，９，1B13）
……………………………………………………………………多羅尾　進，松林勝志，津田　潔，三谷知世
移動機構を用いた力覚呈示デバイスの試作（八王子産学公連携機構第７回研究成果発表講演会，2007，12）
……………………………………………………………………小林宗嗣，石川達矢，北川一知，多羅尾　進
小型モータの性能評価システムの構築と評価実験
（日本機械学会関東支部　関東学生会第47回学生員卒業研究発表講演会，2008，３）…柏田知洋，多羅尾　進
スカーフ接着継手の衝撃引張り強度特性（第232回材料試験技術シンポジウム，2007年７月）……志村　穣，田宮高信
JAVA を用いたコースティックス法測定システムの開発―応力拡大係数測定システムの開発と検証―
（第232回材料試験技術シンポジウム，2007年７月）……………………田宮高信，鈴木恭平，朴　宏，志村　穣
全日本学生室内飛行ロボットコンテスト「飛行機部門」における競技用機体の設計・製作
（第13回スカイスポーツシンポジウム講演集，2007年12月，pp.62－65）
…………………………………………………平　英享，石鍋治己，青木　将，志村　穣，宮野智行，飯野　明
算術幾何平均による弾性接触圧力の計算
（2007年度日本機械学会年次大会公演論文集，vol.４，2007年９月，pp.129－130）
………………………………………………………………………根本良三，竹居賢治，田村恵万，志村　穣
工作用定盤面仕上げのための自動きさげ加工機の開発
（日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集，vol.14，2008，３，pp.67－68）
…………………………………………………………谷合章吾，岸野　智，堤　博貴，福田勝己，久曽神煌
きさげ仕上げされたすべり案内面のトライボロジー特性評価（第２報）―面形状と摩擦特性の関係について―
（日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集，vol.14，2008，３，pp.69－70）
…………………………………………………………関水巧実，原田　徹，堤　博貴，福田勝己，久曽神煌
きさげ仕上げされたすべり案内面のトライボロジー特性評価
（日本機械学会中国四国支部・九州支部合同企画講演会講演論文集，vol.2007，2008，３，pp.109－110）
………………………………………………………………………………………堤　博貴，福田勝己，久曽神煌

電気工学科

電力系統解析技術をテーマにした高学年・専攻科電気工学実験への試み
（『独立行政法人　国立高等専門学校機構　教育教員研究集会』2007年８月）……………………………土井　淳
熟練ノウハウの継承を目指した電力技術者教育方法のシステム化検討
（『平成19年電気学会　電力・エネルギー部門大会』2007年９月）…………………………京本寿美恵，土井　淳
機械端加速度フィードバックによる２次共振抑制
（平成20年電気学会全国大会，2008年３月，平成20年電気学会全国大会講演論文集４，2008年３月，
pp.298－299）………………………………………………………………………………古儀史也，松井義弘
層状化合物半導体 GaS 薄膜の低温ヘテロエピタキシーに関する研究
（第68回応用物理学会学術講演会，2007年９月，pp.668）………………………田中康之，伊藤　浩，大山昌憲
反応性 DC スパッタリング法による SiO_2膜の基板バイアス効果
（第55回応用物理学会関係連合講演会，2008年３月，pp.216）…………………伊藤　浩，川又由雄，大山昌憲
誘導性回路における炭素電極開離アークの継続時間
（電子情報通信学会　機構デバイス研究会，2007年10月19日，電子情報通信学会技術研究報告，
vol.107，No.272，pp.19－24）………………………………………………………………………………須原啓一
炭素電極開離アークの電圧電流特性式／～新しく提案した特性式とエアトン式の比較～
（電子情報通信学会　機構デバイス研究会，2008年１月25日，電子情報通信学会技術研究報告，
vol.107，No.457，pp.１－５）………………………………………………………………………………須原啓一
東京高専における新入生向け体験重視型専門教育～その２　電気工学分野～
（平成19年度工学・工業教育研究講演会講演論集，2007，１，pp.568－569）

……………………………………………………木村知彦，山内峯生，羽鳥広範，松岡　敏，土井　淳，大貫繁雄

電子工学科

候補点解析による劣化指紋画像からの高精度特異点抽出手法
（八王子市産学連携機構第 7 回研究成果発表講演会要旨集，2007，12，pp. 258－259）…渡辺大輔，大塚友彦

画像輪郭を保存するインパルス性ノイズ除去に関する研究
（八王子市産学連携機構第 7 回研究成果発表講演会要旨集，2007，12，pp. 260－261）
……………………………………………………………………………………………佐々木　誉，大塚友彦

輪郭情報を用いたインパルス画像雑音除去に関する研究
（『2007年電子情報通信学会ソサイエティ大会，基礎・境界講演論文集』2007，９，pp. 87）
……………………………………………………………………………………………佐々木　誉，大塚友彦

東京高専における新入生向け体験重視型専門基礎教育～概要報告～
（『日本工学教育研協会第55回年次大会講演論文集』2007，８，pp. 564－565）
……………………………………………………大塚友彦，清水昭博，大貫繁雄，西村　亮，城石英伸，羽鳥広範

東京高専における新入生向け体験重視型専門基礎教育～その３　電子工学分野～
（平成19年度工学・工業教育研究講演会講演論文集，2007年８月，pp. 570－571）
………………………………………………………………一戸隆久，加藤　格，新田武父，大塚友彦，正木　進

Fabrication of Silver Oxide Films using Reactive Bias Sputter-Deposition
（American Vacuum Society 54th International Symposium, TF-TuP13, Seattle, WA, Oct. 2007）
……………………………………Takahisa ICHINOHE, Mitsuo IWASE, Susumu MASAKI, Koichi KAWASAKI

反応性バイアススパッタリング法による銀酸化物薄膜の形成
（日本材料科学会平成19年度学術講演大会講演予稿集，2007年５月，pp. 45－46）
…………………………………………………………………………一戸隆久，岩瀬満雄，正木　進，川崎宏一

イオンビームスパッタリング法による PET 材料への ITO 薄膜の形成
（日本材料科学会平成19年度学術講演大会講演予稿集，2007年５月，pp. 47－50）
………………………………………………………………一戸隆久，岩瀬満雄，大島雅博，西原孝義，正木　進

熱電発電用最大電力追尾装置の開発（第４回日本熱電学会学術講演会，2007年）……徳光賢大，永吉　浩，梶川武信

ホットフィラメント法による Si 系ウィスカーの成長と評価（第54回応用物理学関係連合講演会，2008年）
…………………………………………蝶名林幹也，Alexander ULYASHIN，Heidi NORDMARK，永吉　浩

熱電発電用最大電力追尾装置の開発（第54回応用物理学関係連合講演会，2008年）…徳光賢大，梶川武信，永吉　浩

Si 基板上 BP エピタキシャル層の転位（37回結晶成長国内会議，2007年）……………徳光賢大，梶川武信，永吉　浩

情報工学科

東京高専におけるくくり相当入試
（㈳日本工学教育協会　工学・工業教育研究講演会講演論文集，８－101，July，2007，pp. 32－33）
……………………………………………………………………………………小坂敏文，三谷知世，潮　秀樹

新入生向け技術マインド育成のための工学系共通基礎教育「ものづくり基礎工学」
（平成19年度高専教育講演論文集（岐阜），2007，８，pp. 279－282）
……………………………………小坂敏文，大塚友彦，清水昭博，大貫繁雄，西村　亮，城石英伸，羽鳥広範

RTOS を用いた，屋内用床磨きポリッシャーロボットに関する研究
（八王子産学公連携機構　第７回研究成果発表講演会，2007，12，RNO4−103）…………井口了太，小坂敏文

主観・客観表現に着目した Web ページのカテゴライゼーション
—文末の終助詞，助動詞，表明思考動詞を用いた判別法
（八王子産学公連携機構第７回研究成果発表講演会，2007，12）………………本間夏海，松本章代，鈴木雅人

Web 文書を活用した n-gram モデルによる手書き自由記述アンケートの自動認識法
（情報処理学会自然言語処理研究会，2008-NL-183，2008，１，pp. 141－148）
……………………………………………………………………………………泉谷達庸，松本章代，鈴木雅人

論理的思考の定着をねらいとした基礎数学 e－ラーニングシステムに関する一検討
（電子情報通信学会2008年総合大会講演論文集，2008，３）……鈴木雅人，山田恭一郎，松本章代，吉本定伸

理工系学生を対象とした論文における文章作成能力の向上を促すシステムの開発
(電子情報通信学会2008年総合大会学生ポスターセッション，2008，3）……田中大輔，松本章代，鈴木雅人
環境教育の推進を目的とした廃棄物を出さない魚と野菜の同時生産システムの開発
—アクアポニックスシステムにおける硝化サイクルの完成課程—
(日本環境学会第33回研究発表会講演予稿集，2007，7，pp. 221－224)
………………………………………………………………………………中川文寛，松林勝志，小坂敏文，三谷知世
汚水を出さない魚と野菜の同時生産（アクアポニックス）システムに関する研究
—アクアポニックスシステム稼働前の硝化サイクルの確立—
(機械学会第17回環境工学総合シンポジウム2007　講演論文集，2007，7，pp. 183－186)
…………………………………………………………………松林勝志，中川文寛，半田真帆，小坂敏文，三谷知世
廃棄物を出さない魚と野菜の同時生産システム（アクアポニックス）に関する研究
—野菜を育てるための水質調整とシステムの運用—
(八王子産学公連携機構第7回研究成果発表講演会要旨集，2007，12，pp. 226－227)
……………………………………………………………………………………………中川文寛，半田真帆，松林勝志
サレジオ高専プロジェクト教育　その3～Imagine Cup 世界大会を目指した東京高専との競争・連携取り組み～
(平成19年度工学・工業教育研究講演会講演論文集，2007，8，pp. 640－641)
………………………………………………………市村　洋，吉野純一，松林勝志，小嶋徹也，蛭田雄一，荒川淳平
東京高専における新入生向け体験重視型専門基礎教育～その4　情報工学分野～
—情報工学体験教材としてのプログラミング入門—
(平成19年度工学・工業教育研究講演会講演論文集，2007，8，pp. 572－573)
…………………………………………………………………西村　亮，松林勝志，鈴木　孝，松本章代，羽鳥広範
地域の科学教育センターと連携したものづくり教育　第1報
—初等中等教育機関と高等教育機関が連携した工学教育—
(平成19年度工学・工業教育研究講演会講演論文集，2007，8，pp. 384－385)
……………………………………………………松林勝志，多羅尾　進，福田晴男，篠山哲雄，津田　潔，三谷知世
初等教育機関と高等教育機関が連携した工学教育事例，現代的教育ニーズ取組支援プログラム
(ものづくりリテラシー教育フォーラム2007概要集　—技術教育の現状と将来—，2007，10，pp. 21－26)
………松林勝志
On a Convoluted-Time and Code Division Multiple Access Communication System Using Complete Complementary Codes
(2007 International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications, September, 2007, pp. 30-33) ………………………………………………………………………Tetsuya KOJIMA, Masahiro AONO
On a Convoluted-Time and Code Division Multiple Access and Conventional CDMA Based on Complete Complementary Codes
(第30回情報理論とその応用シンポジウム，2007，11，pp. 66－71) ………Tetsuya KOJIMA, Masahiro AONO
複素数値信号のブラインド信号分離およびその応用に関する研究
(八王子産学公連携機構　第7回研究成果発表講演会，2007，12，pp. 122－123)
……………………………………………………………………………………………中本顕正，小嶋徹也，青野正宏
完全相補系列を用いた CDMA システムの応用に関する研究
(八王子産学公連携機構　第7回研究成果発表講演会，2007，12，pp. 126－127)
……………………………………………………………………………………………森本晃弘，小嶋徹也，青野正宏
テクノ・ガールズ！　～マンスリー・サイエンス・フェスタ in TOKYO-KOSEN
(女性研究者支援モデル育成事業等合同シンポジウム　—女性研究者等の活躍促進のために—，2008，2，pp. 14－15) ……………………………………………………………………………………………小嶋徹也
利用状況の動的変化に対応するブックマーク情報提示システムの提案
(第8回 AI 若手の集い MYCOM2007，2007，6，CD-ROM)…………………北越大輔，塩谷浩之，中野良平
分布クラスタリングを用いた強化学習エージェントの方策改善に関する一検討
(第40回計測自動制御学会北海道支部学術講演会，2008，1，pp. 87－88) …山口晃昌，北越大輔，塩谷浩之

物質工学科

H2-sorption by potassium-graphite intercalation compounds（Extd. Abstr. Int. Conf. Carbon (2007 July, Seattle), D064）
……………………………………………Noboru AKUZAWA, Tomoki KAMOSHITA, Manabu HAGIWARA, Morio CHIWATA, Rika MATSUMOTO

Thermoelectric properties of graphite intercalation compounds
（Extd. Abstr. Int. Conf. Carbon (2007 July, Seattle), A072）……………Rika MATSUMOTO, Noboru AKUZAWA

グラファイトー塩化鉄ーアンモニア三元系化合物の合成
（第34回炭素材料学会年会，2007年11月，別府市，pp. 156－157）
……………………………………………………………………橋村詩織，小島洋一郎，阿久沢　昇，松本里香

アルミナ溶融塩電解に伴うカソード黒鉛の構造と物性の変化
（第34回炭素材料学会年会，2007年11月，別府市，pp. 158－159）
…………………………………………………………南部隼外，萩原　学，阿久沢　昇，岡本龍也，今川　博

Rb-GICs のラマン分光によるキャラクタリゼーション
（第34回炭素材料学会年会，2007年11月，別府市，pp. 160－161）
………………………………………………………三山文葵，千綿司雄，阿久沢　昇，松本里香，曽根田　靖

AM-GICs のナノスペースの構造制御と水素吸収（第34回炭素材料学会年会，2007年１月，別府市，pp. 162－163）
……………………………………………………………………………………千綿司雄，阿久沢　昇，松本里香

Change of electrical resistivity of graphitized cathode block during and after electrolysis in alumina molten salts
（Abstract of TMS Annual Meeting & Exhibition (2008 March, New Orleans), pp. 187）
………………………………Yoshinori SATO, Hiroshi IMAGAWA, Noboru AKUZAWA, Manabu HAGIWARA

吸入製剤粒子の管内への付着率と流れの構造に関する基礎的研究
（第13回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム，2007年12月，2007，pp. 39－43）…矢崎将崇，石井宏幸

Mixing Characteristics in the Pilot Plant for Refining Process of Natural Rubber
（『The 8th Inter. Symposium “Global Renaissance by Green Energy Revolution”』，2008年１月，2008，pp. 250）……Hiroyuki ISHII, Siti Nadiah Biti NORULHUDA, Yoshimasa YAMAMOTO, Seiichi KAWAHARA

脱気水の洗濯への応用
（2007年電気化学秋期大会，2007年９月，1G18）………大野愛菜，小林　祥，北折典之，中村幹彦，柴山浩司

インピーダンス法によるパンの発酵度合いの測定（2007年電気化学秋期大会，2007年９月，1G19）
………………………………森屋静香，堀田なつみ，大野愛菜，飯田真美子，石川　彰，北折典之，高橋三男

QCM 法を用いたオゾンによる油分解の測定
（2007年電気化学秋期大会，2007年９月，1G20）………岩下知世，関戸広太，北折典之，高橋三男，中村幹彦

導電性ダイヤモンド電極を用いた小型オゾン水生成装置の開発(2)
（第31回電解技術討論会，2007年11月，pp. 81－84）…関戸広太，北折典之，錦　善則，柴田友康，古田常人

QCM を用いた化学現象の評価（2007年度材料技術研究協会討論会，2007年11月，1B−01）
…………………………………………………………堀田なつみ，関戸広太，北折典之，高橋三男，中村幹彦

過酸化水素の電気分解における漂白効果
（2007年度材料技術研究協会討論会，2007年11月，1B−02）……………………関戸広太，小松　剛，北折典之

電気化学的処理によるオゾン殺菌装置の冷却水への利用（2007年度材料技術研究協会討論会，2007年11月，1B−03）
……………………………………………………………柳谷怜美，関戸広太，北折典之，猿渡　篤，藤後　章

真空技術の家庭分野への応用（2007年度材料技術研究協会討論会，2007年11月，1B−04）
……………………………………………………………小林　祥，大野愛菜，北折典之，中村幹彦，柴山浩司

過酸化水素の電気分解を利用した漂白
（電気化学会第75回大会，2008年３月，1E21）………………………松石早矢，関戸広太，北折典之，高橋三男

脱気水を利用した衣類の洗濯
（電気化学会第75回大会，2008年３月，1E22）…………青木克冬，小林　祥，北折典之，中村幹彦，柴山浩司

過酸化水素水の電気分解とその応用（電気化学会第75回大会，2008年３月，1E23）…秋田真吾，関戸広太，北折典之

Characterization of the Trinuclear Complex Obtained by the Reaction of Europium (Ⅲ) Oxide with Diethylenetriaminepentaacetic Acid in Aqueous Solution（12th Asian Chemical Congress，2007年８月，p. 43）

……………………………………………Setsuko KUDO, Hajime, YAMAGISHI, Satoshi SASAKI, Akihiro SAIGA

カーボンナノチューブを修飾したグラッシーカーボン電極の電気化学的特性

（2007年電気化学秋季大会，2007年９月）…………………………小杉健一朗，星野　陽，西田有歩，工藤節子

磁場配向カーボンナノチューブ修飾電極の作製（第53回ポーラログラフィーおよび電気分析化学討論会，2007年11月）

………………………………………………工藤節子，茂木　巌，進藤大輔，赤瀬善太郎，石井正夫，釜谷　隆

カーボンナノチューブを修飾したグラッシーカーボン電極による［$Fe(CN)_6$］$^{4-}$／［$Fe(CN)_6$］$^{3-}$の電気化学的挙動

（日本化学会第88年春季年会，2008年３月）……………………小杉健一朗，工藤節子，進藤大輔，赤瀬善太郎

酸化ユウロピウム（Ⅲ）とジエチレントリアミンペンタ酢酸の反応による複核錯体の合成と性質

（日本化学会第88年春季年会，2008年３月）………………………佐々木　慧，工藤節子，町田　茂，雑賀章浩

複数のセンサ情報による液体の識別

（八王子産学公連機構第７回研究成果発表会，第５回はちおうじ企業・地域活性化アイデア発表会，2007，pp. 174～175）…………………………………………………………………吉田朋史，小島洋一郎，高橋三男

隔膜ガルバニ電池式酸素センサの作製とその教材開発

（八王子産学公連機構第７回研究成果発表会，第５回はちおうじ企業・地域活性化アイデア発表会，2007，pp. 245－255）……………………………………………………………………………………濱田麻美，高橋三男

オゾン-UV 処理により表面改質された各種医用高分子材料への血漿タンパク質吸着挙動

（第29回日本バイオマテリアル学会大会，2007）

……………………………………櫻井嘉人，落合　晃，高橋三男，北折典之，中村幹彦，川島徳道，徳岡由一

QCM を用いた化学現象評価

（2007年度材料技術研究協会討論会，2007，pp. 13－14）………堀田なつみ，関戸広太，北折典之，高橋三男

オゾン-UV 処理により表面改質された各種医用高分子材料への血漿タンパク質吸着挙動（Ⅱ）

（2007年度材料技術研究協会討論会，2007，pp. 185－186）

……………………………………櫻井嘉人，落合　晃，高橋三男，北折典之，中村幹彦，川島徳道，徳岡由一

マイクロ酸素センサを使った灌水条件下での根の表面酸素濃度の測定

（根の研究会第16巻第４号，2007年12月，pp. 174）……………………………………………高橋三男，仁木輝緒

筑波大学附属盲学校と東京工業高等専門学校の教材開発連携について

（第27回日本視覚障害理科研究会（JASEB），2007年７月26日）

…………………………………………………………………高橋三男，柚賀正光，小池清之，阿津勝博，新田武父

手作り酸素センサの開発と理科教育への活用⑹―酵母菌の呼吸―

（日本理科教育学会　第57回全国大会日本理科教育学会全国大会発表論文集第５号，pp. 146）

……………………………………………………………………………………高橋三男，園部幸枝，佐藤道幸

5, 5’―ジスチリル―2, 2’―ビチオフェン誘導体の合成と光学的・電気化学的特性に関する研究

（第18回日本 MRS 学術シンポジウム，2007年12月）…秋田康宏，井手智仁，町田　茂，森　敦紀，工藤一秋

PBLG-CRA 膜を用いたリオトロピック液晶の配向制御の研究

（八王子産学公連携機構第７回研究成果発表講演会，2007年12月）…………………………武藤真司，町田　茂

分子間水素結合ネットワークにより安定化した C_{60}含有 SAM 膜の作製

（八王子産学公連携機構第７回研究成果発表講演会，2007年12月）

…………………………………………………………………黒沢祐人，井手智仁，山田　紘，都鳥顕司，町田　茂

ライスワックスの食品添加物用途の開発（八王子産学公連携機構第７回研究成果発表講演会，2007年12月）

………………………………………………………………………………増田嘉丈，細木原睦士，中村太厚，町田　茂

リガンド間相互作用による金ナノ粒子の安定化の研究

（八王子産学公連携機構第７回研究成果発表講演会，2007年12月）

………………………土戸良高，井手智仁，秋田康宏，武藤真司，増田嘉丈，山田　紘，都鳥顕司，町田　茂

バイパス全線開通による NO_2濃度の変化（『第48回大気環境学会年会講演集』2007，９，PO3）…山田親義，三谷知世

東京高専における資源の有効利用と環境意識向上への取り組み

（『八王子産学公連携機構第７回研究成果発表講演会要旨集』2007，12，pp. 246－247）…佐伯和美，三谷知世

自動車から排出される NO_2および日常生活における NO_2曝露量の測定

（『八王子産学公連携機構第７回研究成果発表講演会要旨集』2007，12，pp. 248－249）…坪井基起，三谷知世

馴化活性汚泥による界面活性剤の生分解性

（『八王子産学公連携機構第 7 回研究成果発表講演会要旨集』2007，12，pp. 250－251）
…………………………………………………………………………………………………Tiew Chin Chin，三谷知世
凝集剤によるリン酸除去に関する研究
（『八王子産学公連携機構第 7 回研究成果発表講演会要旨集』2007，12，pp. 300－301）…山本巧介，三谷知世
焼成火山灰土壌と凝集助剤を用いた下水中溶存リン酸除去の実験室的検討
（『第42回日本水環境学会年会講演集』2008， 3 ，1-H-10-1）
…………………………………………………………………山﨑賢一，三谷知世，山本巧介，柳田友隆，江耀宗
金属薄膜の成膜条件と密着性の関係（第21回多摩応用物理研究会，2007，10月）………………井家上　修，菊地　章
表面粗さが濡れ性に与える影響（第21回多摩応用物理研究会，2007，10月）………………………鈴木慎也，菊地　章
前処理が及ぼす摩擦力への影響（第21回多摩応用物理研究会，2007，10月）………………………村松宗来，菊地　章
プラスチック光ファイバーを用いた薄膜センサに関する研究
（第21回多摩応用物理研究会，2007，10月）…………………………………………………松井はづき，菊地　章
基板の表面強化に関する研究（第21回多摩応用物理研究会，2007，10月）…………………………山内悠司，菊地　章
A study on the film using plastic optical fiber
（The 7th BIT-TNCT international Joint Symposium，2008， 3 月）…………Hazuki MATSU, Akira KIKUCHI
Integration of bioavailability and bioassay to evaluate ecotoxicity of waste and biomass ashes from the gasification test plant（SETAC Europe 17th Annual Meeting，2007年 5 月，129） …………………………………R. Shoji
Terrestrial Biotic Ligand Model による野菜の重金属蓄積量予測
（日本土壌肥料学会，2007年 8 月，pp. 170）…………………………………………………吉沢英里子，庄司　良
Estimation of combined metal effect on duckweed growth using the biotic ligand model (BLM)
（13th International Symposium on Toxicity Assessment，2007年 8 月，pp. 109）
………………………………………………………………………………………A. Hatano, R. Shoji, T. Beppu
Bioassay testing approach to predect toxicity and bioavailability of heavy metals in waste incineration ashes
（13th International Symposium on Toxicity Assessment，2007年 8 月，pp. 123）
……………………………………………………………………Y. Ueda, R. Shoji, S. Urata, S. Mohri, Y. Ono
焼却灰に含まれる重金属類の確率論的リスク評価（日本生態毒性学会，2007年 8 月，pp. 23）
……………………………………………井籐賀　操，小松由佳梨，須藤恵美，榊原　均，庄司　良，小野芳朗
蘚苔植物を利用した重金属の集積（バイオアッセイ研究会，2007年 8 月，pp. 29）
……………………………………………中村秦美，庄司　良，井籐賀　操，榊原　均，小松由佳梨，小野芳朗
移動型大気粉塵採取測定自動車“Snifer”により収集された道路粉塵の簡便迅速な遺伝子毒性測定装置による有害性評価（第19回環境システム計測制御学会，2007年11月，pp. 90－91）
……………………………………………………………庄司　良，瀧上祐介，田口和之，田中良春，L. Pirjola
Verification of terrestrial biotic ligand model to copper and Lanthanum toxicity to barley
（SETAC North America 28th Annual Meeting，2007年11月，pp. 269）……………Eriko Yoshizawa, Ryo Shoji
一般廃棄物焼却灰のバイオアッセイによる毒性試験データ表示法の検討
（第18回廃棄物学会研究発表会，2007年11月，pp. 996－998）
……貞国亮司，庄司　良，浦田真嗣，榊原　均，井籐賀　操，小松由佳梨，酒井康行，毛利紫乃，小野芳朗
農薬ボルドー液の長期施用による銅の土壌中への蓄積とその植物毒性
（第13回高専シンポジウム，2008年 1 月，pp. 35） ………………………………………………庄司　良，田中優也
海洋性発光微生物を用いた自動車排気ガス粉塵の細胞毒性と原因物質の推定
（第13回高専シンポジウム，2008年 1 月，pp. 132）………………………………瀧上祐介，貞国亮司，庄司　良
大気汚染物質の簡便迅速なオンサイト型細胞毒性評価システムを用いた生態毒性測定手法の開発
（第10回化学工学学生発表会，2008年 3 月，pp. 61） ………………瀧上祐介，貞国亮司，庄司　良，L. Pirjola
鉛のファイトレメディエーション適用に向けたヒョウタンゴケの鉛蓄積能力及び鉛耐性の評価
（第10回化学工学学生発表会，2008年 3 月，pp. 62）
……………………………………………………………中西弘貴，中村秦美，庄司　良，井籐賀　操，榊原　均
一般廃棄物からの重金属溶出量予測
（第10回化学工学学生発表会，2008年 3 月，pp. 63） ……………………………晴山和直，上田剛将，庄司　良
東京高専における新入生向け体験重視型専門基礎教育～その 5　物質工学分野～

―楽しく授業に役立つ化学実験と安全教育の導入―
（平成19年度工学・工業教育研究講演会，2007，８）……………………………城石英伸，雑賀章浩，中野雅之
酸化物ナノシートを用いた新規酸素還元電極触媒の研究
（2007年電気化学秋季大会，2007，９）……明星裕也，大野直隆，得能寛人，齋藤守弘，桑野　潤，城石英伸
光導波路分光法による固／液界面への色素吸着様式の研究⑷
（2007年電気化学秋季大会，2007，９）……………………………井上友里恵，城石英伸，綾戸勇輔，松田直樹
固体高分子形燃料電池カソード極白金触媒劣化防止剤の開発⑶
（2007年電気化学秋季大会，2007，９，19）…………………………岡谷一輝，羽地聖和，城石英伸，二又政之
種々の酸化物を用いた水の光分解に関する基礎科学的研究
（2007年電気化学秋季大会，2007，９）……森　尚久，城石英伸，古西敬之，齋藤芳信，齋藤守弘，桑野　潤
中温域でのエタノール電気化学的酸化反応（2007年電気化学秋季大会，2007，９）…坂本克矢，城石英伸，国松昌幸
PEFC 用カソード極触媒の劣化耐性の評価
（2007年電気化学秋季大会（1G26），2007，９）………羽地聖和，岡谷一輝，城石英伸，松田直樹，二又政之
シェルーコア型 TiP_2O_7基質プロトン導電性固体電解質
（第27回エレクトロセラミックス研究討論会（2P02），2007，10）
………………………谷本　智，蛭川峻介，白井貴章，佐藤俊輔，草野智弘，齋藤守弘，桑野　潤，城石英伸
種々の酸化物を用いた水の光分解に関する基礎科学的研究
（第27回エレクトロセラミックス研究討論会（2P29），2007，10）
…………………………………………………森　尚久，田極とり，城石英伸，齋藤芳信，齋藤守弘，桑野　潤
酸化物ナノシート構造体の酸素還元電極特性（第27回エレクトロセラミックス研究討論会（2P32），2007，10，19）
…………………………………………………明星裕也，大野直隆，得能寛人，齋藤守弘，桑野　潤，城石英伸
リン酸塩を用いた中温域プロトン導電性固体電解質の研究
（第27回エレクトロセラミックス研究討論会（2P38），2007，10）
…………………………………………………坂本克矢，城石英伸，白井貴章，佐藤俊輔，齋藤守弘，桑野　潤
パイロクロア型酸化物の光化学的水の酸化能ならびにプロトン還元能の研究
（平成19年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会，2007，10）
……………………………………………………………森　尚久，城石英伸，斉藤芳信，齋藤守弘，桑野　潤
中温作動型プロトン導電性リン酸塩電解質の研究
（平成19年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会，2007，10）
…………………………………………………坂本克矢，城石英伸，白井貴章，佐藤俊輔，齋藤守弘，桑野　潤
PEFC カソード極用 Pt/C 触媒の劣化耐性と担持量の関係
（平成19年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会，2007，10）
……………………………………………………………………………羽地聖和，城石英伸，岡谷一輝，松田直樹
固体高分子形燃料電池の長寿命化の研究
（平成19年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会，2007，10）
……………………………………………………………………………岡谷一輝，城石英伸，羽地聖和，松田直樹
光導波路分光法による固／液界面への色素吸着様式の研究
（平成19年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会，2007，10）
……………………………………………………………………………井上友里江，城石英伸，綾戸勇輔，松田直樹
白金劣化防止剤の高分子電解質への影響
（電気化学会第75回大会（1E17），2007，３）………………………立道一生，城石英伸，綾戸勇輔，松田直樹
Ｂサイト置換パイロクロア型酸化物における水の分解活性触媒能の研究（電気化学会第75回大会（1E18），2007，３）
………………………………………………中川由里絵，森　尚久，城石英伸，齊藤芳信，齋藤守弘，桑野　潤
３価イオン置換二リン酸塩をコアとするプロトン導電体（電気化学会第75回大会（1E19），2007，３）
………………………Dedy Eka Priyanto，坂本克矢，城石英伸，谷本　智，蛭川峻介，齋藤守弘，桑野　潤
劣化防止剤適用カソード触媒を用いた PEFC の発電特性⑴
（電気化学会第75回大会（1E20），2007，３）……………………………………馬場恒生，岡谷一輝，城石英伸
A New Approach to Observe Optical Phonon in Hydrogen Storage Pd Using Raman Spectroscopy
（(JCF8　2007年11月29日)，Proceedings of the 8th Meeting of Japan CF Research Society, pp. 1-4）

……………………………………Ken-ichi TSUCHIYA, Shinnosuke ASANO, Masao OZAKI, Shigeru SASABE

Change of Coulomb Potential of Electron due to Band Structure in Semiconductor

（(JCF8　2007年11月29日)，Proceedings of the 8th Meeting of Japan CF Research Society pp. 31-35）

……………………………………………………Shigeru SASABE, Ken-ichi TSUCHIYA, Kyota WATANABE

教育研究技術支援センター

圧電高分子フィルムを用いた疾患診断用足裏荷重測定具の試作

（応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集，2008，１，pp. 213－216）…中村源一郎，黒崎　茂

模型自動車モデルの機械加工製作によるものづくり実践授業―第３報　実習アンケートの集計と分析―

（日本工学教育協会第55回年次大会講演論文集，2007，８，pp. 370－371）

………………………………………………中村源一郎，清水昭博，福田勝己，黒崎　茂，藤野　宏，海津朋之

小学生を対象とした夏休み公開講座「電子工作入門」について

（日本工学教育協会第55回年次大会講演論文集，2007，８，pp. 174－175）

……………………………………………………………福井繁雄，羽鳥広範，松岡　敏，村田賢俊，新田武父

3．その他

⑴学位取得・学会賞・論文賞

Exploring Shadowing as a Method of English Pronunciation Training

（Doctor of Philosophy Dissertation, The Graduate School of Language, Communication, and Culture, Kansei Gakuin University, 2008, October）……………………………………………………………Tomoko HORI

ターボ機械協会　第18回畠山研究助成金受賞　環境適合型風車用翼まわりの流れ場の解明とその応用技術の開発

（ターボ機械協会，2007年５月）…………………………………………………………………………斉藤純夫

優秀発表賞（市川達也，山科貴裕）受賞　風車翼特性と流動状態に関する研究

（八王子産学公連携機構第７回研究成果発表講演会，2007，12，pp. 190－191）

………………………………………………………………………………市川達也，山科貴裕，斉藤純夫

⑵科学研究費補助金（研究実績報告書，研究成果報告書）等

『高度英語リーディング教材指導システムとコースウェアの開発』

（平成17～19年度科学研究費補助金（基盤研究⒞）研究成果報告書　2008年３月，111頁）

………………………………研究代表者：相澤俊行　研究分担者：吉本定伸，古家貴雄，John Wade GATES

高専の特色に立脚した英語教育プログラムの開発とその実用化

基盤研究⒝　課題番号19320093（2007）…………………………亀山太一，小澤志朗，武田　淳，村井三千男

試作ピエゾセンサーによる機器安全保持のためのひずみモニタリング方法

基盤研究⒞　課題番号18510152（2006年度～2007年度）………………………黒崎　茂，斉藤純夫，清水昭博

ポーラリメトリック・インターフェロメトリックレーダによる地雷検知に関する研究

研究実績報告書　基盤研究⒮　課題番号14102024（2007．５）

………………………………………………………研究代表者：佐藤源之　研究分担者：下井信浩　他５名

拡張隣接グラフとニューラルネットを応用したバイオメトリック情報からの特徴抽出

基盤研究⒞　課題番号19560403（2007年度～2008年度）……………………………………大塚友彦，青木宏之

『みる・きく・はかる』エレクトロニクス体験学習

「ひらめき工房アジレント」助成プログラム実施報告書（2007年度）…………大塚友彦，青木宏之，一戸隆久

産学連携報告：室内空間のアクティブ消音システム（ANC）に関する研究中間報告

INC エンジニアリング報告会，2007，12，pp. １－37 ………………………………………小坂敏文，内野敬太

室内空間のアクティブ消音システム（ANC）に関する研究最終報告

INC エンジニアリング報告会，2008，３，pp. １－59 ………………………………………小坂敏文，内野敬太

論理的思考力の定着を目的とした基礎数学学習 e-ラーニングシステムの設計と開発

研究実績報告書　基盤研究⒞　課題番号19500842（2008年３月）

……………………………………………………………………鈴木雅人，大塚友彦，吉本定伸，松本章代

廃棄物を出さない魚と野菜の循環生産システム（アクアポニックス）による環境教育研究
平成18年度科学研究費補助金実績報告書　萌芽研究　課題番号18650239（2006－2007年度，2007，５）
……松林勝志

ロボット製作体験講座「見て・触って・考えて・作ってみよう」
（平成19年度　㈱科学技術振興機構サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト講座型学習活動プランＢ
報告書，pp. １－85，2008，３）………松林勝志，多羅尾　進，小池清之，吉本定伸，津田　潔，小坂敏文

廃棄物を出さない魚と野菜の循環生産システム（アクアポニックス）による環境教育研究
平成19年度科学研究費補助金実績報告書　萌芽研究　課題番号18650239（2006－2007年度，2008，５）
……松林勝志

ベイジアンネット混合モデルを用いた環境適応型オンライン学習システム
若手(B)　課題番号19700138（2007年度～2008年度）……………………………………………………北越大輔

磁場配向 CNT 修飾電極の作製
平成18年度年次報告書　東北大学附属強磁場超伝導材料研究センター共同利用研究　採択番号1397
（2007年６月）……………………………工藤節子，茂木　巌，進藤大輔，赤瀬善太郎，石井正夫，釜谷　隆

盲学校理科教育における音声化手作り酸素センサの開発と自然探求型の教材開発
平成19年度研究実績報告書　基盤研究(C)　課題番号19500770（2007年度～2008年度）
…………………………………高橋三男，柚賀正光，筒井健太郎，堤　博貴，John Wade GATES，川島徳道

基盤技術研究開発　ナノ構造部材オプティカル新機能応用技術
革新的部材　産業創出プログラム・省エネルギー技術開発プログラム「低損失オプティカル新機能部材技術開発」基盤技術研究開発報告書　NEDO プロジェクトコード：P06020（2007年６月）pp. 88－97…町田　茂

固体ガス状試料の安全性評価システムの開発のうち Bioavailability の概念による評価
経済活性化のための研究開発プロジェクト（リーディングプロジェクト）　一般・産業廃棄物・バイオマスの複合処理・再資源化プロジェクト平成19年度研究成果報告書　Ⅲ.4.2.c（2008年３月）…………庄司　良

固体ガス状試料の安全性評価システムの開発のうち水圏植物及び陸生植物による影響評価
経済活性化のための研究開発プロジェクト（リーディングプロジェクト）　一般・産業廃棄物・バイオマスの複合処理・再資源化プロジェクト平成19年度研究成果報告書　Ⅲ.4.2.g（2008年３月）…………庄司　良

圧電高分子フィルムを用いた疾患診断用足裏荷重測定具の開発
研究実績報告書　奨励研究　課題番号19917022（20年３月）……………………………中村源一郎，黒崎　茂

⑶特許等

特許：車両盗難防止装置及びその方法　特許第3859157（2007．９．29）…………………………………………下井信浩

⑷解説・研究ノート・エッセイ等

調査報告「海外調査（ドイツ，ハンガリー）班報告」
（『平成19／20年度教育方法改善共同プロジェクト　高専の特色ある技術者教育
“学外の教育力を活用した高専の特色ある技術者”中間報告書』2008年３月　pp. 124－158）
………………………………………………………………………（河村　豊，相澤俊行，永瀬ライマー桂子）

『相談室だより』（第37号，2007，６）……………………………………………………………………古屋正俊

『相談室だより』（第38号，2007，12）……………………………………………………………………古屋正俊

『相談室だより』（第39号，2008，３）……………………………………………………………………古屋正俊

『学生相談室報』（第６号，2008，３）……………………………………………………………………古屋正俊

『学生相談室のご案内―学生支援のためのメンタルヘルス・ガイド―』（改訂版，2008，３）…………………古屋正俊

『日本語表現法』改訂版，三省堂，2007，10，第２章担当，沖森卓也，半沢幹一，多門靖容，橋本　修，舩戸美智子，矢澤真人

目撃者が語る日本史の決定的瞬間　『別冊歴史読本』平成20年２月，新人物往来社…………………………舩戸美智子

日本数学教育学会高専・大学部会論文誌第14号編集発行，2007，８，佐藤義隆（編集長）

パイプラインの異常検出方法及びその装置
JST データ補完研究課題報告書，2007，２，pp. １－19 ………………………………………下井信浩，黒崎　茂

東京高専における「教育研究活動に係る自己申告書」の取り組み

（工学教育 vol. 55　No. 4　2007．7，pp. 10－13）……………………………………………小坂敏文，正木　進
高専ロボコン（ロボットコンテスト）に燃える東京高専・ロボコンゼミの活動
（Inrevium lab，東京エレクトロンデバイス，2007，3，pp. 14）…………………………………………松林勝志
高専ロボコン（ロボットコンテスト）に燃える東京高専・ロボコンゼミの活動　その２
（Inrevium lab，東京エレクトロンデバイス，2007，8，pp. 14）…………………………………………松林勝志
高専ロボコン（ロボットコンテスト）に燃える東京高専・ロボコンゼミの活動　その３
（Inrevium lab，東京エレクトロンデバイス，2008，3，pp. 10）…………………………………………松林勝志
黒鉛層間化合物の合成手法─気相法，固相法
（『炭素』2007［No. 230］，2007年11月，pp. 373－378）……………………………………阿久沢　昇，松本里香
グローバルエンジニア育成機関としての高専
（『化学工学』第71巻第６号，2007年６月，pp. 361－364）………………………石井宏幸，三谷知世，庄司　良
驚異のヘリカル炭素─未来を変えるカーボンマイクロコイル（CMC）─
（『化学と教育』55巻，12月号，2007年）……………………………………………………………………高橋三男
食品の品質と酸素（『化学と教育』55巻，11月号，2007年，pp. 584）……………………………………………高橋三男
隔膜ガルバニ電池式酸素センサの基礎研究
（『第６回トライアル講座平成19年度理数科課題研究報告書』岐阜県立大垣高等学校，平成20年１月22日，pp. C５－１～７）………………………………………………………………………………………高橋三男

東京工業高等専門学校研究報告書　第40(1)号，2008

『新撰万葉集』注釈稿（上巻　冬部　八三～八四）

一般教科　津田　潔・共立女子大学　半澤　幹一

The Annotation of the Shinsen-man'yōshū (15)

Kiyoshi TSUDA, Kan'ichi HANZAWA

This paper is the annotation of the Shinsen-man'yōshū edited in 893 ?

(Keyword : the Shinsen-man'yōshū)

83　攪崩芝　雹降積咩　白玉之　鋪留墀鞆　人者見蟹
かきくらし　あられ降り積め　白玉の　しけるにはとも　人は見るがに

【校異】

本文では、結句の「見」と「蟹」の間に、永青文庫本・久曽神本が「留」字を補う。

訓みでは、初句の「かきくらし」を、元禄九年版本・元禄十二年版本・文化版本・下沢文庫本・藤波家本・道明寺本・羅山本・無窮会本が「かきくつし」とする。

同歌は、寛平御時后宮歌合（十巻本、冬歌、一一八番）にあり（ただし第二・三句「あられふりしけしらたまを」結句「ひとのみるがに」）、また後撰集（巻八、冬、四六四番）にも「題しらず」として見られる（ただし第二・三句「霰ふりしけ白玉を」結句「人のみるべく」）ほか、秋萩集（八番。ただし第四句「しけるやどとも」結句「ひとのみるがに」）や和歌初学抄（八〇番。ただし第二句「あられふりしけ」第三句「あらたまを」結句「人のみるべく」）にも見られる。

83　冬天下雹玉墀新。　冬天より雹下りて玉墀新なり。
潔白鋪来不見塵。　潔白に鋪き来たりて塵を見ず。
千顆瑠璃多誤月。　千顆の瑠璃のごとく多く月と誤る。
可憐素色満清晨。　憐むべし素色の清晨に満つることを。

【校異】

「千顆」を、無窮会本・永青文庫本「千頃」に作り、林羅山本・久曽神本「千項」に作り、久曽神本は「頃歟」と注記する。「瑠璃」を、類従本・林羅山本・無窮会本「琉璃」に作る。「可憐」を、底本・文化写本・藤波家本「可怜」に作るも、諸本に従う。元禄九年版本・類従本は右傍に「怜」を注記し、文化写本は「怜」に「憐群」と注記する。「清晨」を、藤波家本「清農」に作る。

【通釈】

冬空から雹が降ってきて、宮殿の庭は今玉石を敷き詰めたばかりのようだ。真っ白に敷き詰められてゴミ一つ見えない。（その雹は）無数のルリ玉（のように白く輝いて）しばしば月光と見誤るほどだ。白い色がすがすがしい朝の空間を満たすことは、何と素晴らしいことか。

【通釈】

（空一面を）暗くして、あられよ、降り積もれ。白玉が敷いてある庭とも、（訪れる、あの）人は見るほどに。

【語釈】

かきくらし　【校異】に示したように、元禄九年版本ほか数本が「撹崩芝」という本文は同じながら、これを「かきくつし」と訓んでいる。『新撰万葉集注釈　巻上㈡』は「［撹崩芝］という表記は「かきくづし」以外には読み得ない形であり、本集の歌としては当初から〔かきくづし〕という本文であったことが明白である」と述べている。たしかに、「撹」字を「かき」と訓むのはともかくとして、「崩」字を「くらし」と訓むのは、意味関係として難しい。「撹崩芝」という本文だけから訓みを考えるとしたら、「かきくづし」になると言えよう。しかし、いかんせん、この語の和歌の用例が乏しく、万葉集や八代集には見られず、平安期の例としては私家集の「いはせがはみづこそすきてはやからめかきくづしきときくぞあやふき」（相模集一五〇）「かきくづしふりつむゆきはつもるとも春のつららはうちとけぬべし」（弁乳母集九四）「としのうちにつくれるつみはかきくつしふりつむゆきとゝもにきえなん」（貫之集二〇）の三例のみであり、しかも貫之歌は拾遺集では「年の内につもれるつみはかきくらしふる白雪とともにきえなん」（拾遺集四－二五八）のように「かきくらし」になっている。本集の和歌が寛平御時后宮歌合から採られたとすれば、歌合の該当歌も「かきくらし」であって、異同は見られない。「かきくらし」は万葉集にはないが八代集には「かきくらしふる白雪のしたぎえにきえて物思ふころにもあるかな」（古今集一二－五六六）「かきくらし雪はふりつつしかすがにわが家のそのに鶯ぞなく」（後撰集一－三三）「かきくらし雪もふらなん桜花まださかぬまはよそへても見む」（拾遺集一六－一〇三四）など、一〇例以上見られ、雪や雨に関して用いられていて、「かきくづし」よりは蓋然性が高い。一案として考えられるのは、「かきくらし」が、雪や雨が降るという表現に先立って用いられることを前提として、漢字表記する際に、

【語釈】

冬天　冬の空。また、冬の季節そのもの。「春天」（一九番詩）、「夏天」（三八番詩）、「秋天」（四八番詩）と既にあった。『晋書』天文志上・天体に「冬天陰気多、陽気少、陰気暗冥、掩日之光」、白居易「香爐峰下新卜山居草堂初成偶題東壁」詩に「南檐納日冬天暖、北戸迎風夏月涼」とあり、嵯峨天皇「和滋貞主城外聴鶯簡前藤中納言之作」詩に「邃谷黄鶯無儔侶、冬天不語在荒林」（『経国集』巻一一）、空海「徒懐玉」詩に「夏月涼風、冬天淵風」（『性霊集』巻一）とある。　**下雹**　「ひょう」が降る。『漢書』五行志第七中之下に「元封三年十二月、雷雨雹、大如馬頭。宣帝地節四年五月、山陽済陰雨雹如雞子、深二尺五寸、殺二十人、蜚鳥皆死」（『初学記』雹）、『史記』孝景本紀に「二年…秋、衡山雨雹、大者五寸、深者二尺」（『初学記』雹）等とあるとおり、「雨雹」と表記するのが一般。ただし、「下雹」は、『朱子語類』に用例が残り、現代でも「下雹子」と言うように、当時の口頭語を反映している可能性がある。なお、底本等の版本や写本に和訓が残るものは、みな「冬天雹を下して」と訓ずるが、文法的には「雹下りて」と訓むのが正しい。
玉墀　玉石を敷き詰めた宮殿の庭。顔延之「宋文皇帝元皇后哀策文」に「灑零玉墀、雨泗丹掖」（『文選』巻五八・『藝文類聚』后妃）、梁・沈約「八詠詩・登臺望秋月」詩に「臨玉墀之皎皎、含霜靄之濛濛」（『藝文類聚』月）とあり、菅原道真「九日侍宴各分一字応製」詩に「蕭辰供奉一佳期、拝舞紛々白玉墀」（『菅家文草』巻二）、源英明「見二毛」詩に「延長休明代、久趨白玉墀」（『本朝文粋』巻一）とある。　**潔白**　月光のような清らかな白さを言う。唐・欧州陽詹「玩月」詩に「清冷到肌骨、潔白盈衣裳」、劉禹錫「奉和中書崔舎人八月十五日夜玩月二十韻」詩に「運行調玉灯、潔白応金天」とあり、『捜神記』巻一八に「華見其総角風流、潔白如玉、挙動容止、顧盼生姿、雅重之」とあるから、「雹」を「玉」に見立て、「潔白」と表現するのは無理な表現ではない。平城天皇「旧邑対雪」詩に「潔白因逢立、汚玄以染成」（『経国集』巻一三）、島田忠臣「府城雪後作」詩に「愚蒙未得推天意、唯愛衝前潔白光」（『田氏家

「崩」字により、そのイメージ（たとえば、空を覆う氷が細かく砕け散るというイメージ）を付加しようとしたのではないかということである。逆に言えば、それがなければ、「攪崩芝」から「かきくらし」という訓みは出て来ようがないであろう。　**あられ降り積め**　「あられ」は雪に氷が付着したものをいい、万葉集から「阿良例」「安良礼」「霰」「丸雪」などの表記で見られる。「降り積む」は万葉集にはないが、八代集に「ささのはにふりつむ雪のうれをおもみ本くだちゆくわがさかりはも」（古今集一七－八九一）「白雲のおりゐる山とみえつるはふりつむ雪のきえぬなりけり」（後撰集八－四八四）「梅がえにふりつむ雪はひとゝせにふたたびさける花かとぞ見る」（拾遺集四－二五六）などのように、雪に関して、上記のごとくもっぱら連体修飾で用いられ、本歌のような命令形の例は見られない。それに対して、異訓の「ふりしく（降り敷く）」は、同様に雪に関して「池の辺の松の末葉に降る雪は五百重降り敷け明日さへも見む」（万葉集八－一六五〇）「沫雪は千重に降りしけ恋ひしくの日長き我は見つつ偲はむ」（万葉集一〇－二三三四）「初雪は千重に降りしけ恋ひしくの多かる我は見つつしのはむ」（万葉集二〇－四四七五）などのように、万葉集では命令表現になる例が目立ち、古今集にも「けぬがうへに又もふりしけ春霞たちなばみ雪まれにこそ見め」（古今集六－三三三）のように見られる。「積む」は垂直方向、「敷く」は水平方向の変化を表すので、この命令形の使用も合わせ、本歌には後者のほうがふさわしいと考えられるが、第四句にも「敷く」が用いられているので、重複を避けて「積む」にしたかと考えられる。なお、「あられ」については、万葉集では「我が袖にあられたばしる巻き隠し消たずてあらむ妹が見むため」（万葉集一〇－二三一二）のように「たばしる」という動詞が使われることもあるが、ほとんどは「降る」であり、「降り積む」も「降り敷く」も用いた例は見当たらない。　**白玉の**　「白玉（しらたま）」は白く小さく丸い物一般を表すとされるが、万葉集に見られる三〇ほどの例は、「磯の上に爪木折り焚き汝がためと我が潜き来し沖つ白玉」（万葉集七－一二〇三）「白玉の五百つ集ひを手に結びお

集』巻中）とある。　**鋪来**　「鋪」とは、隙間なく敷き詰めること。杜荀鶴「春日山中対雪有作」詩に「嶺梅謝後重妝蕊、巌水鋪来卻結氷」とあるのは、雪が水一面に降り積もる様。嵯峨天皇「梅花落」詩に「歴乱飄鋪地、徘徊颺満空」（『文華秀麗集』巻中）、紀御依「奉和聖製江上落花詞」詩に「須臾鋪地不勝風、半著江磯浦口駁」（『雑言奉和』）というのは、花びらが地にびっしりと敷き詰められること。　**不見塵**　ゴミが見えない。白居易「長恨歌」詩に「回頭下望人寰処、不見長安見塵霧」、褚載「暁発」詩に「衣溼乍驚霑霧露、馬行仍未見塵埃」とあり、滋野貞主「和藤神策大将閉門好静花鳥馴人不勝感興什」詩に「松蘿宜避跡、苔蘚不看塵」（『経国集』巻一一）、島田忠臣「七言重奉題禁中瞿麦花応詔一首」詩に「仙都置色属清晨、瞿麦花開不見塵」（『田氏家集』巻下）とある。上の「潔白」との対応表現。　**千顆**　ここの「千」は、「万」「百」と同様、具体的な数ではなく、沢山の、を意味する大数としての用法。「顆」とは、小さな丸い物、粒状の物を数えるときの助数詞。唐代の農学書『斉民要術』巻四・種栗に「魏志云、有東夷韓国出大栗、状如梨。三秦記曰、漢武帝果園有大栗、十五顆一升」、同巻十・桃に「漢武内伝曰、……須臾以玉盤盛仙桃七顆、大如鴨子、形円色青、以呈王母」とあり、『通典』食貨六に「河東郡貢綾絹扇四面　龍骨二十斤　棗八千顆　鳳栖梨三千五百顆　今蒲州」等の語句が見える。また、晩唐・鄭棨「別郡後寄席中三蘭」詩に「千顆涙珠無寄処、一時弾与渡前風」の詩句もあるから、その「雹」の大きさの範囲もおおよその判断が出来るだろう。異文「頃」は、土地の広さの単位。　**瑠璃**　「琉璃」の表記が一般で、「流離」とも。半透明の玉石で、深い青色をしたものが多い。韓愈「鄭群贈簟」詩に「攜来当昼不得臥、一府伝看黄琉璃」、孟郊「溧陽唐興寺観薔薇花同諸公餞陳明府」詩に「忽驚紅琉璃、千艶万艶開」等ともある。なお、白居易「遊悟真寺詩」に「双鉼白琉璃、色若秋水寒」、韋応物「詠琉璃」詩に「有色同寒氷、無物隔纖塵」の語句もあるから、「雹」を「瑠璃」で喩えることがあってしかるべきだろう。　**多誤月**　「多誤」は、しばしば間違える、間違えることが多い。梁鍠「贈李中華」詩に「莫向

こせむ海人は幸しくもあるか」（万葉集一八－四一〇五）などから明らかなように、すべて真珠のことを指し、中には「…我が中の　生まれ出でたる　白玉の　我が子古日は…」（万葉集五－九〇四）「さ雄鹿の萩に貫き置ける露の白玉あふさわに誰の人かも手に巻かむちふ」（万葉集八－一五四七）などのように、人や露を喩える歌もある。それが古今集以降になると、「白玉」はもはや実体としての真珠そのものを表す例がなくなり、おもには「あかずしてわかるるそでのしらたまを君がかたみとつつみてぞ行く」（古今集八－四〇〇）「ころをへてあひ見ぬ時は白玉の涙も春は色まさりけり」（後撰集九－五四五）などの涙、「亀の尾の山のいはねをとめておつるたきの白玉千世のかずかも」（古今集七－三五〇）「たきつせに誰白玉をみだりけんひろふとせしに袖はひちにき」（後撰集一七－一二三五）などの滝の飛沫、そして「草のいとにぬく白玉と見えつるは秋のむすべるつゆにぞ有りける」（後撰集五－二七〇）「をぎの葉にそそやあきかぜ吹きぬなりこぼれやしぬるつゆのしらたま」（詞花集三－一〇八）などの露、の三つの見立てとして用いられる。本歌では、あられを白玉に見立てているが、雪を含め、他にそのような例は見出しがたい。ただ、わずかに「…さむく日ごとに　なりゆけば　たまのをとけて　こきちらし　あられみだれて…」（古今集一九－一〇〇五）「花とちり玉とみえつつあざむけば雪ふる里ぞ夢に見えける」（新古今集一八－一六九五）のように、あられや雪の降るさまを「白玉」ではなく「玉」に見立てた例は見られる。　**しけるにはとも**　「しく（敷く）」は万葉集では、黒髪、藻・薦・筵・竹葉などに用いられているが、用例の三分一が「玉」に関してで、しかも「あらかじめ君来まさむと知らませば門にやどにも玉敷かましを」（万葉集六－一〇一三）「思ふ人来むと知りせば八重むぐら覆へる庭に玉敷かましを」（万葉集一一－二八二四）「松陰の清き浜辺に玉敷かば君来まさむか清き浜辺に」（万葉集一九－四二七一）などのように、来客を迎えるための準備としての表現であり、この「玉」はおそらく玉石であろう。八代集には後撰集所載の同歌以外に類例はなく、関連する例として、露を玉に見立てた「秋ののにお

嵩山去、神仙多誤人」、杜甫「奉贈韋左丞丈二十二韻」詩に「紈袴不餓死、儒冠多誤身」とある。ここの「誤」は、「如」や「疑」と類似して、あまりに似ているので間違ってしまうという比喩表現。陳・伏知道「従軍五更転五首其三」詩に「彊聴梅花落、誤憶柳園人」、初唐・趙彦昭「奉和聖制立春日侍宴内殿出剪綵花応制」詩に「嫩色驚銜燕、軽香誤採人」、杜甫「八哀詩　故著作郎貶台州司戸滎陽鄭公虔」詩に「滄洲動玉陛、宣鶴誤一響」などとある。菅原道真「山陰亭冬夜待月」詩に「消残砌雪心猶誤、挑尽窓灯眼更嫌」（『菅家文草』巻一）、菅原道真「冬夜対月憶友人」詩に「山疑小雪微々積、水誤新氷漸々生」（『菅家文草』巻四）とあるのは、いずれも月光の比喩。　**素色**　白い色。初唐・李頎「少室雪晴送王寧」詩に「隔城半山連青松、素色峨峨千万里」、李商隠「賦得月照冰池」詩に「高低連素色、上下接清規」とあるのは、雪や月光を「素色」と表現したもの。　**清晨**　すがすがしい朝。曹植「贈白馬王彪」詩に「清晨発皇邑、日夕過首陽」（『文選』巻二四）、梁・沈約「三月三日率尓成篇」詩に「清晨戯伊水、薄暮宿蘭池」（『文選』巻三〇）とあり、具平親王「過秋山」詩に「清晨連轡伴樵歌、漸上青山逸興多」（『本朝麗藻』巻上）とある。また、「不見塵」の項参照。

【補注】

韻字は「新・塵・晨」で、上平声十七真韻。平仄にも基本的誤りはない。

起句と転句が比喩表現。「潔白」「不見塵」「素色」「清晨」等と、その色に対する清潔感のイメージで作品全体の統一は出来ている。冬の早朝の、宮殿の張りつめた空気を思い描けば足りると言うことか。

なお、「誤」に関する比喩と、当時の和歌への影響関係については、小島憲之『古今集以前』二六四頁以下に言及されている。

く白露をけさ見れば玉やしけるとおどろかれつつ」（後撰集六－三〇九）や、年数を砂に見立てた「君が代のとしのかずをば白妙の浜のまさごとたれかしきけむ」（新古今集七－七一〇）が見られる程度である。「には」と訓む「墀」字は古辞書にもその訓が見られ、角川大字源によれば「敷石など敷き詰めた所」の意があり、本歌の例もそれに該当しよう。「には」は万葉集には「飼飯の海の庭（庭）良くあらし刈り薦の乱れて出づ見ゆ海人の釣舟」（万葉集三－二五六）のように、海面を表す例も見られるが、ほとんどは屋敷の前の平地を表し、そこでの自然現象や動植物のありさまが詠まれている。庭に玉を敷く例は先に挙げたとおりであるが、「沫雪の庭に降り敷き寒き夜を手枕まかず一人かも寝む」（万葉集八－一六六三）「梅の花咲き散り過ぎぬしかすがに白雪庭に降りしきりつつ」（万葉集一〇－一八三四）「庭に降る雪は千重敷く然のみに思ひて君を我が待たなくに」（万葉集一七－三九六〇）などのように、雪が庭に降り敷くという表現も見られる。八代集にも、「よるならば月とぞみましわがやどの庭白妙にふりつもる雪」（後撰集八－四九六）「なつの夜のにはにふりしくしら雪は月のいるこそきゆるなりけれ」（金葉集二－一四一）「まつ人のいまもきたらばいかがせむふままくをしきにはの雪かな」（詞花集四－一五八）のように、同様の例がある。　**人は見るがに**　「人は見る」とは、庭に降り積もったあられを、白玉を敷いたように「人は見る」ということである。「がに」は万葉集で用いられた副助詞で、上接動詞の表す動作を、下接表現の程度・様態を示す表現として用いられる。たとえば「秋田刈る仮廬もいまだ壊たねば雁が音寒※↗

※し霜も置きぬがに」（万葉集八－一五五六）のように、歌末にあって「霜も置きぬがに」が、倒置的に「雁が音寒し」の程度のはなはだしさを表している。後撰集所載の同歌は「人のみるべく」となっているが、これは万葉語の「がに」が使われなくなり「べし」という助動詞がそれに置き換わったものである。

【補注】

本歌は、あられを白玉に見立てること自体が特異であるが、それとともに「白玉」が万葉集以来、一般に和歌では、真珠を元にした美的なイメージを表すのに対して、白い玉石をイメージさせる点においても異色と言える。

その根拠として、【語釈】「しけるにはとも」の項に示したように、万葉の頃、大事な客を迎える際には、庭に玉石を敷き詰めて清めるということが風習としてあったことが挙げられる。そして、それだからこそ、雪よりは粒の大きいあられが、その意の白玉に見立てられたのであろう。

しかし、実際に庭に玉石を敷き詰めることは、きわめて特別な場所に限られていたと考えられる。先の万葉の例も「玉敷かましを」や「玉敷かば」のように、あくまでも仮定でしかなく、本歌も折よく降り出したあられをそれに見立てようとしたにすぎない。

この見立てには、結句を「人の見るがに」ではなく「人は見るがに」のように、「の」ではなく「は」とすることにより、人一般ではなく、他ならぬ特定の相手においてのみ、それが成り立つこと、つまり歓迎の意を汲み取ってもらうことを願う思いが読み取れる。

【比較対照】

詩は、歌における、あられに対する見立て、しかも情景としての見立ての一点にしぼって展開し、歌の見立ての背景にあると想定される人間関係はまったく反映されていない。

あられの白玉への見立ては起句が対応しようが、厳密には純粋な見立てとは言えない。なぜなら「玉墀」自体がすでに「玉石を敷き詰めた宮殿の庭」だからである。詩【通釈】が「冬空から霰が降ってきて、宮殿の庭は今玉石を敷き詰めたばかりのようだ」として、見立ての重点を、玉石そのものというよりも、今敷き詰めたばかりというところに置いているのはそのせいである。承句の「潔白鋪来不見塵」も、玉石だけではなく、その上に霰が降

り敷いたからこそである。
また、詩における見立ては、雹そのものよりも、それが降り敷いた庭の情景にあり、その情景を転句で「千顆瑠璃」さらに「月」になぞらえているが、どの見立てもポイントは、承句の「潔白」、結句の「素色」という措辞に明らかなように、色の白さにある。歌も「玉」ではなく「白玉」という語を用いているので、詩はその点をとくに強調しようとしたと考えられる。
歌における見立ては、それが歌の趣旨ではなく、あくまで前提・仮定であって、相手を待ち望む思いを表すのが趣旨である。何よりも、第二句「あられ降り積め」という表現は、その見立てが情景としてはまだ実現していないことを示している。それに対して、詩はその見立てが実現した情景を歌ったものであり、歌とのこのようなずれは、これまでにもたびたび見られた。

84　冬寒美　簷丹懸垂　益鏡　迅裳破南　可老迷久
冬寒み　のきに懸かれる　ます鏡　とくもわれなむ　老いまどふべく

【校異】
本文では、第二句末の「垂」字を、類従本が欠き、第四句の「破」字を、久曽神本が「被」とする。また、結句の「可老迷久」を、永青文庫本と久曽神本は「老可迷久」とする。
訓みでは、第二句の「かかれる」を、元禄九年版本・元禄十二年版本・文化版本・下沢文庫本が「かけたる」とし、第四句の「われ」を、藤波家本・和学講談所本が「やぶれ」、道明寺本が「やぶる」、林羅山本・無窮会本が「やれ」とする。
同歌は、寛平御時后宮歌合（十巻本、冬歌、一三六番）にあるが（ただし第二句「水の面に懸くる」）、他の歌集には見られない。
【通釈】
冬寒のため軒に懸かっている（氷の）鏡よ、一刻も早く割れて（溶けて）ほしい、年取って訳が分からなくなるように。
【語釈】
冬寒み　「寒み」については、本集五〇番歌【語釈】「羽風を寒み」の項および五八番歌【語釈】「夜を寒み」の項を参照。「冬寒み」という表現は万葉集にはなく、八代集に「冬さむみこほらぬ水はなけれども吉

84　冬来氷鏡拠簷懸。
一旦趁看未破前。
嫗女嚬臨無粉黛、
老来皺集幾廻年。

冬来たりて氷鏡簷（のき）に拠りて懸る。
一旦趁（も）とめ看る未だ破（わ）れざる前。
嫗女嚬（ひそ）み臨むに粉黛無ければ、
老い来たりて皺集（しは）まりて幾廻（たび）の年ぞ。

【校異】
「拠簷」を、日本詩紀本「拠檐」に作り、京大本・大阪市大本・天理本・永青文庫本・久曽神本「拠簾」に作る。「嚬臨」を、類従本・永青文庫本・久曽神本「頻臨」に作り、文化写本には「頻群」の右傍注記あり。「皺集」を、類従本・京大本・大阪市大本・天理本・林羅山本・無窮会本・久曽神本「皺集」に作り、永青文庫本「雛集」に作り、文化写本には「皺群」の右傍注記あり。「幾廻年」を、類従本・林羅山本・無窮会本・永青文庫本・久曽神本「幾廻千」に作り、類従本は「年イ」を校注する。また、京大本・大阪市大本・天理本「幾回年」に作り、元禄九年版本・文化写本は「年」に「千」を校注する。
【通釈】
冬になって鏡のような氷が軒先に垂れ下がった。まだそれが割れる前にすぐに見てみた。老女が化粧もせずに顔をしかめてのぞき込むと、「年取ってからこのかた、顔にシワが集まって、いったい何年になるだろうか」（と思わずつぶやくことになる。）
【語釈】

野のたきはたゆるよもなし」（拾遺集四－二三五）「ふゆさむみそらにこほれる月かげはやどにもるこそとくるなりけれ」（金葉集四－二七四）の二例があり、ともに「こほる」という動詞と関連している。　**のきに懸かれる**　「簷」は「檐」の別体字で、「のき」と訓まれる。この語は万葉集にないが、八代集には「雨やまぬのきの玉水かずしらず恋しき事のまさるころかな」（後撰集九－五七八）をはじめとして、「のきば（軒端）」とともに、とくに千載集・新古今集でよく用いられている。軒において詠まれるのは、右掲の後撰集の例のほか、「おつれどものきにしられぬ玉水は恋のながめのしづくなりけり」（千載集一一－六八六）「ながめつつ我がおもふ事はひぐらしに檐のしづくのたゆるまもなし」（新古今集一八－一八〇一）などのように、軒から落ちる雨だれと、「わがやどののきのしのぶにことよせてやがてもしげるわすれぐさかな」（後拾遺集一三－七三七）「すみわびてわれさへのきのしのぶぐさしのぶかたがたしげきやどかな」（金葉集九－五九一）「あづまやのをがやの軒のしのぶ草しのびもあへずしげる思ひに」（千載集一四－八五六）などのように、軒の部分に生えている忍び草が中心的である。「懸かれる」については、本集二一番歌【語釈】「白雪の懸かれる枝」の項を参照。本歌では、軒にます鏡が「懸かる」という関係になるが、「かがみ」が「懸かる」という表現は万葉集にも八代集にもなく、「のき」に「懸かる」という表現も「秋風のおとせざりせば白露の檐の忍にかからましやは」（新古今集一八－一七三三）という関連した例があるのみである。【校異】に示したように、元禄九年版本などは「かかれる」ではなく「かけたる」と訓み、寛平御時后宮歌合では「水の面に懸くる」であるが、ともに同様に類例は見られない。第二句末の「垂」字を助動詞「り」の連体形の「る」と訓む例は、本集にも万葉集にも見られず、訓仮名としては助動詞「たり」の連体形の「たる」に当てられているが、ここでは略訓とみなしておく。　**ます鏡**　万葉集には、「ますかがみ」という語形の確例はなく、相当するのは「まそかがみ」で、「麻蘇・末蘇」あるいは「真十・真素・真祖」などと表記され、「ます」とは訓めない。いっ

冬来　冬になる。初唐・王泠然「古木臥平沙」詩に「春至苔為葉、冬来雪作花」、杜甫「重簡王明府」詩に「甲子西南異、冬来只薄寒」とある。本集にも「冬来」（九九番詩）とあり、「春来」（一・七九番詩）、「秋来」（四五・六九・七八番詩）とあった。　**氷鏡**　鏡のような氷。梁・簡文帝「玄圃寒夕」詩に「雪花無有蔕、氷鏡不安臺」（『藝文類聚』・『初学記』冬）、孟郊「古意」詩に「願君如隴水、氷鏡水還流」とあり、島田忠臣「七言就花枝応製一首」詩に「半綻春粧応製断、初融氷鏡未□澌」（『田氏家集』巻下）とある。水が凍って鏡になるという句は、「冬至毎朝涷作鏡」（七九番詩）とあり、更に八九番詩などにあるが、いずれも池が凍るというもの。　**拠簷懸**　「簷」は、のき、ひさし。異文「檐」も同意。ただし、異文「簾」の存在を考えれば、「簷」が勝るか。「拠」は、たよる。よりどころにする。「懸」は、物がぶら下がる。「つらら」を漢語では「氷柱」「垂氷」という。謝恵連「雪賦」に「爾其流滴垂氷、縁霤承隅」（『文選』巻一三）とあり、李善は王逸楚辞注を引いて「霤、屋宇也」という。徐鉉「陪鄭王相公賦筵前垂氷応教依韻」詩に「窓外虚明雪乍晴、簷前垂霤尽成氷」とあり、劉乂「氷柱」詩に「旋落旋逐朝暾化、簷間氷柱若削出交加」とある。ちなみに白居易「新居早春二首其二」詩に「霤滴簷氷尽、塵浮隙日斜」、同「江州雪」詩に「城柳方綴花、檐氷纔結穂」とある。　**一旦**　僅かな時間に。にわかに。鮑照「結客少年場行」詩に「追兵一旦至、負剣遠行遊」（『文選』巻二八）、駱賓王「帝京篇」詩に「当時一旦擅豪華、自言千載長驕奢」とあり、菅原道真「絶句十首賀諸進士及第其二」詩に「不遺白首空帰恨、請見愁眉一旦開」（『菅家文草』巻二）、菅原道真「聞蝉」詩に「猶恨凄凉風未到、不能一旦自無声」（『菅家文草』巻二）とある。　**趁看**　急いで見る。六六番詩【語釈】該項参照。　**嫗女**　「嫗」とは、『広韻』に「老嫗也」とあるとおり、老婆のこと。ただし、「嫗女」の語例を日中ともに知らない。あるいは、『塩鉄論』毀学に「趙女不択醜好、鄭嫗不択遠近」、『抱朴子』内篇・論仙に「則牛哀成虎、楚嫗為黿、枝離為柳、秦女為石」とあるように、「嫗」には単に「女」の意もあるので、女性の通称として

ぽう八代集には「ますかがみ」のみで、「まそかがみ」の例は見られない。ともに、「…我が目らは　ますみ（真墨）の鏡…」（万葉集一六―三八八五）や「山のはにますみのかがみかけたりとみゆるは月のいづるなりけり」（千載集四―二八七）における「ますみのかがみ」の略と考えられ、全体に澄み渡った鏡を指す。用法上の違いとしては、万葉集の「まそかがみ」は「見る」関係の語などにかかる枕詞の用法がもっぱらであるのに対して、八代集の「ますかがみ」は「ます」に「増す」を重ねる掛詞としての用法が目立つ。本歌における「ます鏡」は実体としての鏡を指すのではなく、氷の見立てになっていると見られる。その根拠は「ます鏡」を修飾している「冬寒みのきに懸かれる」という表現であり、軒という所から、氷柱のようなものが想定される。しかし、氷を鏡に見立てる例は「たにがはのよどみにむすぶこほりこそ見る人もなきかがみなりけれ」（金葉集四―二七二）の一例のみであり、しかも川の水面の氷についてである。　**とくもわれなむ**　「とくも」については本集一七番歌【語釈】「とくも散るかな」の項、「われ」については本集一七番歌【語釈】「われてはぐくむ」の項を、それぞれ参照。「なむ」は願望の終助詞で、第三句の「ます鏡」に対して、それが早く割れることを望んでいることになる。ただし、鏡について「わる」を用いた例は見当たらず、異訓の「やる」や「やぶる」についても、同様である。　**老いまどふべく**　「老いまどふ」は動詞の「おゆ（老）」と「まどふ」が連続した表現であるが、そのような複合動詞は他に認められない。『新撰万葉集注釈　巻上㈡』は「老いを擬人化した表現」ととらえているので、「老い」を名詞とし「まどふ」の主語とみなしていることになる。「老い」が動詞の主語になっている例は、八代集に「鶯の笠にぬふといふ梅花折りてかざさむおいやかくると」（古今集一―三六）「かざせども老もかくれぬこの春ぞ花のおもてはふせつべらなる」（後撰集三―九六）「いかにせんくれゆくとしをしるべにて身をたづねつつおいはきにけり」（金葉集四―三〇二）「かずならぬ身にさへとしのつもるかなおいは人をもきらはざりけり」（詞花集四―一五九）「かりそめの旅のわかれと忍ぶれどおい

用いたものか。　**嚬臨**　「嚬」は、顔をしかめる。眉をひそめる。昭明太子「龍笛曲」詩に「金門玉堂臨水居、一嚬一笑千万余」（『玉臺新詠』巻九）、駱賓王「王昭君」詩に「妝鏡菱花暗、愁眉柳葉嚬」とある。愁いの表情であると同時に、時には女性の魅力ともなる。「臨」は、高いところから見下ろす。鏡に対してやや上からのぞき込む。李益「照鏡」詩に「衰鬢朝臨鏡、将看卻自疑」、李賀「美人梳頭歌」詩に「双鸞開鏡秋水光、解鬟臨鏡立象床」とあるが、ここの鏡はつらであるから、「臨」は、不適であろう。異文「頻」は、頻りに。劉禹錫「同楽天和微之深春二十首其十六」詩に「妝壊頻臨鏡、身軽不占車」とあるけれども、何故「頻」であるかの説明は、「妝壊」の語が明示している。ここは、結句との関連で、「嚬」が勝ると考える。　**粉黛**　化粧。二四番詩【語釈】該項参照。　**老来**　老いてよりこのかた。六朝詩にはこの語の用例がない。盛唐から使われはじめ、白居易「晩出西郊」詩に「老来何所用、少興不多言」、同「蘇州柳」詩に「老来処処遊行遍、不似蘇州柳最多」とあるように、白居易詩に用例が多い。　**皴集**　この語例を日中ともに知らない。「皴」は、孟郊「寄義興小女子」詩に「漁妾性崛強、耕童手皴釐」とあるように、ひび、あかぎれを言うが、同時に、薛逢「老去也」詩に「朝巾暮櫛不自省、老皮皴皺文縦横」とあって、シワの意でも用いられる。また、異文「皺」は、李賀「啁少年」詩に「莫道韶華鎮長在、髪白面皺専相待」とあるように、しわの寄ること。両字とも他の日本漢詩においても異文関係にあることが多く、確定できないものの、「皺」字がいずれも水面の波の形容に用いられて、いわゆる皺の意で用いられることが無いのに比して、「皴」は、後代のものだが、惟宗孝仲「近曽左金吾藤廷尉…重奉呈之」詩に「齢欲傾兮面皴、愁難除兮心辛」（『朝野群載』巻一）、藤原忠通「傀儡子」詩に「行客征夫遥側目、是斯髪白面空皴」（『本朝無題詩』巻二）などと名詞・動詞に用いられるので、こちらを採る。「老来」の語からも、単なるシワよりひびあかぎれの入ったカサカサの肌をイメージさせる方が、勝るだろう。　**幾廻年**　この語例を日中ともに知らない。恐らく、何年になるのか、の意。そうとするな

は涙もえこそとどめね」（新古今集九－八八九）など見られるが、直接動詞に接するのではなく、いずれも「や・も・は」の助詞がはさまれ、結果的に「おい」が主語名詞であることが明示されている。本歌の「おいまどふべく」はその点が曖昧であり、「おいまどふ」という臨時的な複合語としての可能性も否定できない。ちなみに、本集二七番歌には同じく結句に「老いも死なずて」という表現があり、助詞「も」が入るが「老い死ぬ」という複合語とみなしえたものである。「可老迷久」という本文における「可」字の位置も考慮される。「老いまどふ」という複合語として考えれば、その意味は、年をとって訳が分からなくなるという意味になろう。

【補注】

和歌においては、発想・表現に類例の乏しいものであり、『新撰万葉集注釈　上巻(二)』が指摘するように、漢詩の影響を受けているのかもしれない。氷を鏡に見立てるのも、寛平御時后宮歌合の歌のように、水面の氷ならまだしも、軒の氷柱しかも平面に見えるほど連なった氷柱は、想像上のものでしかなかったろう。

この歌において一番の難題は結句の「老いまどふべく」の解釈である。それが「とくもわれなむ」という願望の理由であることは察せられるが、なぜそれが理由となりうるかである。『新撰万葉集注釈　巻上(二)』は「鏡にやってくるはずの老いを戸惑わせるために、鏡に割れてほしいと望む」と解釈している。この解釈は、鏡が自分の老いを如実に映し出す物であるということを前提としていると見られ、それは「ゆく年のをしくもあるかなますかがみ見るかげさへにくれぬと思へば」（古今集六－三四二）「年ごとにしらがのかずをますかがみ見るにぞ雪の友はしれける」（後撰集八－四七四）などからも首肯しうることである。しかし、その鏡が割れてしまったら、老いは戸惑うというよりも見えなくなってしまうのではあるまいか。

「とくもわれなむ」という願望は、現在、氷の鏡に映し出された自らの老いの姿を目にしているからに他ならない。その鏡が無くなってしまら、「幾年」と表記するのが一般。さもなければ、陶淵明「讀山海經詩十三首其二」詩に「天地共倶生、不知幾何年」、張籍「送梧州王使君」詩に「千里同行従此別、相逢又隔幾多年」とあるように、「幾何年」「幾多年」とするべきだろう。「廻（迴・回）」は、「何」「多」と共に平声であり、平仄の関係とも思えない。異文「千」の存在は、字形の類似と共に（韻も同じ）、そのような不自然さを回避しようとした試みの一つと捉えたい。ただし、これも「幾千回」なら兎も角、「幾回千」では、意味をなさない。

【補注】

韻字は「懸・前・年」で、下平声一先韻。平仄にも基本的誤りはない。

本作品は、【語釈】の「抛簷懸」「嚬臨」「幾廻年」などの各項で指摘したように、措辞にいくつかの傷があり、とても上等の作品とは言い難い。氷の鏡をすぐに見に行くという前半の内容と、結句の老女のつぶやきの内容が、本来ならすぐに見に行くということの種明かしになっていなければならないところが、そうなっていないというところにも、この作者の力量が示されているように思われる。

老いと鏡の関係を少し贅言しておく。

隋・孔範「和陳主詠鏡」詩に「懐恩未得報、空歎髪如糸」（『初学記』鏡）とあるように、鏡を見て自らの老いを嘆くという詩は六朝時代からあるけれども、それは決して多くはない。

それに少しずつ変化が出てくるのが盛唐である。李白「覧鏡書懐」詩に「自笑鏡中人、白髪如霜草」、李白「代美人愁鏡二首其二」詩に「紅顔老昨日、白髪多去年」とあるなど、次第に増えていき、白居易になると数え切れなくなる。

そうした量的なことと共に注目すべきは、質的な変化である。六朝詩においては鏡にまつわる故事を利用して作品を仕上げる外は、宮女に成り代わって寵愛の衰えを嘆く中で、一人鏡に向かうというものが多かったのに対して、盛唐より自己の老衰を嘆く作品が増えていくということであろう。岑参「下外江舟懐終南旧居」詩に「顔容老難頼、把鏡悲鬢髪」、

えば、老いをハッキリと思い知らされるすべがなくなるのであり、自分が老いているかどうか分からなくなるのである。「老いまどふ」という表現を、そのような意味でとらえておきたい。

顧況「夢後吟」詩に「明鏡唯知老、青山何処深」とあるなどを初めとして、それが次第に増えてゆき、白居易に至って極点に達する。彼の作品は身辺に題材を採ることが極めて多いが、自己の老いは彼の主要テーマであることは言を待たない。自照性ということもしばしば言われることだが、その主要な装置が鏡であった。

【比較・対照】

この、和歌と漢詩の組み合わせは、その順番からいえば、従来通り和歌を漢詩に翻案したということなのだろうが、内容上の時間的な先後関係から言えば、その逆になっていると考えるべきだろう。あるいは、和歌の「とくもわれなむ」という願望の背景を、漢詩が表現していると言うべきだろう。

和歌の上三句は、情景描写とも取れるものだが、漢詩の起句はそれを端的に表現する。反対に、和歌の下二句は極めて主情的表現の強いものであるが、それを「嫗女」という人物を登場させることで、漢詩は承句以下を構成している。

和歌が「とくもわれなむ」と望むのは、「老いまどふべく」と、自らの老いた醜い姿を見たくないからであるのは自明であるが、漢詩の承句は、わざわざその鏡が溶けて壊れる前に走って見に行くというわけだから、和歌の一番肝心な心を、漢詩作者は理解していないと言うべきだろう。あるいは、理解はしていても、和歌の「とくもわれなむ」に引きずられて、上手く漢詩に表現できなかったと言うべきだろうか。

韻字や平仄を度外視して漢詩の内容的な構成のみから言えば、承句は鏡を破壊する意に改変して結句に置き、「嫗女…」と「老来…」の二句をそのまま前にずらして、承句と転句にすることにより、取りあえず先のような破綻を避けることが出来る。

兎も角、和と漢の対比からする最も大きな問題点は、もし和歌の発想が類例に乏しいことで、漢詩の影響を受けているのだとすれば、漢詩の方で老いを嘆く主体を、何故女性に設定したかということであろう。

漢詩の【補注】が指摘するように、六朝詩においては鏡を覗くのは寵愛を失って涙で化粧のくずれた宮女であり、日本に最も影響を与えた白居易においては、自分自身の老残の姿であった。

『新撰万葉集注釈　巻上(二)』が言うように、和歌に白居易の影響が大きいのであれば、何故漢詩における主体が女性でなければならないのか。和歌の措辞から、主体が女性と限定できるのだろうか。

〔注〕本稿は、『共立女子大学文芸学部紀要』第四〇集～第五四集（平成六年一月～平成二〇年一月）および『東京工業高等専門学校研究報告書』第二六号～第三九（一）号（平成六年一二月～平成一九年一二月）の続稿である。

（平成二〇年九月二五日受理）

東京工業高等専門学校研究報告書

第 40（1）号

平成20年度

平成21年１月18日発行
編　集　者　　東京工業高等専門学校図書委員会
発　行　者　　東 京 工 業 高 等 専 門 学 校
　　　　　　　東京都八王子市椚田町1220の２
　　　　　　　TEL　八王子（042）668－5111
　　　　　　　〒193－0997
印　刷　所　　電算印刷株式会社
　　　　　　　長野県松本市筑摩１－11－30
　　　　　　　TEL　松本（0263）25－4329
　　　　　　　〒390－0821

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.