

ISSN 0914-3750

REPORTS  
OF  
THE  
INDUSTRIAL  
RESEARCH  
CENTER  
OF  
SHIGA  
PREFECTURE

1992 研究報告

滋賀県工業技術センター

# 目 次

## 研究報告

画像処理に対する知識処理の適用に関する研究（第一報）	1
川崎雅生	
電子機器の電磁環境評価法の研究（第四報）	
木村昌彦、堤 誠、西村和男、山元伸一、吉川隆彦	7
バッチ式ガス焼成炉における焼成工程の自動化に関する研究（第一報）	
小川栄司、今西康博、中島 孝、井上和夫、亀井且有、桑田一仁	12
光センシング技術による表面粗さ判定法の研究（第二報）	
河村安太郎	23
機械部品整列のための姿勢検出装置の試作（第二報）	
月瀬寛二	32
移動部品を把持できるロボットの研究（第二報）	
深尾典久	40
炭素繊維強化高分子複合材料の“ぬれ性”に関する研究	
山中仁敏	46
CF <sub>4</sub> プラズマ処理によるポリイミド表面のフッ素化と表面の低接着化	
中村吉紀、丹田久嗣	51
高圧下における酵素反応に関する研究（第一報）	
松本 正	59

## 技術開発報告

画像処理の利用による加工組立作業の自動化に関する研究（第三報）	
櫻井 淳、渡部利樹	67
炭素繊維強化熱可塑性ポリイミド樹脂複合材料の開発	
那須喜一、山中仁敏、中村吉紀	74
デザイン手法の高度化に関する研究（第五報）	
野上雅彦、山下誠児	81

## 実験レポート

機械部品の平面度・直角度測定装置の試作（第二報）	
井上栄一	87
プラズマCVDによる硬質被膜の機械的特性に関する研究	
西内廣志	95
ゾルーゲル法による新機能性光学ガラスセラミックスの作成条件に関する研究	
前川 昭	99
ゼオライト機能性材料の開発	
前川 昭、松本价三良	104

# 研 究 報 告

# 画像処理に対する 知識処理の適用に関する研究（第一報）

——ニューラルネットワークによる文字認識のための前処理——

技術第一科 川崎 雅生 Masao Kawasaki

あらまし：生産現場等において、組立を行う部品のチェックや製品に対する型番印字・刻印作業の分野では、画像処理を応用して文字を正確に効率良く認識できれば自動化できることが多い。ニューラルネットワークは、パターン認識や分類に効果を発揮すると期待されている知識処理の一手法であるが、その特徴である学習機能は莫大な量の計算を必要とする。本年度は、ニューラルネットワークを応用した文字認識を行うための前処理として、入力画像に含まれる情報を効率的に抽出する方法について検討を行った結果、2次元DCTを使うことでニューラルネットワークの計算量を、2値画像を直接計算する方法に比べて3桁以上減少させることができた。

## 1. まえがき

生産現場の自動化が進むなかで、検査作業については依然として目視に頼る方法（目視検査）が中心となっている。これは、検査項目が人の経験とカンに頼る部分が多く、論理的な解析がしにくいことや、自動化できても一品料理的な要素が多いため他の同様な検査工程に適用しにくいことがあげられる。

一方、知識処理の一手法としてニューラルネットワークの研究が進み、工業的な応用事例も報告されてきている（文献1）。ニューラルネットワークの特徴は学習機能にあり、論理的な解析をしなくても学習パターンから必要な処理を実現できる点で画像処理の分野においても効果が期待されている。しかし、文字認識等の分野においてニューラルネットワークを適用する場合、原画像の2値化データをそのままニューラルネットワークに入力すると計算量が多すぎて、学習がうまく進まないことや学習時間がかかり過ぎる問題がある（文献2）。

本年度は、画像データの圧縮に有効とされる2次元DCTを利用して、文字認識におけるニューラルネットワークの計算量を減らすことを検討したので、その概要について報告する。

## 2. ニューラルネットワークの特徴と問題点

### 2-1 ニューラルネットワークの特徴

ニューラルネットワークは、文字認識等において処理に必要なアルゴリズムを、教示パターンと教師データから自己学習により獲得するための機能があるため、以下のメリットがある。

- (1) 解析的に個々の処理アルゴリズムを構築するより、短期間でシステム開発ができる。
- (2) 教示パターンを変更するだけで、再学習により他の処理に適用できる。
- (3) 論理的なアルゴリズムが組立てにくい分野に適用することができる。



## 2-2 ニューラルネットワークの問題点

2-1節で述べたような特徴があるため、文字の検査等をニューラルネットワークで処理できる期待は大きいですが、以下のような問題点がある。

(1) 入力データが多いと学習時間が長くなる。3層型のニューラルネットワーク(図1)を例にとって、計算量を概算すると次のようになる。ただし、入力層、中間層、出力層のニューロンの数をそれぞれI、J、Kとする。

$$\begin{aligned} & \{I \times J + J \times K\} \dots\dots\dots (\text{重み係数の数}) \\ & \times \text{基本処理時間} \dots\dots\dots (\text{ニューロンの出力値計算等}) \\ & \times \text{教示パターン数} \dots\dots\dots (\text{例 } 100 \text{ 個}) \\ & \times \text{収束するまでの繰り返し回数} \dots\dots\dots (\text{数千回程度}) \dots\dots (1) \end{aligned}$$

(1)式からわかるように、計算量は(JもIと同程度の大きさとして)およそIの2乗に比例して増大する。

(2) 重み係数の初期値や学習定数の値により、(1)式の繰り返し回数が大きく異なる(初期値等が悪いとなかなか収束しない)。

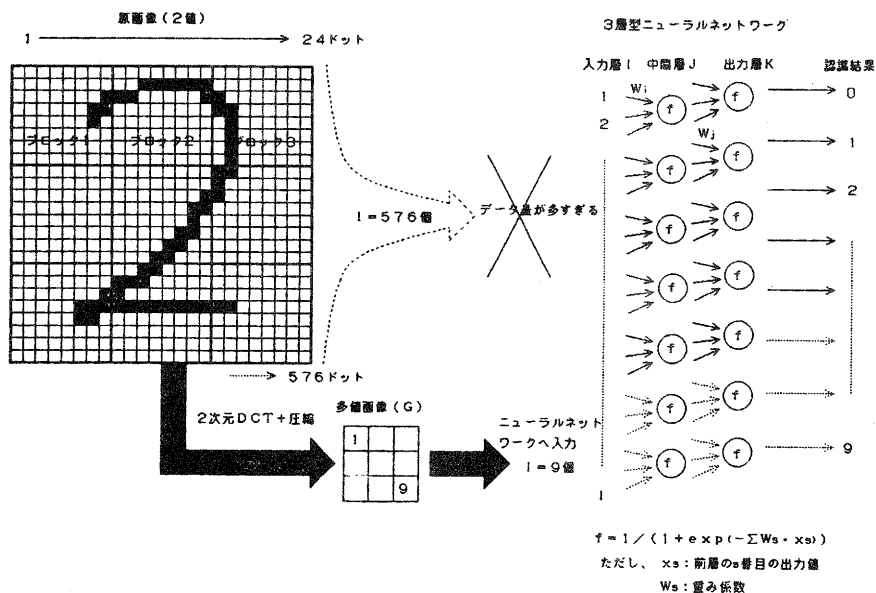


図1 2次元DCTを利用したニューラルネットワークへの構成

### 3. 2次元DCTによる特徴パラメータの抽出

2-2節で述べた入力層のニューロンの数Iを効率的に減少させることができれば、ニューラルネットワークの持つ問題の1つが解決できる。ここでは、2次元DCTを利用することにより、入力層Iを効率的に減少させることができることを示す。なお、2次元DCTの高速な計算方法は、

文献3等を参照されたい。

### 3-1 画像の分割

処理対象となる2値の原画像が、縦横8の倍数の画素(8P×8Qドット)を持つ場合に、それをブロック(8×8ドット)に分割する。この各ブロックの2値画像g(m,n)に2次元DCTを適用する(図1)。

$$g(m,n)=0 \text{ or } 1 \quad \text{ただし、} 0 \leq m \leq 7, 0 \leq n \leq 7 \quad \dots \dots \dots (2)$$

### 3-2 特徴パラメータGの定義

ブロックサイズ8×8の場合における2次元DCTの基本式を(3)式に示す。

$$G(j,i) = C_j C_i \sum_{n=0}^7 \sum_{m=0}^7 g(m,n) \cos \frac{(2n+1)i\pi}{16} \cos \frac{(2m+1)j\pi}{16}$$

$$\text{ただし、} C_k = 1/\sqrt{8} \quad \dots \dots \dots k=0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$= 1/2 \quad \dots \dots \dots k=1 \sim 7$$

このG(j,i)をもとに、ブロック内の特徴パラメータGを次式(4)のように定義する。

$$G = G_{00} + G_{0-} + G_{-0} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、G<sub>00</sub>、G<sub>0-</sub>、G<sub>-0</sub>はG(j,i)より次式(4)のようにして求める。

$$G_{00} = G(0,0)、$$

$$G_{0-} = \sum_{i=1}^7 |G(0,i)|、 \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$G_{-0} = \sum_{j=1}^7 |G(j,0)|$$

(5)式をわかりやすくするために、次の諸量を定義する。

$$M = \sum_{n=0}^7 \sum_{m=0}^7 g(m,n)$$

$$L_m = \sum_{n=0}^7 g(m,n) \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$R_n = \sum_{m=0}^7 g(m,n)$$

ここで、Mはブロック中の要素数(1の画素数)、L<sub>m</sub>は第m行内の要素数、R<sub>n</sub>は第n列内の要素数を表している。式(6)を用いると、式(5)は次のように表すことができる。

$$G_{00} = M/8$$

$$G_{0-} = (\sqrt{2}/8) \sum_{i=1}^7 \left| \sum_{n=0}^7 R_n \cos \frac{(2n+1)i\pi}{16} \right| \dots \dots \dots (7)$$

$$G_{-0} = (\sqrt{2}/8) \sum_{j=1}^7 \left| \sum_{m=0}^7 L_m \cos \frac{(2m+1)j\pi}{16} \right|$$

G<sub>00</sub>は、ブロック中の要素数に対応し、G<sub>0-</sub>とG<sub>-0</sub>はそれぞれ、縦方向と横方向の周辺分布を求め、これを一次元離散コサイン変換したときの周波数成分の絶対値の総和に対応している。従って文字認識においては有効な特徴量になっていると考えられる。

### 3-3 特徴パラメータGの性質

3-2節で定義した特徴パラメータGの持つ性質について説明する。今、対象ブロックに下記の条件で要素が存在しているとする。これは、辺の長さが(u,v)である長方形が該当する。

$L_m = M/u \dots \dots \dots \text{if } m_0 \leq m \leq m_1$ $= 0 \dots \dots \dots \text{else case}$ $R_n = M/v \dots \dots \dots \text{if } n_0 \leq n \leq n_1$ $= 0 \dots \dots \dots \text{else case}$	<p style="text-align: center;">ただし、<math>0 \leq m_0</math></p> $0 \leq m_1 - m_0 < 7$ $u = m_1 - m_0 + 1 \dots \dots \dots (8)$ $0 \leq n_0$ $0 \leq n_1 - n_0 < 7$ $v = n_1 - n_0 + 1 \text{ とする。}$
---	--

このとき次式が成立する。

$$G_{0-} = (\sqrt{2M}/8v) \sum_{i=1}^7 \left| \sum_{n=n_0}^{n_1} \cos \frac{(2n+1)i\pi}{16} \right| \dots \dots \dots (9)$$

$$G_{-0} = (\sqrt{2M}/8u) \sum_{j=1}^7 \left| \sum_{m=m_0}^{m_1} \cos \frac{(2m+1)j\pi}{16} \right|$$

上式において、 $0 \leq s_1 - s_0 < 7, 0 \leq s_0^*$  ならば、 $s_0$ や $s_1$ に関係なく

$$5.2 < \sqrt{2} \sum_{t=1}^7 \left| \sum_{s=s_0}^{s_1} \cos \frac{(2s+1)t\pi}{16} \right| < 8.9 \dots \dots \dots (10)$$

となることが確認できる(表1)。そこで、Kを次式により定義する。

$$K = \sum_{t=1}^7 \sqrt{2} \cos \frac{t\pi}{16} = \sum_{t=1}^7 \left| \sqrt{2} \cos \frac{(2s+1)t\pi}{16} \right| \quad (\text{証明略})$$

$$\approx 6.47 \dots \dots \dots (11)$$

このKを用いると、(9)式のG<sub>0-</sub>、G<sub>-0</sub>は次のように近似することができる。

$$G_{0-} \approx (M/8)(K/v)$$

$$G_{-0} \approx (M/8)(K/u) \dots \dots \dots (12)$$

従って、条件(8)において $m_0$ や $n_0$ の値(ブロック中の画像パターンの位置)に関係なく、G

は近似的に次のように表現することができる。

$$G \approx (M/8) \{1 + K(1/u + 1/v)\} \dots \dots \dots (13)$$

式(13)より、Gは対象領域中に存在する要素数(M)に比例した量と、広がり形状(u、v)の逆数の和に1を加えた数との積をほぼ近似していることがわかる。表2に、(4)式で計算できるGの値のばらつきと、各形状から目視により抽出したuやvを(13)式に代入して求めた値を示す。

一般に広がり形状を数式処理により数値化することは難しいが、(4)式を計算することは容易である。

\* 補足  $s_1 - s_0 = 7$  のときは、 $\sum_{t=1}^7 \left| \sum_{s=0}^7 \text{Cos} \frac{(2s+1)t\pi}{16} \right| = 0$  が成り立つ(証明略)。

表1 Cos{(2s+1) tπ/16} の値  
(Cnは、Cos (nπ/16)を意味する)

	s →							
t ↓	0	1	2	3	4	5	6	7
0	C1	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0
1	C1	C3	C5	C7	-C7	-C5	-C3	-C1
2	C2	C6	-C6	-C2	-C2	-C6	C6	C2
3	C3	-C7	-C1	-C5	C5	C1	C7	-C3
4	C4	-C4	-C4	C4	C4	-C4	-C4	C4
5	C5	-C1	C7	C3	-C3	-C7	C1	-C5
6	C6	-C2	C2	-C6	-C6	C2	-C2	C6
7	C7	-C5	C3	-C1	C1	-C3	C5	-C7

表2 特徴パラメータGと近似式の比較

要素数	形状	近似式の値 [(13)式]	Gの値 [(4)式]
1		1.7	1.7
2		1.9	1.7~2.2
4		3.7	3.3~4.3
4		4.5	4.4~4.8
4		2.1	1.8~2.7
8		5.9	5.1~7.0
8		8.3	7.5
8		4.2	3.6~5.4
8		2.6	1.0

#### 4. Gを使ったニューラルネットワークによる文字認識

このようにGは、1ブロック8×8の64ドットの画像データに含まれる要素数とその形状に関する情報を含んでいるため、2値データ64個の代替として多値データ1個をニューラルネットワークに利用できることが推測される。これは、2-2節で述べた計算量から考えると、対象画像(文字)と無関係に、計算量を3000分の1以下に減少していることになる。

表3 ニューラルネットワークによる文字の認識率  
(教示文字数=教示パターン数×10)

1文字当たりの教示パターン数	5	10
認識正解率	80%	95%

表3は、0～9の10個の数字(24×24ドット)を縦横8×8ドットの9ブロックに分割して、9個の特徴パラメータGを求め、3層のニューラルネットワークでBP法により学習させた結果である(図1)。

1文字当たり10個の教示パターンで学習させた結果では、95%程度の正解率を得ることができた。なお、学習のための繰り返し回数は、1300回程度であった。

## 5. むすび

2次元DCTを使った文字認識は、実験を始めたばかりであるが、本年度の研究の成果としてニューラルネットワークに原画像を直接入力しなくても、文字認識が高い精度で行える可能性を見つげられた。

今後の課題としては、

- (1) データ圧縮の限界調査
- (2) 各重み係数に対する初期値の最適設定の導出方法の検討
- (3) ノイズを含む原画像に対する認識率

等が考えられるので、次年度に続けて研究を行う。

## 謝辞

本研究について御指導いただいた龍谷大学理工学部の有木康雄教授に感謝します。

## 【参考文献】

- (1) 松崎他:「ニューラルネットワークを用いた工業用文字認識システムとレーザ印字認識への適用」、電学論D、112巻6号、p561-568(平4)
- (2) 池谷、増田:「多層型ニューラルネットワークにおけるリンク荷重の最適な初期化について」、ISCI E、第36回システム制御情報学会研究発表講演会、p153-154(平4)
- (3) N.I.Cho, S.U.Lee: Fast Algorithm and Implementation of 2-D Discrete Cosine Transform、IE EE、TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS、VOL.38、NO.3、p295-305(1991)

# 電子機器の電磁環境評価法の研究（第四報）

## —電波吸収材の試作と特性評価に関する研究（1）—

技術第一科 木村 昌彦 Masahiko Kimura  
京都工芸繊維大学 堤 誠 Makoto Tsutsumi  
西村 和男 Kazuo Nishimura  
日光化成(株) 山元 伸一 Shinichi Yamamoto  
吉川 隆彦 Takahiko Yoshikawa

あらまし：電波利用の多様化、ビルの高層化等による電波障害の防止策として、部屋の壁やビルの外壁あるいは大型橋梁の側面等に電波吸収体が張られることが多くなってきた。この材料は、現在フェライトが中心で、他の材料はまだあまり実用化されておらず、特性の測定も周波数帯域によっては大がかりになるのが現状である。

そこで、カーボンファイバーを基材とした、従来のものとは違った材料・製法による電波吸収体の試作を試みたところ、材料表面に周期構造を装荷する事によって、狭帯域ではあるが、 $-20\text{ dB}$ 超のものが得られた。

また、これらの材料に適した特性評価法も併せて検討を行った。

### 1. まえがき

高度情報化の今日、衛星通信、移動体通信はめざましく進展しているが、ビルの高層化、大型建築物の増加により、その電磁波環境は悪くなる一方である。このためテレビ、ラジオに受信障害が起り、他の無線設備の運用に悪影響を及ぼしている。また、医療機器の分野にも高周波が多く利用されるようになり、機器の誤動作が即、人命に関わるなど重大な要素を含んでいる。これらの対策のために電波吸収体が用いられるが、まだ用途は限られており、すべての電磁波障害に対応できるまでに開発が進んでいない。また、今後発展していくであろうオフィス内・工場内無線LANの環境づくりにおいても、高性能電波吸収体の開発が望まれている。

そこで、今までと違った材料・製法で、これまで対応できなかった分野・対象物への適用可能性を探るため、電波吸収体の試作、評価を行った。

### 2. 試作材料

#### 2-1 カーボンファイバーを基材としたもの（カーボン繊維成形板）

カーボンファイバーをフェルト状にしたものにフェノール樹脂を含浸し、シート状および板状に加圧硬化させたものを作製した。

①試料1-A：サイズ=1500x1500x30t[mm]、嵩密度=0.223[g/cc]

②試料1-B：サイズ=1500x1500x5t[mm]、嵩密度=0.178[g/cc]

#### 2-2 黒鉛粉（グラファイト）を損失源としたもの（カーボン混入エポキシ樹脂成形板）

エポキシ樹脂をバインダーとし、導電率調整のためのガラスバルーンと共にグラファイトを成形して作製した。

サイズ=500x1000x10t[mm]

- ①試料2-A：導電率=0.91[S/m]（直流値）
- ②試料2-B： " =0.45[S/m]（ " ）
- ③試料2-C： " =0.050[S/m]（ " ）
- ④試料2-D： " =0.0030[S/m]（ " ）

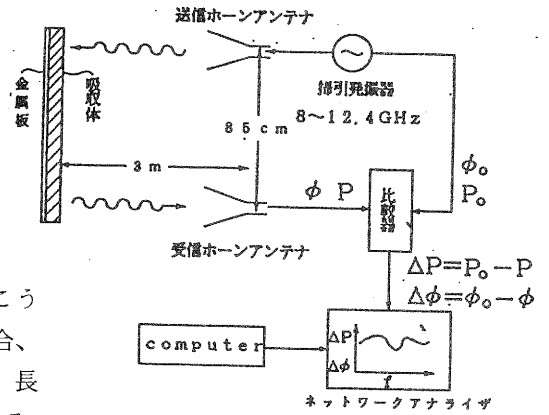


図 1 アンテナによる測定ブロック図

### 3. アンテナによる実規模での測定

図1にアンテナを使った測定ブロック図を示す。こういった実規模で反射吸収特性を測定しようとする場合、波長に見合った寸法の試料や測定距離が必要であり、長波長域では設備が大規模となり測定が困難になってくる。今回は測定帯域を8.0～12.4GHzとし、この回路構成で行った。

### 4. テストピースによる物理定数の測定

#### 4-1 材料のSパラメータによる吸収特性の評価

円筒状に加工した試料を同軸管内に装着して、ネットワークアナライザにてSパラメータ ( $S_{11}$ 、 $S_{21}$ ) を測定すると、これらの値から反射係数 $\Gamma$ および透過係数 $T$ は次のように求められる。

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1}$$

$$T = \frac{\{S_{11}(\omega) + S_{21}(\omega)\} - \Gamma}{1 - \{S_{11}(\omega) + S_{21}(\omega)\} \cdot \Gamma}$$

ここに、

$$K = \frac{\{S_{11}^2(\omega) - S_{21}^2(\omega)\} + 1}{2 S_{11}(\omega)}$$

また、これらの値より複素誘電率 $\bar{\epsilon}$ 、複素透磁率 $\bar{\mu}$ は次のように求まる。

$$\left[ \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right]^2 = x, \quad - \left\{ \frac{c}{\omega d} \ln \left[ \frac{1}{T} \right] \right\}^2 = y \quad \left[ \begin{array}{l} c : \text{光速} \\ d : \text{試料厚さ} \end{array} \right]$$

とおくと、

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{y/x}$$

$$\bar{\mu} = \sqrt{x \cdot y}$$

#### 4-2 導波管による試料の減衰量の測定

矩形導波管において、TE<sub>10</sub>モードを考えると、マクスウェルの方程式から、  
 $\nabla \times \mathbf{E} = -j \omega \mu_0 \mathbf{H}$ より、

$$-\frac{\partial E_y}{\partial z} = -j \omega \mu_0 H_x \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -j \omega \mu_0 H_z \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\nabla \times \mathbf{H} = j \omega \epsilon_0 \mathbf{E}$ より、

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{\partial H_x}{\partial z} = j \omega \epsilon_0 E_y \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、式(1)、(2)、(3)より次の波動方程式が得られる。

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 E_y = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、管壁では $E_y = 0$ だから、

$$E_y = A \sin(\pi/a)x \cdot e^{-j\beta z} \quad (A: \text{振幅}, a: \text{導波管長辺寸法})$$

とおくと、

$$\beta = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - (\pi/a)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、損失媒質中では、 $\epsilon - j\sigma/\omega = \bar{\epsilon}$ とおいて、

$$\bar{\beta} = \sqrt{\omega^2 \bar{\epsilon} \mu_0 - (\pi/a)^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、試料への入力電力と試料を透過してくる電力の比で減衰量 (dB) が分かるから、

$$dB = 20 \log \left| \frac{2 \cos \bar{\beta} d + (\beta / \bar{\beta} + \bar{\beta} / \beta) \cdot j \sin \bar{\beta} d}{2 e^{j\beta d}} \right| \quad \dots (7)$$

と表せる。

また位相は、入射電力を $P_{in}$ 、透過電力を $P_{out}$ とすると、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(P_{in}/P_{out})}{\text{Re}(P_{in}/P_{out})} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

### 5. 実験結果と考察

#### 5-1 カーボン繊維成形板の吸収性能

この材料は、カーボン繊維がやや層状に分布しているものの、かなりランダムな方向に絡み合っており、それほど繊維の方向性はない。試料1-Aに対し、導電性材料をできるだけ粗にするた



め試料1-Bは約20%密度を下げて製作したが、どちらも平板ではほとんど反射してしまい、吸収効果は見られなかった。この時の試料1-Aのデータを図2に示す。

この測定は図1の測定回路により、供試吸収体に向け照射された電磁波が、どれだけ反射されて戻ってきたかを見ている。吸収体背面の金属板だけの反射を基準にして、それとの差を吸収特性としている。このデータでは、12GHz付近で約5dB程度の減衰が見られるが、それ以外の帯域ではほとんど見られない。これは

特性的には、金属板と同等の作用、すなわち反射性能を示していることになる。今、反射と断定したが、この試料が電磁波を透過する材料であっても、データはこれと同じになる。ただ、試料1-Aの1/6の厚さの試料1-Bのシールド特性のデータ(図3)から、この材料が透過ではなく、反射性能を持っていることが分かる。周波数300MHz~1GHzまでの範囲で20dB以上の減衰があることが読み取れる。

そこで、反射させずに吸収効果を上げるため、同質材料で図4上図のように、平板の表面に下駄の歯状に周期的に突起を設けると、狭帯域ではあるが-20dBの減衰が確認された。周波数ではほぼ10GHzのところであるが、これは周期構造のピッチが3cmで、波長と一致しているところからくるものと考えられる。

今回の実験では検証できなかったが、この周期構造の突起のピッチおよび高さに最適値が存在するのではないかと考えられる。この点については、今後検討を加えたい。

## 5-2 カーボン混入エポキシ

### 樹脂成形板の吸収特性

式(7)において、比誘電率を20として導電率 $\sigma$ を変化させて計算すると、図5のようになる。これに試料2-Bの実測データを書き込んだものが図中のプロットである。比誘電率20というのは推測値であるが、これが2~5

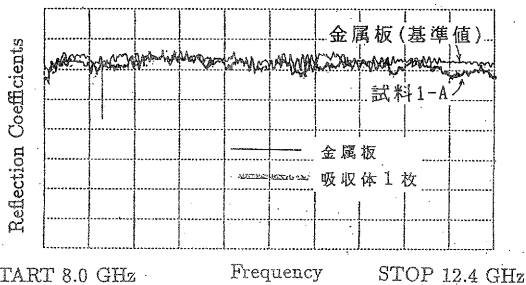


図2 試料1-Aの反射量周波数特性

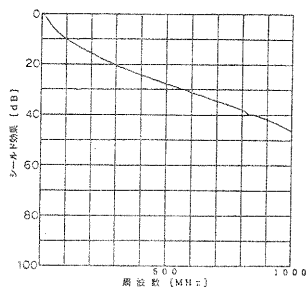


図3 試料1-Bのシールド効果特性

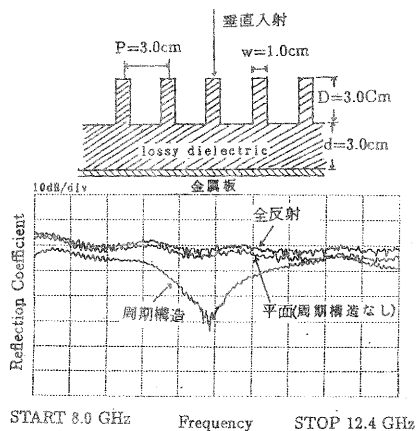


図4 周期構造の反射量周波数特性

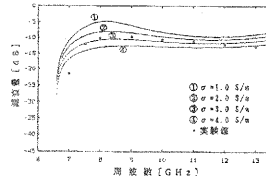


図5 透過量周波数特性の理論値と実験値

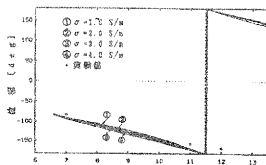


図6 位相周波数特性の理論値と実験値

程度ではこの計算値には全然のらないカーブになってしまう。なお、周波数 6.6 GHz 付近でカーブが急激に下がっているのは、対象としている導波管のカットオフ周波数 (6.55 GHz) によるもので、これ以下の周波数の波は伝送されないためである。そして、図 6 の位相のデータでは、比誘電率を 10 とすると、計算値と近い特性になる。おそらくこの試料は、比誘電率が 10 ~ 20 の間にあるものと推測される。

また、試料 2-A ~ D の直流における導電率は、約 1 から  $10^{-3} \text{ S/m}$  と、大きく分布しているが、GHz 帯ではそれほど顕著な差は出なかった。

### 5-3 Sパラメータによる試料の材料定数の測定

試料 2-A ~ D をそれぞれ同軸管の中に装着し、ベクトルネットワークアナライザにて  $S_{11}$ 、 $S_{22}$  パラメータを測定したが、これらから計算で得られた複素誘電率、複素透磁率は理論的に合わないものであった。これは、キャリブレーションの方法、校正基準面の取り方、試料の装着位置等、誤差要因を多く含んでいるものと思われる。今後検討すべき事項である。

## 6. むすび

電波吸収体は特殊な研究分野ではあるが、その歴史は長い。そして今後ますますその重要性は増していくと思われる。こういった観点から、新しい電波吸収体の試作を試みたが、現在までのところ満足のいくものが得られていない。これまでで分かったことは、

- (1) カーボン繊維をプレスしたような構造のものは、導電性が高く、金属のような性質を示し、平板のままでは、シールド性能は高いが、吸収性能は良くない。
- (2) 上記のような材料でも、その表面に周期構造を装荷すると、狭帯域ではあるが、 $-20 \text{ dB}$  を越える吸収性能を持たせることができた。ただ、周期構造の突起のピッチ、高さ等は対象とする周波数と密接な関係があり、吸収体の設計条件を把握する上で極めて重要な事項である。今回はここまで検証できなかったが、今後の課題である。
- (3) カーボン混入エポキシ樹脂成形板の場合も、今回試作した 4 種類のテストピースは、吸収体としての十分な特性は得られなかった。今後さらに配合比について検討する必要がある。特に、カーボン粉の比率をもっと粗にすることが有効と思われる。

### [参考文献]

- (1) 雨宮好文：現代電磁波工学、オーム社、(1985)
- (2) 電磁波の吸収と遮蔽、日経技術図書、(1989)
- (3) 榎本肇、関口利男：電波工学、オーム社、(1964)
- (4) 横河・ヒューレット・パッカート：最新の電子材料評価法と測定装置セミナーテキスト

# バッチ式ガス焼成炉における 焼成工程の自動化に関する研究（第二報）

技術第一科	小川 栄司 Eiji	Ogawa
信楽窯業試験場	今西 康博 Yasuhiro	Imanishi
	中島 孝 Takashi	Nakajima
立命館大学理工学部情報工学科	井上 和夫 Kazuo	Inoue
	亀井 且有 Katuari	Kamei
	象田 一仁 Kazuhito	Kumeda

あらまし：現在、信楽で主に使用されているバッチ式ガス焼成炉では、その焼成工程により炉内の温度と雰囲気を適正に制御する必要があるが、焼成炉は炉内の温度と雰囲気により燃焼特性が複雑に変化する非線形なシステムであり熱容量も非常に大きいことから、その操作には熟練者の経験と勘が必要となっている。そこで、人間の扱うあいまいな情報をファジィ集合として定量化し、熟練者の持つノウハウに基づいて設定された制御ルールに従って推論を行うファジィ制御を利用して、その焼成工程の自動化を試みた。その結果、PID制御による焼成時に見られた炉内温度の乱れやオーバーシュートが改善され、良好な制御結果を得ることが可能となった。

## 1. まえがき

現在、信楽で使用されている陶磁器焼成炉の大部分は、昭和40年代中頃より急速に普及した液化石油ガス(LPG:Liquefied Petroleum Gas)を燃料とするバッチ式シャトル窯である<sup>1)</sup>。バッチ式シャトル窯による陶磁器製品の焼成では、焼成工程における炉内の温度および雰囲気(酸素および一酸化炭素濃度)が、焼成製品の色合い・外観・品質などに大きな影響を及ぼすため、焼成にあたっては、炉内の温度や雰囲気を随時測定しながら、燃料のガス圧やエアダンパーの開度を適度に調節する必要がある。ところが、焼成炉は炉内の温度と雰囲気の相互干渉によりその動特性が複雑に変化する非線形なシステムであり、また焼成炉自身の熱容量が非常に大きいこともあいまって、その操作には熟練者の経験と勘が必要となっている。

一方、人間の扱うあいまいな情報をファジィ集合として定量化し、人間の経験則に基づいて設定された制御ルールに従って推論を実行し制御を行う、ファジィ制御が数多くの分野で応用されその有効性が報告されている<sup>2-3)</sup>。ファジィ制御では、数式モデルによる記述の困難な制御に関するノウハウを、言語表現により比較的簡単に制御ルールとして設定できることから、上記の焼成工程の例のように熟練者の経験や勘がものをいう分野には、ファジィ制御の適用は非常に効果的な手段であると考えられる<sup>4)</sup>。

本研究では、昨年度のPID制御による焼成炉自動制御システムの開発<sup>5)</sup>に引き続き、ファジィ制御による自動化を試み、その有効性を検討する。

## 2. 焼成炉の構造と炉内の反応

### 2-1 焼成炉の構造

今回の実験で使用した焼成炉の仕様を表1に、外観と構造をそれぞれ図1と図2に示す。このような構造の焼成炉は倒炎式と呼ばれるもので、炉床両側のガスバーナより発生した火焰は側壁に沿って上昇して天井に当たり、焼成物の間を下降して炉床中央の煙道から煙突に排出される。焼成炉内の温度と雰囲気を適正な値とするために、燃料のガス圧の操作により炉内へ供給される燃料のガス量が調節され、エアダンパーの操作により炉内の燃焼ガスの煙突からの放出量が調節される。燃焼に必要な空気はベンチュリー式のスラットバルブによる自然吸入であるため直接操作はできないが、エアダンパーの操作により炉内の圧力が変化し、間接的にその量が調節される。ゲートダンパーは、煙突の有効断面積を調節するために使用され、エアダンパーの補助的な役割を果たしている。

表1 焼成炉の仕様

名称	小型シャトル式ガス炉
製造	高砂工業(株)
内寸法	1850mm×960mm×1200mm
燃料	液化石油ガス(ブタン:プロパン=7:3)
焼成時間	15~18時間

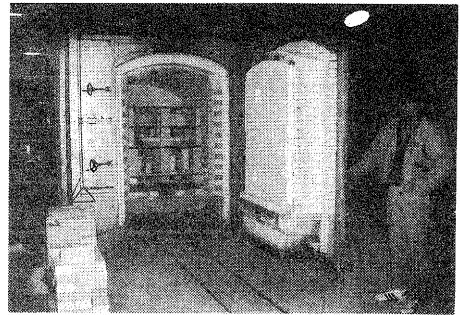


図1 焼成炉の外観

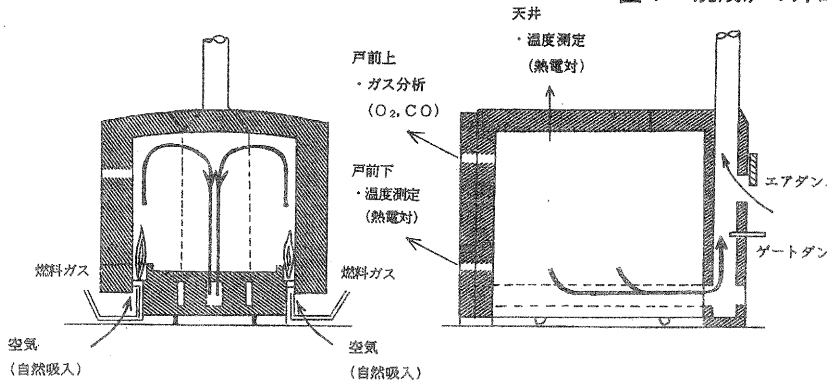


図2 焼成炉の構造と各種データ測定位置

### 2-2 焼成炉内の反応

自然吸気式のバッチ式ガス焼成炉では、炉内の温度は燃料ガスの燃焼により発生する熱量と煙突より放出される燃焼ガスの持ち去る熱量などにより決定され、炉内の雰囲気は炉内に吸入される空気量と燃料ガスの燃焼反応により決定される。主として炉内温度は燃料のガス圧によって、雰囲気はエアダンパーによって

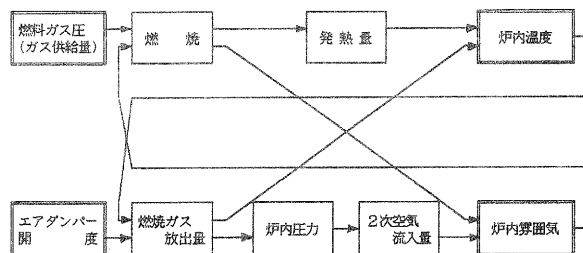


図3 焼成炉内の因果関係

変化するが、これらは図3に示すように互いに干渉しあい、燃料のガス圧とエアダンパー開度を  
入力、炉内温度と雰囲気を出力とする2入力2出力の非線形なシステムをなしている。

### 3. ファジィ制御

#### 3-1 制御方法

自然吸気式のバッチ式ガス焼成炉では、炉内の温度と雰囲気が互いに影響を及ぼし合っている。  
このため、昨年度のPID制御による実験のように、炉内の温度と雰囲気をそれぞれ別々にフィー  
ドバックして制御を行おうとすると、燃料のガス圧とエアダンパーの操作に互いに矛盾が生じ、  
炉内の燃焼状態が不安定となる。炉内雰囲気の時定数が炉内温度のそれと比べ非常に小さいため、  
炉内雰囲気が炉内温度の制御に追従する形で安定し、制御結果としては比較的良好な特性が得ら  
れるが、焼成炉の内部では非効率的な燃焼が行われていることが十分に予想される。

そこで、今回のファジィ制御による焼成炉自動制御システムでは、図4に示すように、まず炉  
内温度により燃料のガス圧を決定し、次に得られたガス圧と炉内雰囲気によりエアダンパーの開  
度を決定する。これにより、炉内雰囲気の制御に対する矛盾とこれに伴う炉内温度への悪影響を  
未然に防ぎ、焼成炉内の燃焼ができるだけ効率の良いものとなるようにする。

また、熟練者のノウハウが必要とされるような特殊な操炉については、知識ベースとして別の  
制御ルール(特殊ルール)を用意し、必要に応じてこの特殊ルールを適用する。今回の実験では、  
特に還元焼成移行時における操炉に限定し(図4点線部)、その有効性を確認する。

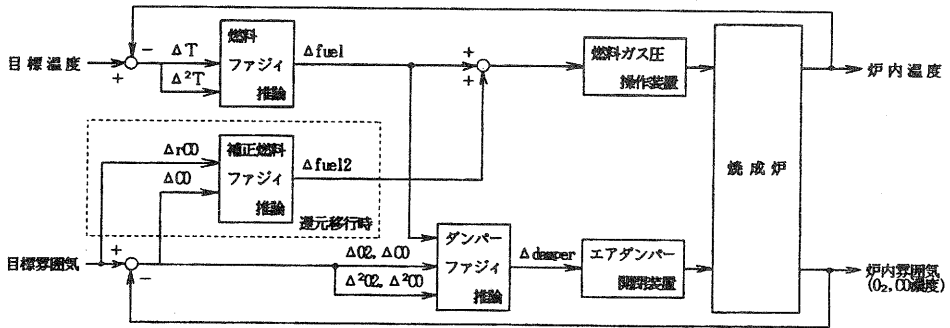


図4 ファジィ制御による焼成炉制御方法

#### 3-2 メンバシップ関数

今回のシステムに設定したメン  
バシップ関数を図5～図7に示  
す。メンバシップ関数は、ファ  
ジィ推論処理の高速化のため、一  
部の例外を除いて、その形状を左  
右対称の三角形とする。また、メ  
ンバシップ関数のラベルは、制  
御ルールの複雑化を抑えるため、  
入出力とも3種類(Negative, Zero,  
Positive)とする。

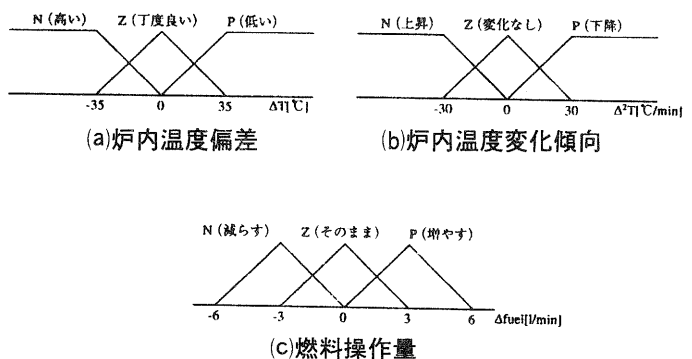


図5 燃料ファジィ推論のメンバシップ関数

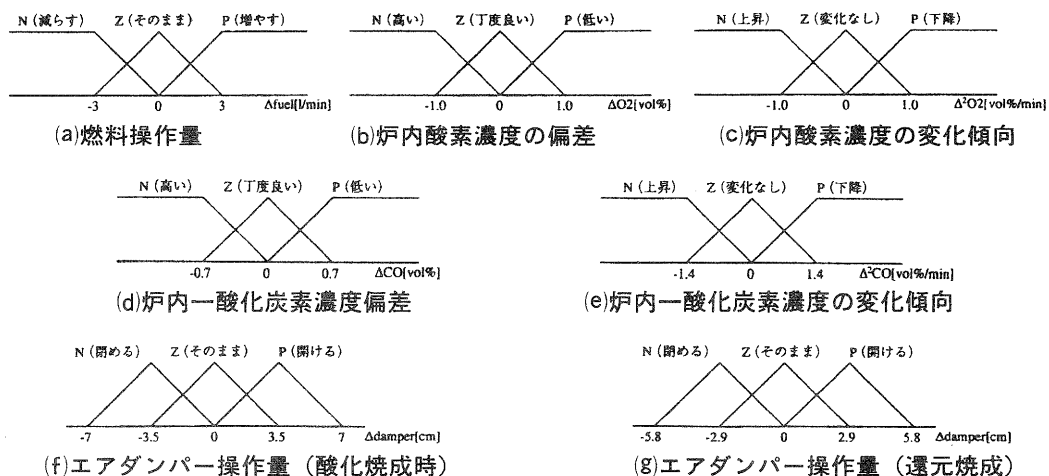


図6 エアダンパーファジィ推論のメンバーシップ関数

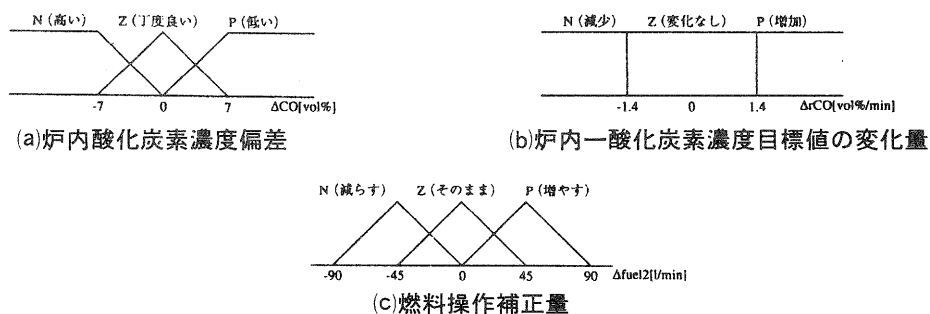


図7 還元焼成移行時の燃料補正ファジィ推論のメンバーシップ関数

上記のメンバーシップ関数として定義した入出力変数の内容は以下の通りである。

- $\Delta T$  : 炉内温度測定値の偏差( $rT(t) - fT(t)$ ) $[\text{C}]$
- $\Delta^2 T$  : 炉内温度測定値の目標値に対する変化傾向( $\Delta T(t) - \Delta T(t-1)$ ) $[\text{C}/\text{min}]$
- $\Delta O_2$  : 炉内 $O_2$ 濃度測定値の偏差( $rO_2(t) - fO_2(t)$ ) $[\text{vol}\%]$
- $\Delta^2 O_2$  : 炉内 $O_2$ 濃度測定値の目標値に対する変化傾向( $\Delta O_2(t) - \Delta O_2(t-1)$ ) $[\text{vol}\%/\text{min}]$
- $\Delta CO$  : 炉内 $CO$ 濃度測定値の偏差( $rCO(t) - fCO(t)$ ) $[\text{vol}\%]$
- $\Delta^2 CO$  : 炉内 $CO$ 濃度測定値の目標値に対する変化傾向( $\Delta CO(t) - \Delta CO(t-1)$ ) $[\text{vol}\%/\text{min}]$
- $\Delta rCO$  : 炉内 $CO$ 濃度目標値の変化量( $rCO(t) - rCO(t-1)$ ) $[\text{vol}\%/\text{min}]$
- $\Delta fuel$  : 燃料ガス操作量 $[\text{l}/\text{min}]$
- $\Delta fuel2$  : 燃料ガス操作補正量 $[\text{l}/\text{min}]$
- $\Delta damper$  : エアダンパー開度操作量 $[\text{cm}]$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{ただし、} rT(t) : \text{目標温度}[\text{C}] \\ fT(t) : \text{測定温度}[\text{C}] \\ rO_2(t) : \text{目標}O_2\text{濃度}[\text{vol}\%] \\ fO_2(t) : \text{測定}O_2\text{濃度}[\text{vol}\%] \\ rCO(t) : \text{目標}CO\text{濃度}[\text{vol}\%] \\ fCO(t) : \text{測定}CO\text{濃度}[\text{vol}\%] \end{array} \right]$$

前記メンバーシップ関数の各パラメータは、昨年度開発の焼成炉モデル<sup>6)</sup>に対し図4に示す制御系を適用してシミュレーションを行い、その制御特性が最も良好となる値に調整している<sup>7)</sup>。

### 3-3 制御ルール

ファジィ制御におけるIF~THEN形式のファジィプロダクションルールは、熟練者からの操炉に関するヒアリング結果に基づいて、図4に示す制御系に対し以下の通り設定する。

#### ① 炉内温度制御

焼成炉内の測定温度と目標温度の偏差 $\Delta T$ および偏差の変化量（測定温度の目標温度に対する変化傾向） $\Delta^2 T$ より、燃料ガスの操作量 $\Delta \text{fuel}$ を推論する。炉内温度の制御には、酸化および還元焼成の区別なく、それぞれ同一の制御ルールを適用する。炉内温度制御に関するルールテーブルを表2に示す。

#### ② 炉内雰囲気制御

炉内温度制御のファジィ推論で得られた燃料ガスの操作量 $\Delta \text{fuel}$ と、焼成炉内の測定雰囲気と目標雰囲気の偏差 $\Delta \text{O}_2$ 、 $\Delta \text{CO}$ および偏差の変化量（測定雰囲気の目標雰囲気に対する変化傾向） $\Delta^2 \text{O}_2$ 、 $\Delta^2 \text{CO}$ より、エアダンパーの操作量 $\Delta \text{damper}$ を推論する。推論に使用する焼成炉内の雰囲気には、酸化焼成時は酸素濃度を、還元焼成時には一酸化炭素濃度を使用する。また、炉内雰囲気の制御には、酸化焼成時と還元焼成時とで、それぞれ別の制御ルールを適用する。炉内雰囲気制御に関するルールテーブルを表3と表4に示す。

#### ③ 還元焼成移行時補正

焼成炉内の一酸化炭素濃度の測定値と目標値の偏差 $\Delta \text{CO}$ および目標値の変化量 $\Delta r\text{CO}$ より、燃料ガス操作の補正量 $\Delta \text{fuel}_2$ を推論する。還元焼成移行時補正に関するルールテーブルを表5に示す。

### 3-4 ファジィ推論

ファジィ推論の合成規則には種々の推論方法が提案されているが、今回の実験では最も一般的なmin-max合成法を使用する。また、推論結果の非ファジィ化には、重心法（還元焼成移行時補正の推論のみ高さ法）を使用する。

表2 炉内温度(燃料操作量)に関する制御ルール

$\Delta^2 T$		$\Delta T$		炉内温度の偏差		
				低い(P)	丁度良い(Z)	高い(N)
傾の炉内 変温度 向化度	下	降(P)	増やす	増やす	そのまま	そのまま
	変化なし(Z)		増やす	そのまま	減らす	
	上	昇(N)	そのまま	減らす	減らす	

表3 炉内雰囲気(エアダンパー操作量)に関する制御ルール[酸化焼成時]

$\Delta \text{fuel}$		$\Delta^2 \text{O}_2$		炉内酸素濃度の偏差		
				低い(P)	丁度良い(Z)	高い(N)
燃料操作量	増やす(P)	下	降(P)	閉じる	閉じる	開く
		変化なし(Z)		閉じる	閉じる	開く
		上	昇(N)	閉じる	そのまま	開く
	そのまま(Z)	下	降(P)	閉じる	閉じる	そのまま
		変化なし(Z)		閉じる	そのまま	開く
		上	昇(N)	そのまま	開く	開く
	減らす(N)	下	降(P)	閉じる	そのまま	開く
		変化なし(Z)		閉じる	開く	開く
		上	昇(N)	閉じる	開く	開く

表4 炉内雰囲気(エアダンパー操作量)に関する制御ルール[還元焼成時]

$\Delta \text{fuel}$		$\Delta^2 \text{CO}$		炉内一酸化炭素濃度の偏差		
				低い(P)	丁度良い(Z)	高い(N)
燃料操作量	増やす(P)	下	降(P)	開く	そのまま	閉じる
		変化なし(Z)		開く	閉じる	閉じる
		上	昇(N)	開く	閉じる	閉じる
	そのまま(Z)	下	降(P)	開く	開く	そのまま
		変化なし(Z)		開く	そのまま	閉じる
		上	昇(N)	そのまま	閉じる	閉じる
	減らす(N)	下	降(P)	開く	開く	閉じる
		変化なし(Z)		開く	開く	閉じる
		上	昇(N)	開く	そのまま	閉じる

表5 還元焼成移行時補正(燃料操作量)に関する制御ルール

$\Delta r\text{CO}$		$\Delta \text{CO}$		炉内一酸化炭素濃度の偏差		
				低い(P)	丁度良い(Z)	高い(N)
目標の炉内 CO濃度 変化量	増	加(P)	増やす	そのまま		
	変化なし(Z)					
	減	少(N)				

#### 4. 焼成炉自動制御システム

今年度開発したファジィ制御による焼成炉自動制御システムは、昨年度開発のPID制御による自動制御システムをベースに、その制御部にファジィ推論機能を追加する形で実現している。また、昨年度の実験結果より、エアダンパーの操作のみでは炉内の雰囲気気を十分に制御することができなかつたため、今年度は新たにゲートダンパー駆動装置を設置し、エアダンパーが可動範囲を越えた場合にゲートダンパーを操作することで、炉内雰囲気気の制御範囲を拡大するよう変更している。さらに、自動制御に要する設備コストの低減化を図るため、炉内雰囲気気測定のための測定機をジルコニア酸素分析計に変更し、一台の測定機で酸素濃度と一酸化炭素濃度の両方の測定が可能ないようにしている。

今年度開発の焼成炉自動制御システムのハードウェア構成を図8に、機能構成を図9に、制御プログラムの画面表示例を図10に、制御装置の外観を図11と図12に示す。

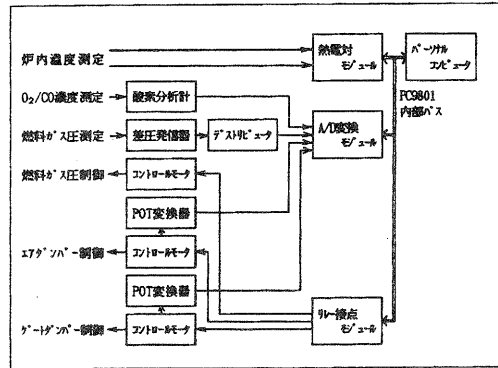


図8 焼成炉ファジィ制御システムのハードウェア構成図

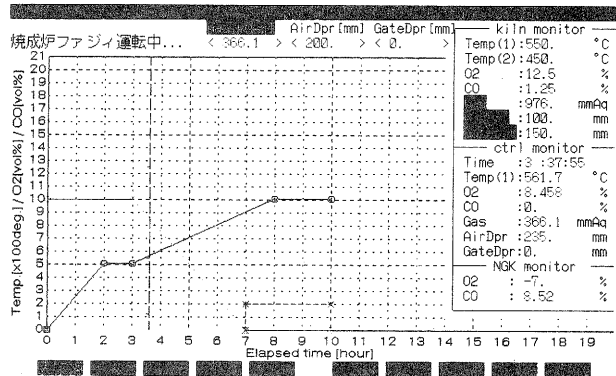


図10 制御プログラム画面表示例

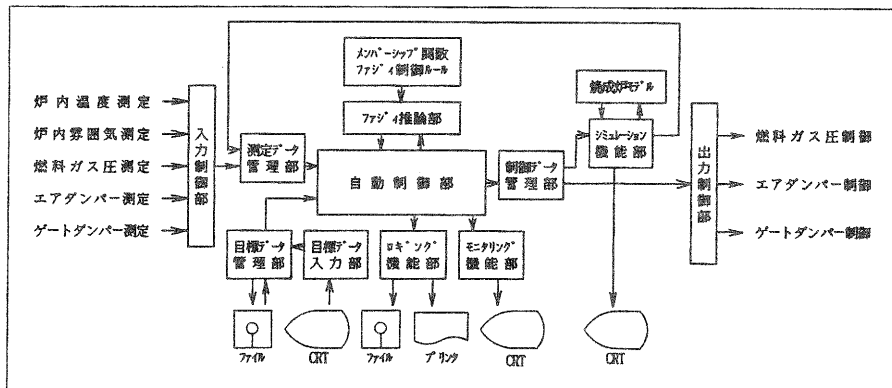


図9 焼成炉ファジィ制御システムの機能構成図



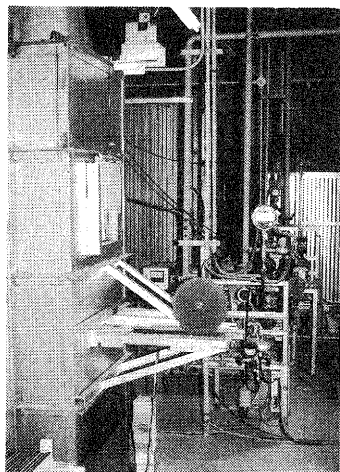


図 1.1 エアダンパー／ゲートダンパー制御装置

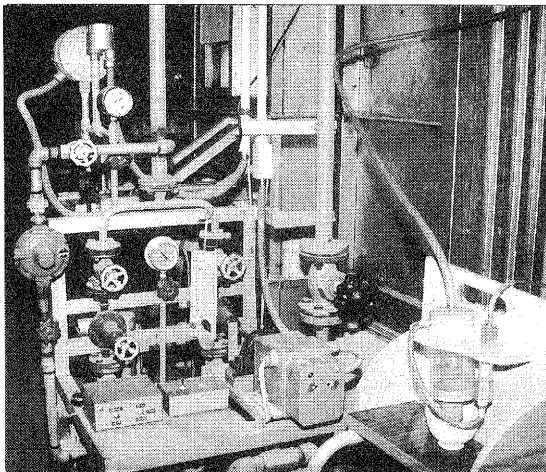


図 1.2 燃料ガス圧制御装置

## 5. 焼成実験

今回開発した焼成炉自動制御システムにより、実炉による焼成実験を行った。ファジィ制御の有効性比較のため、PID制御による焼成実験も同時に行い、その制御特性の比較を行った。

### 5-1 焼成条件

焼成実験における焼成条件は下記の通りとした。

目標焼成曲線：図 1.3，図 1.4，図 1.5 参照（還元焼成）

窯 詰 め 品：焼成済み製品（耐火材）

制 御 間 隔：1分

### 5-2 実験結果

#### (1) PID制御

昨年度開発のPID制御による自動制御システムにより行った焼成実験の結果を図 1.3 に示す。

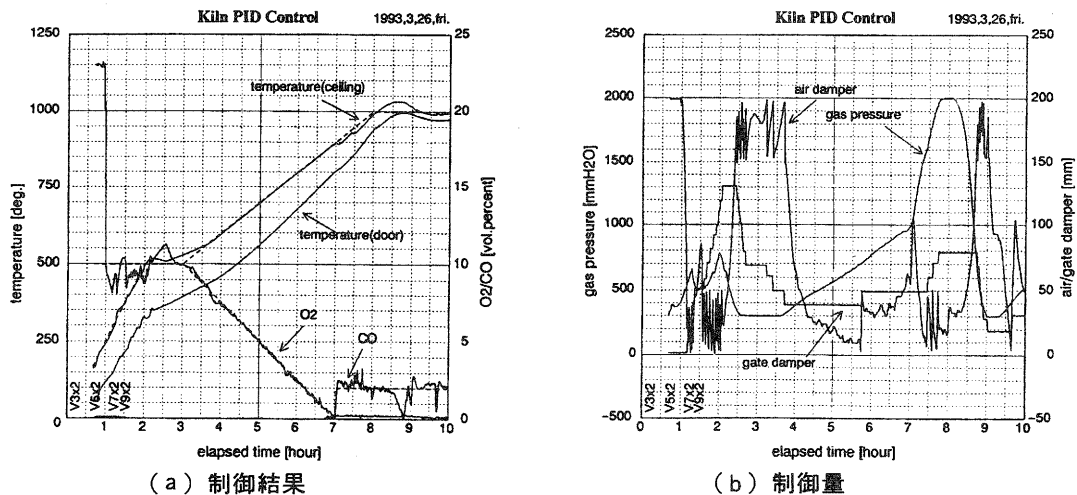


図 1.3 PID制御による焼成実験結果

## (2) ファジィ制御

今回開発したファジィ制御による自動制御システムにより行った焼成実験の結果を図14に示す。

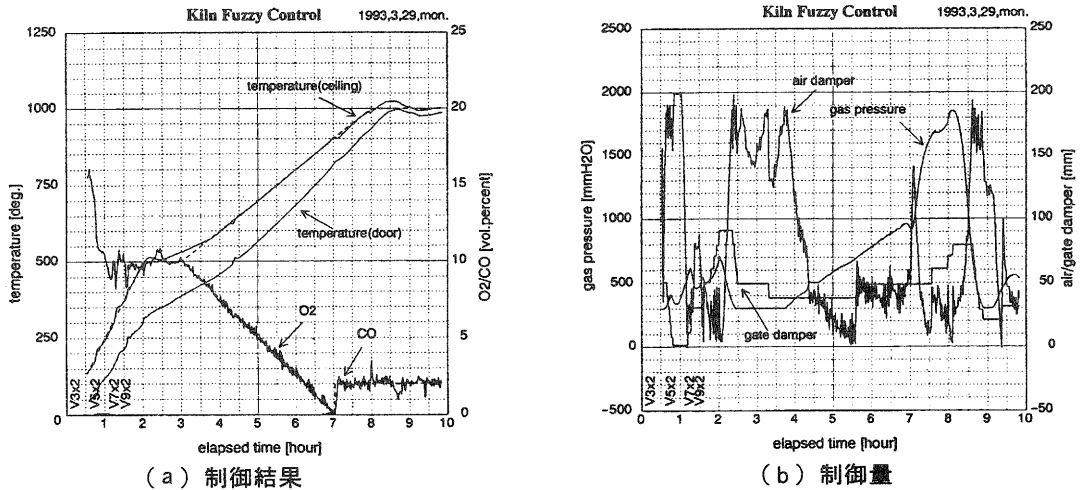


図14 ファジィ制御による焼成実験結果

## (3) 還元焼成移行時補正機能付きファジィ制御

上記のファジィ制御に対し還元焼成移行時における補正機能を追加したシステムにより行った焼成実験の結果を図15に示す。

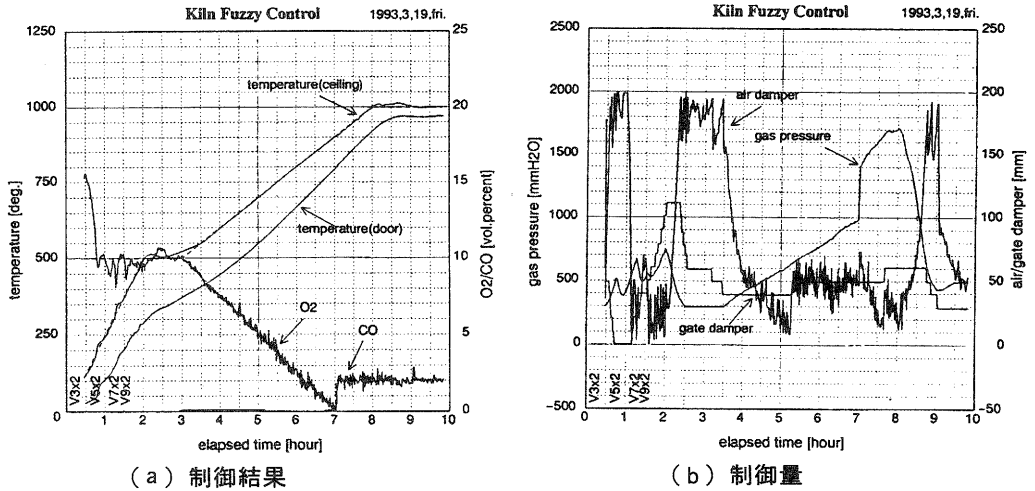


図15 還元焼成移行時補正機能付きファジィ制御による実験結果

## 6. 考察

### 6-1 温度制御特性

#### (1) 還元焼成移行時の温度低下

昨年度のPID制御では、炉内の温度と雰囲気それぞれ別々にフィードバックして制御を行った。このため、一酸化炭素濃度の目標値が急激に大きくなると、これに対応して炉内雰囲気の制御ループがエアダンパーを操作して一酸化炭素濃度を増加させるが、これにより炉内の燃焼効率が急激に低下し炉内温度を低下させてしまっている。炉内温度が一旦目標値を大きく

下回ると、これを補うために炉内温度の制御ループが燃料ガスを増加させるが、これにより炉内の一酸化炭素濃度がさらに増加し、これを抑えるために炉内雰囲気制御の制御ループも炉内の燃焼ガスの放出量を増加させるため、炉内の温度低下はさらに著しいものとなっている。

これに対し、今回のファジィ制御では、一酸化炭素濃度の目標値の急激な変化にも関わらず、炉内温度の低下をかなり抑えることができた。これは、炉内温度により推論された燃料ガスの操作量を考慮した上でエアダンパーの操作量を推論する制御構成としたことにより、炉内温度の低下に対して補われる燃料ガスの増加に伴う一酸化炭素濃度の増加を見込んだエアダンパーの操作を実現することが可能となり、これにより燃料ガスやエアダンパーの操作が後追いとならずに効率の良い焼成を行うことができたためと考えられる。

還元焼成移行時の補正機能を加えたファジィ制御では、一酸化炭素濃度の目標値の急激な変化に対し、エアダンパーの操作だけでなく燃料ガスの操作も同時に行っている。これは、熟練者の一歩先を見込んだ操炉方法になら

表6 還元焼成移行時における炉内温度低下の比較

制御方法	温度低下の最大値
PID制御	21.2℃
ファジィ制御	12.5℃
ファジィ制御+補正機能	3.9℃

て、炉内の一酸化炭素をエアダンパーだけでなく燃料ガスの操作によって発生させるとともに、一酸化炭素濃度の増加による炉内温度の低下を未然に防ごうとしたものである。これにより、還元焼成移行時の炉内温度の低下はほとんど発生せず、非常に良好な制御結果となった。

還元焼成移行時の炉内温度低下の最大値の比較結果を表6に示す。

(2) 定値制御移行時のオーバーシュート

焼成実験における目標温度曲線では、焼成開始後8時間目にランプ制御から定値制御に切り換えているが、この時点で比較的大きなオーバーシュートが発生する傾向にある。焼成工程の最終段階である「ねらし工程」では、炉内を釉薬の溶け出す温度(約1230℃)でほぼ一定に保ち釉薬を熟成させるが、この時の炉内温度が低すぎると釉薬の熟成が不十分となり、逆に高すぎると釉薬が溶けて流れ出してしまふ。このため、炉内温度の制御にはかなりの精度が要求され、これは焼成製品の品質を決定する重要な

表7 定値制御移行時における炉内温度オーバーシュートの比較

制御方法	温度オーバーシュートの最大値
PID制御	33.2℃
ファジィ制御	23.5℃
ファジィ制御+補正機能	12.9℃

要因となっている。

今回のファジィ制御による焼成実験では、PID制御と比較して、このオーバーシュートの量を約3分の1に抑えることができた。これは、PID制御では還元

焼成への移行時に炉内温度が大きく低下してしまっているために、これを補うべく燃料ガスが多量に供給され、その分オーバーシュートが大きくなったものと考えられる。これに対し、ファジィ制御や還元焼成移行時の補正機能を加えたファジィ制御では、還元焼成移行時における炉内温度の低下が大幅に抑えられており、これに伴って燃料ガスの供給量が少なくなり、炉内温度のオーバーシュートが少なくなったものと考えられる。

定値制御移行時の炉内温度オーバーシュートの最大値の比較結果を表7に示す。

## 6-2 雰囲気制御特性

### (1) 還元焼成移行時の一酸化炭素濃度のオーバーシュート

焼成実験における目標雰囲気曲線では、焼成開始後7時間目の還元焼成への移行時に、炉内の一酸化炭素濃度を急激に増加させている。PID制御ではこれに対し炉内雰囲気の制御ループがエアダンパーを操作して対応しようとするが、これに伴う燃焼効率の低下により炉内温度が急激に低下し、炉内温度の制御ループが燃料ガスを増加させるため、一酸化炭素濃度が目標値を大幅に越える結果となっている。これに対し、ファジィ制御では燃料ガスの増加を見込んだエアダンパーの操作により、炉内雰囲気への影響が最低限に抑えられたオーバーシュートの少ない良好な制御結果となっている。

### (2) 炉内温度の定値制御移行時の炉内雰囲気への影響

炉内温度の定値制御への移行時における燃料ガスの減少に伴う一酸化炭素濃度の減少の影響が、PID制御では顕著に制御結果にあらわれている。これに対し、ファジィ制御や還元焼成移行時の補正機能を加えたファジィ制御では、燃料ガスの減少を見込んだエアダンパーの操作により、極めて安定した制御結果となっている。

## 6-3 燃料消費量

今回の焼成実験による燃料ガスの消費量を図16に示す。PID制御に対しファジィ制御の消費量がわずかに下回る結果となり、還元焼成移行時の補正機能を加えたファジィ制御がこれらの中間の値を示す結果となった。今回の焼成実験において、それぞれの制御方法に燃料消費量の違いを生じさせた原因としては、還元焼成への移行時における炉内温度の低下を補うべく供給された燃料によるところが大きいと考えられる。還元焼成移行時の補正機能を加えたファジィ制御では、炉内の一酸化炭素を燃料ガスの増加により発生させているために、補正を加えないファジィ制御に対し、その分燃料ガスの消費量が上回る結果となった。

## 6-4 制御目標の優先順位

今回の実験結果で、いずれの制御方法においても、焼成開始後3時間目前後において炉内温度が目標値の500℃を大きく上回ってしまっている。これは、目標温度の500℃と目標酸素濃度の10%という組み合わせが今回の実験で使用した焼成炉では実現不可能であり、燃料ガス圧の最低値である300mmH<sub>2</sub>Oでは炉内温度が上昇してしまうためである。今回の実験では、両者の制御に対し特に優先順位は設けていないため、目標酸素濃度における燃焼効率に従って炉内温度が上昇してしまっているが、今後、焼成工程における必要性に従ってこれらの優先順位を変化させることを考える必要がある。

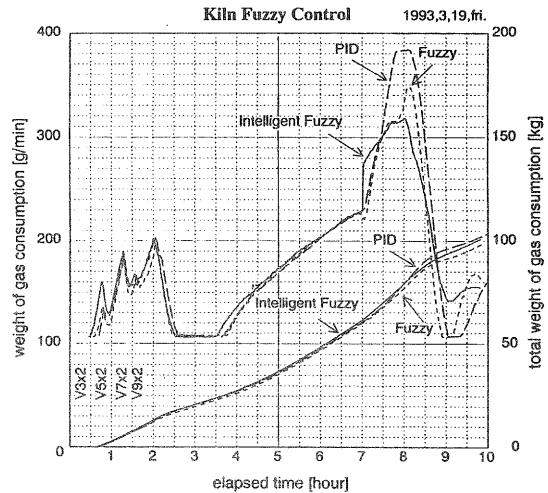


図16 燃料ガス消費量

## 7. むすび

ファジィ制御によりバッチ式ガス焼成炉における焼成工程の自動化を試みた結果、P I D制御による焼成時に見られた、還元焼成への移行時や定値制御への移行時における炉内温度や炉内雰囲気に対する制御の乱れが、かなり改善された。特に還元焼成移行時に補正機能を追加したシステムでは、一酸化炭素濃度の急激な増加にも関わらず炉内温度の低下はほとんど発生せず、ファジィ制御の効果と熟練者の知識ベースによる補正処理の有効性を確認することができた。しかし、燃料ガスの消費量に関しては目覚ましい改善はほとんど見られず、わずかにファジィ制御の消費量が下回る程度であった。平成5年度には、今年度の実験結果を踏まえ、ファジィ制御ルールの改善や知識ベースの追加を行うことにより、さらなる制御特性の改善と省エネルギー化を進める予定である。

### [参考文献]

- (1)今西康博ほか：L P G 焚シャトル陶磁器焼成炉の効率的な繰り方法の検討について，滋賀県立信楽窯業試験場業務報告 p33-41(1980)
- (2)菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社(1988)
- (3)寺野寿郎ほか：応用ファジィシステム入門，オーム社(1989)
- (4)伊藤敏博ほか：焼成炉に対するファジィ制御の適用，第35回システム制御情報学会研究発表講演論文集 p217-218(1991)
- (5)小川栄司ほか：バッチ式ガス焼成炉における焼成工程の自動化に関する研究（第一報），滋賀県工業技術センター研究報告 p23-32(1991)
- (6)伊藤敏博ほか：焼成炉に対するファジィ制御の適用 - 焼成炉のモデリングについて - ，平成3年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 G42(1991)
- (7)糸田一仁ほか：陶器焼成炉のファジィ制御（I） - メンバシップ関数と制御則 - ，平成4年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 S53(1992)

# 光センシング技術による 表面粗さ判定法の研究（第二報）

技術第一科 河村安太郎 Yasutarou Kawamura

あらすじ：製品品質を確保する上から加工工程での全品検査が必要となっており、このため加工現場で使える各種の精度判定装置の開発が望まれている。その一つに、加工現場で使える非接触の面粗さ判定機がある。

本研究では、レーザ光の反射光強度分布を用いた面粗さを判定する装置の開発を目指している。今回は、研削面を対象に実用化する場合の判定用特性値、最適スポット径やセンサー数などが判った。また、新たに切削面を対象にし研削面とは異なった強度分布を得、理論的にも確認した。

## 1. まえがき

現在、高品質を確保するには、各加工工程ごとに部品の全品検査・管理を行うことが必要になってきた。しかし、加工ラインの中に寸法検査等の工程を入れることは生産性の低下となり、これらの自動化が求められている。

機械加工品の寸法検査の1つに、表面粗さの測定による表面状態の検査がある。しかし、現在の表面粗さ測定機は接触式であるため、振動やゴミの問題がない専用の測定室で行う必要があり、工程数が増えるとともに時間もかかる。そのため、表面粗さ測定に関しては、抜取り検査をすることになり、PPMと言われる不良率を保証することは難しい。簡易的には、比較測定用表面粗さ基準片を現場に置き加工品と目視で比較して表面状態の可否を出すことも行われているが、人意的判断が入るため、ばらつきが多く十分とは言えない。

第一報（1）では、研削加工面においてスポット光を反射光強度分布の標準偏差が表面粗さの判定に使えることが判ったが、今回、さらに実用化に向けた検討を行った。また、切削加工面を対象とする検討を行い、理論的考察も試みたので報告する。

## 2. 反射光強度分布と表面粗さについて

光を用いた表面粗さの非接触測定は、10数年前より研究されており、数々の提案や試作が行われた<sup>(2)(3)(4)</sup>。

いままで検討された方法として①正反射光法、鏡面反射率法、②総散乱光法、③拡散反射光法、⑤対比光沢度法、④角度分布法、⑤スペckル法、⑥偏光解析法、⑦複合化された方法などがある。これらのなかでは③と④を測定原理にした方法が実用性のある方法と言われている<sup>(5)</sup>。なお、③の拡散反射光法は正反射光とそれ以外の一定部分に届く拡散反射光の比でもって論じる方法であり、④は散乱光の全角度分布でもって論じる方法である。

しかし、これらも実用化されているものは少ない。そこで、本研究では最新の機器である感度の高いMOS型ラインセンサーと、スポット光型およびライン光型の光ファイバー接続のレーザ集光ユニットを用い、反射光強度分布から表面粗さを判定する方法について検討を行った。

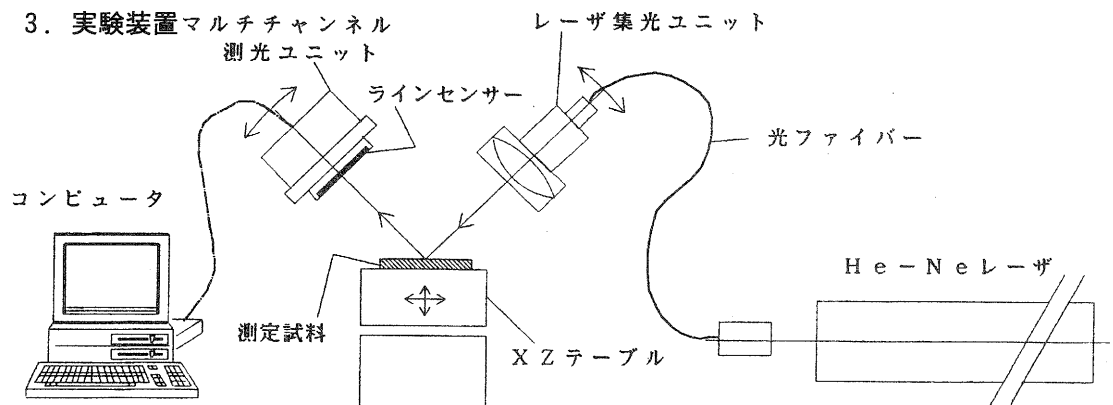


図1 反射光強度分布測定解析装置の概要図

図1は今回実験に使用した反射光分布測定解析装置の概要図である。光源には一般的なHe-Neレーザー(波長632.8nm)を用いた。そして、測定の自由度を持たせるため光ファイバー式のレーザー集光ユニット(日本科学エンジニアリング製)を用い測定部と光源を切り離れた。測定試料への投光ビームはスポット光型およびライン光型の集光ユニットのレンズ光学系で絞られている。

試料からの反射光の測定は蓄積型のMOS型ラインフォトセンサー(浜松ホトニクス製、フォトダイオード $25\mu\text{m} \times 0.5\text{mm} \times 1024$ 素子= $25.6 \times 0.5\text{mm}$ )を用いて、コンピュータに反射光の強度分布を取り込めるようにした。また、試料台にはXZテーブルを用いた。なお、レーザー集光ユニットとラインフォトセンサー部は角度が変えられるようにゴニオテーブルに取り付けてある。

実験に用いた試料は、表面粗さのクラス毎のサンプルが揃っている英国Ruber社製の粗さ標準片の平面研削加工面8レベル(N0315のN1~N8)と平面切削加工面8レベル(N0325N6~N13)を用いた。

投光角および受光角は第一報と同じ45度とした。

#### 4. 研削加工面における実用化追加実験および考察

第一報では、研削面において「反射光強度分布により表面粗さを測定する時には、照射するレーザースポット径は極端に絞らず、0.8mm程度がよく、表面粗さを求めるための反射光強度分布の特性値は、半値巾より標準偏差の方がよい」と報告したが、今回実用化を念頭に以下の追加実験を行った。

##### 4-1 反射光強度分布の特性値とリニアリティについて

第一報は、表面粗さに関係する反射光強度分布の特性値として標準偏差を提案したが、直線関係に無く、測定値としては使いにくい。この関係が2次曲線に似ているため、反射光強度分布の特性値として分散(=標準偏差の2乗)を用いて、再度関係を調べたところ、図2の様に原点を通るシンプルな1次比例関係となった。

また、標準偏差の算出処理は分散値を求めてから行うため、分散値を特性値とする方がデータ処理時間が僅かではあるが少なく済むメリットもある。

#### 4-2 標準偏差・分散値の生データからの算出について

移動平均化後のデータから標準偏差や分散を求めていたが、これを式で示すと以下ようになる。

$n \gg k$  とすると

$$\begin{aligned} \text{移動平均化後分散} &= \frac{\sum_n \left( \frac{\sum_k H_{n+k}}{k} \cdot L_{n^2} \right)}{n} = \frac{\sum_n (\sum_k H_{n+k} \cdot L_{n^2})}{n \cdot k} \\ &= \frac{\sum_n H_{n+k} \cdot L_{n^2}}{n} = \text{生データの分散} \end{aligned}$$

ただし、 $L_n$  : ラインセンサー中の1番目から $n$ 個目の受光素子までの距離

$H_n$  :  $n$ 個目の素子の受光量       $k$  : 移動平均の母数

となり、移動平均化処理をしなくても分散値は変わらない。実際、処理結果に変わり無く、データ処理が速くなった。

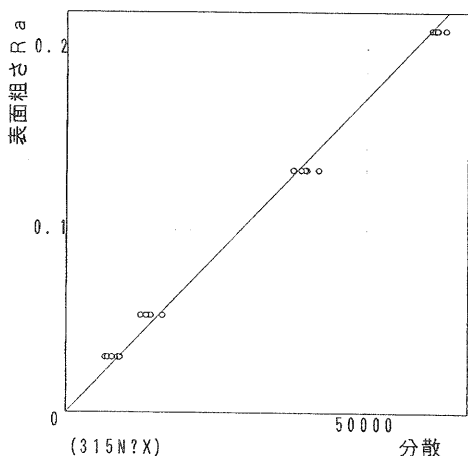


図2 反射光分布の分散と表面粗さRaの関係

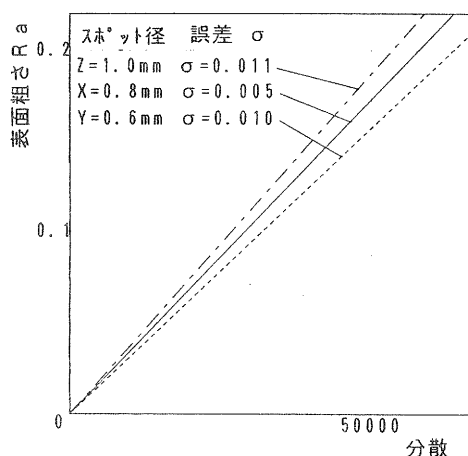


図3 スポット径の違いによる反射光分布の分散と表面粗さRaの関係

#### 4-3 照射スポット径の影響について

スポット径の大きさを変え、表面粗さと分散値との直線性を調べたところ、図3にのようになった。スポット径1.0、0.8、0.6mmにおける直線性誤差 $\sigma$ は0.011、0.005、0.010であり、スポット径0.8mmが一番直線性がよい事が判った。

また、直線の傾きを見ると、スポット径が大きくなるほど分散が小さくなる傾向にある。原因として積み重ねによるばらつき極小化などが考えられるが、これについては今後究明していきたい。

#### 4-4 受光センサー分割数の削減について

本研究では反射光強度分布を1024分割のラインセンサーを用いて測定している。しかし実用化する場合、コスト面、処理速度面から見て、受光センサー個数は出来るだけ少ない方がよい。そこで、今までの測定データ(研削加工面N0315N1, 2, 3, 4 スポット光0.8mm)を用いて、1024分割から512、256、128、64、32、16、8、4分割とセンサー分



割数を減らした場合の反射光強度分布の分散値を算出し、図4に示した。図よりセンサー分割数を16にしても分散値は変化しない。さらに8分割にしてもほとんど変化がない。よって、表面粗さRa0.2以下の研削面についてはセンサーは8~16分割でも十分な判定が出来ると言える。

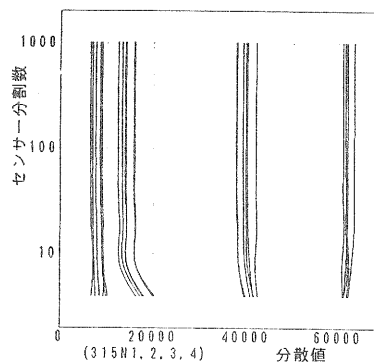


図4 センサ分割数の変更による分散値の変動

### 5. 切削加工面の反射光強度分布結果および考察

切削加工面（平面切削）は切削バイトで切りとられて行くため、バイト先端の形状を伸長した形状が転写され且つバイトの送りピッチに対応して同じ形状が繰り返されている。この様な表面の粗さ判定に反射光強度分布が適用できるかを検討を行った。

#### 5-1 研削面測定時の装置条件（スポット光）での反射光強度分布

図5は4項の研削面測定と同じ条件で反射光強度分布を測定したものである（スポット光1.0mm）。なお、ここで用いた試料は平面

切削加工面N0325N6であり表面粗さRa0.8μmである。研削加工面N0315N1, 2, 3, 4（表面粗さRa0.030, 0.053, 0.133, 0.21）とは粗さも違い、一概に比較する事は出来ない。しかし、反射光の分散がラインセンサーの長さより広がって

フィルターの中 何点長?? 20  
Y?(-0)? (326N6202,04,06,08,10,12,14)■

標準偏差σ  
σ=180.22  
σ=185.73  
σ=184.50  
σ=191.70  
σ=202.10  
σ=203.98  
σ=202.63

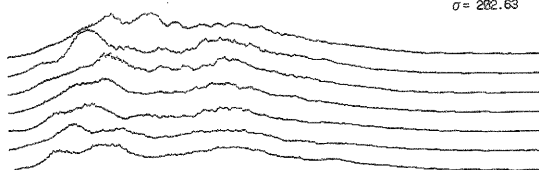


図5 切削面N6のスポット光照射時の反射光強度分布

また今までの一山分布と異なり両端に各々ピークを持つ2山分布となっている。

これについては、切削面は研削面に比べ表面凹凸の周期が長く照射範囲の小さなスポット光では対応出来ないなど測定条件の不備が考えられる。そこで、局部形状の影響を取り除くため照射範囲の広いライン光を用い、且つ反射光がラインセンサーの測定範囲にはいるようセンサーを測定試料方向に近づけて以後の測定実験を行った。

#### 5-2 ライン光照射の場合の反射光強度分布

図1の実験装置においてマルチチャンネル測光ユニットを試料方向に近づけてラインセンサーの位置を試料から25mmとした。また、スポット光用のレーザ集光ユニットをライン光用のユニットに替えた。なおライン光が長い試料との間に長さ調整用スリットを設け照射光のライン長を4mmとした。

フィルターの中 何点長?? 20  
Y?(-0)? (25N6UL02,3,4,5,6,7,8,9)■

標準偏差σ  
σ=130.78  
σ=132.28  
σ=133.92  
σ=132.78  
σ=135.28  
σ=132.67  
σ=130.06  
σ=128.24

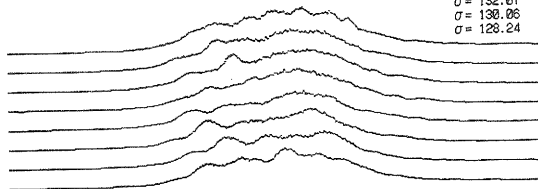


図6 切削面N6のライン光照射時の反射光強度分布

図6、図7、図8は上記条件で切削加工用標準表面粗さ試料片N0325N6、7、8（表面粗さRa0.87、1.46、3.24）の反射光強度分布測定結果（20点移動平均処理後）である。また、重ね書きした8本の分布曲線は試料の測定位置を1mmずつ移動させたものである。

図6を図5を比較すると分布幅は狭まっております、また1山分布に近くなっています。しかし、表面粗さが粗くなった図7では両端にピークのある2山分布となっており、図8では2ピーク間がさらに広がっている。

よって、切削面では照射光を大きくしても両端にピークを持つ2山分布となることが判る。これは後述する理論的考察によっても証明できる。

## 6. 周期的凹凸形状表面における反射光分布の理論的考察

切削加工面の反射光強度分布について理論考察を行う。

図9に示すように、切削加工試料表面は、周期的な凹凸を持つ二次元的曲面とする。入射光は、均一な密度分布を持った2次元平行光で試料面に対し一定の角度で入射するものとする。光は試料面で正反射するものと干渉は無視する。この時反射した光は反射面から一定距離はなれ且つ試料面と一定の角度を持つ受光面に直接到達し、2次元光密度分布を作るものとする。

試料凹凸曲線は、周期的な凹凸形状であるため、試料の面方向の位置をXとすると、

$$\text{試料面} = F(X)$$

と書ける。

さきに、光線の幾何学的関係を見ると、入射光は場所に関係無く一定であり、また、受光面も固定であるため、受光面上の反射光は反射点の位置と表面の傾きに一義的に依存する。すなわち、反射位置(X、F(X))とその位置の面の傾きF'(X)によって決まるので、この点からの反射光が受光面に当たる位置Yは

フィルターの中 何点長?? 20  
Y?(-0)? 1 (25N7UL02,3,4,5,6,7,8,9)■

標準偏差  $\sigma$   
 $\sigma = 179.13$   
 $\sigma = 178.96$   
 $\sigma = 179.19$   
 $\sigma = 182.28$   
 $\sigma = 182.23$   
 $\sigma = 183.85$   
 $\sigma = 180.73$   
 $\sigma = 182.98$

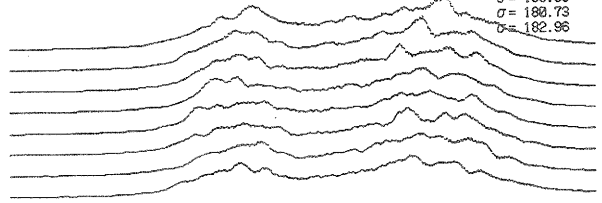


図7 切削面N7のライン光照射時の反射光強度分布

フィルターの中 何点長?? 20  
Y?(-0)? (25N8UL02,3,4,5,6,7,8,9)■

標準偏差  $\sigma$   
 $\sigma = 225.79$   
 $\sigma = 226.23$   
 $\sigma = 229.46$   
 $\sigma = 226.43$   
 $\sigma = 225.97$   
 $\sigma = 227.61$   
 $\sigma = 227.84$   
 $\sigma = 227.01$

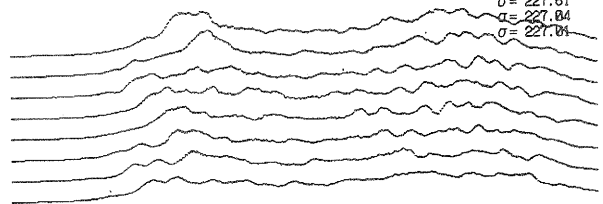


図8 切削面N8のライン光照射時の反射光強度分布

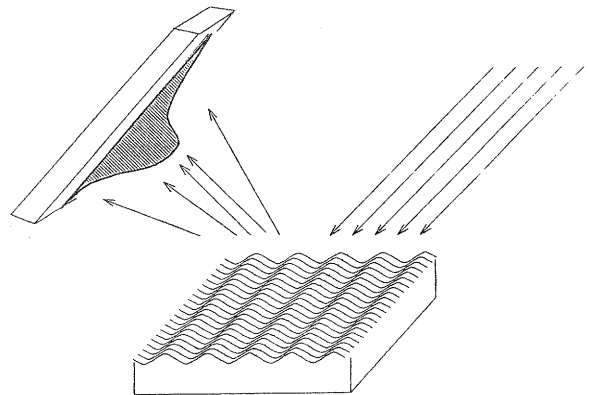


図9 周期的凹凸形状表面と光の反射の関係図

$$Y = R(F'(X), F(X), X) = R_t(X)$$

と表せる。

次に光密度について見ると、反射光の光密度は、入射光は均一であるため表面の傾きに一義的に依存する。すなわち反射光  $R_t(X)$  の光密度は

$$W(F'(X)) dX$$

ここで受光面上の反射光密度を  $H(Y)$  とすると

$$H(R_t(X)) = W(F'(X)) dX$$

反射光分布は

$$B(Y) = H(Y) dY$$

となる。

この式を数値解析で解くと以下のようになる。

投射光線  $y = C_1 \cdot x + \alpha$  (1)

測定物表面断面曲線  $y = F(x)$  (2)

ラインセンサー面  $y = C_2 \cdot x + C_3$  (3)

### ①幾何学的反射光線

$x = x_0$  の表面上の  $y$  を  $y_0$  とすると

$$y_0 = F(x_0) \quad (5)$$

$x = x_0$  における表面の傾きは

$$\text{傾き} = F'(x_0) \quad (6)$$

ここで図10において

$$\angle EOC = \pi + \angle FOG - \angle AOB$$

$$\angle AOB = \angle AOC - \angle BOC$$

$$\angle FOG = \angle BOC$$

$$\text{すなわち } \angle EOC = \pi - \angle AOC - 2 \cdot \angle BOC \quad (7)$$

式(7)は式(1)、式(6)より

$$\angle EOC = \pi - \tan^{-1}(C_1) - 2 \cdot \tan^{-1}(F'(x_0)) \quad (8)$$

$x = x_0$  において反射した光線は式(5)より

$$y = \tan(\angle EOC) \cdot x + \{F(x_0) - \tan(\angle EOC) \cdot x_0\}$$

式(8)を代入すると

$$y = G(x_0) \cdot x + F(x_0) - G(x_0) \cdot x_0 \quad (9)$$

$$\text{但し } G(x_0) = \tan\{\pi - \tan^{-1}(C_1) - 2 \cdot \tan^{-1}(F'(x_0))\}$$

### ②センサー上の受光位置

$x = x_0$  における反射光線が入射するラインセンサー上の交点は

式(3)、式(9)より

$$y_1 = x_2 \cdot x_1 + C_3 = G(x_0) \cdot x_1 + F(x_0) - G(x_0) \cdot x_0$$

$$x_1 = \{C_3 - F(x_0) + G(x_0) \cdot x_0\} / \{G(x_0) - C_2\} \quad (10)$$

$$\text{但し } G(x_0) = \tan\{\pi - \tan^{-1}(C_1) - 2 \cdot \tan^{-1}(F'(x_0))\}$$

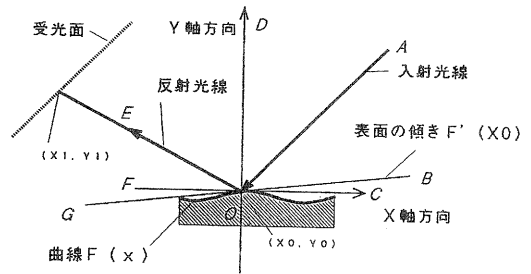


図10 表面形状と反射光線軌跡の関係説明図

### ③反射光の光密度

反射光の光密度は照射位置の面の傾き度合いによって違ってくる。この違いを各反射光線毎に重み  $w$  として表す。

投射光は一様分布であるので、図11の  $x = x_0$  から単位距離  $\Delta x$  の間の表面に投射された光巾  $E$   $F$  がその時の光量の重み  $w$  と考えればよい。

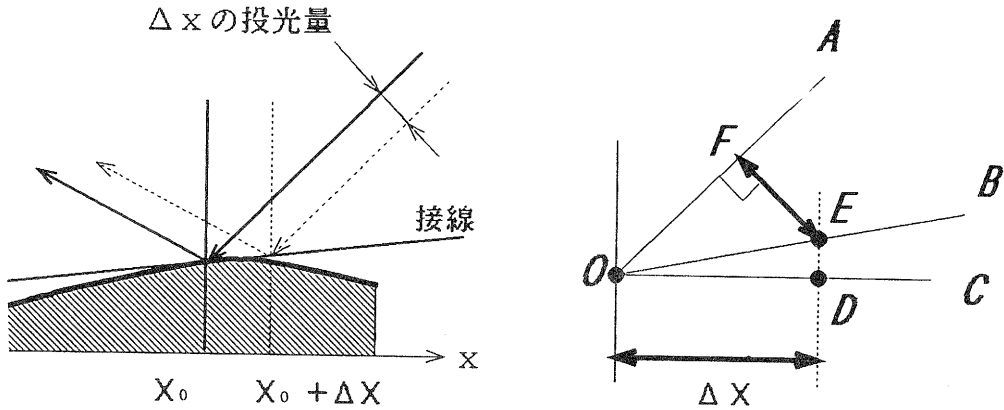


図11 反射光の光密度の算出説明図

$$\begin{aligned}
 F'(x_0) &= \tan(\angle BOC) \\
 C_1 &= \tan(\angle AOC) \\
 OE &= OD / \cos(\angle BOC) \\
 EF &= OE \cdot \sin(\angle AOB) \\
 \therefore EF &= OD \cdot \sin(\angle AOB) / \cos(\angle BOC) \\
 \angle AOB &= \angle AOC - \angle BOC = \tan^{-1}(C_1) - \tan^{-1}(F'(x_0)) \\
 \cos(\angle BOC) &= \sqrt{1 + F'(x_0) \cdot F'(x_0)} \\
 OD &= \Delta x = 1 \text{ とすると} \\
 EF &= \frac{\sin(\tan^{-1}(C_1) - \tan^{-1}(F'(x_0)))}{\sqrt{1 + F'(x_0) \cdot F'(x_0)}}
 \end{aligned}$$

よって  $x = x_0$  の時の重み  $w_0$  は

$$w_0 = EF = \frac{\sin(\tan^{-1}(C_1) - \tan^{-1}(F'(x_0)))}{\sqrt{1 + F'(x_0) \cdot F'(x_0)}} \quad (11)$$

### ④数値解析例

ここで、式(10)、(11)の  $x_0$  を0から  $L$  まで  $\Delta x$  間隔で数値計算し、結果の  $\Sigma(x_1, w_1)$  を  $x_1$  を横軸にして表すと反射光強度分布となる。一例として表面形状が  $F(x) = F_1 \cdot \sin(T \cdot x)$  の時の理論数値計算結果を図8に示す。但し  $C_1 = 1$ ,  $C_2 = 1$ ,  $C_3 = 56569 \mu\text{m}$ ,  $L = 7000 \mu\text{m}$ ,  $\Delta x = 1 \mu\text{m}$ ,  $F_1 = 2.8 \mu\text{m}$ ,  $T = 0.05236 / \mu\text{m}$  とする。図12は両端ピークの2山分布となっており、切削加工面を単純化したSIN曲線でも測定結果と同じ傾向になることが判かる。

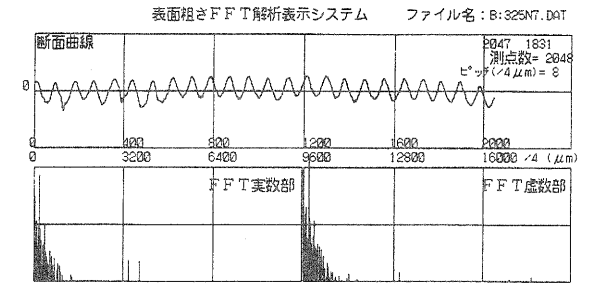
```

<<反射光分布理論の数値解析 結果>>
F(X)曲線 F(X)=Σ{An*cos(T+n*X)+Bn*sin(T+n*X)} (Tは基本周期長さ)
投影線 y=C1*x+α 投影長さ L 式光面 y=C2*x+C3 受光面分割数 IBNKT
T= 0.0015340 μm ΔX= 0.25 (Xを0→LまでΔX間隔で数値計算)
L= 4000 C1= 1.00 C2= 1.00 C3= 35350 IBNKT= 200個
? (325N7)

```

図 1 2 反射光分布の理論解析結果 (正弦波形)

図 1 3 は試料 N 7 の表面状態を表面粗さ測定機で測定し、その断面曲線を FFT 解析したものである。この解析値を用いて実際に近いの表面形状  $F(X)$  を再構築し理論数値解析を行ったのが図 1 4 である。両端の立ち上がりがなめらかになり図 7 の形状にはほぼ一致している。なお、両端部の分布が大きく変動しているが  $\Delta X$  が大きいと思われる。



command COPY) F)file P)FFT L)list H)printer >

図 1 3 切削面の表面粗さ FFT 解析結果

```

<<反射光分布理論の数値解析 結果>>
F(X)曲線 F(X)=Σ{An*cos(T+n*X)+Bn*sin(T+n*X)} (Tは基本周期長さ)
投影線 y=C1*x+α 投影長さ L 式光面 y=C2*x+C3 受光面分割数 IBNKT
T= 0.0015340 μm ΔX= 0.25 (Xを0→LまでΔX間隔で数値計算)
L= 4000 C1= 1.00 C2= 1.00 C3= 35350 IBNKT= 200個
? (325N7)

```

図 1 4 反射光分布の理論解析結果 (FFT データ)

## 7. ライン光照射時の反射光強度分布と表面粗さの関係

切削加工面におけるライン光照射反射光強度分布はきれいな正規分布をしめさないが、分散値を算出し、表面粗さ  $R_a$  との関係を決めると図 1 5 のようになる。図 1 5 より  $R_a$  1.5 以下においては、原点を通る 1 次比例直線上に乗っており、前述の研削面で述べたように表面粗さは分散値と比例関係がある推考できる。しかし、それ以上の粗い面では言えない。

また、前述の研削加工面について、ライン光を用いた切削面測定と同じ測定条件で研削加工標準表面粗さ試料の測定を繰り返し、その結果を図 1 5 に併せて示した。研削面と切削面はまったく異なった直線上に乗っており、両者が同一基準で面粗さ判定できないことが判った。

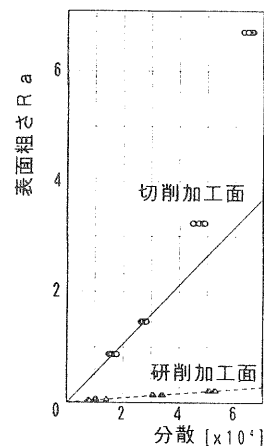


図 1 5 反射光分布の分散と表面粗さ  $R_a$  の関係

## 8. まとめ

今回の研究で、次のことが判った。

1. 粗さパラメータと関係がある反射光強度分布 曲線の特徴量としては、標準偏差よりも分散  $\sigma^2$  を取るほうが直線性あり、粗さ判定に向いている ことが判った。
2. 研削加工面において投射光ビームの径を変えてその最適値を検討した所、0.6 mm、1.0 mm よりも 0.8 mm のほうが、直線性が良いことが判った。
3. 装置化するときセンサー数は少ない方がよいが、測定データをもとにパソコン上で検討した結

果、分散値を特徴値とする場合は8～16個以上のセンサーが有れば大体において良いことが判った。

4. 切削加工面の反射光強度分布は両端ピーク2山分布で研削加工面の1山ピークとは異なっている。また、分散値との関係も大きく異なっており同一の判定基準に立たない事が判った。
5. 切削加工面における反射光強度分布の理論解析を試み、両端ピークの2山分布になることが確かめられた。

今後は切削加工面について、光源や投射方法、解析方法など理論面も含めて検討を加え、表面粗さ判定に有効な特性値を求めていくとともに、他の加工面についても検討を加え、現場で使える表面粗さ判定機の試作して行きたい。

#### [参考文献]

- (1) 河村安太郎：「光センシング技術による表面粗さ判定法の研究（第一報）」滋賀県工業技術センター研究報告 1991年度P33～38
- (1) 高遠英生、石田次雄、草鹿履一郎：「新しい粗度評価法と鋼板面での光の散乱特性解析への応用」鉄と鋼 1976第6号P75～83
- (2) 浅野有一郎、塩住基仁、栗田邦夫、矢部直、守屋進：「冷延鋼板の光反射特性解析とそのオンライン表面粗度測定への応用」鉄と鋼 1984第9号P111～118
- (3) 安達正明、稲荷隆彦、亀井光仁：「反射レーザー光広がりによる金属表面粗さ形状のモニタリング」計測自動制御学会論文集 1984第6号P66～71
- (4) 柳和久：「反射光強度分布による精密加工表面粗さの非接触測定」非接触方式による精密加工表面の性状評価、(社)精機学会 光を用いた光学表面の性状評価分科会偏

## 機械部品整列のための姿勢検出装置の試作（第2報）

技術第一科 月瀬 寛二 Kanji Tsukise

あらまし：産業用ロボットにある程度の感覚機能といろいろな状況に対する対応策を教えておけば、その作業能力を飛躍的に高めることができる。一般的に、知能ロボットには、感覚機能、認識・判断機能、運動機能、マン・マシンインターフェイスが必要である。そこで、感覚機能の中でも特に視覚に着目し、視覚による認識・判断機能を持ったロボットシステム実現のため、部品の姿勢検出装置の開発を試みた。

本年度は、任意の位置に置かれベルトコンベア上を移動している部品の種別と姿勢を判断し、ロボットコントローラに把持位置を教示するシステムを試作した。このシステムによって実際にロボットに移動中の部品を把持させる実験を行ったところ、認識判断と把持とも良好な結果が得られた。

### 1. まえがき

人間は、自由な位置に置かれ移動している部品を見て、方向と姿勢を判断し部品を手で取り上げられる。もし、ロボットにこの作業を行わせるとすれば、カメラ等に入力した画像から部品の形状と位置を求め、それらの情報をロボットに与え、ロボットハンドは部品の移動速度に等しい等速直線運動を行う必要がある。さらに精度良く把持するには、触覚やより細かな視覚により位置決め誤差を補正する必要がある。また、対象とする部品が多種類ある場合、人間は部品を目で見て種別を判断し、種別に対応した作業が可能であるが、ロボットではカメラなどで得た画像を処理して認識・判断する必要がある。智能化されたロボットは、ロボット自身が周囲の状況を認識し作業手順を自動生成することができるかとされているが、まだ実用化には至っていない。そこで、ロボットが行動決定のための感覚機能の一部でも持てば、単に移動中の部品を持つ動作だけを取り上げても、その自由度は高まる。

本研究では、ロボットを智能化する際の最も重要な要素技術である目の部分のシステム開発を行う。本年度は、固定したCCDカメラによる移動中の部品の画像情報から、部品の種類を判別し、その部品を把持する位置を認識することを試みたので、その結果を報告する。

### 2. 姿勢検出システムの構成と概要

図1に姿勢検出システムの構成を示す。システムは、CCDカメラ、画像処理装置、パーソナルコンピュータ、照明装置、およびモニタテレビなどで構成される。

本年度新たに追加した構成機器は、ベルトコンベアと透過型光電スイッチである。ベルトコンベアには、コンピュータから起動・停止および正転・逆転を制御する回路を付け加えた。図1のCCDカメラ下部左側の透過型光電スイッチは、CCDカメラによる部品像取り込みのためのトリガスイッチや、ロボット制御部が移動中の部品位置を計算する基準とした。また、左右2組の光電スイッチを利用しベルトコンベア移動速度を計測した。光電スイッチは、ベルトコンベア移動方向に対し

て、ONとなる位置が直角線をなすように設置した。表1に姿勢検出システムの仕様を示す。

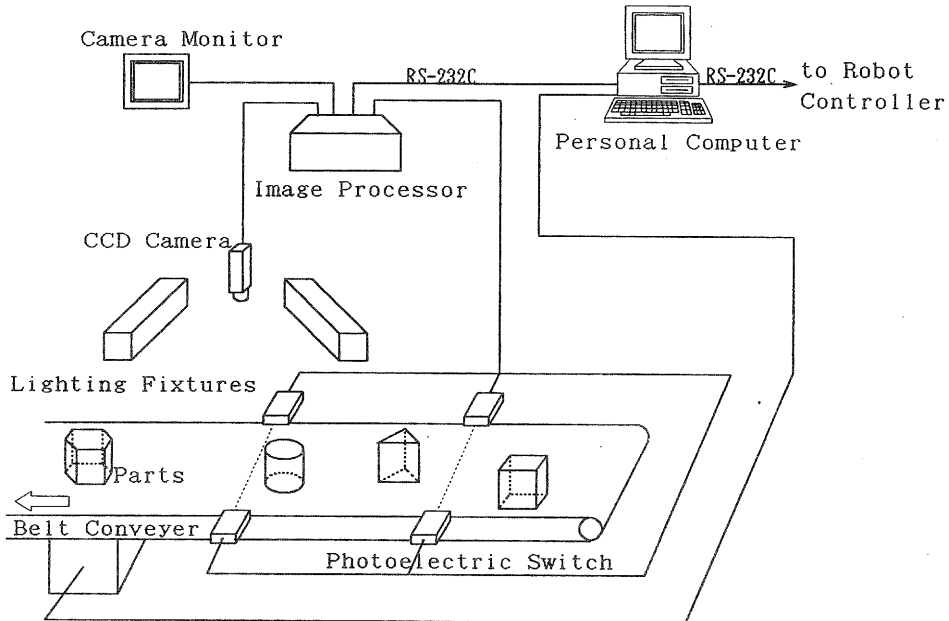


図1 姿勢検出システムの構成

表1 姿勢検出システムの仕様

CCDカメラ		画像処理装置	
型式	XC-77 (SONY)	型式	ROBOTEC V-250 (ダイキン工業)
有効画素数	768×493pixel	CPU	68020(32bit)20MHz
セルサイズ	11.0×13.0μm	分解能	512×480pixel
		特徴値抽出	30種類
照明装置		パソコン	
型式	FL-V80 (エス・エフ・シー)	型式	PC-9801RA (NEC)
照明方式	高周波点灯による蛍光ランプ4本	増設RS232C	AZI-4101 (インターフェイス)
ベルトコンベア		透過形光電スイッチ	
型式	FBG×500A×4000-11G636 (オークラ輸送機)	型式	E3JK-5M1 (オムロン)
ベルト幅	500mm	検出距離	5m
機長	4000mm	検出物体	不透明体、幅16mm以上
ベルコン速度	Max36m/minまたはMax8.4m/min	応答時間	30ms以下
その他	ガイドベルトによるベルト蛇行防止機構附属	投光用LED	赤外LED

### 3. ベルトコンベア移動速度の計測

移動中の部品をロボットで把持する場合、ロボットハンドをベルトコンベア移動速度に合わせ等速直線運動させなければならない。また、CCDカメラによる撮影位置から何秒後に把持する位置に部品が到達するかの計算を行う必要がある。

そこで、図2のようなシーケンスで、ベルトコンベア移動速度の計測を行った。左右の光電スイッ



時間の部品通過時間を、MS-DOSのタイマーBIOSにより10ms単位で時間計測し、5回平均によりベルトコンベア移動速度を算出した。光电スイッチの間隔を500mmに設定した時の測定時間のばらつきは、±10ms程度であった。ベルトコンベア移動速度は、ベルトコンベアのギアボックス交換により高速側と低速側に切り替えられる。本年度は、低速側のギアボックスにて実験を行い、カタログ値で最大140mm/sであったが、実測ではベルトコンベアを最大駆動速度に設定した時149~150mm/sであった。

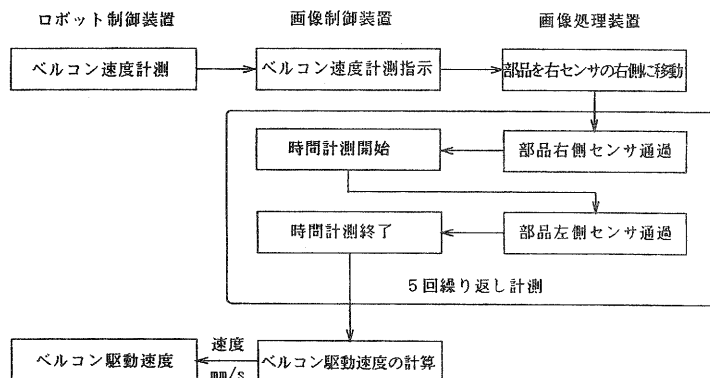


図2 ベルトコンベア移動速度計シーケンス

#### 4. 座標キャリブレーション

図3に、ロボット制御部と画像処理装置の座標系キャリブレーションのシーケンスを示す。

ロボットでφ20mmの円柱部品を把持し、ロボット座標系のY方向（ベルトコンベア移動方向に直角な方向）の原点位置に置き、カメラ下部の光电スイッチがONになる位置までコンベアを移動させ画像処理部のY方向原点位置とした。次に、同じくロボットでY方向100mmの位置に部品を置き、同様に移動させ画像処理部Y方向100mmの位置とした。

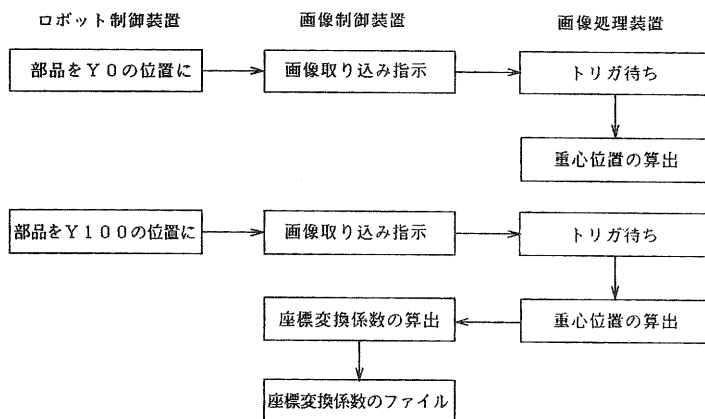


図3 座標キャリブレーション

この座標キャリブレーションは、ロボットの水平面の移動距離（100mm）がカメラ上の何画素に相当するかが主体であり、ロボットの座標系とカメラの座標系の傾き（XY軸の回転）はキャリブレーション出来ていない。ロボットとカメラの座標軸の傾きは、光电スイッチがONになる軸とベルトコンベア移動方向との直角度のみで決定するので、ロボット、ベルトコンベア、光电スイッチおよびカメラの設置を可能な限り直角や水平に調整した。

#### 5. 移動物の撮影

移動している物体をCCDカメラで撮影した場合、図4の様な楕形状となる。CCDカメラの駆動方式としてフレーム蓄積駆動とフィールド蓄積駆動<sup>(1)(2)</sup>がある。フレーム蓄積駆動は、信号蓄積を1/30秒間行い垂直方向\*1のフィールドを1本おきに信号を読みだす。一方、フィールド蓄積は、

信号蓄積を1/60秒間行い垂直方向で隣接した2フィールドの信号電荷を混合して読みだす。フレーム蓄積駆動は、信号蓄積時間が2フィールドに渡るので残像現象が問題となるが垂直の解像度が高く取れ、フィールド蓄積駆動は、垂直の解像度が落ちるが残像現象は減少する<sup>3)</sup>。

両方式とも、偶数フィールドと奇数フィールドの信号蓄積開始時間が1/60秒ずれているので、撮影した像に楕円形状が現れる。

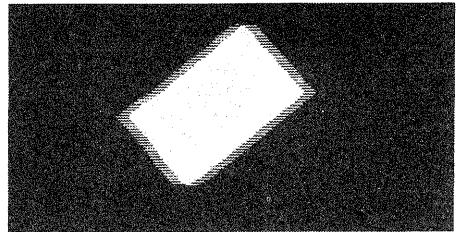


図4 楕円形状（フレーム蓄積駆動で撮影）

例えばフレーム蓄積駆動で、ベルコン速度を150mm/s、カメラ視野を200mmとすれば、2.5mm (200mm/60秒) つまり6.4画素 (512画素/(200mm/2.5mm)) の楕歯高さとなる。φ20mmの円形状が長径25mm、短径20mmの楕円となり、正方形は、六角形もしくはは移動する方向により長方形となる。

楕円形状および残像現象への対策として、

- (1) ストロボによる撮影：楕円形状、残像現象とも有効。
- (2) フィールド蓄積：残像現象が少なくなる。(理論的にはフレーム蓄積の半分) 楕円は発生し、垂直解像度が劣る。
- (3) 偶数(奇数)フィールドのみで処理：楕円形状は解消されるが、残像現象は発生。処理時間を必要とする。
- (4) 電子シャッター付きCCDカメラの活用：残像現象、楕円形状とも解消。十分な電荷蓄積のため強い光での照明が必要。
- (5) 論理的なフィルタによる処理

などが考えられる。本年度は、(1)、(2)と(5)を試みた。(1)と(5)について次に説明を行い、(2)については、垂直解像度が劣る以外は顕著な改善効果が認められなかったので省略する。

### 5-1 ストロボによる撮影

フレーム蓄積によるCCDカメラは、1/60秒毎のカメラ同期信号によりFLD1の蓄積を開始し、1/60秒後にFLD2の蓄積をおおの1/30秒間行う。ストロボ発光を両フィールドとも電荷蓄積に行えば、楕円や残像現象がない像が得

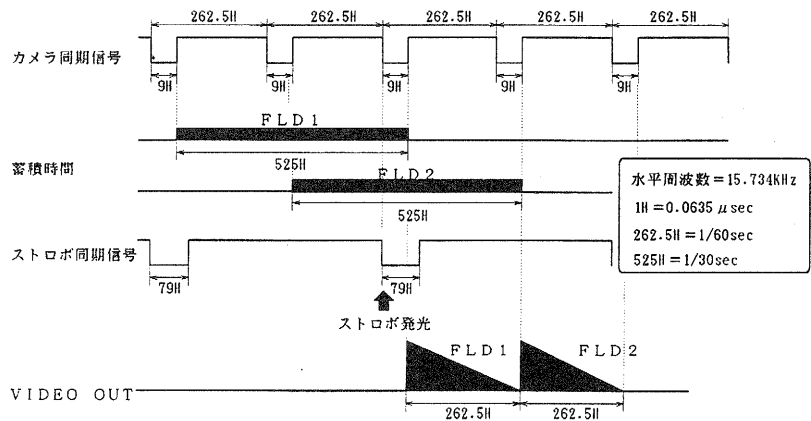


図5 CCDカメラ電荷蓄積とストロボ発光のタイミング

られる。欠点は、暗室状態で撮影しなければならないこと、CCDカメラへの電荷供給量が少ないので、電荷蓄積量を上げるため強い光でのストロボ照明が必要となることである。

今回使用している画像処理装置では、カメラ同期信号に合わせ1/30秒間隔のストロボ同期信号が出力されている。菅原研究所製デジタルストロボS-125形（ネオン管）は、パルス立ち上がりで発光するので、ストロボ同期信号を反転増幅回路を介してストロボに入力し、図5のタイミングで発光させた。結果は、強いストロボ光を一方向から部品に当てるので、切削部品表面での反射（乱反射でなく正反射状態）が発生し、部品形状の認識が困難な状況であった。

## 5-2 フィルタリング

3×3マトリクスによる論理的なフィルタリングにより、移動部品の形状補正を試みたので、の(ア)の正方形の部品形状の場合の補正過程を説明する。

正方形の部品が横方向に移動している状態で、フレーム蓄積により撮影すれば、(イ)の楕形状に撮影される。縦方向は、もとの正方形の一辺の長さAであるが、横方向は $A + \alpha + \beta$ となる。 $\alpha$ は1/30秒間の物体移動量に相当するが、2値化画像では電荷蓄積量が1フィールドの左右端部で減少するので、実際の移動量よりは短くなる。 $\beta$ は、1/60秒間の物体の移動量に相当し、偶数フィールドと奇数フィールドの電荷蓄積開始時間の違いにより生じ、 $\alpha$ 同様実際よりも短くなる。

(ウ)では、垂直方向におおの1画素膨張させ楕形を消し、(エ)で1画素収縮させて縦方向の長さを元に戻している。

$\alpha$ 、 $\beta$ は、ベルトコンベア移動速度やCCDカメラのレンズ系に

より変化するので、その時の設定条件により横方向の収縮量を変化させる必要がある。(オ)のAとBを計測し、 $B > A$ ならば横方向に1画素収縮処理を行い再度A、Bの比較を行う処理を繰り返し、 $A \pm 1$ 画素=Bとなるまでこの処理を繰り返した。この横方向収縮回数を、実際の移動部

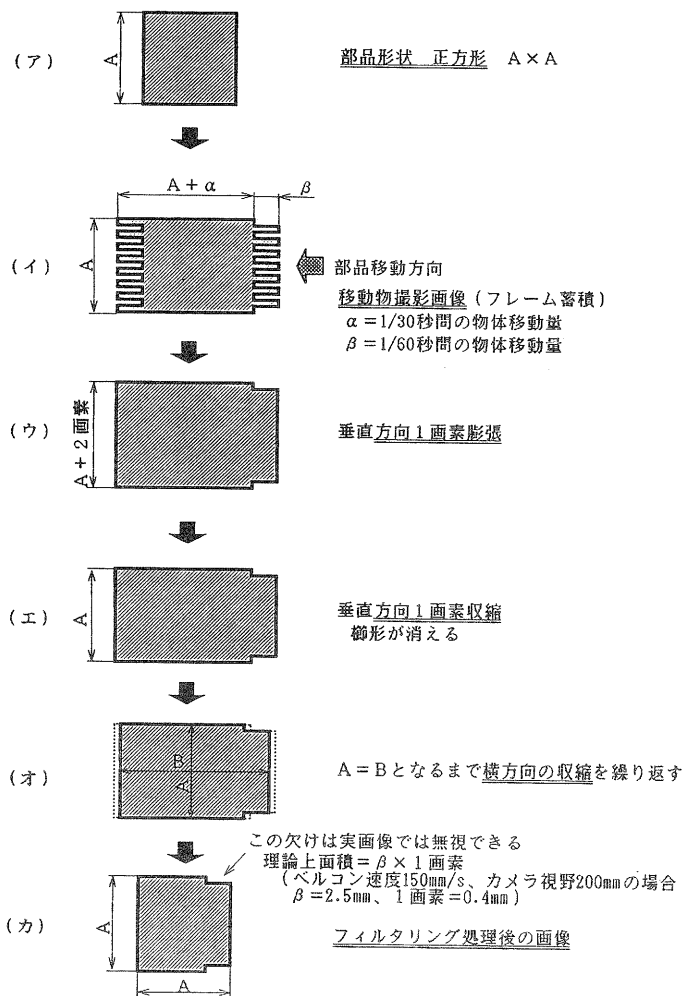


図6 論理的なフィルタリングによる形状の補正

品の撮影後行えば、横方向に関してほぼ静止画像と同じ寸法形状が得られる。

(カ)が補正後の画像である。欠けが、縦方向もしくは対角線上に2箇所現れる。理論上では、 $\beta \times 1$ 画素の面積が2箇所欠ける。例えば、ベルトコンベアの移動速度が150mm/s、カメラ視野が200mmの時、 $\beta = 2.5\text{mm}$ 、1画素=0.4mmで、実際の部品寸法を20mm角とすれば、欠ける面積は実際の部品面積の0.5%であり、実画像ではノイズや照明等の影響による誤差があるので無視できる範囲であろう。

なお、図6では説明に正方形を用いたが、実際のシステムでは部品移動方向に沿って傾き無く正方形を置くことが困難なので、 $\phi 20\text{mm}$ の円柱部品で行い、(オ)のA、Bの寸法の算出は楕円形状の画像の長径、短径で行った。

## 6. 部品種別識別法

識別関数は、統計的決定理論に基づく最尤法<sup>(4)</sup>で行った。あるクラス $\omega_i$ における特徴ベクトルの分布を表す関数を $P(X \setminus \omega_i)$ としたとき、

$$g_i = P(\omega_i \setminus X) = P(\omega_i) P(X \setminus \omega_i) \dots \dots (1)$$

が最大となるクラスに分類する方法である。ここで、 $P(\omega_i)$ はクラス $\omega_i$ がどのくらいの確率で観測されるかを表し、 $P(\omega_i \setminus X)$ は $X$ を観測したときのクラス $\omega_i$ に属する確からしさ(尤度)を表している。

$P(\omega_i)$ は、クラス $\omega_i$ が観測される確率であるが、今回1として全て同じとした。 $P(X \setminus \omega_i)$ は、正規分布に従うと仮定し、移動中の部品を撮影し、その特徴量の分布の平均値と分散を求め分類に利用した。

種別の識別に用いた特徴量は、面積、周囲の長さ(周囲長)、面積を短軸長と長軸長で表される四角形の面積で割った値(面積密度)、面積を周囲長で割った値(周面比)および短軸長と長軸長の比の5種類である。

## 7. 部品位置・把持時刻の認識法

部品を把持する位置の認識法は昨年度と同じであるが、部品移動方向(X方向)は、部品がカメラ下部の光電スイッチを横切った時から、何秒後にロボットによる把持場所に部品が流れてくるかを、ベルトコンベア移動速度を基にロボット制御部で計算している。しかし、光電スイッチをONするのは部品の移動方向の先端部であり、先端部から把持する位置までの距離は、図7のA、Bの様に部品形状や部品の置かれている方向などにより一定でない。単に、光電スイッチONの時点から把持すべき時刻を計算しても、部品が存在していない状況が発生する。

そこで、部品進行方向先端から把持する位置ま

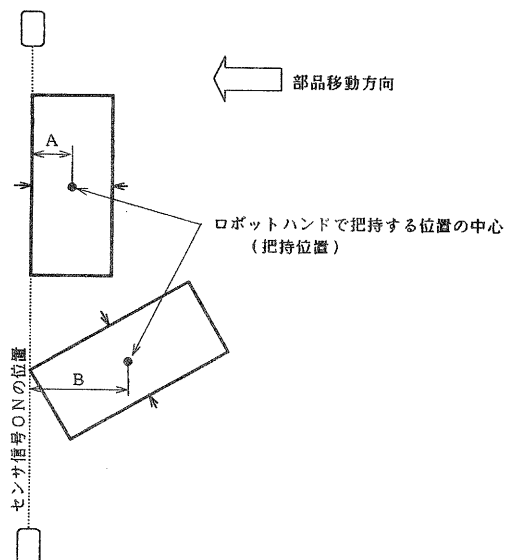


図7 センサ信号と把持位置の関係

でのX方向の距離（のAもしくはB）を計算しロボット制御部に伝えた。

## 8. 把持のためのシーケンス

図8に、ロボットで移動部品を把持する際の画像処理部の処理の流れを示す。

部品が流れてくれば、カメラの下部の光電スイッチがONとなり、部品が来たことをロボット制御部に知らす。次に、部品像を取り込み特徴量を算出し、部品種別を識別し把持位置など

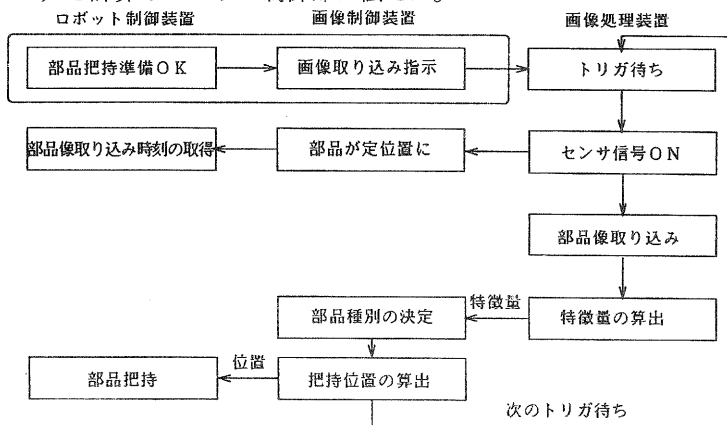


図8 部品把持のシーケンス

と共にロボット制御部に情報を送信する。光電スイッチがONとなってから部品像の取り込みと特徴量の算出に0.5秒、部品種別の識別と把持位置の算出およびロボット制御部に把持位置を送信し終わるまでが0.2秒、合計1処理サイクルで0.7秒である。

現在のシステムでは、この1処理サイクルの間、つまり、ベルトコンベアの速度が最大150mm/sの場合、部品が間隔が105mmより短く流れてきても判断できない。また、部品をロボットが把持終わるまでに、次の把持すべき部品が流れてきても処理できない。これらは、今後改良を要する点である。

## 9. 実験結果

対象としたモデル部品は、昨年度と同じアルミ製の6種類の部品を用いた<sup>6)</sup>。ただし、ロボットによる把持実験の初期段階で対象とした長方形部品は、ロボットハンドと干渉し危険な状態が発生した。そこで、少しでもロボットハンドと長方形部品が干渉しないように幅を少し狭くした。今回、円柱部品と長方形部品をティーチングし他の4種類の部品と共に、ランダムに部品を流し種別の認識および把持を行った。

絶対的な把持精度は、移動部品なので特に計測できないが、部品向きの関係ない円柱部品の場合、ビデオに撮影し確認した限りでは、ほぼ部品が動くこと無く把持できた。長方形の部品の場合、部品の置かれている向きの誤差が加わる。ベルトコンベア移動方向に対して斜め方向に部品が置かれている場合の把持では、目視でハンドの向きと部品の向きとの誤差が確認され、概ね誤差の角度は1~2度程度であると思われる。部品種別の認識判断では、今回実験を行った6種類の部品の識別を間違いなく行えた。

## 10. むすび

ベルトコンベアの任意の位置に部品を置き、その部品種別を認識判断し把持位置を求め、ロボットコントローラに情報を出力するシステムを試作した。その結果、部品種別の認識では、対象とした6種類の認識判断が最尤法にて行え、部品種別と把持位置の情報をロボットに教示することにより、移動中の部品の把持が行えた。また、撮影から認識、教示までの1処理サイクルは、0.7秒で

あった。

今後、部品の位置検出の誤差を定量化して表す方法の検討や連続して部品が流れてきた場合の対応、さらには、より高速な移動中の部品の把持やハンドアイによるビジュアルフィードバックにより高精度に把持するための画像処理技術の研究などを行う予定である。

## 謝辞

本研究について御指導頂いた川村貞夫研究参与（立命館大学工学部助教授）と小川均研究参与（立命館大学工学部教授）に感謝します。

## 〔参考文献〕

- (1) テレビジョン学会編：固体撮像デバイス、昭晃堂(1986)
- (2) 塚本哲男：固体撮像デバイスの基礎、オーム社(1987)
- (3) 木内雄二：画像入力技術ハンドブック、日刊工業新聞社(1992)
- (4) 田村秀行：コンピュータ画像処理入門、総研出版(1985)
- (5) 月瀬寛二：“機械部品整列のための姿勢検出装置の試作（第一報）”、滋賀県工業技術センター研究報告,P39～P45(1991)

---

\*インターライン転送形CCDカメラの電荷蓄積部の撮像領域内での素子配列方向。今回のカメラのセッティングでは、垂直方向は画像のY軸方向に相当する。

# 移動部品を把持できるロボットの研究（第二報）

技術第一科 深尾 典久 Norihisa Fukao

あらまし：従来の産業用ロボットは、単純作業を人間に代わり繰り返し行わせるために用いられることが多かったが、近年の多品種少量生産の流れの中で、柔軟な動作をするロボットが求められている。本研究では視覚とロボットアームを組み合わせるにより、ベルトコンベア上において移動中の複数種類の部品の中から特定種別の部品を識別し、把持できるロボットの開発を行ったので報告する。

## 1. まえがき

従来、産業用ロボットは、規則正しく置かれた定型物のハンドリング等、単純作業を人間に代わり繰り返し行うために導入される事が多かった。しかし、近年の多品種少量生産の流れの中で、柔軟な動作が出来るロボット、すなわち視覚等の感覚機能や判断能力をもち、作業環境を自ら把握しながら作業が出来る知能ロボットの開発が望まれている<sup>1)</sup>。知能ロボット研究の一段階として、本研究ではベルトコンベア上において移動中の複数種類の部品の中から、視覚センサにより特定種類の部品とその位置を認識して、それを把持できるロボットの開発を行った。視覚センサの部分は別の報告に譲ることとし<sup>2)</sup>、本文では、視覚センサにより得られた情報によってロボットアームを制御する部分について報告する。

## 2. ロボットアームの概要

本研究には水平4軸のロボットアームを用いた。リンク構成および外観を図1、図2に示す<sup>3)</sup>。ロボットアームの各軸は、減速器を介し、DCサーボモータによって駆動される。各軸の制御は、ロボット付属のコントローラでは行わず、図3の様に、サーボドライバ、パルス発生器を介して、直接パソコンから行うようにしている。構成装置の各仕様を、表1に示す。

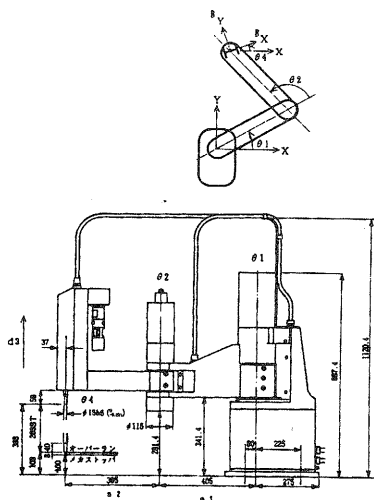


図1 研究に使用したロボットアームのリンク構成

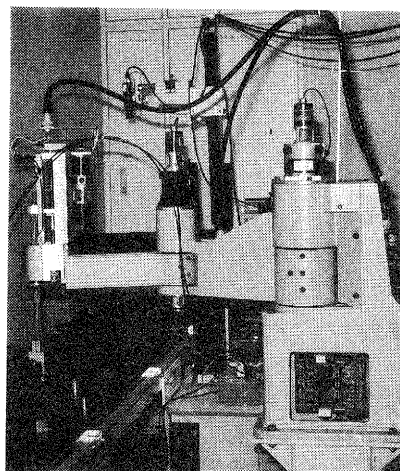


図2 ロボットアームの外観

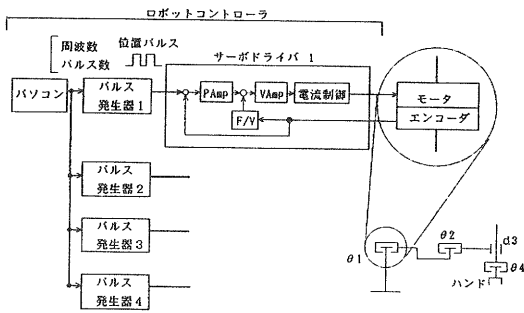


図3 ロボットアーム制御装置の概要

パソコン	PC-H98 model170 日本電気(株)				
パルス発生器	HP98-PPD4 (株)ハイパーテック 仕様LSI PCL-3AM 日本パルスモータ(株)				
ハンド	エアチャック 開放時 30mm				
ロボットアーム					
関節	モータ      サーボドライバ      エンコーダ      減速比      指令パルス				
θ1	DCサーボ 300w	DC 6 大三工業(株)	1000 P/R	132 : 1	132000 P/R
θ2	DCサーボ 200w	DC 6 大三工業(株)	1000 P/R	80 : 1	80000 P/R
d3	DCサーボ 100w	TDM AU3620 多摩川精機(株)	1000 P/R	...	100 P/Zmm
θ4	DCサーボ 60w	TDM AU3620 多摩川精機(株)	1000 P/R	33 : 1	33000 P/R

表1 構成装置の仕様

### 3. ロボットアームの制御方法

ベルトコンベア上に任意の位置と向きに置かれ、一定の速度で移動するアルミ製の部品を把持するため、視覚センサにより、部品の種別、把持位置ならびに向きを検出し<sup>②</sup>、その情報をもとに特定の把持すべき部品について、ロボットアームをベルトコンベアと等速に動かすことにより、部品の把持を行う。

以下、ロボットアームの制御方法について説明する。

#### 3-1 ロボットアームの運動学

ロボットアームは、に示した水平4軸型であり、手首関節の角度 $\theta_4$ は、ベルト駆動機構により、 $\theta_1, \theta_2$ とは独立して動作するようになっている。したがって、このロボットアームの同時変換Tは、

$$T = \begin{pmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & a_1 \cdot \cos(\theta_1) + a_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & a_1 \cdot \sin(\theta_1) + a_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

である。

ここにTは、ロボットアームの関節変数 $\{\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4\}$ がの様にと与えられるとき、ロボットアーム先端の位置、姿勢を与えるものである。空間上の任意の点が同時座標表示を用い、ロボットアームの置かれた座標系において $(x, y, z, 1)$ で与えられ、同時に手先の座標系において $({}^Bx, {}^By, {}^Bz, 1)$ で与えられるとき両者の間には、

$$(x, y, z, 1)^T = T \cdot ({}^Bx, {}^By, {}^Bz, 1)^T$$

の関係がある。

また、手先位置がロボットアームの置かれた座標により $(x, y, z, 1)$ 、手首角度 $\theta$ で与えら



れるとき、関節変数 $\{\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4\}$ は、

$$\theta_2 = \cos^{-1}\{(x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2) / 2a_1a_2\}$$

(2つの解が、それぞれ右手系と左手系に対応する)

$$\theta_1 = \text{atan2}\{[(a_1 + a_2 \cos(\theta_2))y - a_2 \sin(\theta_2)x], [(a_1 + a_2 \cos(\theta_2))x - a_2 \sin(\theta_2)y]\}$$

$$d_3 = z$$

$$\theta_4 = \theta$$

で与えられる。<sup>(4)</sup>

なお  $\text{atan2}[a, b]$  は、 $\tan^{-1}(a/b)$  を範囲  $2\pi$  (rad) で求める計算機関数である。これは、複素数  $b+aj$  の偏角と等しい。

### 3-2 移動部品把持の手順

ロボットと視覚センサおよび画像処理装置は、図4の様に接続されている。ベルトコンベア上を流れる部品を把持するためには、ある時間における部品の位置、姿勢およびベルトコンベアの速度を知る必要がある。姿勢およびY軸（ベルトコンベアと直交方向）座標については、視覚センサにより取得する。X軸（ベルトコンベアの移動方向）座標については、画像処理に要する時間が不定であるので、視覚センサにより部品先端から把持位置までの距離を得て、ベルトコンベア上に取り付けたリミットスイッチをささぎる時刻と組み合わせて用いた<sup>(5)</sup>。なお、視覚センサ、リミットスイッチ、ベルトコンベアおよびロボットアームの位置関係は既知の固定値であるとした。

以下に、視覚センサにより得られる情報を用いた、把持の手順について記す。

- (1) ロボットアームの手先を、X軸が把持スタート位置で、Y軸が一定の位置へ移動する。
- (2) 部品がリミットスイッチを通過したら、タイマーをスタートする。
- (3) 視覚センサにより、部品の種別、部品を把持する位置のY座標、部品の先端(リミットスイッチを通過する点)から把持する位置までのX座標、ベルトコンベアの速度を得る。
- (4) ロボットアームの手先を、X軸が把持スタート位置で、Y軸および手首角度を部品の把持位置へ移動する。
- (5) タイマーの時刻によりロボットアームの部品把持動作を開始する。この部分の詳細は、3-3節に記す。

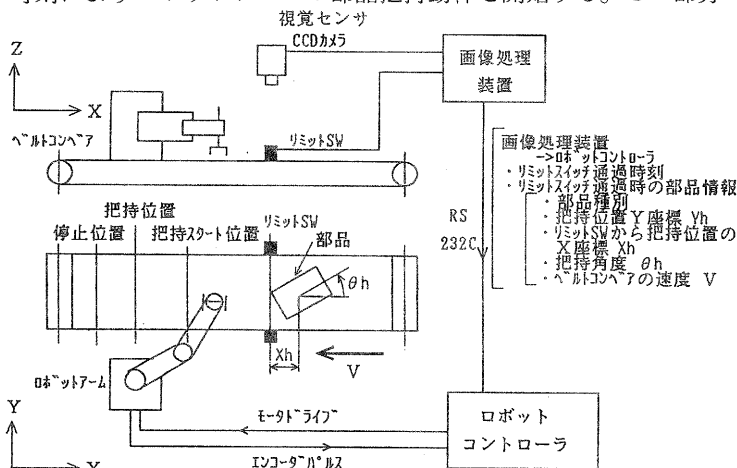


図4 ロボットアームと視覚センサ、画像処理装置の接続

### 3-3 ロボットアームの部品把持動作

図5に示す様に、ロボットアームの手先をベルトコンベアの進行方向に、時間  $t_2$  の間、速度  $V_2$  で等速直線に動かす。ここに  $V_2$  は、ベルトコンベアと等しい速度である。また加減速は、加減速時間  $t_1$  の間、加速度一定で行う。この場合、ベルトコンベアに対しロボットアームは、加速時間の間に、距離  $t_1 \cdot V_2 / 2$  遅れるのでその分を見越して、 $t_1 / 2$  早くスタートしなければならない。この間の移動距離は、 $(t_1 + t_2) \cdot V_2$  である。

今回は、把持スタート位置、把持位置、停止位置を、図4に示したように一定とし、また加減速時間  $t_1$  も固定して、スタート時刻  $T_0$ 、把持時刻  $T_g$  ならびに等速移動時間  $t_2$  を求めた。

上下方向には、把持時刻  $T_g$  において、ロボットアームが部品把持のための高さ  $Z_g$  となるように、速度一定で下降し、その後停止時刻  $(T_0 + t_1 + t_2 + t_1)$  まで上昇する。そして把持時刻  $T_g$  に、ロボットアーム先端のエアハンドで部品を把持する。

ロボットアームを駆動する方法としては、図3の構成のロボットコントローラにおいて、パソコンで10 (msec) ごとに、上記の軌道計画にしたがって、手先の位置を求める。そして、3-1節の方法で角関節変数を求め、さらに1つ前の関節変数と比較することにより、各軸のパルス数およびパルス周波数(速度)を求め、パルス発生器を通して、サーボドライバに指令を出すことにより行った。

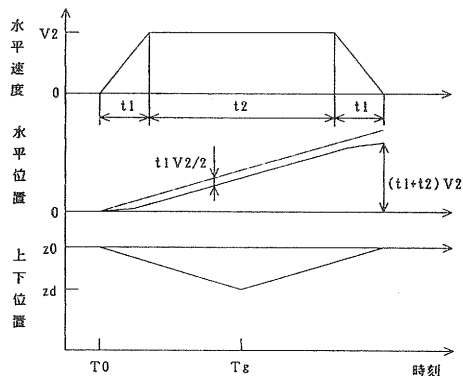


図5 ロボットアーム先端の部品把持軌道

### 4. ロボットアームによる部品の把持および直線動作時の精度に関する検討

部品把持の実験では、ベルトコンベアを最大 0.15m/sec とし、アルミ製の6種類の部品を流しその中から円柱および四角柱の部品を識別して、ロボットに把持させた結果、良好に把持できた。

次に、その精度について検討する。ロボットアーム先端を、等速直線移動させた場合の、位置決め精度を、平面上での移動(第1軸と第2軸)について、サーボドライバに対する指令パルスと、各軸のエンコーダパルスを比較することにより評価を行った。これらのパルスは、各軸の角度と比例関係にある。本来、把持精度の検証には、ロボットアームおよび移動する部品から独立した外界センサーを用いて行うのが望ましいが、移動するロボットアーム先端の各時刻における位置を精度良く測定することは困難であるため、この方法を用いた。ロボットアームの寸法誤差や剛性不足、減速器のバックラッシュ等による誤差は、この方法では測定されていない。

第1軸指令パルスを $\theta_{1s}$ 、第1軸エンコーダパルスを $\theta_{1e}$ 、第2軸指令パルスを $\theta_{2s}$ 、第2軸エンコーダパルスを $\theta_{2e}$ とする。

動作条件は図6の様に、初期位置(560,560)から、加速時間500msec 等速時間9500msec 減速時間500msec 等速速度はX軸負方向に $-0.2$  (m/sec)で、終点位置(-440,560)まで右手系で等速直線移動させたものである。これは、今回把持を行った速度より高速である。

図7、図8に第1軸および第2軸に対する10msecごとの指令パルス数 $\dot{\theta}_{1s}$ 、 $\dot{\theta}_{2s}$ を示す。また、図9、図10に $\{\int \dot{\theta}_{1s} dt - \int \dot{\theta}_{1e} dt\}$  および、 $\{\int \dot{\theta}_{2s} dt - \int \dot{\theta}_{2e} dt\}$ を示す。これは、第1軸および第2軸における指令パルスとエンコーダパルスの角度誤差を示す。なおより、第1軸の1パルスは $\pi/66000$ (rad)に、また第2軸の1パルスは、 $\pi/40000$ (rad)に対応する。

これらから第1軸 第2軸とも、各速度と角度誤差はほぼ比例関係にあることが解る。この条件の場合、第1軸および第2軸で角度誤差は最大、46パルスおよび43パルスである。これは、 $2.19 \times 10^{-3}$ (rad) および  $3.38 \times 10^{-3}$ (rad)に対応する。

に直角座標での位置誤差を示す。各時刻における指令パルス $\theta_{1s}$ 、 $\theta_{2s}$  およびエンコーダパルス $\theta_{1e}$ 、 $\theta_{2e}$ からに従って位置 $P_s$ 、 $P_e$ を求め、その距離 $|P_s - P_e|$ を時間軸で表したものである。これによると位置誤差は、最大0.90mmである。

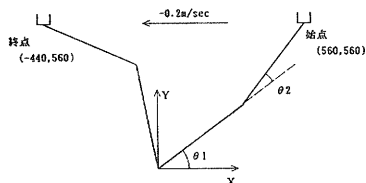


図6 精度検証条件

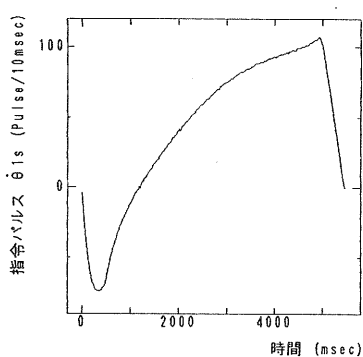


図7 第1軸角速度-時間

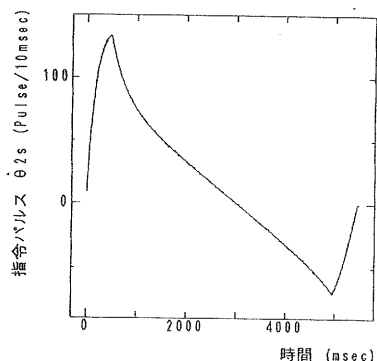


図8 第2軸角速度-時間

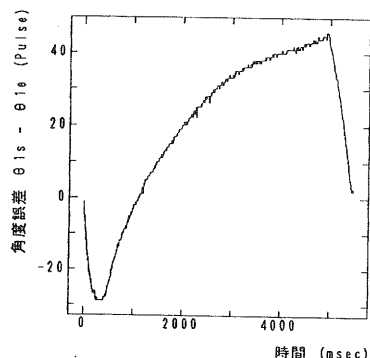


図9 第1軸角度誤差-時間

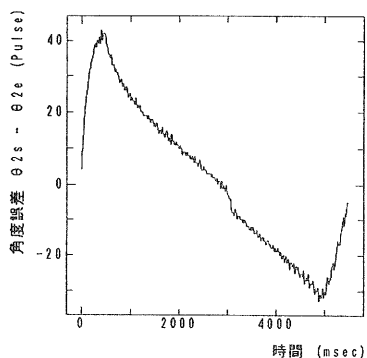


図10 第2軸角度誤差-時間

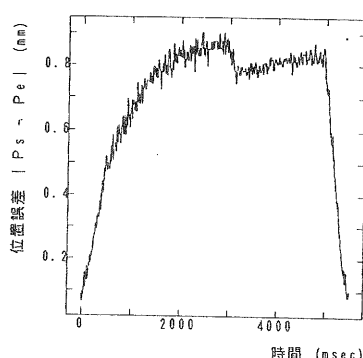


図11 位置誤差-時間

## 5. むすび

本研究では、水平4軸ロボットの各軸をパソコンから直接制御することにより、ベルトコンベア上を最大 0.15m/sec で流れる複数の部品を識別し、ロボットアームを部品に追従してベルトコンベアと等速度で動かし、先端に取り付けたエアチャックにより良好に把持できた。把持精度の検証には、各サーボモータに取り付けられたエンコーダのパルスをモニタすることにより行った。その結果は、直線移動速度 0.2m/sec において位置誤差約0.9mmであった。この値には、さらに機械的な誤差が加わるが、本研究の目的からは十分な精度であろうと思われる。

## 謝辞

本研究についてご指導頂いた川村貞夫研究参与（立命館大学理工学部）と小川均研究参与（立命館大学理工学部）に感謝します。

## 【参考文献】

- (1)今出ほか：“ベルトコンベア上を移動する加工物の識別とロボットアームの把持制御”、中国工業技術試験所報告 No.37(1991)
- (2)月瀬：“機械部品整列のための姿勢検出装置の試作（第2報）”
- (3)吉川：ロボット制御基礎論 コロナ社
- (4)松下電器(株)：組立用ロボット取扱説明書

# 炭素繊維強化エポキシ樹脂（CFRP）の “ぬれ性”に関する研究（第六報）

— 陽極酸化による液晶ピッチ系炭素繊維の表面処理について —

技術第二科 山中 仁敏 Masatoshi Yamanaka

あらまし：炭素繊維強化エポキシ樹脂（CFRP）の材料力学的特性は、強化繊維とマトリックス樹脂の力学的性質だけで決定されるものではなく、繊維－樹脂界面の接着性（ぬれ性）に大きく依存する。従って界面の接着性を向上するために、炭素繊維の表面処理が一般におこなわれている。ところが、液晶ピッチ系炭素繊維の表面処理が、炭素繊維自体およびCFRPの力学特性に及ぼす影響については、ほとんど解明されていない。そこで液晶ピッチ系炭素繊維の陽極酸化法（液相酸化）による表面処理を行い、炭素繊維およびCFRPに及ぼす影響について調べた。

その結果、陽極酸化法における表面処理では加電圧が0.8V～1.0Vで層間せん断強度(ILSS)が大きく増加した。またILSSは最大で約135%、曲げ強度は約13%増加し、気相酸化による表面処理とほぼ同じ結果が得られた。しかし、ILSS強度が同じ時の単繊維引張強度の低下について比較すると、陽極酸化法の方が気相酸化法に比べて低下が小さく、炭素繊維に対する損傷の少ない処理方法であることが分かった。

## 1. はじめに

CFRPの強化繊維である炭素繊維は、マトリックス樹脂との接着性（ぬれ性）があまりよくないため、焼成したままの炭素繊維で樹脂を強化しても、炭素繊維がもつ性能を十分に発揮させることができない。そこで繊維－樹脂間の接着性を向上させる目的で炭素繊維の表面処理が一般的に行われている。ところが炭素繊維の表面処理は、繊維－樹脂間の接着力を向上させる反面、同時に繊維自体の力学的特性の低下を引き起こすため、適切な表面処理を行う必要がある。しかしながら、PAN系炭素繊維に比べて安価でしかも高弾性糸が製造できる可能性のある液晶ピッチ系炭素繊維<sup>1)</sup>の表面処理効果についてはほとんど解明されていない。

このため前報<sup>2-3)</sup>では、気相酸化法による液晶ピッチ系炭素繊維の表面処理がCFRPの力学的特性に及ぼす影響について調べ、繊維－樹脂間の接着強度の増加による曲げ強度の増加と、繊維自体の劣化による引張強度の低下について確認した。しかし、炭素繊維の表面処理法としては気相酸化法だけではなく薬液酸化法、陽極酸化法、プラズマ酸化法などがありこれらの表面処理効果の違いについては、明らかにされていない。そこで今年度は、陽極酸化法を用いて液晶ピッチ系炭素繊維の表面処理を行い、単繊維引張強度およびCFRPのILSSと曲げ強度に及ぼす影響について調べた。

## 2. 実験

### 2-1 炭素繊維の陽極酸化による表面処理

炭素繊維の陽極酸化表面処理は、炭素繊維を陽極として電解質を溶解した水溶液中で低電流を流すことにより、炭素繊維表面に発生する活性酸素により炭素繊維表面を酸化する方法である。酸化の制御が容易であり、繊維を連続的に処理できるという特徴を持っている。陽極酸化に使用される電解質水溶液としては、アルカリ性水溶液 (NaOH、 $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  など)、酸性水溶液 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HNO}_3$  など)、および中性水溶液 (NaCl、 $\text{NaNO}_3$  など) が使用され、加電圧方法も低電圧直流やパルス電流などによる方法が知られており、これまでは主にPAN系炭素繊維に関する研究が行われている<sup>4-7)</sup>。今回の実験では、電解質に $\text{HNO}_3$ を使用し直流で加電することにより、液晶ピッチ系炭素繊維の陽極酸化について検討した。

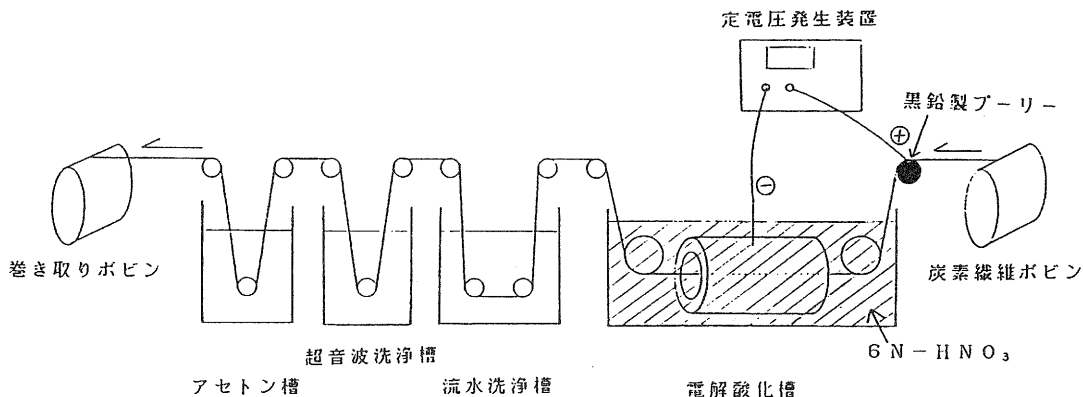


図1 陽極酸化法

図1のように、炭素繊維を黒鉛製のプーリーにより接触通電させて陽極とし、陰極としては黒鉛製円筒 (外径38mm、内径25mm、長さ130mm) を使用した。この陰極全体を6N- $\text{HNO}_3$ 中に置き、炭素繊維を一定速度で通過させることにより、陽極酸化表面処理を行った。処理した炭素繊維は流水水槽と超音波洗浄水槽で洗浄し炭素繊維に残留している $\text{HNO}_3$ を洗い、その後アセトン槽を通過させることにより水分を取り除いた。炭素繊維の送り速度を一定 (130mm/min) とし、陽極-陰極間の加電圧を0.4V~1.8Vに変化させて処理を行った。

### 2-2 炭素繊維とCFRPの成形方法

液晶ピッチ系炭素繊維は、(株)ペトカ製で引張弾性率が約500GPaの表面処理されていないものを用いた。またCFRPのマトリックス樹脂としては3phrの3フッ化ほう素モノエチルアミン錯塩で硬化したエピコート828 (油化シェルエポキシ(株)製) を使用した。

成形については、前報<sup>3)</sup>と同様に170℃で硬化させ一方向CFRPを作製した。

### 2-3 CFRPの層間せん断強度(ILSS)、曲げ強度、および単繊維引張強度

ILSSは、20mm×10mm×2mmの試料をスパン長さ8.0mm、クロスヘッド速度1mm/minのショートビーム法で行った。曲げ試験については、105mm×10mm×2mmの試料をスパン長さ80mm、クロスヘッド速度1mm/minの3点曲げ試験を行い、複合則に基づき体積繊維含有率を60%に補正した。また単繊維引張強度は、前報<sup>3)</sup>と同様の方法で測定した。

### 3. 結果と考察

#### 3-1 陽極酸化に加電圧と単繊維引張強度との関係

図2に加電圧と単繊維引張強度との関係を示す。単繊維引張強度は、加電圧の増加とともに低下し、特に1.0V以上で大きな強度の低下を示した。炭素繊維の表面処理では、繊維自体均一に酸化されるのではなく、炭素繊維表面に存在する欠陥や低結晶部分から

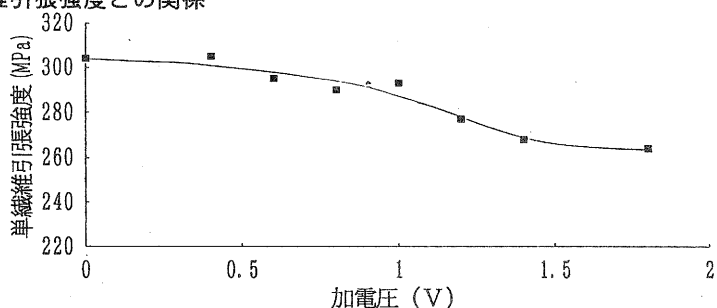


図2 加電圧と単繊維引張強度の関係

酸化されるため、繊維表面の粗化が進行し強度の低下を引き起す。このため陽極酸化での表面処理では、加電圧が1.0V以上で、炭素繊維表面の粗化が大きくなったと考えられる。

#### 3-2 陽極酸化に加電圧とILSSとの関係

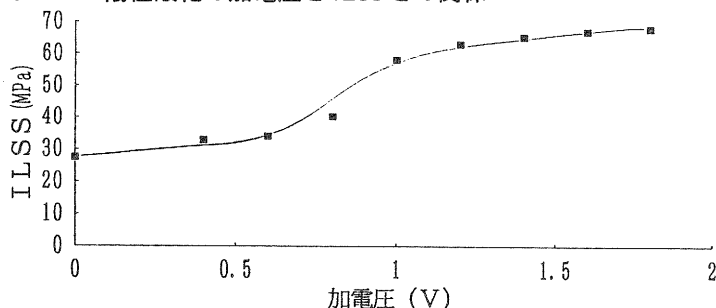


図3 加電圧とILSSとの関係

図3に陽極酸化に加電圧とILSSとの関係を示す。ILSSは0.8Vまでは、加電圧の増加に伴い徐々に増加し、0.8V~1.0Vの間で大きく増加した。その後、加電圧の増加に伴いILSSも増加したが増加量は小さかった。ILSSの増加した原因としては、繊維表面の粗化によるアンカー

効果と表面酸化による炭素繊維表面への酸素含有官能基の導入の2つが考えられる。加電圧が0.8V~1.0V間での大きなILSSの増加は、主に後者の原因により起こったと考えられる。これは、水の電解反応は加電圧が0.8V付近から起こり始め、陽極である炭素繊維表面で活性酸素が発生する。この活性酸素により繊維表面への酸素導入が促進され酸素含有官能基の急増することが考えられるためである。

また、加電圧と単繊維引張強度、およびILSSの関係から、陽極酸化による表面処理での加電圧と炭素繊維の酸化機構との関係を次のように推定した。加電圧が0.8Vまでは、ILSSおよび単繊維引張強度の変化が小さいことから、炭素繊維の酸化はほとんど起こっていないと考えられる。次に、加電圧0.8V~1.0Vの間では、ILSSは大きく増加しているが単繊維の引張強度は余り低下していないことから、主として炭素繊維表面への酸素含有官能基の導入が起こっており、繊維表面の粗化はほとんど起こっていないと考えられる。1.0V以上の加電圧では、ILSSが微増であるにもかかわらず単繊維引張強度が大きく低下していることから、炭素繊維表面への酸素含有官能基の導入量は少なく、逆に繊維表面の粗化が進行していると考えられる。以上のように、陽極酸化法による表面処理では、酸素含有官能基の導入と表面粗化の進行が平行して起こっているのではなく、加電圧により酸化機構に違いがあると考えられる。

### 3-3 陽極酸化に加電圧と曲げ強度の関係

加電圧と曲げ強度との関係を図4に示す。曲げ強度は、加電圧が大きくなるとともに増加し、特にILSSと同様、0.8V~1.0Vにかけて大きく増加した。ILSSと曲げ強度の挙動がよく一致していることから、曲げ強度の増加は、繊維-樹脂間の接着力の増加が、曲げ破壊が開始する時の圧縮

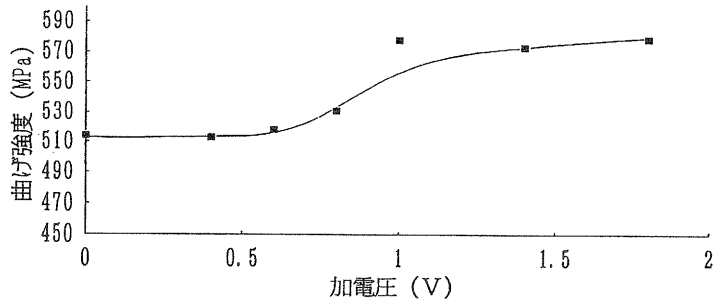


図4 加電圧と曲げ強度の関係

応力による炭素繊維の微小座屈<sup>9)</sup>を起こりにくくするためと考えられる。また液晶ピッチ系炭素繊維の場合、圧縮強度が引張強度に比べて極端に低く、表面処理による単繊維引張強度の低下の影響を受けず、ILSSの増加が曲げ強度の増加につながったと考えられる。

### 3-4 陽極酸化法と気相酸化法との比較

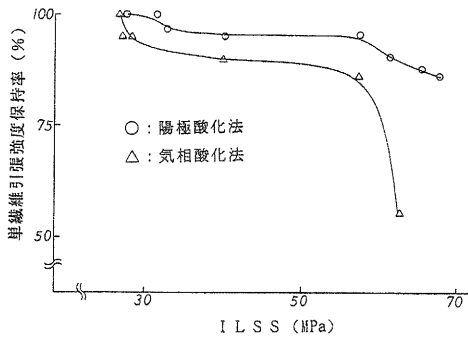


図5 表面処理によるILSSと単繊維引張強度保持率の関係

図5に、陽極酸化法と気相酸化法による、ILSSと単繊維引張強度保持率の関係を示す。気相酸化法の場合、ILSSが上昇するにつれて徐々に単繊維引張強度は低下し、ILSSが上昇し始める処理条件で単繊維引張強度が5%低下し、55MPa付近で約15%低下している。しかし60MPaを越えると繊維強度は

急激に低下した。一方、陽極酸化法の場合、初期の低下率は気相酸化法に比べて小さく、ILSSが55MPaで約5%の低下にとどまっている。また、60MPa以上での低下率は60MPa以下に比べて大きい。気相酸化法のように急激な劣化は認められない。これらの違いは、気相酸化法では表面処理により表面の酸素含有官能基の導入と粗化が同時に起り、ILSSの向上と繊維の劣化が平行して起こるのに対して、陽極酸化法では気相酸化に比べて表面の粗化よりも酸素含有官能基の導入が優先的に起こるためと考えられる。これらのことより液晶ピッチ系炭素繊維の表面処理において、陽極酸化法は気相酸化法よりも繊維自体の劣化が少ない処理であり、言い変えると、繊維の劣化が少ない状態でILSSを向上させることができると考えられる。

## 4. むすび

液晶ピッチ系炭素繊維を陽極酸化法による表面処理を行い、単繊維引張強度およびCFRPのILSSと曲げ強度を測定し、下記の結果を得た。

1、陽極酸化法により、ILSSは加電圧0.8V~1.0Vの間で大きく増加する。



- 2、陽極酸化法では気相酸化法よりも、繊維自体の劣化が少ない。
- 3、陽極酸化法によるILSSの向上は、表面への酸素含有官能基の導入が大きく影響し、繊維表面の粗化の影響は小さいと考えられる。

#### 謝辞

本研究について御指導をいただいた大阪工業技術試験所、無機機能材料部、複合材料化学研究室の皆様、ならびに御助言いただいた木村良晴研究参与（京都工芸繊維大学教授）に深く感謝します。

#### 【参考文献】

- (1)大谷杉郎他：「炭素繊維」近代編集社
- (2)山中仁敏：1990年滋賀県工業技術センター研究報告
- (3)山中仁敏：1991年滋賀県工業技術センター研究報告
- (4)John Harvey, Carol Kozlowski and Peter M.A Sherwood : J.Mat.Sci.22,1585(1987)
- (5)Carol Kozlowski and Peter M.A Sherwood : Carbon,25,751(1987)
- (6)E.Theodoridou and A.D.Jannakoudakis : Synthetic Metals,14,125-135(1986)
- (7)進藤昭男他：第10回複合材料シンポジウム(1985)他
- (8)山中仁敏：1988年滋賀県工業技術センター研究報告
- (9)松井醇一他：「炭素繊維の展開と評価方法」リアライズ社

# CF<sub>4</sub>プラズマ処理によるポリイミド表面の フッ素化と表面の低接着化

技術第二科 中村 吉紀 Yoshiki Nakamura  
(株)I. S. T. 丹田 久嗣 Hisashi Tanda

あらまし：ポリイミドをCF<sub>4</sub>ガスでプラズマ処理し、表面の化学組成と処理表面の接着性を調べた。放電電力、ガス圧、ガス流量、処理時間を変えて処理を行った。ほとんどの条件下でかなりの量のフッ素 (F/C=0.6~0.9) が導入され、かつ接着性も未処理の1/2~1/3となり、表面の低接着化が達成された。1分程度の処理でも同様の結果が得られており、表面のフッ素化による改質は急速に起こることが分かった。しかし、放電電力が高い(100W)場合には、接着性は未処理のポリイミドよりも高くなった。この場合でもF/C=0.56とかなりのフッ素が表面に存在しており、フッ素量よりもエッチングの影響の方が大きいことが分かった。また、導入されたフッ素は空気中では1週間程度は安定に存在した。

## 1. はじめに

前報<sup>1)</sup>では、フッ素系の化合物を用いポリイミドフィルム上にプラズマ重合膜を形成し、その化学構造といくつかの特性について評価した。その結果、プラズマ重合膜は良好な力学的性質を有するが、フッ素系樹脂膜に特有な水性や滑り性は低いことが明かとなった。また、重合膜と基材との接着性については、従来の湿式のフッ素樹脂コーティングとほぼ同等の性能が得られた。しかし、一般的に重合膜の場合は基材表面での重合・堆積が主体となるため、基材と重合膜との接着性には自ずと限界がある。そこで今回は、ポリイミドの表面をCF<sub>4</sub>ガスでプラズマ処理することにより、基材表面を直接フッ素化することを試みた。

フッ素系ガスによる高分子表面のプラズマ処理についてはいくつかの報告がある。岡崎<sup>2)</sup>らはポリイミドなどの高分子材料をCF<sub>4</sub>ガスでプラズマ処理し、テフロンと同様の水性が得られること、および表面のフッ素原子の大部分は炭素に結合していることを認めている。しかし、プラズマ処理表面の接着性の変化、特に低接着化ないしは非接着化についてはあまり知られていない。

ここでは、ポリイミドの表面をCF<sub>4</sub>ガスでプラズマ処理し、処理条件が接着性と表面の化学組成に及ぼす影響について調べた。

## 2. 実験

### 2-1 プラズマ処理

処理装置：プラズマ重合装置 (サムコインターナショナル研究所、Model PD-2)

基 材：ポリイミドフィルム (ユービレックス50S、宇部興産)

ガ ス：CF<sub>4</sub> (旭硝子、フロン-14、5N)

処理方法：RF電源 13.56MHz

電 極 容量結合型内部電極 (平行平板型)

電極間距離	17 mm
基板径	100 mm $\phi$
基板温度	20 $\pm$ 3 $^{\circ}$ C
放電電力	25 ~ 100 W
処理時間	~ 30 分
圧力	0.5 ~ 2 Torr

ステンレス製の基板（下部電極）上にポリイミドフィルム（100 $\times$ 100mm<sup>2</sup>）を置き、両端をスライドガラスで押さえた。一たん、 $5 \times 10^{-5}$  Torr 以下に減圧した後、CF<sub>4</sub>ガスを導入し、Table 1 ~ 4の条件で処理を行った。

Table 1 Change on the discharge power

Discharge Power (W)	Pressure (Torr)	Flow Rate (ml/min)	Time (min)
25	1	100	30
50			
100			
25	2	100	30
50			
100			

Table 2 Change on the pressure

Discharge Power (W)	Pressure (Torr)	Flow Rate (ml/min)	Time (min)
25	0.5	100	30
	1		
	2		

Table 3 Change on the CF<sub>4</sub> gas flow rate

Discharge Power (W)	Pressure (Torr)	Flow Rate (ml/min)	Time (min)
25	1	50	30
		100	
		200	

Table 4 Change on the exposure time

Discharge Power (W)	Pressure (Torr)	Flow Rate (ml/min)	Time (min)
25	1	100	1
			5
			15
			30

## 2-2 接着性と表面分析

### (1) 接着性

CF<sub>4</sub>ガスでプラズマ処理したポリイミドフィルムの表面と、未処理のポリイミドフィルムの表面をサンドペーパー（#600）で荒らしたものとを、エポキシ系接着剤（アラルダイト、日本チバガイギー）で接着した。室温で16時間、さらに60 $^{\circ}$ Cで6時間保持し硬化した。

これを20mmの幅に裁断し、材料試験機（オートグラフ AG 5000-A 型、島津製作所）を用い、クロスヘッド速度100mm/minで、T形はく離法によりはく離強度を測定した。

### (2) X線光電子スペクトル (XPS)

X線光電子分光分析装置（Model 5400、アルバックーフアイ）を用い表面分析を行った。F/C, O/C比を算出し、C1sピークの波形分離を行った。帯電補正は低エネルギー側のC1sピークが284.6eVとなるよう補正した。

### (3) SEM

処理表面をAu-Pdでコーティングした後、走査型電子顕微鏡（S-650、日立製作所）を用い表面観察を行った。

### 3. 結果と考察

#### 3-1 接着性および表面の化学組成

Table 1 から Table 4 の条件でプラズマ処理した時の、各パラメータの変化が表面の接着性および化学組成に与える影響について調べた。ここでは、表面のフッ素化による低接着化を目的としているため、はく離強度が小さいものほど低接着性が向上しているとみなした。

##### (1) 放電電力の影響 (Fig. 1)

25Wで30分間、 $\text{CF}_4$ ガス気流下でプラズマ処理することにより、はく離強度は未処理に比べて約1/2に低下し低接着性を示した。しかし、25W以上では放電電力が大きくなるにつれて、はく離強度は逆に高くなり、100Wでは未処理のポリイミドのそれよりも高くなった。

表面組成をみると、 $\text{O}/\text{C}$ は約0.2でほぼ一定であった。一方、 $\text{F}/\text{C}$ は未処理が0であるのに対して、25Wでは約0.7と高くなっており、かなりのフッ素が取り込まれていることが分かった。放電電力が25Wから100Wに増加するに従ってフッ素量は減少傾向を示したが、100Wでも $\text{F}/\text{C}$ は0.56と依然として高かった。このように100W、30分の処理では相当量のフッ素が存在しているにもかかわらず、はく離強度は未処理よりも大きくなった。

##### (2) 圧力の影響 (Fig. 2)

0.5~2Torrにおいては、はく離強度は未処理に対して1/2以下に低下した。一方、 $\text{O}/\text{C}$ 、 $\text{F}/\text{C}$ は各々0.2、0.7~0.8でほぼ一定であった。これらの圧力範囲においては、圧力の影響は小さいことが分かった。なお0.5Torrでのはく離強度が他に比べてやや低い原因については、有意差であるかどうかも含めて確認できなかった。

##### (3) ガス流量の影響 (Fig. 3)

50~200ml/minの範囲においては、ガス流量も特に大きな影響は与えなかった。はく離強度は未処理の1/2以下に低下し、 $\text{F}/\text{C}$ もほぼ0.8と高かった。わずかではあるが流量が大きいほど $\text{F}/\text{C}$ が大きくなり、かつ接着性も低くなるような傾向がうかがえた。

##### (4) 処理時間の影響 (Fig. 4)

低接着性を示した25Wで処理した場合の処理時間とはく離強度、あるいはフッ素量との関係を調べた。はく離強度は急激に減少し1分後においてすでに未処理の1/3となった。それ以降は30分まで低接着性(約50~100gf/20mm)を示した。

フッ素の導入も急速に進行し、1分処理ですでに $\text{F}/\text{C}$ は0.65と高くなった。5分後にはさらに0.85にまで達したが、その後はやや減少した。このようにごく短時間で起こるフッ素の導入と接着性の低下の間には良い相関関係が認められた。

#### 3-2 経時変化

25W、2Torr、100ml/min、30分で処理した後の表面組成の経時変化を Fig. 5 に示す。 $\text{O}/\text{C}$ はほぼ一定であったが、 $\text{F}/\text{C}$ は7日前後で約10%減少した。

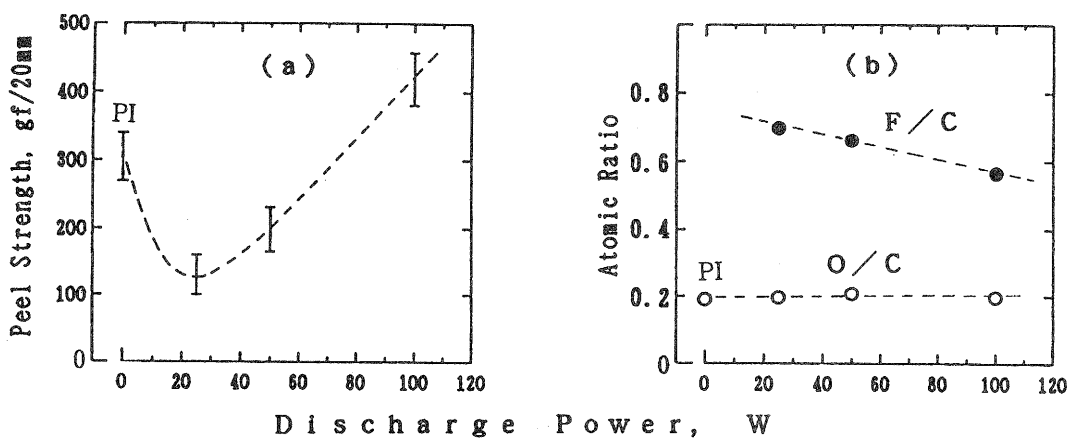


Fig 1. Effect of the discharge power on the peel strength (a) and on the atomic ratio (b). (1 Torr, 100ml/min. 30min)

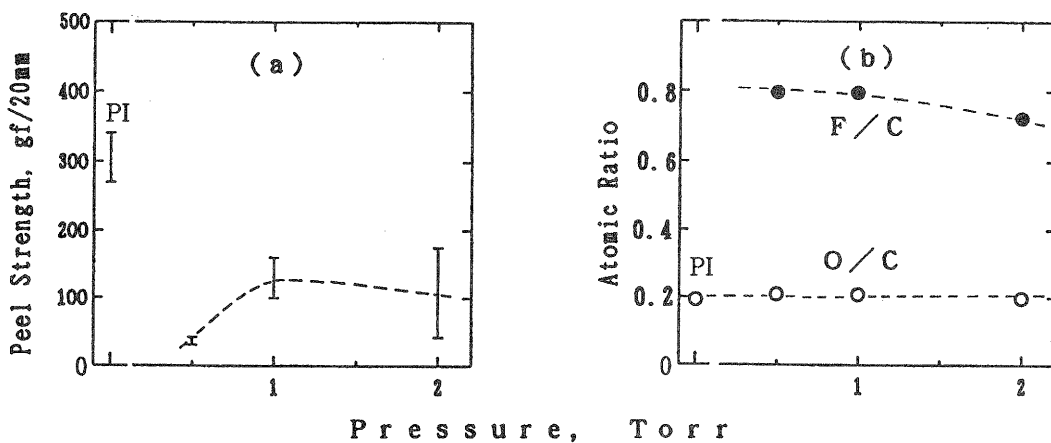


Fig 2. Effect of the pressure on the peel strength (a) and on the atomic ratio (b). (25W, 100ml/min. 30min)

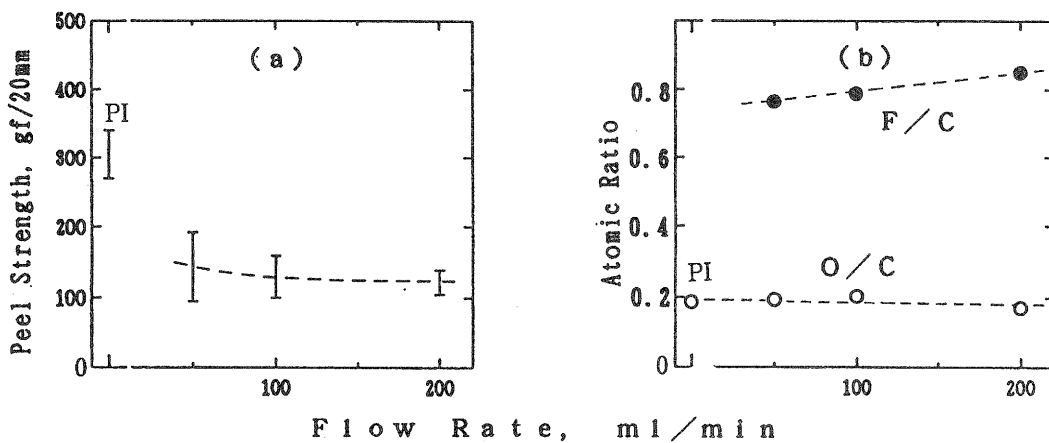


Fig 3. Effect of the flow rate on the peel strength (a) and on the atomic ratio (b). (25W, 1 Torr. 30min)

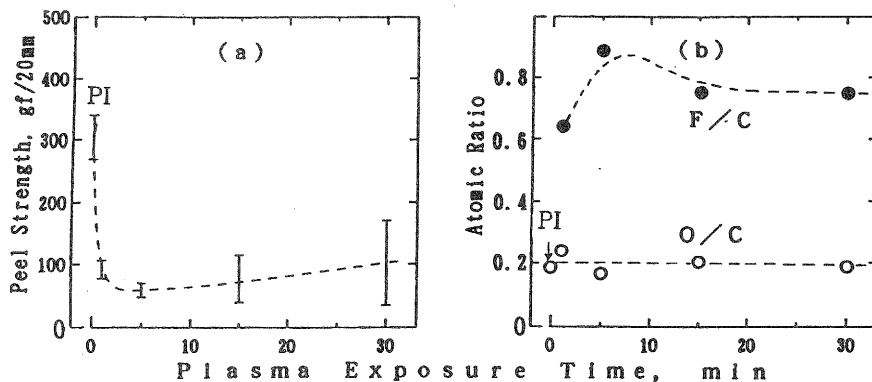


Fig. 4 Effect of the exposure time on the peel strength(a) and on the atomic ratio(b). (25W, 2 Torr, 100ml/min)

プラズマ処理で導入される酸素を含む極性基の量は、もぐり込みや反転によって次第に減少することが知られている<sup>3)</sup>。ポリイミドのような剛直な分子でも、表面ではかなりの程度で極性基の反転が起こり得るとされている<sup>4)</sup>。一方、今回表面に導入されたフッ素は7日程度では大きな減少は起こらなかった。同様なことは Momoseら<sup>5)</sup>も報告しており、フッ素のような表面エネルギーの小さい非極性基からなる表面構造は、空気中では比較的安定であると考えられる。

### 3-3 表面の化学構造

XPSの測定結果のうち、C1sのピークの1例とそのピーク分離の結果をFig. 6に示す。文献のケミカルシフト値<sup>6)</sup>を参考に、各構成

ピークの帰属を行った。ピークa~cはポリイミドの炭素のうち、フッ素置換されていない炭素と考えられる。ピークd~gはフッ素が直接結合した炭素と考えられる。放電電力および処理時間を変えた場合のC1sの構成ピークの比率の変化をFig. 7に示す。フッ素が直接結合した炭素が全体に占める割合は、F/Cと同様の傾向を示した。また、相対的にフッ素量が多く低接着性のもの——例えば、25Wや5分処理の場合——ほど、CF<sub>3</sub>やCF<sub>2</sub>基の割合が多く、それより電力が高くなったりあるいは処理時間が長くなるにつれて、低エネルギー側のフッ素化されていない炭素の比率が高くなった。このように処理条件が強くなるに従って、一たん導入されたフッ素原子の一部が脱離や転移をおこすものと考えられる。

### 3-4 表面状態

Fig. 1に示すように、25W~100WにかけてF/Cは約20%減少したが、はく離強度は120gf/20mmから未処理のポリイミドより高い400gf/20mmに増加した。このようにはく離強度が特異な挙動を示したため、処理表面の形態観察を行った (Photo. 1)。

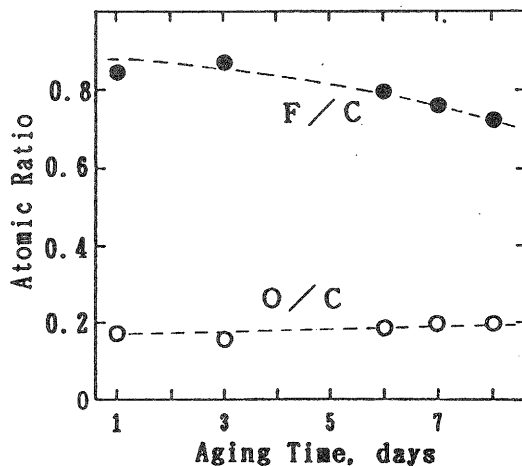


Fig. 5 Changes of atomic ratio after plasma exposure. (25W, 2 Torr, 100ml/min, 30min)

電力が高くなるにつれて明らかに表面のエッチングが進行して粗面化が認められた。特に50Wから100Wにかけて粒状の突起物の生成が次第に明瞭になった。

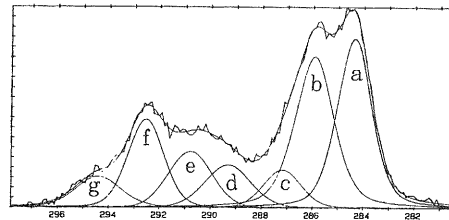
一般にCF<sub>4</sub>ガスはポリイミドなどの有機化合物に対してもエッチングガスとして作用することが報告されている<sup>7)</sup>。今回もCF<sub>4</sub>のエッチング作用は認められたが、それは放電電力が相対的に高い条件下であり、低電力側ではエッチングの影響は小さいと考えられる。

### 3-5 低接着性と表面組成との関係

以上の実験で得られた結果を、はく離強度とF/Cとの関係で示したのがFig. 8である。領域aはすべて25W、30分以内の結果であり、上述のようにエッチングの影響はごくわずかであると考えられる。この場合フッ素量がある程度(F/C > 0.6)導入されれば、低接着化しうることが分かる。一方、種々のポリマー表面を酸素プラズマ

100%  
50  
0

マで処理した場合、表面酸素量が増加するに従い接着性も向上することが知られている<sup>8)</sup>。これらの知見と今回の結果とは対照的であり興味深い。領域a以外は放電電力が50W、100Wで処理時間が30分の条件であり、エッチングの影響のためフッ素量に  
関係なく接着性が大きくなったもの  
と考えられる。



BINDING ENERGY, eV

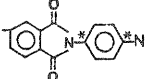
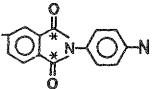
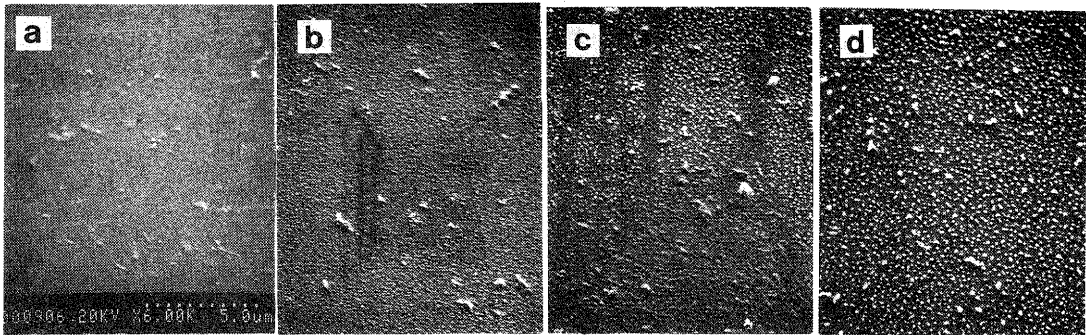
Peak	Binding Energy, eV	Assignment
a	284.6	C
b	286.2 ± 0.1	C* - O, C* - CF, 
c	287.9 ± 0.4	
d	289.6 ± 0.4	C*F - CF <sub>n</sub> (n = 0, 1)
e	290.9 ± 0.3	C*F - CF <sub>n</sub> (n ≥ 2)
f	292.8 ± 0.5	CF <sub>2</sub>
g	294.9 ± 0.5	CF <sub>3</sub>

Fig. 6 C1s spectrum of polyimide treated with CF<sub>4</sub> plasma and curve fitting. (25W, 1 Torr, 100ml/min, 30min)

100% 50 0							d+e+f+g, %	F/C	Plasma Condition
g	f	e	d	c	b	a			
9	22	9	6	5	24	25	46	0.69	25W
6	14	10	9	6	28	27	39	0.66	50W $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ Torr} \\ 100 \text{ ml/min} \\ 30 \text{ min} \end{array} \right\}$
5	15	8	11	7	34	20	38	0.56	
7	14	10	6	4	21	38	37	0.64	1min
8	24	15	5	4	23	21	52	0.88	5min
6	21	12	8	3	22	28	47	0.75	15min $\left\{ \begin{array}{l} 25 \text{ W} \\ 2 \text{ Torr} \\ 100 \text{ ml/min} \end{array} \right\}$
7	18	10	10	3	29	23	45	0.75	

Fig. 7 Changes of the each component of C1s peaks under different discharge powers (upper) and during the exposure to CF<sub>4</sub> plasma (lower).



(a)Untreated (F/C=0) (b)25W (F/C=0.69) (c)50W (F/C=0.66) (d)100W (F/C=0.56)  
 Photo. 1 SEM photographs of the polyimide surface treated with  $CF_4$  plasma under various discharge powers. (1Torr, 100ml/mm, 30min)

#### 4. まとめ

ポリイミドを $CF_4$ ガスを用い放電電力、ガス圧、ガス流量、処理時間を変えて処理を行い、得られた表面の化学組成と処理表面の接着性を調べた。ほとんどの条件下で、かなりの量のフッ素 ( $F/C=0.6\sim 0.9$ ) が導入され、接着性も未処理の  $1/2\sim 1/3$  となり、表面の低接着化が起こった。1分程度の処理でも同様の結果が得られており、表面のフッ素化による改質は急速に起こることが分かった。しかし、放電電力が高い (100W) 場合には接着性は未処理のポリイミドよりも高くなった。この場合でも  $F/C=0.56$  とかなりのフッ素が表面に存在しており、フッ素量よりもエッチングの影響の方が大きいことが分かった。また、フッ素化が進んだものほど  $CF_3$  や  $CF_2$  基が多く生成しており、これら導入されたフッ素は空気中では長期間 (1週間) 安定に存在した。

今回は $CF_4$ ガス処理による低接着化の機構として、表面のフッ素化との関係でみてきた。しかし、別の可能性として、分解物が重合・堆積することにより接着性が低くなるという可能性も考えられる。従って今後は、はく離界面の分析等を行う必要があると考えられる。

#### 謝 辞

本研究について御指導いただいた木村良晴研究参与 (京都工芸繊維大学教授) に感謝します。

#### [参考文献]

- (1)中村吉紀、丹田久嗣：滋賀県工業技術センター研究報告、1991,74 (1991)
- (2)高橋和夫、河西英一、小駒益弘、森脇隆夫、岡崎幸子、日本化学会誌、1985,(10) 1916 (1985)
- (3)多留康矩、高岡京、高分子論文集、43,(6) 361 (1986)

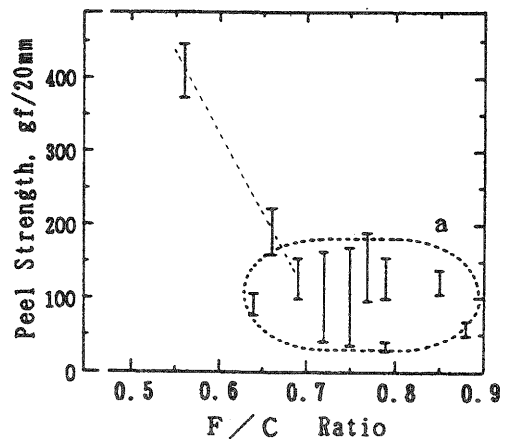


Fig. 8 Relationship between the peel strength and F/C ratio.



- (4)谷川聡、中前勝彦、松本恒隆、高分子論文集、47,(1) 41 (1990).
- (5)Y.MOMOSE,M.NOGUCHI,S.OKAZAKI, Nucl.Instrum.Methods Phys.Res.,**B39**,805 (1989)
- (6)長田義仁ら：”プラズマ重合”、東京化学同人、p120 (1986)
- (7)F.D.EGITTO,F.EMMI,R.S.HORWATH, J.Vac.Sci.Technol.,**B3**, (3) 893 (1985)
- (8)中村吉紀、松本价三良、梅林和美、桑原信夫、接着学会誌、**29**,(5), 197(1993)  
中前勝彦、谷川聡、石川雅彦、日本接着学会年次大会講演要旨集、28th, 113 (1990)

## 高圧下における酵素反応に関する研究（第1報）

—高圧下における *Bacillus subtilis* 液化型  $\alpha$ -アミラーゼによるデンプン加水分解生成物の変化—

技術第二科 松本 正 Tadashi Matsumoto

あらまし：近年バイオテクノロジーの発展により酵素の価格が安価になり、食品工業においても種々の目的で多数利用されている。ところが、高圧下における酵素反応に関する研究はあまりなされてなく、「食品への高圧利用研究」をさらに発展させるため、高圧下における酵素反応について検討を開始した。

本研究においては、まず *Bacillus subtilis* 起源の液化型  $\alpha$ -アミラーゼを対象として、3種のデンプン（可溶性デンプン、バレイショデンプン、トウモロコシデンプン）に高圧下で酵素を反応させ、生成物であるマルトオリゴ糖組成の変化の検討を行った。

その結果、圧力の増加とともにグルコース、マルトースやマルトトリオースが徐々に減少し、マルトペンタオースが大幅に増加するという、極めて興味深い現象を発見した。

本現象の発見は、特異性や機能性の変換等の酵素のデザインや反応機構や活性中心の構造の解明という理学的研究の手段としての高圧利用の可能性を示唆するとともに、高価なマルトペンタオース生産の一手法の開発という工業的利用面の発展に寄与するものであると考えられる。

### 1. はじめに

筆者らは昭和62年度より、高圧下においてタンパク質が変性したり、微生物が死滅する現象を食品の加工や保存へ応用するという一連の研究である「食品への高圧利用」研究に取り組んでおり各種の食品や食品素材に高圧処理を適用しその性質を検討している<sup>(1~13)</sup>。

一方、近年バイオテクノロジーの発展により各種の酵素が安価に入手できるようになり、食品工業でも種々の分野で酵素が使用されており、今後益々増加するものと考えられる。そこで、今回「食品への高圧利用研究」をさらに発展させるため、酵素反応にも高圧を適用するすなわち高圧下での酵素反応について検討を開始した。

ところで、反応速度論としての酵素に対する高圧効果の研究は1981年にMorildの解説<sup>(14)</sup>があるが、その後、高圧下における酵素反応の研究は活発でない。わが国においても、功刀<sup>(15~18)</sup>らが主としてプロテアーゼ反応の高圧効果を研究しているに留まっている。

筆者は、高圧下において基質分子や酵素分子の立体構造が変化する結果、反応速度が変化するのは当然として、生成物にも何らかの変化が起きるのではないかと考え、反応速度論はさておき主に生成物に注目して研究を行うこととした。

そして、本研究においてはまず *Bacillus subtilis* 起源の液化型  $\alpha$ -アミラーゼを対象とした。 $\alpha$ -アミラーゼは栄養源としてのデンプンをオリゴ糖に加水分解する代表的な酵素であり、既に、微生

物、植物、動物起源のものが単離生成されており、その性質、一次構造の決定やX線結晶構造解析による立体構造の解明および遺伝子のクローニングなどの基礎的研究が進んでいる一方で、古くから糖の生産など工業的な利用も盛んである。しかしながら、高圧下での挙動や生成物の変化については全く研究されていない、今後工業的に高圧下で本酵素を使用するには、高圧下での性質を詳しく検討する必要がある。

ここでは、*Bacillus subtilis* 起源の  $\alpha$ -アミラーゼについて、主に高圧下での生成物の変化の有無について検討したので報告する。

## 2. 実験材料

### 1) 酵 素

*Bacillus subtilis* 液化型  $\alpha$ -アミラーゼ (和光純薬製化学用)

### 2) 基 質

- ①可溶性デンプン (ナカライテスク製)
- ②バレイショデンプン (キシダ化学製)
- ③トウモロコシデンプン (キシダ化学製)

### 3) その他の試薬

いずれも特級品を使用した。

## 3. 実験方法

### 3-1 圧力下での酵素反応

#### ①基質溶液

各種デンプンを 0.002 M の塩化カルシウムを含有する pH 6.0 の 0.05 M 酢酸ナトリウム緩衝溶液に 3% の濃度で加熱溶解したものをを用いた。

#### ②酵素溶液

*Bacillus subtilis* 液化型  $\alpha$ -アミラーゼを基質の場合と同じ緩衝溶液に 2% の濃度に懸濁させたものをを用いた。

#### ③反応方法

基質溶液 3 ml と酵素溶液 1 ml を氷冷下で混合し、すばやくポリエチレン製の容器に封入し、食品用高圧試験装置 (三菱重工業(株)製 MFP-7000 型) により 0.1~6.0 MPa で 30~120 分間加圧した。また、圧力容器の回りに温水を循環させることにより、反応温度は 40℃ に制御した。所定の時間反応させた後、すばやく高圧容器から取り出し、20% -スルホサリチル酸 0.1 ml を加え酵素反応を停止した。

### 3-2 マルトオリゴ糖の分析

酵素反応により生成したマルトオリゴ糖は、反応混合液を 2 倍に希釈した後 0.45  $\mu$ m のフィルターでろ過し、高速液体クロマトグラフ (島津製作所製 LC-9A 型) を用い、ゲルろ過法により分析した。検出は示差屈折計を用いて行った。

## 4. 実験結果

### 4-1 反応圧力による生成物の変化

可溶性デンプンを基質として、40℃、pH 6.0において圧力を0.1~600MPaまで変化させてBacillus subtilis 液化型 $\alpha$ -アミラーゼを30分間反応させたときの、生成物の組成に及ぼす圧力の影響を図-1に示す。圧力の増加とともにグルコース(DP=1)、マルトース(DP=2)が徐々に減少していき、マルトトリオース(DP=3)は200MPaまでは少し増加し以後徐々に減少していった。マルトテトラオース(DP=4)は圧力の増加とともに少し増加していき、マルトペンタオース(DP=5)については150MPaまではほとんど変化しないが、200MPaより高い圧力で大きく増加した。そして、マルトペンタオースは、600MPaにおいて0.1MPaと比べ10倍以上増加しており、大変興味ある現象である。マルトヘキサオース以上の鎖長のオリゴ糖は500MPa以上で少し検出された程度であった。

次にこの現象が可溶性デンプンという化工を受けたデンプンに特有のものか、あるいは他の未化工デンプンでもこのような現象が観察されるのか、またデンプンの種類による違いがあるのかを確かめるため、デンプンとしての性質の違いが最も大きいと言われるバレイショデンプンとトウモロコシデンプンを基質として同様の実験を行った。バレイショデンプンを基質にしたときの変化を図-2に、トウモロコシデンプンを基質にしたときの变化を図-3に示す。

低い圧力下ではマルトースやマルトトリオースの挙動に若干違いはあるが、200MPa以上の圧力下では、いずれも可溶性デンプンのときと同じく、圧力の増加とともにグルコース、マル

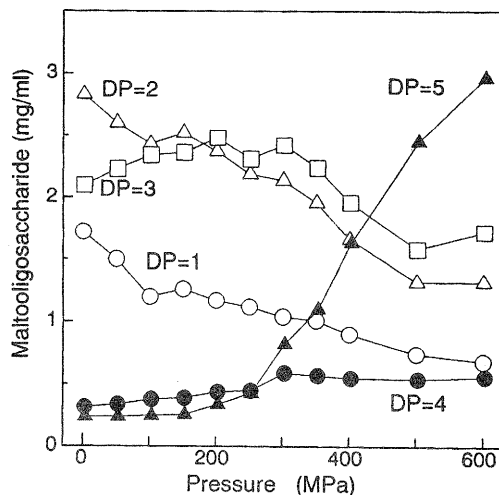


Fig 1, Effect of pressure on the composition of maltoorigosaccharide in enzymatic hydrolysis of soluble starch.

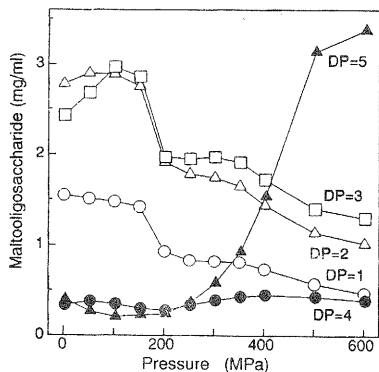


Fig 2, Effect of pressure on the composition of maltoorigosaccharide in enzymatic hydrolysis of Potato starch.

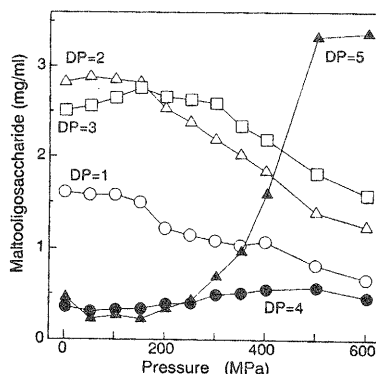


Fig 3, Effect of pressure on the composition of maltoorigosaccharide in enzymatic hydrolysis of corn starch.

トース、マルトトリオースが徐々に減少していき、マルトテトラオースが少し増加し、マルトペンタオースが大きく増加した。反応圧力の違いによる生成物のこの変化は、デンプンの種類によらないことが示唆された。

また、定量結果から計算したマルトオリゴ糖の平均重合度と圧力の関係を図-4に示す。いずれのデンプンもほとんど同じ挙動を示し、圧力が増加すると生成物であるマルトオリゴ糖の平均鎖長(重合度)が増加していることがわかる。

#### 4-2 反応時間の影響

本実験は、生成物に着目するものであるので、基質に対して大過剰の酵素を添加して反応を実施した。そのため、反応時間30分間で反応はほぼ終結していると考えられるが、例えば高压下では酵素の活性が著しく低下した結果反応の途中を観察したものかも知れず、反応時間を長くすれば常圧下と同じ生成物組成になるかも知れない。そこで、前記3種のデンプンについて0.1MPaおよび400MPaにおいて反応時間を30分から120分まで変化させて、生成物組成の違いを検討した。

その結果、常圧(0.1MPa)において(図-5~7)、3種のデンプンとも反応時間を長くしてもはや生成物の組成に大きな変化は観察されなかった。一方、高压下(400MPa)において(図-8~10)も同じく反応時間を長くしても生成物組成に大きな変化は観察されず、それぞれの圧力において30分間で反応はほぼ終了していたものと考えられる。そして、本反応は酵素大過剰下において十分反応させた場合、圧力によって生成物の組成が決まり、反応時間は

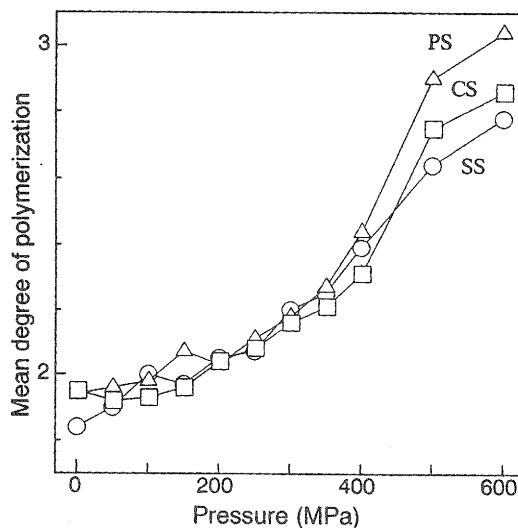


Fig 4, Effect of pressure on the mean degree of polymerization.

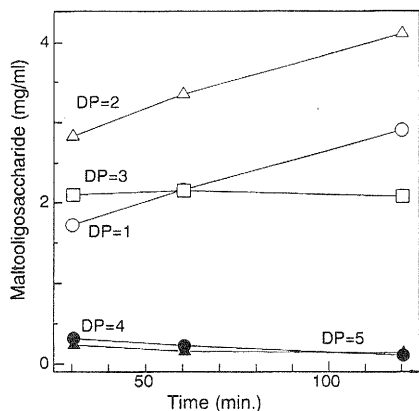


Fig 5, Effect of reaction time on the composition of maltoigosaccharide in enzymatic hydrolysis of soluble starch at 0.1MPa.

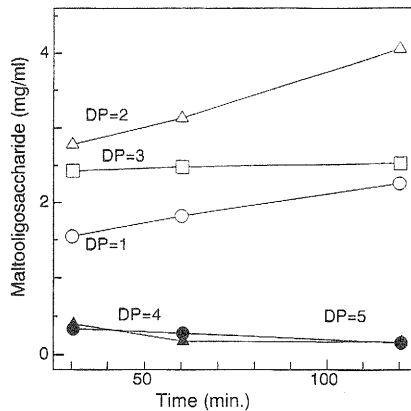


Fig 6, Effect of reaction time on the composition of maltoigosaccharide in enzymatic hydrolysis of potato starch at 0.1MPa.

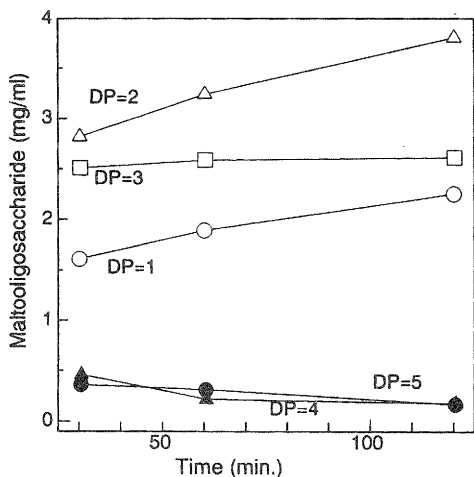


Fig 7. Effect of reaction time on the composition of maltoorigosaccharide in enzymatic hydrolysis of corn starch at 0.1MPa.

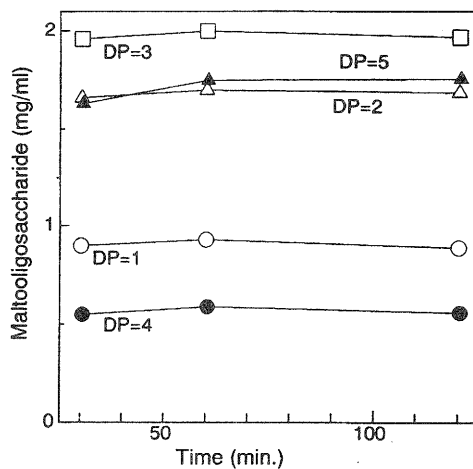


Fig 8. Effect of reaction time on the composition of maltoorigosaccharide in enzymatic hydrolysis of soluble starch at 400MPa.

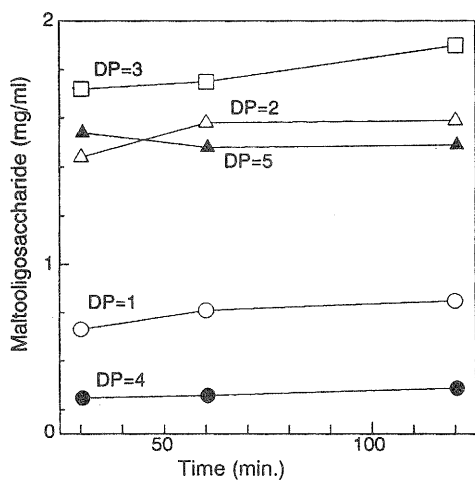


Fig 9. Effect of reaction time on the composition of maltoorigosaccharide in enzymatic hydrolysis of potato starch at 400MPa.

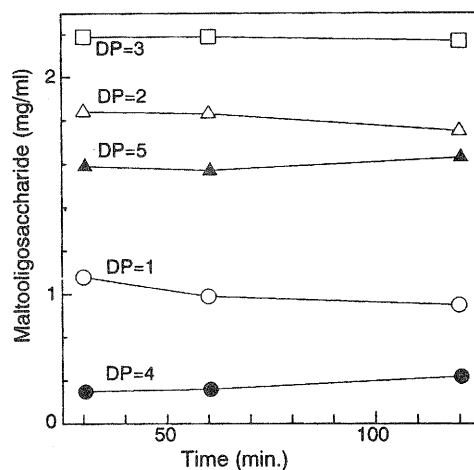


Fig10. Effect of reaction time on the composition of maltoorigosaccharide in enzymatic hydrolysis of corn starch at 400MPa.

影響しないことがわかる。

## 5. 考察

デンプンに高圧下で *Bacillus subtilis* 液化型  $\alpha$ -アミラーゼを反応させると、常圧下と比べ生成物であるマルトオリゴ糖の組成が変化し、圧力が増加すれば著しくマルトペンタオースが増加するという極めて興味ある現象を発見した。このような現象の生じる理由には次のようなことが考えられる。

- 1) 高圧下で酵素の活性中心の構造が変化している。
- 2) 高圧下で基質のコンフォメーションが変化し、酵素のアタックできる箇所が変化する。
- 3) 転移反応が起こっている。

そして、今後はこの理由の解明のために高圧下での酵素サブサイトへの基質の結合様式の変化や転移反応の有無の確認等の研究を進めていく必要がある。

また、今回反応速度論はほとんど無視して進めてきたが、やはり酵素反応の解析には反応速度論から出発する必要があり、本酵素の高圧下での  $k_{cat}$  や  $K_m$  値の測定また活性化体積の測定等が今後の研究を進める上で重要であると考えられる。

一方、利用の面からみれば、本現象より酵素の特異性や機能の変換に圧力が使える可能性が考えられ、酵素デザインへの高圧利用なるものの誕生の可能性を示唆するものである。

また、本現象は工業的にも大変興味深いことであり、今後は高価なマルトペンタオースの製造や長鎖オリゴ糖を多く含有するシロップの製造への一手法となる可能性を持つものと考えられる。

## 6. おわりに

今回デンプンに高圧下で *Bacillus subtilis* 液化型  $\alpha$ -アミラーゼを反応させると、常圧下と比べ生成物であるマルトオリゴ糖の組成が変化し、圧力が増加すれば著しくマルトペンタオースが増加するという極めて興味ある現象を発見したが、まだ手掛けたところであり、今後究明しなければならない事項が多数ある。今後はさらに本研究を発展させ、高圧下での酵素反応の工業的利用を目指すとともに、他の酵素についても検討していきたいと考えている。

**謝 辞** 本研究の遂行にあたり、御指導御助言をいただいた林力丸研究参与（京都大学農学部農芸化学教室教授）に対し深く感謝いたします。

## 【参考文献】

- (1) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告，2，79-89（1988）。
- (2) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告，3，77-91（1989）。
- (3) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告，4，107-116（1990）。
- (4) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告，5，78-87（1991）。
- (5) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告，6，110-121（1992）。
- (6) 松本正，矢田稔，今西康博：「昭和63年度技術開発研究費補助事業成果普及講習会テキスト」，第VI章，中小企業庁（1989）。
- (7) 松本正，林力丸：農化，64，1455-1459（1990）。
- (8) 松本正，林力丸：「加圧食品-研究と開発-」（林力丸編），pp. 237-247，さんえい出版（1990）。
- (9) 松本正：食品と開発，25（12），21-23（1990）。
- (10) 松本正：農化，65，388（1991）。
- (11) 松本正：「加圧食品と高圧生物科学」（林力丸編），pp. 368-377，さんえい出版（1991）。

- (12) 松本正：材料，41，294-298(1992).
- (13) 松本正：「生物と食品の高圧科学」(林力丸編)，pp. 346-349，さんえい出版(1993).
- (14) E. Morild, Adv. Protein chem.,34,93(1981).
- (15) 林力丸編：「食品への高圧利用」，さんえい出版(1989).
- (16) 林力丸編：「加圧食品-研究と開発-」，さんえい出版(1990).
- (17) 林力丸編：「加圧食品と高圧生物学」，さんえい出版(1991).
- (18) 林力丸編：「食品と生物の高圧科学」，さんえい出版(1993).



# 技術開発報告

# 画像処理の利用による加工組立作業の 自動化に関する研究（第三報）

—電子部品組立行程における不良品の自動検出（1）—

技術第一科 櫻井 淳 Atsushi Sakurai  
栄立電機(株) 渡部 利樹 Toshiki Watanabe

あらまし：電子部品等の組立においては、作業の多くが自動化され、様々な種類の部品が大量に生産されている。品質管理は、全数検査により厳密に行われるが、目視による作業が多く、部品の小型化が進むにつれて検査が困難な状況になって来ている。

本研究では、センサー部品のマークキングの良否判定検査を自動化する方法について検討した。多値画像のパターンマッチング処理により、マークキングの不良を検出すると同時に、飛び、にじみ、かすれ、欠けの4種類の良否状況の自動判定を行うことが出来たので、その概要を報告する。

## 1. まえがき

今日の家電機器あるいは産業機器の小型高性能化に伴って、機器内部に使用されている電子部品は非常に小さくなってきている。しかし、これら電子部品の製造工程での品質検査においては、現在まだ人の目に頼る検査が多く見られるが、精度面および速度面で目視での検査は限界になりつつある。そのため、これらの作業を自動化することは、品質の改善、生産性の向上、作業環境の改善などをはかる上から非常に有効であると考えられる。

本研究では、センサー部品のマークキングの良否判定の検査を取り上げ、その検査の自動化の方法について検討を行った。現在、マークキング作業そのものは自動機により行われているが、その検査は目視により良否判別が行われている。そこで、パソコンおよびCCDカメラなどの汎用機器を用い、高速かつ正確にマークキングの良否判定と飛び、にじみ、かすれ、欠けなどの不良状況の判定を行う方法について検討を行った。このように、良否判定に加えその不良状況を判定することは、不良発生時に作業者がその対応処理を適切かつ迅速に行うのに役立つと思われる。

## 2. 文字品位検査システムのハードウェアの構成

本研究に使用した文字品位検査システムのハードウェアと仕様をそれぞれ図1と表1に示す。画像の入力タイミングの取り込みは、図1に示すようにカメラ視野位置への部品の通過を、レーザ光電スイッチにより検知し、その信号をP I Oボードよりパソコンに送り行っている。特に、微小な部品の通過タイミングを正確に取り込むため、光電スイッチは、検知の感度の高いレーザ式のものを使用し、受光側センサー部に $\phi 0.1$  mmのスリットを取り付けた。

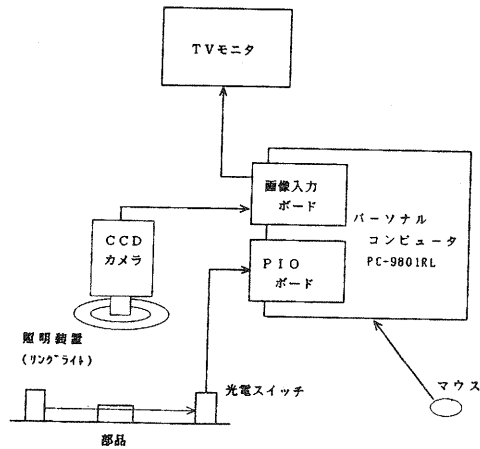


図1 マーキング検査システムのハードウェアの構成

表1 マーキング検査システムの仕様

(1) パーソナルコンピュータ (NEC(製)PC-9801RL) CPU:80386 クロック:20MHz 数値演算プロセッサ:80387	(5) TVモニタ (シャープ(製) C-3419)
(2) 画像入力ボード (マイクロテック(製)MT98-CVFM01) AD/DA変換器:8ビット 画像メモリ:512Vx512Hx8ビットx3フレーム	(6) 照明装置 (電通産業(株) HF-9210-DLY) 点灯周波数: 25~33kHz リング径: 150mm
(3) PIOボード (コンテック(製)PIO-24/24T(98))	(7) 光電スイッチ (オムロン(製) E3L-2E4) スリット径: (φ0.1mm)
(4) CCDカメラ (ソニー(製) XC-77) 画素数:768(H)x493(V) レンズ: 50mm Cマウントレンズ	

### 3. パターンマッチングのための画像の位置補正処理

以下の各種画像処理演算および判定は、すべてC言語を用いて作成したパソコンのプログラムにより行っている。

マーキングの不良状況の判定では、教示画像(良品画像)と検査画像とのパターンマッチングを行うため、両パターンの位置合わせを正確に行う必要がある。今回対象とした検査作業では、部品が回転ステーションによってほぼ正しく検査位置に運ばれるため、位置補正処理は、検査時間を短縮するために、傾きの補正は行わず水平および垂直方向のみの補正を行っている。

#### 3-1 文字エリア切り出しレベルの設定

位置合わせは、教示画像と検査画像の各文字エリア抽出し、そのエリア位置を合わせることにより行っている。背景を含む画像の中から文字エリアを抽出するには、画像の濃淡レベルのヒストグラム曲線が谷を示す位置に切り出しレベルを設定することが最も望ましいが、これを厳密に実行すると時間がかかるため、本研究では以下のような簡易な方法でスレッショールドレベル(切り出しレベル)を設定している。

現場の検査環境では、被写体の艶や照明環境の変化などにより、各画像入力時の濃淡レベルが多少変動するため、文字エリア抽出の基準に用いる切り出しレベルは、常に、入力した画像の濃

淡レベルの状態に合った最適な値に設定する必要がある。図2に、3種類の照明環境下で、マーキング部品画像を入力した時の濃淡レベルのヒストグラム例を示す。また、図中のB\_\_a v rは背景部（黒色）の平均濃度レベルを示し、W\_\_m a xは文字部（白色）の最大濃度レベルを示し、LはB\_\_a v rとW\_\_m a xとの幅の1/3の位置を示す。

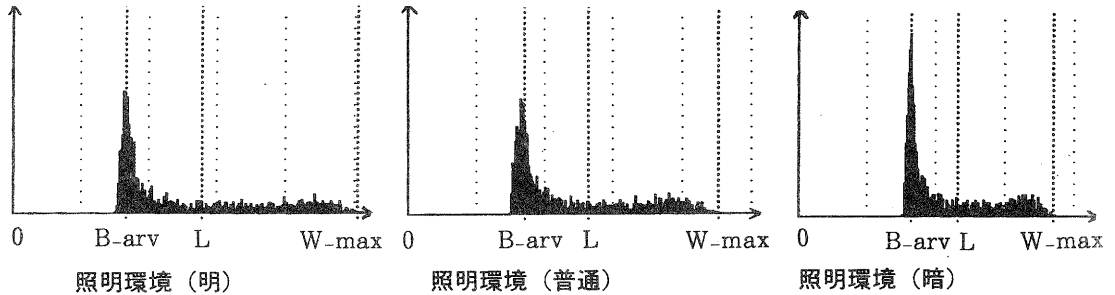


図2 濃淡レベルのヒストグラムの特徴例

図2の例より、背景部と文字部との境界は、照明環境の変化にかかわらず、背景部の平均濃淡レベルと文字部の最大濃淡レベルとの幅のほぼ1/3の位置にあると推定できる。そこで、本研究では、図3に示す画像走査により背景部の濃淡レベルと文字部の濃淡レベルを求め、切り出しレベルを設定している。まず、文字を含まないエリアにおいて水平および垂直方向の走査1を行い、<sup>1)</sup>式により背景部の平均濃淡レベル値を求める。次に、文字を含むエリアにおいて斜め方向の走査2を行い、<sup>2)</sup>式により文字部の濃淡レベルの最大値を求める。そして、<sup>3)</sup>式により文字部と背景部の濃淡レベルの境界部を推定し切り出しレベルを設定する。ここで、切り出しレベルを算出するときのパラメータとして、背景部の平均濃淡レベルと文字部の最大濃淡レベルを用いた理由は、算出が容易であり、かつ部品の汚れ等の影響による値の変動が比較的少ないパラメータであるためである。

$$B_{avr} = \frac{\sum_{x=1}^{lx} da[x,1] + \sum_{y=1}^{ly} da[1,y]}{lx+ly} \quad (1)$$

$$W_{max} = \max_{x=1, y=1}^{lx, ly} (da[x,y]) + \max_{x=lx, y=1}^{1, ly} (da[x,y]) \quad (2)$$

$$L = B_{avr} + (W_{max} - B_{avr}) / 3 \quad (3)$$

da[x,y] : 位置(x,y)における画素の濃淡値

lx, ly : 水平および垂直方向の走査の長さ

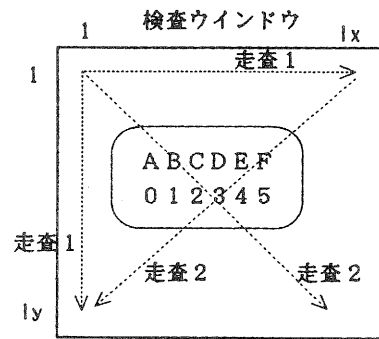


図3 画像走査エリア  
検査ウィンドウ

### 3-2 文字エリアの抽出

文字エリアの抽出は、文字を含む最小の長方形を抽出することにより行う。図4に示すように、検査ウィンドウの上下左右の4方向の各端よりライン走査を行い、(3)式により求めた切り出しレベル以上の値を持つ画素が、1ライン上にある一定数以上存在する最初の

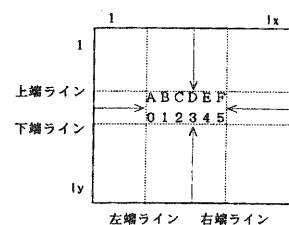


図4 文字エリアの抽出処理

ラインを見つけ、その4本のラインで囲まれたエリアを文字エリアとして抽出する。この時の教示画像と検査画像とにおける文字エリアの左上座標値の差をパターンマッチング時の位置補正量とする。

## 4. 差画像の抽出

差画像は、3-2節で求めた位置補正量を用いて検査画像の位置補正をした後、検査画像から教示画像を減算し求める。この時、微小な位置合わせの誤差や両画像の濃淡レベルの差を補正するため、同時に以下の処理を行っている。

### 4-1 微小位置合わせ誤差の補正

3-2節の方法による文字エリア抽出では、文字切り出しレベルの設定誤差や濃淡データの量子化誤差により、文字エリアの抽出位置が数画素程度ずれることがある。そこで、そのずれをXY方向に±1画素の範囲で補正する

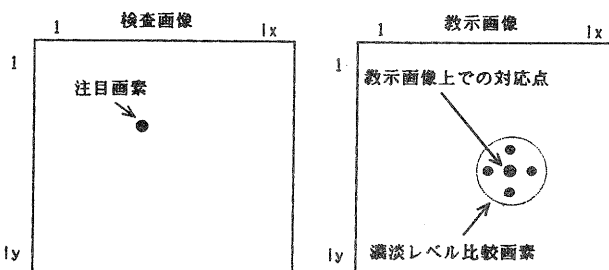


図5 検査画像と教示画像の濃淡レベル比較画素

ため、に示すようにパターンマッチング時に、検査画像の注目画素に対応する教示画像上での比較画素を、その対応点および上下左右の5画素分調べ、その中で最も値の一致する画素との減算値を用いて差画像を求めている。

### 4-2 画像濃淡レベルの補正

3章で述べたように、教示画像の入力時と検査画像の入力時とでは照明環境等に多少の変化があるため、教示画像と検査画像とを比較すると画像全体の濃淡レベルに多少の差が生じる。そこで、差画像の抽出においても、教示画像と検査画像の入力時に(1)式により求めた背景部の平均濃淡レベルの値を用いて、(4)式により教示画像と検査画像の差画像の濃淡レベル補正を行っている。

$$sda[i,j] = sda[i,j] - (B_{avr.in} - B_{avr.ref}) \quad (4)$$

$sda[x,y]$  : 位置  $(x,y)$  における差画像データ値

$B_{avr.in}$  : 検査画像の背景部の平均濃度レベル

$B_{avr.ref}$  : 教示画像の背景部の平均濃度レベル

## 5. マーキングの良否の判定

マーキングの良否は、4章で求めた差画像の文字エリアのヒストグラムの特徴により判定している。

### 5-1 不良状況を判定するためのヒストグラムのエリア分け

マーキングの不良状況は、差画像ヒストグラムの広がり形状の特徴よりほぼ分類が出来る。そこで、に示すように、(5)式~(8)式により4つの基準値を設定し、ヒストグラムを5つのエリアに分け、各エリア1~5内の画素数  $n_1 \sim n_5$  の総画素数  $S$  に対する割合を調べ不良状況の特徴を分類する。エリアを決める基準値の設定では、3-1節の図2に示す例のように照明環境等の変化により画像の濃淡レベルのヒストグラムの分散が変化するため、その変化に対応出来るように、(1)式と(2)式により求めた教示画像入力時の文字部の最大濃度レベルと背景部の平均濃度レベルの

差の値を用いている。また、係数の値については、エリア分けにより各文字状況の差画像ヒストグラムの形状の特徴が分類しやすくなるように、5-2節の図7に示すような各不良状況の差画像のヒストグラム結果より決めている。

$$k1 = (W.max.ref - B.avr.ref) / 3 \quad (5)$$

$$k2 = k1 / 2 \quad (6)$$

$$k3 = -k2 \quad (7)$$

$$k4 = -k1 \quad (8)$$

W.max.ref :

教示画像の文字部の最大濃度レベル

B.avr.ref : 教示画像の背景部の

平均濃度レベル

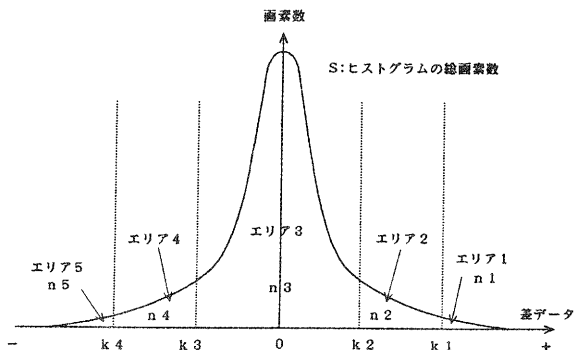


図6 ヒストグラムのエリア分け

### 5-2 各マーキング不良状況の濃淡ヒストグラムの例

図7に、目視検査により判定した良品と飛び、にじみ、欠け、かすれの4種類の不良品のサンプルの画像例および文字エリアの差画像のヒストグラムの例を示す。各グラフの横軸の中央部が差の値が0の位置を示し、その右方向が差の値が+方向に増加する方向、その左方向が差の値が-方向に増加する方向を示す。また、各グラフの中の4本の基準線は、5-1節で設定した各不良状況の特徴を分類するためのエリア分けを示す。

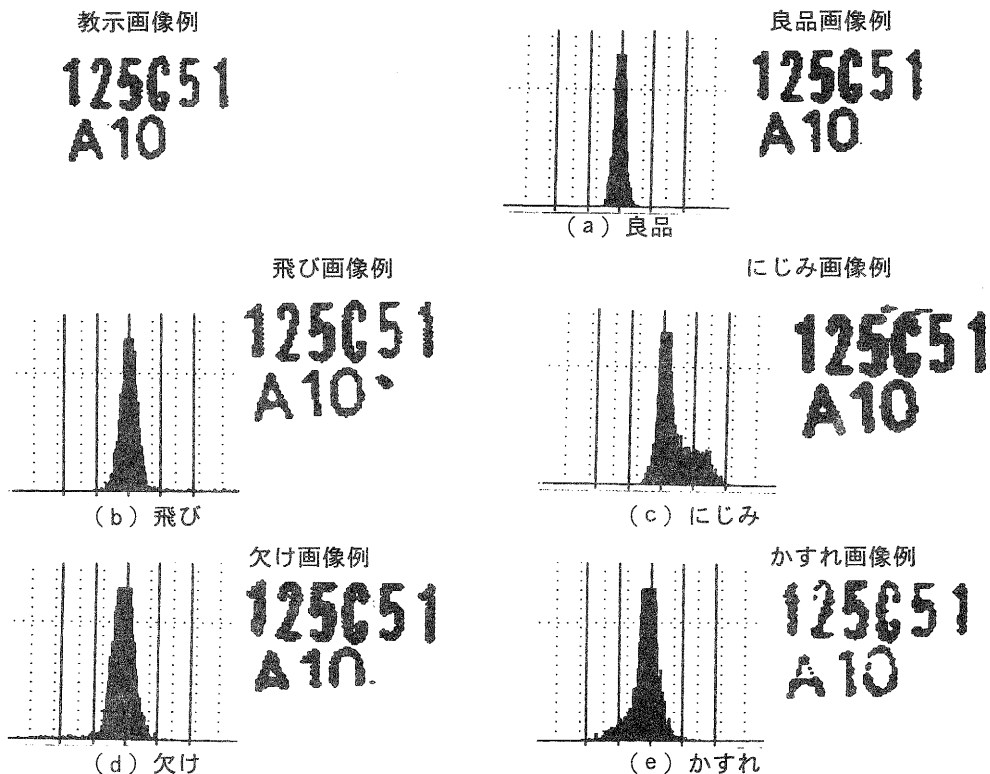


図7 良品および不良品の画像例とヒストグラム特徴例

### 5-3 マーキングの不良状況の特徴とその判定方法

差画像ヒストグラムの形状より各マーキングの不良状況の特徴を調べると、良品の特徴は、中心部のエリア3の部分に画素の分布が集中する傾向を示す。また、飛びの特徴は、中心部のエリア3の部分に分布が集中するが、同時に差データレベルの高いエリア1の部分に多少の分布が現れる傾向を示す。また、にじみの特徴は、中心部のエリア3の分布がエリア2の部分にまで広がる傾向がある。欠け、にじみの特徴についても、差データレベルの一方に、飛び、にじみの場合と同様な傾向を示す。

そこで、これらの特徴よりマーキングの良否を判定するため、(9)式~(12)式に示す不良状況の判定基準を設けた。そして、その基準に当てはまる場合をその不良状況であると判定し、全てに当てはまらなかった場合を良品である判定した。Pは不良と判断する基準、すなわち検査の厳密さを決める値であり、初期値としては0.3に設定している。また、式と式のPに乘じた定数値は、繰り返し実験を行い判定結果が目視判定に近くなるように設定した値である。

$$\langle \text{不良状況の判定基準} \rangle \quad \text{飛び} : n1/S \rangle p/100 \quad (9)$$

$$\text{にじみ} : n2/S \rangle 8p/100 \quad (10)$$

$$\text{かすれ} : n4/S \rangle 8p/100 \quad (11)$$

$$\text{欠け} : n5/S \rangle p/100 \quad (12)$$

## 6. 検査アルゴリズムおよび判定結果

### 6-1 検査アルゴリズム

マーキング検査のアルゴリズムを図8に示す。操作は、現場の検査員に操作しやすいように、パソコンの画面のポップアップウィンドウ方式のメニューに従い、マウスにより選択し実行する方式になっている。また、判定結果は、色と警告音を加えて画面表示するようにしている。

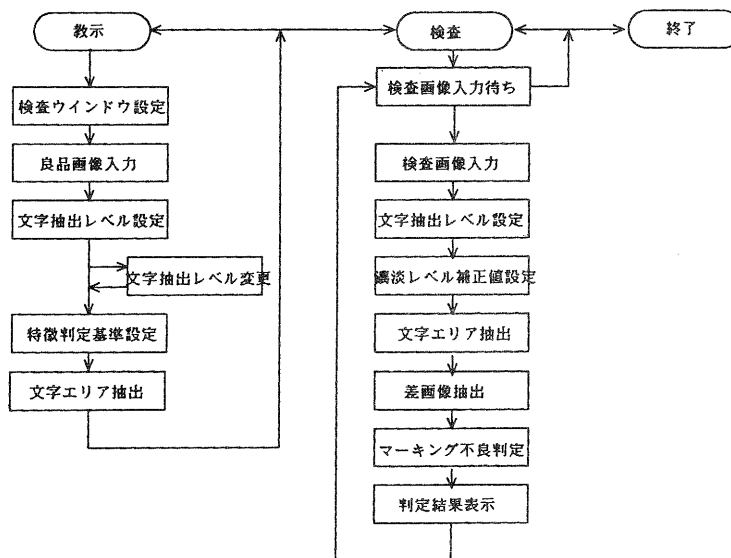


図8 マーキング検査のアルゴリズム

## 6-2 実験および判定結果

検査装置の判定精度を評価するため、製品の中から抽出した良品と数個の不良サンプルを用い、実験室においてマーキングの良否判定の実験を行った。このとき、画像の取り込みは、部品上の4x7mm程度のマーキングエリアを、100x100画素の検査ウインドウにより約10ドット/m程度程度の分解能で入力し行っている。本検査システムの判定結果と目視検査の判定結果との比較を表2に示す。上段が自動検査による判定結果を示し、下段が目視検査による判定結果を示す。また、○印は、常にそのように判定することを示し、△印は、時によりそう判定することを示す。

部 品		不良状況判断結果					部 品		不良状況判断結果				
		良 品	飛 び	に じ み	か す れ	欠 け			良 品	飛 び	に じ み	か す れ	欠 け
A	自動検査	○					D	自動検査				○	○
	目視検査	○						目視検査					○
B	自動検査		○				E	自動検査					○
	目視検査		○					目視検査					○
C	自動検査			○			F	自動検査		△	○	○	○
	目視検査			○				目視検査			○	○	

表2 不良状況の判定結果

## 6-3 考察

部品Dは、かすれの判定結果であるが、特にかすれの状況がひどいため、常にかすれの判定と同時に欠けの判定を表示した。部品Fは、かすれと同時ににじみを伴う場合であるが、かすれ状況がひどく同様に欠けの判定を表示した。また、時により文字エリアの抽出位置がずれ位置補正が正しく出来ない場合が起こり、飛びの判定を同時に表示することがあった。このように、本検査システムでは、とくに不良状態が悪いマーキングにおいて、差画像の抽出時に位置合わせが正しく出来ず他の不良状況の判定を表示する場合があったが、それらは、極めて特殊な場合であるため、不良の中でも判定不可能な状況として取り扱った。

## 7. むすび

本文においては、センサー部品のマーキングの不良検査を自動化するため、パソコンおよびCCDカメラを用いて、マーキングの良否判別および不良状況の判定を行う方法について検討を行った。パターンマッチングにより求めた差画像のヒストグラムの特徴を用いるという簡易画像処理手法により、目視検査による不良状況の判定の結果にほぼ一致したの判定を瞬時に行うことが出来た。なお、本検査システムでは、目視検査の判定に比べ、他の不良状況の判定を同時に表示する場合もあるが、不良品の選別や不良状況の原因や傾向を調べるという意味では有効であると考えられる。今後は、実際の検査ラインで本検査システムの評価実験を行い、判定アルゴリズムの改良を行う予定である。また、本検査システムの判定結果を用いてマーキング装置側の制御を行えるようにする方法や、検査装置を複数台導入する場合におけるシステムの小型化等についても、更に検討を進める予定である。

**謝辞** 本研究について御指導いただいた小川均研究参与（立命館大学理工学部教授）と川村貞夫研究参与（立命館大学理工学部助教授）に感謝します。



# 炭素繊維強化熱可塑性ポリイミド樹脂複合材料の開発

技術第二科 那須 喜一 Yoshikazu Nasu  
山中 仁敏 Masatoshi Yamanaka  
中村 吉紀 Yoshiki Nakamura

あらまし：炭素繊維強化プラスチック（CFRP）材料には、エポキシ樹脂が多く用いられている。そのエポキシ樹脂は耐熱性の向上したものが開発されているが破壊靱性などに問題が残っている。本研究では、この問題を解決するためマトリックスとして耐熱性と靱性の両者を合わせ持つポリイミド系熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維強化複合材料の成形プロセスの検討を行った。また、その評価を試みた。超音波を用いた非破壊試験により内部状態を検査し成形プロセスの評価を試みた。さらに、落球衝撃試験によって得られた複合材料の靱性評価も行った。その結果、通常のエポキシ樹脂に比べ優れた靱性を示すことが確認された。

## 1. まえがき

産業機械部品や航空・宇宙分野を中心に高性能複合材料が求められており、マトリックス樹脂、強化繊維、および両者の接着性の向上など、多方面から検討が進められている。

我々は、エポキシ樹脂に比べて破壊靱性、成形サイクルが短いなどの特徴を有する熱可塑性樹脂を用いた複合材料（Fiber Reinforced Thermoplastics：FRTP）<sup>1) 2) 3)</sup>に着目し、強化繊維としては連続の炭素繊維を、マトリックス樹脂として優れた耐熱性を持つエンジニアリングプラスチック（エンプラ）であるポリイミド系樹脂を用いてCFRTPを作製し、その性能について検討を進めている。平成元年度は、ガラスクロスプリプレグと炭素繊維クロスプリプレグの2種類のプリプレグについて耐熱性の評価を行い、複合材料への利用の可能性を探った<sup>4)</sup>。また、平成2年度にはマトリックスとして用いる樹脂の特性改良のためビスマレイミドとポリイミド系樹脂とのアロイ化について検討した<sup>5)</sup>。平成3年度は一方向CFRTPについて高温曲げ試験やダブルカンチビーム式層間破壊靱性などについて検討を重ねた。その結果、ポリイミド系樹脂はエポキシ樹脂等に比べ優れた耐熱性と靱性を示すことが明かとなった<sup>6)</sup>。しかし、これまでのCFRTP試料が小型のものであるため評価についても、その大きさが限定されたもののみにとどまっていた。そこで今年度は実用化のために必要と考えられるオートクレーブによるCFRTPの成形技術について検討を行い、これまでに比べ大型のCFRTPを作製した。また、このCFRTPの評価には実際の製品によく用いられる落球衝撃試験を用いて評価した。

## 2. プリプレグの作製

### 2-1 試料

マトリックスには熱可塑性ポリイミド系樹脂としてポリスルホンイミドS-63（新日本理化学（株）、Mn=14,400、Mw=28,700）、およびポリエーテルイミド（日本ジーイープラスチック（株）、ウルテム-1000）の2つを用いた（図1）。また、比較のためエポキシ樹脂はエピコート8

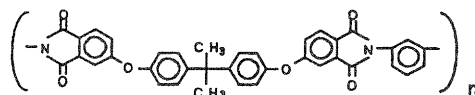
28 (油化シェルエポキシ (株)) を、またその硬化剤には3%の三フッ化ほう素モノエチルアミン錯塩を用いた。炭素繊維は、トレカT-300、12K (東レ) を、炭素繊維クロスにはトレカT300-6K平織りを用いた。

### 2-2 炭素繊維クロスプリプレグ

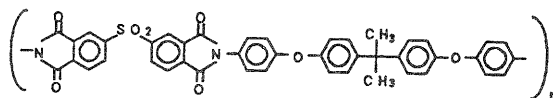
炭素繊維クロスを200×150×2mmのガラス板にクリップで張り付けて、メチルエチルケトン中に2回浸漬する事により出荷時に塗布されたサイジング剤を除去した。これにS-63あるいはウルテムのジクロロメタン溶液を3回(1回目5%溶液、2、3回目10%溶液)塗布した後、常温で一昼夜乾燥し、さらに120℃で12時間乾燥した。これを所定の大きさに切断し、プリプレグとした。

### 2-3 一方向炭素繊維プリプレグ

一般に実験室用の小型の複合材料作製の装置は市販されておらず、これまでは手作業でプリプレグを作製してきた。しかし、有機溶媒を大量に使用することや今後工業化する際の工程上の検討の必要性などから、比較的自動化しやすいと思われる細幅のプリプレグ作製機の試作を行った。この装置の構成を図2に示す。工程は、φ80×190mmの紙管にまかれた炭素繊維とTHF洗浄槽に導入しサイジング剤を除去し、乾燥後、樹脂溶液に含浸し整列させることによりテープ状にし、乾燥するというものである。この装置を用い、トレカT300-12000の幅約10mmのプリプレグを作製した。細幅であるので引っ張りや曲げ試験片用のプリプレグを直接効率よく作製出来るという特徴を持っている。



ウルテム



S-63

図1 マトリックス樹脂の構造

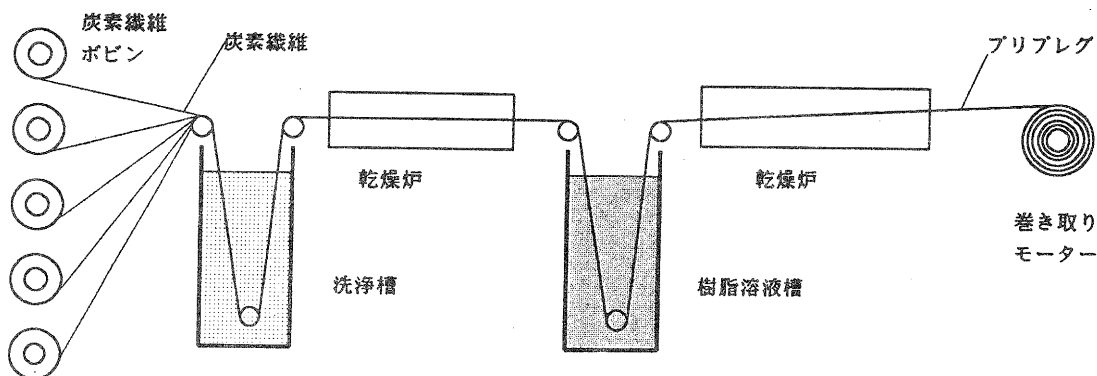


図2 細幅プリプレグ作製装置

この装置により細幅プリプレグの作製時間が大幅に短縮できた。また、この装置では、プリプレグが均一に作成できることの他に、繊維が切断されていないために引っ張り試験を始め物性試験でも良い結果が得られることが分かった。

### 3. CFRTPの成形

#### 3-1 ガス加圧式簡易成形装置による成形条件の検討

CFRTPの成形に用いられているオートクレーブ成形機は大型の成形物や異形の成形が可能である。その反面、種々の温度で試験を行う必要のある成形条件の決定は容易ではない。そこでここでは、おおまかな成形条件をあらかじめ決定するため、ガス加圧式簡易成形装置を作製した。この装置は図3のようにボルトにより加压容器とフィルム、シール材を固定し、フィルムを境として上部を加圧、下部から減圧、底面のヒーターによって加熱する構造になっている。

次に成形方法の一例を示す。最初に下部を減圧しプリプレグ間に存在する空気を排除する。次いで、ヒーターにより50分で380℃まで加压容器全体を加熱し、樹脂が融解している状態で上部をN<sub>2</sub>ガスで加压10分間保持する。この後、ファンで強制冷却し約1時間かけて常温まで冷却した。これによりフィルムとプリプレグを同時に加压し、ボイドの少ない複合材料成形体を得ることができた。

以上のような方法により、ウルテム、S-63それぞれについてV<sub>f</sub> = 45%、60mm × 120mmのプリプレグを用い、成形温度は300℃から410℃まで10℃おきに成形した。なお、成形状態は4-1で述べる超音波探傷法により確認した。以上の方法で、表1の上段の条件を共通にして、下段に示す成形可能温度を特定した。ウルテムのガラス転移点は215℃であり、S-63のガラス転移点は245℃である。どちらも、成形温度はガラス転移点から120℃以上高い温度が必要である事が分かった。

ただし、400℃以上ではマトリックス樹脂の劣化も考えられるため成形の温度範囲はあまり広いとは言えないと思われる。

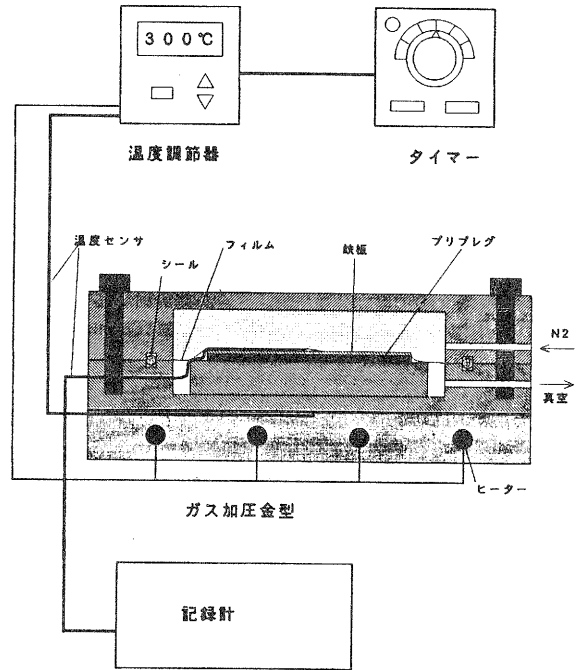


図3 ガス加圧式簡易成形装置

表1 成形条件

強化繊維	炭素繊維クロス：T300-3000平織り	
積層枚数	10枚	
付加圧力	90kPa	
フィルム	ユーピレックス50S	
スペーサー	2mm	
マトリックス	成形可能温度	ガラス転移温度
ウルテム	340~390℃	215℃
S-63	370~410℃	245℃

### 3-2 オートクレーブ成形

オートクレーブ成形機を用いてウルテムのCFRTPを成形した際のバッグフォーミングの一例を図4に示す。シーラントで密閉したポリイミドフィルム製バッグの内部を真空（約780mmHg）にして成形機にいった。前述のガス加圧式簡易成形装置で得られた結果と、本装置における缶内温度とプリプレグ温度の設定温度への到達時間のズレ等を考慮して図5に示す温度プログラムおよび圧力プログラムを決定し、成形を行った。その結果、 $270 \times 350 \times 2$  mmのCFRTPをうまく成形することができた。また、超音波探傷での評価結果でも良好な成形体であることが確認された。本オートクレーブ成形機では、これまでの試験片に比べ大型の成形物や異形の成形物の作製が可能である。そのため大型の成形体から試料を切り出す事により、成形状態の揃った試験片を多数作製できるようになり物性評価の際のばらつきも小さくなると考えられる。

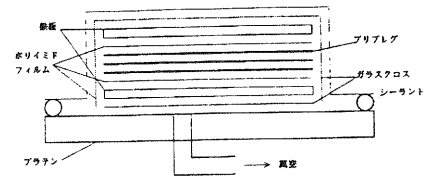


図4 オートクレーブ成形のバッグフォーミング

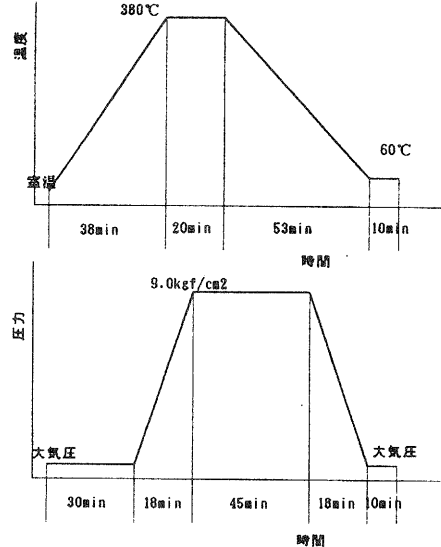


図5 温度、圧力プログラム

## 4. 超音波探傷法によるCFRTPの評価

### 4-1 成形状態の評価

ガス加圧式簡易成形装置を用いて $130 \times 60 \times 2$  mmのCFRTPを作製し、超音波探傷装置により内部の状態を観察した。測定は、川鉄アドバンテック（株）製のKUSS-120TSを用い水槽中、25MHz用探触子を用いて行った。図6は炭素繊維クロス積層板の探傷結果である。白いところが、超音波の減衰が大きいところであり、ボイドの存在する可能性が高いと思われる箇所である。黒いところは炭素繊維クロスの織り目が重なっており、樹脂量が少なくまたボイドも少ないために減衰が小さいと考えられる。白いところが、全体的に、しかも均一に存在している事から、大きなボイドはないものの、小さなボイドが多く存在していると思われる。これは、樹脂の熔融粘度が高いためにプリプレグの製造段階で発生した凹凸や樹脂中のボイドが原因と考えられる。

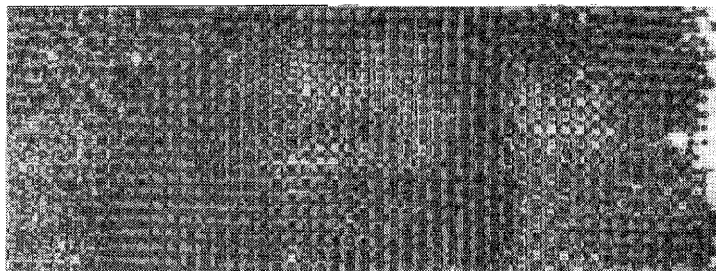


図6 CFRTPクロスの超音波探傷結果

#### 4-2 落球衝撃試験および衝撃後の評価

前報では一方向強化材料のシャルピー衝撃試験や層間破壊靱性（ダブルカンチビーム法）で諸物性の評価を行ってきたが、今回は実際に製品に使用される状態に近いクロス（板状）のCFRTP試験片に付いて、その耐衝撃性を評価する一つの方法として落球衝撃試験を行った。試験片は3-1で成形したエポコート828、ウルテム、S-63をマトリックス樹脂とする炭素繊維クロス（成形板）を70×70×2mmに切断したものをを用いた。落球衝撃試験には、のような装置を用い、落下させる鋼球は重量130g、球径30mm、落下高さは2mとした。試験片の支持は、径40mmの支持台を用いて行った。衝撃後の超音波探傷試験には、4-1と同じ装置を用い周波数5MHz、水浸式平行型の探触子を用いて行った。各層の観察には焦点式の探触子を用いるが<sup>7)</sup>、今回は、試験片層から内部まで試験片に存在する亀裂の総和を観察するため、図8に示すエコーロス法と呼ばれる方法を用いた。この方法は、発信波の焦点を絞らず平行の発信波を用いて、試験片を透過した後、反射板で反射し、もう一度試験片を透過したエコーを観察するものである。

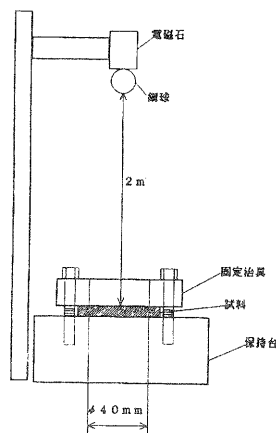


図7 落球衝撃試験装置

図8に示すエコーロス法と呼ばれる方法を用いた。この方法は、発信波の焦点を絞らず平行の発信波を用いて、試験片を透過した後、反射板で反射し、もう一度試験片を透過したエコーを観察するものである。

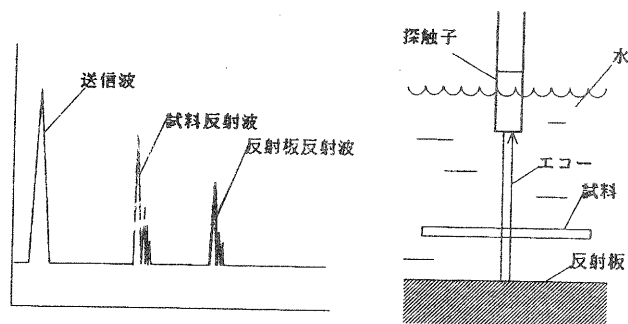
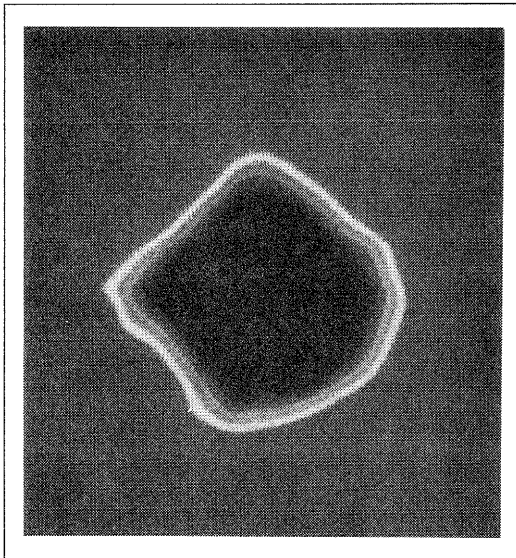
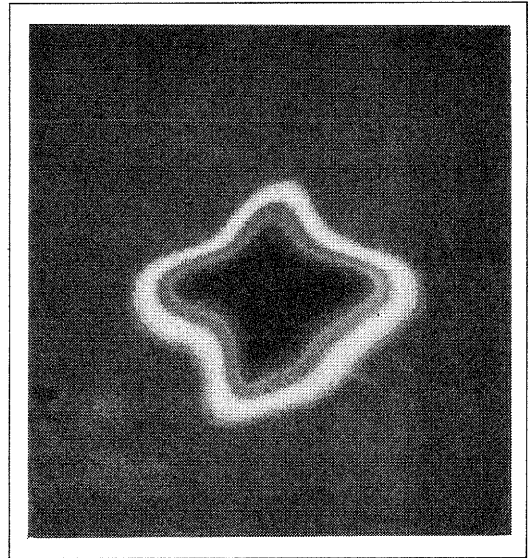


図8 超音波探傷（エコーロス法）

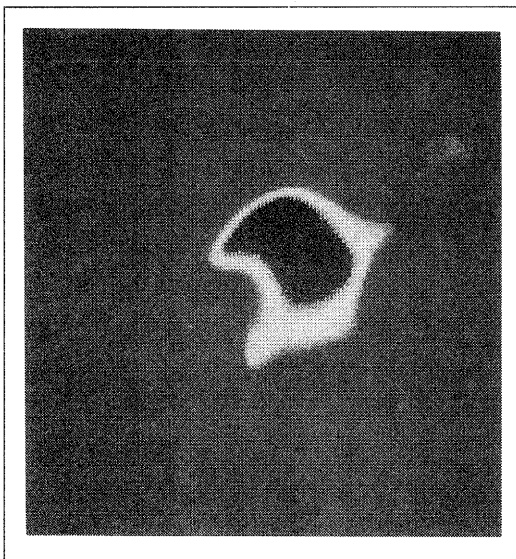
落球衝撃試験で球が衝突した試験片の表面は、ウルテム、S-63では共に球形の圧痕が残っているのに対し、エポキシ樹脂は特に圧痕は観察されなかった。超音波探傷装置を用いCFRTP内部の欠陥を映像化したものが図9の(a)～(c)である。エポキシ樹脂(a)の欠陥の面積が大きいのに対してウルテム(b)やS-63(c)の欠陥の面積は小さい。同様のことはPEEKなどの樹脂でも確認されている<sup>8)</sup>。この理由は、一つにはウルテムやS-63のCFRTPには圧痕が残っていることから、樹脂が塑性変形するためにエネルギーを奪っている事によると考えられる。また、もう一つには前報でも示したが、曲げ破壊強度がエポキシ樹脂に比べ大きいことから分かるように破壊に達するまでのエネルギーが大きいことによる差が考えられる。また、同じく前報に示した一方向材CFRTPの破壊靱性等の結果からも分かるようにエポキシ樹脂が堅くて伸びが小さいため亀裂の進展が一度に起こるのに対して熱可塑性樹脂は伸びがあるために亀裂の進展を阻害する効果を持つことが考えられる。今回のCFRTPはクロス補強であるが、一方向材の場合と同様に靱性の高いものになっていると考えられる。以上のように、マトリックスに用いた熱可塑性樹脂の特性により亀裂の大きさに差が生じたものと考えられる。



(a) エポキシ樹脂マトリックスCFRP



(b) ウルテムマトリックスCFRTF



(c) S-63マトリックスCFRTF

図9 落球衝撃試験後の超音波探傷結果

## 5. まとめ

前年度までの研究で小型の試験片について、韌性や耐熱性がエポキシ樹脂に比べて優れている事を確認している。今年度は、工業化の際に問題となる成形条件の検討を行い、その良否判定に超音波探傷方法が利用できる事が分かった。また、実用形状に近い板状試験片についての評価の一つとして落球衝撃試験を行い、熱可塑性樹脂マトリックス複合材料が優れた物性を持つことを確認した。

## 謝 辞

本研究について御指導いただいた木村良晴研究参与（京都工芸繊維大学教授）に深謝します。また試料を提供していただいた新日本理化株式会社に感謝します。

本研究は、技術開発研究費補助事業（広域共同研究）の一環として行った。

### [参考文献]

- (1)南雲 隆、坂井英男：“耐熱高韌性熱可塑性複合材料の開発”、日本複合材料学会誌、15、5、  
P 194～200（1989）
- (2)山口泰弘、吉田幹根：“熱可塑性樹脂系複合材料成形法に関する基礎研究”、三菱重工技報  
27、6、P 584～553（1990）
- (3)影山和朗： “複合材料の破壊力学（Ⅲ）、日本複合材料学会誌、18、5、  
P 32～38（1992）
- (4)那須喜一、中村吉紀：“新樹脂をもちいた繊維強化複合材料の物性に関する研究  
滋賀県工業技術センター研究報告（1989）
- (5)那須喜一、山中仁敏、中村吉紀：“耐熱性エンブラの高度化に関する研究”、  
滋賀県工業技術センター研究報告（1990）
- (6)那須喜一、山中仁敏、中村吉紀：“強化繊維と耐熱性エンブラとの複合化の研究”  
滋賀県工業技術センター研究報告（1991）
- (7)見尾田 征幸： “衝撃後のCFRP積層板の超音波による内部観察”  
北海道立工業技術センター研究報告、2、P 35～41（1992）
- (8)松嶋正道、石川隆司：“衝撃を受けたCFRP厚板と補強平板の超音波探傷（その1）”、  
非破壊検査、42、3、P 121～123

## デザイン手法の高度化に関する研究（第五報）

——デザイン開発における三次元手法のシステム化と製品開発への応用——

技術第二科 野上 雅彦 Masahiko Nogami  
山下 誠児 Seiji Yamashita

あらまし：コンピュータの普及に伴い、デザイン分野でのその利用も各方面で進められている。中小企業へのフィードバックを前提とした、パーソナルコンピュータ（以下PC）ベースでの研究と共に、エンジニアリング・ワークステーション（以下EWS）上で三次元CGソフトウェアを用いた研究も進めている。

本年度では、PC二機種（PC98、Macintosh）とEWSの効果的な複合利用環境の構築を行った。イーサネットによるネットワーク化と、ビットマップデータのファイルコンバータの作成を行うことで、三次元CGによる製品開発手法の省力化、システム化を行なった。

### 1. まえがき

今日、CADの普及には著しいものがあり、デザインの分野においても様々な分野での利用が拡大されつつある。消費者ニーズの多様化により多品種小量生産が要求される今、デザイン作業の合理化のためのみならず、コンピュータの利用により初めて可能となる創造や表現こそ、これから推し進めていくべき課題であると思われる。当センターでは、デザイン手法の高度化を進めながら、県内中小企業への導入を促進していく。

本年度当センターでは、IBM社のUNIX・EWSマシンと、アップル社のマッキントッシュコンピュータ、日本電気社のPC-98の三台のコンピュータを使用し研究を進めている。この三台を使用することにより、現在、またこれからしばらくの期間は主流であり続けられるOS、MS-DOS/MS-Windows、System7 (MacOS)、UNIX/X-Windowの三種類の環境を構築することができる。

近年、デザイン業界においてアップル社のマッキントッシュコンピュータ（以下Mac）が急速に普及し、業界の標準機となった感がある。基本的な操作の修得が容易なことと、非常に優れたアプリケーションが豊富にそろっていること、最終出力の環境が整備されていることなどがその主な理由である。MS-DOSマシンにおいては、MS-Windowsの登場でプラットフォームは整備されたが、日本においてはアプリケーションが不足している状態である。UNIX/X-Windowは、高い計算能力を持つEWSの標準OSとしての地位を確立し、その強力なネットワーク機能とあいまって最も注目されている。本年度では、上記の異機種、異なるプラットフォームでの複合利用環境の構築を行い、そのシステムによる製品開発への応用を行う。



## 2. 機器構成

機器構成を図-1に示す。

図1 機器構成

機 種	OS	ハードウェア環境		ソフトウェア	用 途
EWS IBM RS6000 530/320H	UNIX(AIX) X - Window	CPU RAM HDD CRT	POWER(RISC 25M) 64/32MB 1200/640MB 19inch(1280×1024×24bit)	Alisa Designer CAEDS	三次元CG 三次元CAD 構造分解
PC Apple Macintosh	MacOS (System7)	CPU RAM HDD CRT	68030(40M) 20MB 300MB 17inch(1152×870×24bit)	FreeHand Photoshop PageMaker MiniCAD+	フルカラーグラ フィクス DTP,CAD
PC NEC PC - 98XL2	MS - DOS MS - Windows	CPU RAM HDD CRT	80386(16M) 9.6MB 180MB 17inch(1024×768×8bit)	Designer Hyper 彩子	フルカラーグラ フィクス、DTP

PCでは、計算能力が向上したとはいえ、複雑な三次元処理をするには速度の点で実用的とはいえない。逆にEWS側もアプリケーションの種類・価格などの点で、多様な目的に柔軟に対応できない点がある。そこでそれぞれの利点を活かした複合利用環境を構築する。

### 3-1. PC98

一般企業とのインターフェイスの機能を受け持つ。豊富なMS-DOSベースのソフトウェアが資産であるが、その互換性は低く、フルカラー化や大画面化になると汎用的なハードウェアが整備されておらず、専用機となりやすい。MS-Windowsの登場、発展によってその問題は解決された。しかし、日本においてはアプリケーションが不足しており（特にビットマップグラフィクス系）、ようやくプラットフォームが整備された状態である。

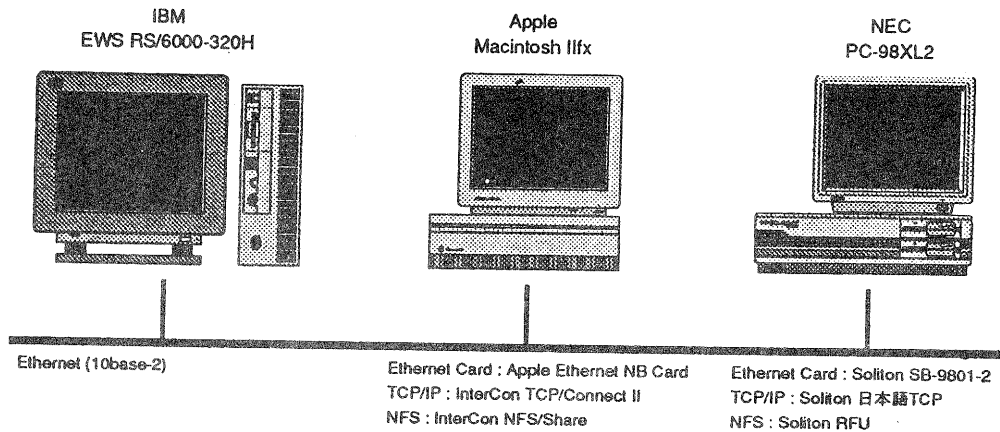
### 3-2. Macintosh

デザイン業界とのインターフェイスの機能を受け持つ。MS-Windowsより歴史の古い分ハードウェア、ソフトウェアとも整備されている。しかし、OSレベルでは弱点も目に付く。操作においては、取っ付きやすい半面、キーボードによる操作は補助的にしか考えられていないため、習熟による操作速度の向上の限界は低い。また、MS-Windowsに比べてマルチタスクの機能の弱さが目立つ。しかし、非常に優れたアプリケーションの豊富さ、マルチメディア機能の充実、ネットワークへのOSレベルでの対応などその長所は数多い。

### 3-3. EWS

三次元モデリングなど複雑な計算処理を担当する。高い計算能力と、マルチユーザー、完全なマルチタスク環境が得られる。UNIX/X-Windowのネットワークは強力で、イーサネット、リモートホスト、ネットワークファイルシステムなどの機能が標準で装備されている。

図2 ネットワーク構成



### 3. イーサネットによるネットワークの構築

前年度に数種類のハードウェア（イーサネット、ローカルトーク、シリアルポート）によるネットワーク化を試みたが、大容量の画像データを扱う必要からその中からイーサネットによるネットワークを選択した。ネットワーク機器構成およびソフトウェア構成を図-2に示す。

イーサネットケーブルは10base-2を使用し、プロトコルはTCP/IPにより接続する。ファイル転送の手法はFTP（ファイル転送プログラム）により個別にファイルを転送する方法と、NFS（ネットワークファイルシステム）によりEWSをファイルサーバにする方法が考えられる。もちろん後者の方法が理想的であるが、実際にNFSの構築を行なってみると様々な問題点が浮かび上がって来た。PC-98ではソリトンシステムズ社のボードとドライバを使用した。TCP/IPだけで100KB、NFSを加えると120KBのメモリを占有する。このため、大量のメモリを必要とするアプリケーションは起動できなくなる。また、このバージョンのドライバでは、MS-Windows上でリモートドライブが使用できず、MS-DOSのバージョン5にも未対応である。マッキントッシュにおいてはメモリの心配はないものの、NFSのドライバとDTPソフトウェア（Aldus PageMaker 4.0J）がコンフリクトを起こし、DTPソフトウェアが起動できなくなった。これらの問題によりNFSによるファイルサーバの構築は断念することとなった。

FTPによるファイル転送であるが、当センターの構成では三機種共がFTPクライアントになれば、EWSとマッキントッシュがFTPサーバになることが出来る。マッキントッシュのTCP/Connect IIによるFTPクライアント機能はユーザーインターフェイスに優れ、コマンドを打ち込む必要がなく非常に使いやすい。現在の構成ではPC-98はFTPサーバになれないが、サーバプログラムは数多く存在しているので、サーバ機能を付加させることは容易である。

### 4. ファイルコンバータの作成

昨年度ビットマップグラフィックデータをPCからEWSの3D・CGソフトウェアへ転送するため、RGBベタファイルからPIXファイル（3D・CGソフトウェア“Alias Designer”のイメージファイル形式）へのファイルコンバータを作成した。このRGBベタファイル

図-3 主なソフトウェアとそのデータの互換性

		Bitmap		Draw		DXF
		TIFF	RGB	EPS	PICT	
EWS	Alias Designer	R/W	R	×	×	W/R
Mac	Photoshop	R/W	R/W	R/W(Bitmap)	R/W(Bitmap)	×
	Illustrator Freehand	×	×	R/W	R/W	×
PC98	Disigner	PC98	Designer	R/W	R/W	R/W
	Hyper彩子	×	R/W	×	×	×

\* ファイルコンバータを作成

図-4 TIFFの内部構成

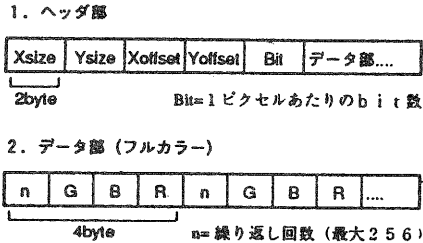


datar.tif (5 x 2 pixel, 24bit color)

Offset	DesCription	Value
<b>Header:</b>		
0000	ByteOrder	4D4D
0002	42	002A
0004	1st IFD offset	00000080
<b>IFD:</b>		
0008	Number of Directory Entries	000E
000A	NewSubfiletype	00FE0004 0000 0001 0000 0000
0016	Image Width	01000003 0000 0001 0005 0000
0022	Image Length	01010003 0000 0001 0002 0000
002E	Bit Per Sample	01020003 0000 0003 0000 00B6
003A	Compression	01030003 0000 0001 0001 0000
0046	Photometric Interpretation	01060003 0000 0001 0002 0000
0052	Strip Offset	01110004 0000 0001 0000 00C4
005E	Samles Per Plxel	01150003 0000 0001 0003 0000
006A	Rows Per Strip	01160003 0000 0001 0002 0000
0076	Strip Byte Counts	01170004 0000 0001 0000 001E
0082	Xresolution	011A0005 0000 0001 0000 00BC
008E	Yresolution	011B0005 0000 0001 0000 00BC
009A	Planer Configuration	011C0003 0000 0001 0001 0000
00A6	Resolution	01280003 0000 0001 0002 0000
00B2	Next IFD offset	00000000
<b>Values longer than 4 bytes:</b>		
00B6	Bit Per Sample	0008,0008,0008
00BC	X,Yresolution	0000 9C40,0000 2710
<b>Image Data:</b>		
00C4		FFFF FF00 FF00 00FF 0000 FF00 0000 0000 0000 0000 FF00 00FF FF00 00FF FFFF
<b>End of file:</b>		

図-5 PIXファイルの内部構成

このファイルは計10byteのヘッダ部と、24bitフルカラーまたは8bitグレースケールのデータ部からなる。



は純粋に画像データしか持っておらず、画像の縦横サイズの情報すら持たないもので、別ファイルにその情報を保存しなければならない。これでは不便なのでTIFF (Tag Image File Format) ファイルからのコンバータを作成することにした。このTIFFファイルは、主要なコンピュータ関連会社 (Aldus, Hewlett Packard, Silicon Graphics など) が共同で規格したもので、ビットマップイメージデータの標準フォーマットとして広く使用されている。TIFFは、モノクロビットイメージからフルカラー、CMYKイメージまでサポートしたもので、ほぼあらゆるビットマップデータを表現することが出来る。フルカラー (RGB各8bit) TIFFとPIXファイルの内部構造を図-4・5に示す。今回は、モノクロ、グレースケール、パレットカラー、フルカラーの4種類のイメージデータに対応させた。コンバートプログラムを開発するにあたり、対象としたTIFFファイルはマッキントッシュのPhotoshopで作成したものである。プログラムは完成しPhotoshopで作成したTIFFファイルは無事コンバートできたが、他のプログラム (Pixel Paint Professional, Studio32) で作成したTIFFファイルはコンバートできなかった。この原因はTIFFが汎用的な規格のため、同じデータを持つファイルでも様々な表現が可能のためである。今後、それらのデータへの対応の必要がある。

コンバータの一応の完成により、ビットマップデータのPCからEWSへの転送が可能となった。これにより、大理石や木目などのテクスチャデータだけでなく、シンボルマークや液晶画面などのドロー系グラフィックデータをビットマップデータへラスタライズし転送することで3Dモデリングのプロセスを大きく省力化、システム化することが可能となる。

## 5. 製品開発への応用

今回、光学機器メーカーからセキュリティシステムの操作盤のデザイン相談を受け、図面からレンダリングをおこなうことになった。データはマッキントッシュのMiniCADの図面データをフロッピディスクで受け取った。まずFreeHandで二次元のグラフィクスを作成した。MiniCADからFreeHandへ編集できるデータで受け渡すにはPICTファイルを中継しなければならず、精度が落ちるため直接は使い物にならない。結局は新しくデータを入力しなおすことになった。次に、EWS上で三次元モデルへの展開を行なった。本体やボタンは新たに作成し、

液晶パネルやピクトグラムはFreeHandで作成したものをTIFF経由でPIXファイルに変換した後、三次元モデルにマッピング処理を行なった。レイトレーシングによるレンダリング後、イメージデータをTIFFでマッキントッシュに転送し、Photoshopで画像の調整をして完成である。

## 6. まとめ

EWS (IBM RS/6000)、Mac、PC98という三種類のコンピュータについて、異機種・異なるプラットフォームでの複合利用環境の構築をおこなってきた。イーサネットによりネットワーク化を行なったが、NFSによるファイルサーバの構築は前記の理由によりできなかった。他のNFSプログラムを探るか、AppleShareやNetWareなどの他のサーバプログラムを使用する方法が考えられるが、現在はFTPのみでの環境である。異なるメーカーのコンピュータ、ソフトウェアを組み合わせる必要があるかぎり、こうした問題は避けられないであろう。TIFFからPIXへのファイルコンバータの作成とネットワーク化により、三次元CGによるデザイン開発手法の省力化、システム化は大きく進展をした。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、ご指導、ご助言をいただいた濱崎修平研究参与に対し感謝します。

# 実験レポート

# 機械部品の平面度・直角度測定装置の試作（第二報）

技術第一科 井上 栄一 Eiichi Inoue

あらまし：昨年度試作した平面度等の幾何形状測定機を用いてプラスチック部品の測定を試みた。部品に要求された幾何偏差は平面度で100 $\mu$ m内であったため、センサーとして拡散タイプのレーザー変位計を使用し、測定実験を行った結果73 $\mu$ mの平面度を得た。ところが、測定値の比較のため3次元座標測定機で測定したところ、平面度が25 $\mu$ mと測定され、両者に大きな開きが生じた。そこで、その原因について考察検討を行った結果、レーザー変位計における測定値が試料の表面形状や色などによってかなり変動することが分かった。

## 1. まえがき

近年オプトエレクトロニクス等の急速な発展に伴って、多くのセンシングデバイスが改良改善され、容易にミクロンオーダーの計測が可能な状況となってきた。とくにレーザーを応用した装置は価格も安価なものが多く、高速にかつ非接触で計測できるという理由から生産・検査工程の中で多く使用されている。<sup>(1)(2)(3)</sup> 昨年試作した測定機も、変位センサーとしてレーザーを初め、超音波や静電容量タイプのものを対象物や目的に応じて取り替え非接触で測定するものである。今回、プラスチックファンの平面度測定が本試作機によって可能かどうか調べるため実験を行った結果、測定値が、基準とした3次元座標測定機の測定値よりかなり大きな値となったため、その原因を考察検討したところ、いくつかの知見を得たのでその結果を報告する。

## 2. 試作測定装置の概要

### 2-1 全体構成

試作機の全体構成および動作の流れを図1に、また試作機の仕様を表1にそれぞれ示す。テーブル駆動および位置情報はステッピングモータのコントローラに計算機側からRS-232C回線を介し命令を送信することで行い、変位データについても変位計と計算機間で別のRS-232C回線によってデータの送受信を行った。

表1 試作機仕様

計算機	PC-H98SMODELU8	: NEC
I/F	PC-9861K (RS-232C回線増設)	: NEC
	PIO-96WK (パラレル双方向入出力)	: CONTEC
コントローラ	ND-405	: 大三工業(株)
テーブル	TSL 170-500 A/S5 E2	: 日本トムソン(株)
	CTSL170/90E30	: 日本トムソン(株)
変位計	LC-2100 (コントローラ)	: (株)キーエンス
	LC-2310 (測定部)	: (株)キーエンス

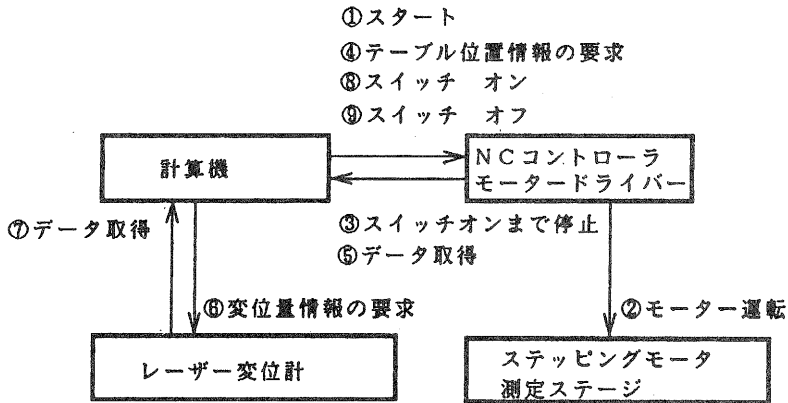


図1 試作機構成図

2-2 変位計

今回の実験では、(1) 必要とされる平面度が100 μm内であったこと、(2) 表面が鏡面状態ではなかったことから、拡散タイプのレーザー変位計を使用した。図2にその原理および仕様を示す。なお本装置は白色拡散物体における標準設定がなされており、校正機能は使用しないで測定を行った。

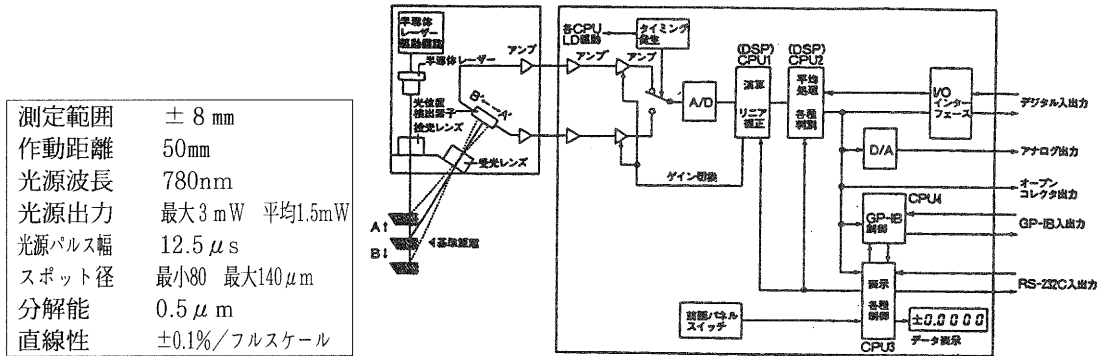


図2 変位形の原理 (取扱い説明書より抜粋) と仕様

2-3 平面度の評価方法

平面度の定義はJIS B0621によれば図3のfで示される「平面形態の幾何学的に正しい平面からの狂いの大きさ」という最小領域による定義が取られている。この定義に基づく平面度は直感的には理解しやすいが、測定を行う立場から見れば多くの解決しなければならない困難な点を含んでいるため、研究対象として計算手法等が提案されているが計算処理に時間がかかるなど余り実用的でない<sup>(4)(5)(6)</sup>。

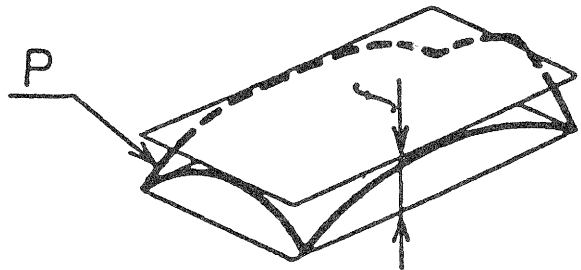


図3 平面度の概念 (JIS B0621より抜粋)



一般的によく用いられる解析手法の一つとして最小自乗平面から平面度を求めるものがある。この手法によって得られる平面度値は最小領域法によって得られた結果と比較しても1～1.12倍大きいに過ぎないという報告<sup>7)</sup>があり、また計算速度もかなり速いため本実験では最小自乗平面による平面度を採用した。

最小自乗平面による平面度の算出方法は、全ての測定点 $P_i (X_i, Y_i, Z_i)$  から平面  $A X + B Y + Z + C = 0$  への距離の自乗総和を最小にする係数A、B、Cを決定し、各点からその平面への垂線の長さの最大偏差を平面度とするものである。

### 3. 測定方法および考察

#### 3-1 測定方法

測定は図4に示すように試作機のZ軸にレーザー変位計を取付け、図5のようにファン(黒)の平面度をほぼ5mm間隔で移動動作停止1s後、変位計の指示値を1回サンプリング測定、記録した。

測定点の数は多ければ多いほど真値に近づくことができると考えられるが、実際の計測では測定時間が限られること、25回の測定でも最終的な評価値の85%程度の評価が可能であるという報告<sup>8)</sup>により測定総数は25点とした。また、基準として表2の3次元座標測定機による測定も行った。

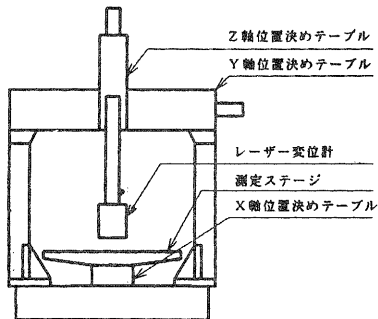


図4 試作機正面図

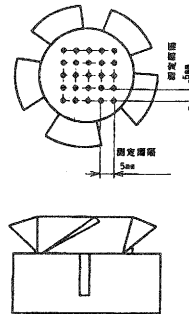


図5 測定試料

#### 3-2 測定結果

表2 3次元座標測定機仕様

本体	F1006	: (株)ミットヨ
軸指示精度	$(3 + 4L / 1000) \mu\text{m}$	L = 任意測定長
軸繰返し精度	$\sigma = 1.0 \mu\text{m}$	
万能タッチ信号プローブ	TP1	: レニショウ
測定力(実測)	15gf	
一方向繰返し精度	$\sigma = 1.0 \mu\text{m}$	

測定結果を表3に示す。レーザー変位計による測定値が $73 \mu\text{m}$ であるのに対し、3次元座標測定機による測定値は $25 \mu\text{m}$ しかなく、両者の値に開きがある。

表 3 平面度測定結果 (単位:  $\mu\text{m}$ )

試作機	72.7	( $\sigma=19.3$ )
3次元座標測定機	24.8	( $\sigma=9.4$ )

3-3 考察

そこで、その原因を調べるため表4のような確認すべき要因を考え、再度測定実験を行い、各要因に関する検討を行った。

表 4 要 因

① 3次元座標測定機による要因
② 試作機による要因
③ レーザー変位計による要因
④ 試験試料による要因

3-4 3次元座標測定機による要因

3次元座標測定機に関する要因のひとつとして考えられるのは、接触圧による試料の弾性変形である。とくに今回のようにプラスチック製品を測る上でよくこの点が問題になることが多い。実験ではTP1という信号プローブに硬球をつけて測定したが、そこに加わる接触力は表2に示したように15gfであり、それほど弾性変形が起こるとは考えにくい。そこで、金属片をもうひとつの測定試料として加え、TP1プローブで測定するとともに表5に示す測定力のより低い高精度タッチ信号プローブHTPによって測定を行った。その結果を表6に示す。

表 5 高精度タッチ信号グローブHTO仕様

測定力(実測)	3 gf
一方向繰返精度	$\sigma \leq 0.5 \mu\text{m}$

表 6 弾性変形による測定結果 (単位:  $\mu\text{m}$ )

プローブ	ファン	金属片
TP1	24.8 ( $\sigma=9.4$ )	23.4 ( $\sigma=8.9$ )
HT2	25.8 ( $\sigma=9.9$ )	24.7 ( $\sigma=10.1$ )

ファン、金属片の両方ともプローブを変更しても測定値上では余り差はなく、弾性変形の違いによるものであるという理由付けは困難であると思われる。

3-5 試作機による要因

試作機の真直度は各軸約 $10 \mu\text{m}$ であるため<sup>9)</sup>、測定した場所によって値が変わるとも考えられたので、図6に示す測定ステージ上の9箇所近傍でファンと金属片の測定を行った。その結果を表7に示す。値のばらつきは余りなくこの $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 程度の測定範囲では測定位置による影響は少ないと思われる。さらに、三次元座標測定機にレーザー変位計を直接取り付けられた状態で平面度測定を行ったところ表8のように、試作機によって得られた値とほぼ同じ結果が得られ、試作機による要因は考えにくいと思われた。

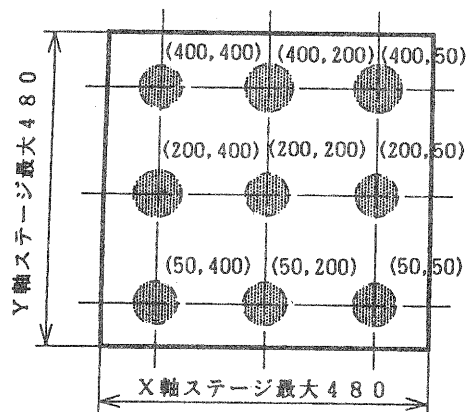


図 6 測定位置

また、テーブルは加速度 $250\text{mm/s}^2$ 、移動速度 $5\text{mm/s}$ であり、パルスが必要な距離分の数に達すると急停止するため、停止直後はまだ装置全体に振動があり、それらによっても値が変化する可能性もあったため、変位計のデータを取り込む時

間を50msから2sまで変化させ、同じ測定位置での実験を行った。その結果を図7に示す。これによると停止時間500msまで若干平面度が低くなっており少なくとも1sは停止時間が必要であると考えられ、今回の停止設定時間は問題ないと思われる。

表7 測定位置に関する測定結果 (単位:  $\mu\text{m}$ )

試験試料 測定位置	ファン		金属片	
	平面度	標準偏差	平面度	標準偏差
(50, 50)	70.7	32.6	99.4	41.4
(50, 200)	80.5	35.8	89.6	38.9
(50, 400)	69.0	30.9	103.6	40.7
(200, 50)	85.3	36.4	86.8	35.7
(200, 200)	87.5	35.9	95.1	37.7
(200, 400)	70.6	33.0	90.4	34.6
(400, 50)	61.3	23.2	90.3	36.6
(400, 200)	58.7	22.6	94.7	36.7
(400, 400)	71.1	28.8	88.2	34.5
全体平均	72.7	19.4	93.2	16.3
	(変動率26.7%)		(変動率17.5%)	

表8 3次元座標測定装置にレーザー変位計取付けた時の平面度 ( $\mu\text{m}$ )

使用した装置	平面度	標準偏差
3次元座標測定機	73.9	17.3
試作機	72.7	19.3

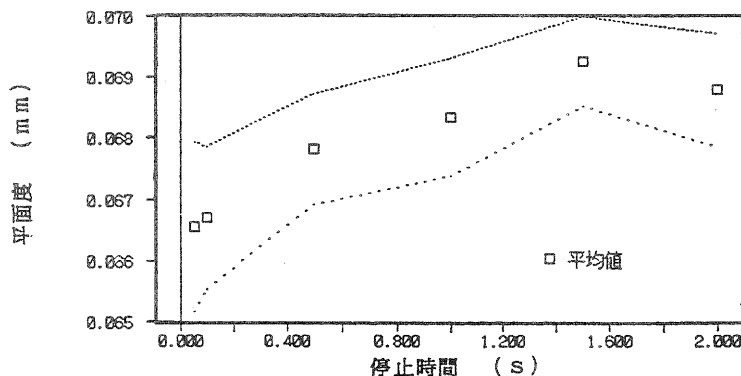


図7 停止時間と平面度の関係

### 3-6 レーザー変位計による要因

今回使用したレーザー変位計は垂直に入射したレーザー光の拡散光の重心を光学素子によって計測するものであるため、測定試料の材質や色などによって測定値が変動する可能性があり、そのための校正機能を有している。そこで材質および色に起因する誤りについての実験をするため、校正をした場合と、校正しない標準設定(白色拡散体における校正)の場合の差を調べた。

#### ①色による指示値の変動

実験は3次元座標測定機のプロブ取付部にレーザー変位計を直接取付けて乾式PPC用紙(L,a,b=84,0,0)、赤色画用紙(L,a,b=36,44,15)および黒色画用紙(L,a,b=22,0,1)の試料をサインバーにはりつけレーザー光のスポットが最小となる位置にセットし、マニュアル操作で3次元座標測定機のZ軸を5 $\mu\text{m}$ ずつ250 $\mu\text{m}$ まで移動させ、その時の座

標値とレーザー変位計の指示値を測定した。その結果を図8に示す。PPC用紙で最大 $4\mu\text{m}$ 、色画用紙では赤が最大 $1.5\mu\text{m}$ と黒で $5\mu\text{m}$ ずれることがある。一方校正を行って測定をした場合各試料とも最大のずれでも $1\mu\text{m}$ であり校正操作は大変重要であると考えられる。

### ②材質による指示値の変動

紙以外の材質であるプラスチックについて白(テフロン板:  $L, a, b = 88, -1, -3$ )、赤(ナベヤ製クランプ治具:  $L, a, b = 39, 33, 14$ )、黒(フロッピーディスク外枠:  $L, a, b = 17, 0, 0$ )の測定を行った。その結果を図9に示す。赤色の例として測定した

クランプ治具はほとんど校正の必要がないほど偏差がなかった。一方テフロンやフロッピーディスクはかなり大きな偏差を示した。とくにフロッピーディスクは静止状態でもかなり表示値がばらついた。

### ③ファンの測定

実験試料であるファンも測定したところ静止状態にであるにもかかわらず指示値自体にかなりのばらつきがあり、校正値を求めることが困難であることがわかった。この試料の25箇所について静止状態で30秒間最大値と最小値の積算変動測定では、最大で $8.5\mu\text{m}$ もあることが分かった。これは、静止状態であっても光学素子上の光束の重心位置が変動していることを意味することから表面状態によって拡散状態が安定していないと考えられ、場合によっては多数サンプリングによる平均化処理等が必要であることも考えられた。

### ④考察

色については、赤色系統は、標準設定で測定した場合もあまり大きな差は見られなかったが、黒色系はかなり大きな差がでたため校正操作が必要であると思われる。また表面状態の余り変わらない紙においても同様な傾向を示しているため、本変位センサーでは次に考察する表面凹凸状態の他、表面からの反射光量の違いが測定値に影響を及ぼしているものと思われる。

## 3-7 試験試料による要因

ファンは射出成形品であるため表面に若干凹凸があると考えられるため、ファンと金属片の測定箇所25点の近傍で最大表面粗さを測定した。その結果を表9およびその代表的な粗さ曲線を

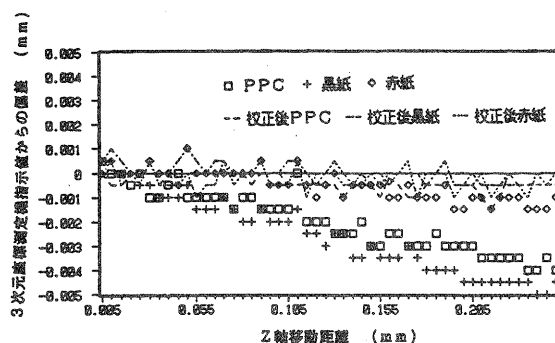


図8 色による指示値の変動

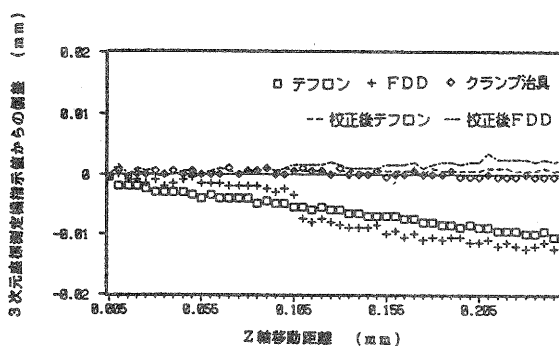


図9 材質による指示値の変動

図10に示す。

ファンでは10 $\mu\text{m}$ ~30 $\mu\text{m}$ まで値がばらつき、金属片ではほぼ12 $\mu\text{m}$ であった。また、試験で使用したファンの粗さ曲線の山と山の間は100 $\mu\text{m}$ 程度で、急激に凹になっているということが分かった。一般に表面の凹凸はプローブ等の測定子の大きさと比較して2桁以上小さい場合に問題ないとされるが、同程度以上では測定子の有効面積によって形状が著しく変わって捕らえられると言われている。<sup>30</sup>今回使用した変位計のレーザーの焦点径は80 $\mu\text{m}$ ~140 $\mu\text{m}$ であるため、同程度の振幅を持っており、平面度において最大表面粗さの大きさ分大きな値となるのではないかと考えられる。一方3次元座標測定機のプローブはレーザーに比較してかなり曲率が大きくなるため点接触であるが表面の凸が高い部分だけの放絡線上を測定することになるため、表面の微細な凹凸を無視したうねりに近い平面度値しか得られていないのではないかと思われる。

表9 最大粗さパラメータ (単位:  $\mu\text{m}$ )

試験試料	最大粗さ	標準偏差
ファン (25箇所平均)	19.3	4.8 (変動率24.7%)
金属片 (25箇所平均)	15.1	2.7 (変動率17.7%)

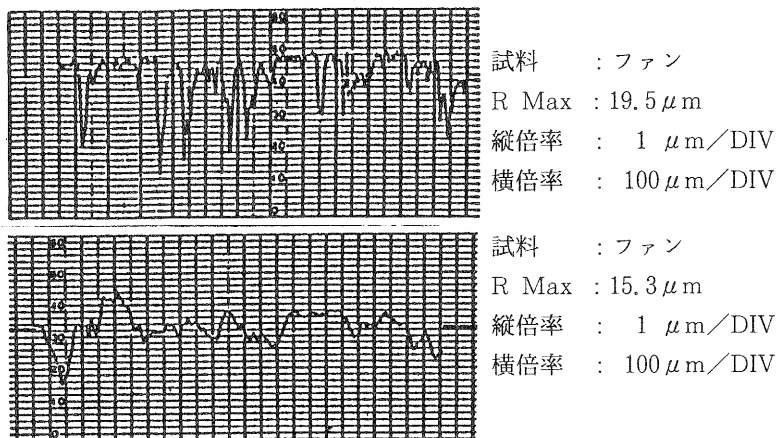


図10 粗さ曲線

#### 4. むすび

(1)昨年度試作した計測試作機でレーザー変位計をセンサーとしてファンの平面度測定をおこなったところ3次元座標測定機によって得た平面度よりかなり大きな値を示した。その原因は拡散光タイプの変位計の焦点径が試料表面の粗さ曲線における周期より小さく、表面粗さ分大きな値となるとともに3次元座標測定機による値も凸部の最高部放絡線を得る可能性が高いため低めの値を取ることによるのではないかと思われる。

(2)拡散光タイプのレーザー変位計は標準状態校正状態では試料および材質等によって示す値が変化し、精密測定を実施する場合には適当な方法による実測材での校正が必要である。また、レーザーのスポット径の大きさと実測材の表面粗さ曲線の周期および振幅に注意する必要がある。

今後の課題として、今回のような20mm $\times$ 20mmという狭い範囲でかつ平面度で100 $\mu\text{m}$

m程度の場合は測定精度上問題は無いと思われるが、より広範囲の測定でより精度が必要となった場合、複数センサーによる逐次法の適用などが必要となると思われ、これら測定精度を上げるための手法を本システムにも取り込んで行きたいと考えている。

#### [参考文献]

- (1) 松丸憲司 外3：光マイクロを使用した厚み測定、アンリツテクニカル、No63、May、'92  
P.101-P.110
- (2) M.E.Rabedeau：OPTICAL SCANNING INTERFEROMETER FOR MESURING SURFACE FLATNESS、IBM Technical Disclosure Bulletin、Vol.24、No.1B June、'81、  
P.684-P.685
- (3) 小野浩之 外1：光センサーによる寸法・形状計測、青森産業技術開発センター活動報告、  
'91、P.29-P.30
- (4) 下河辺明 外2：最小領域法による形状精度の評価、精密機械、Vol150、  
No4、'84
- (5) 金田 徹 外3：最適化手法による平面度の評価、日本設計工学会講演論文集、No90、春  
期
- (6) 小尾 誠：最小領域法の幾何学的考察、日本機械学会、Vol158、549号、  
'92、P.328-P.333
- (7) 中野健一 外2：平面度の最小領域評価と諸評価の比較、東京都立工業技術センター研究報  
告、11号、'82、P.5-P.8
- (8) 中野健一 外1：平面度評価に及ぼす測定点数の効果、東京都立工業技術センター研究報告、  
12号、'83、P.25-P.28
- (9) 井上 栄一：機械部品の平面度・直角度測定装置の試作、滋賀県工業技術センター研究  
報告、'91、P.89-P.92
- (10) 柳 和久：非接触式形状計測法の現状と課題、機械の研究、VOL42、2号、'90、P.8-P.  
P.14

# プラズマCVDによる硬質被膜の 機械的特性に関する研究

技術第二科 西内 廣志 Hiroshi Nishiuchi

あらまし：従来、合金工具鋼（SKD）に熱処理を施した材料が金型等に使用されているが、過酷な使用条件（摩耗、破損）に耐えることが出来ず耐久性のある材料の開発が要求されている。このような要求に応えるために金属材料の表面改質が注目されている。前年度はSKH材を主とした工具鋼へのTiN被膜の処理条件の検討を行った。今回は冷間用金型に使用されているSKD11鋼についてプラズマCVDによるTiN被膜の形成に関する処理の検討を行った。その結果TiCl<sub>4</sub>のガス流量の変動がTiN被膜の形成に大きく影響することが分かった。

## 1. はじめに

近年、機械構造物の高効率化や高性能化に伴って各種機械部品の使用条件はますます過酷なものになりつつある。そのためこれ等に使用される各種材料に対して単に強度のみならず耐摩耗性、耐食性といった機能が要求される。このような要求に応えるために金属材料の表面改質技術が注目されている。過酷な状況で使用される金型、工具への硬質被膜処理としてPVD（物理的蒸着法）、熱CVD（化学的蒸着法）がある。しかしながらPVDによる方法は基材との密着性が弱く、熱CVD法は処理温度が1000℃前後であるため基材の変形等の問題がある。そこでPVDより密着が良く熱CVDと比べ低温で処理できるPCVD法（プラズマCVD）が注目されている。PCVD法は半導体分野での利用が先行しているが、TiNなどの耐摩耗性被膜の適用が遅れている。そこで、今回金型材への適用を図るためPCVDによる処理条件の検討と得られた膜の特性について調べた。

## 2. 実験方法

### 2-1 供試材

基材には冷間用合金工具鋼（SKD11）の焼鈍材（市販）および熱処理材（調質材）を用いた。試験片の形状は25×50×5mmである。熱処理方法は図1の処理条件で真空熱処理による焼入れ焼戻し（調質）を行った。調質後の硬度はHRC60であった。基材はすべて鏡面研磨（エミリー紙→ラッピング→バフ研磨）を行った。供試材はPCVD処理直前にアセトン脱脂（超音波洗浄）を行った。真空熱処理による調質後の組織写真を写真1に示す。

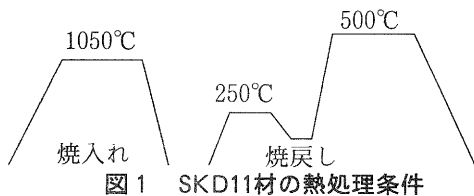


写真1 SKD11の焼入れ焼戻し組織

## 2-2 PCVD装置およびTiN膜の処理条件

図2にPCVD装置の模式図を示す。装置はガス供給系、反応系、真空排気系から構成されており、直流のグロー放電を利用するイオン窒化装置と同様に炉壁を陽極、基材としてこの間でグロー放電を発生させる。TiNコーティングの原料ガスとして高純度四塩化チタン( $\text{TiCl}_4$ )、超高純度窒素( $\text{N}_2$ )、および超高純度水素( $\text{H}_2$ )を用いた。 $\text{TiCl}_4$ は専用のソースタンクを用い $10^\circ\text{C}$ の恒温状態で使用した。図3にPCVD処理工程の模式図を示す。炉体内を $10^{-5}$ Torr以下に排気した後、Ar、 $\text{H}_2$ で昇温を行い、表1に示す条件でTiNコーティングを行った。処理後 $\text{H}_2$ で炉冷した。

図2 PCVD装置模式図

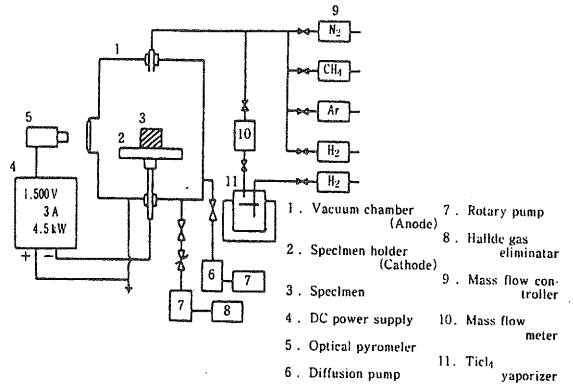


図3 PCVD処理工程模式図

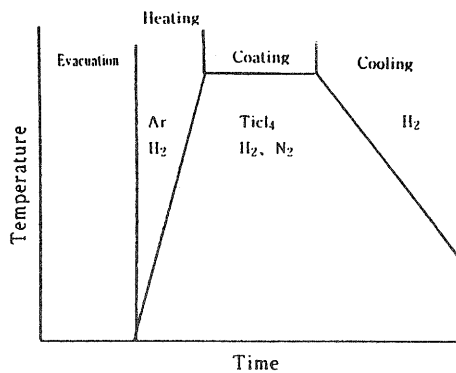


表1 PCVD処理条件 (Tin)

処 理 条 件		No. 1 (焼鈍材)	No. 2 (調質材)
ガス流量 ml/min	$\text{N}_2$	50	50
	$\text{H}_2$	250	250
	Bubbling $\text{H}_2$	100	100
	$\text{TiCl}_4$	6	10~17
温度 ( $^\circ\text{C}$ )		520	520
圧力 ( $10^2$ Pa)		1.3	1.4
放電電圧 (V)		1300	1200

## 2-3 TiNコーティング層の評価

### (1) 形成相の同定

X線回折装置を用いて、管電圧40Kv、管電流80mAでCuK $\alpha$ 線を使用して処理品の形成相を同定した。

### (2) コーティング層の表面観察

TiN被膜の表面観察は走査型電子顕微鏡で観察した。

### (3) コーティング層の表面硬さ

マイクロビッカース硬度計で25gの荷重で測定した。

### (4) 表面分析

TiN膜の表面分析についてはオージェ電子分光分析装置(AES)で分析した。



### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 形成相の解析

図4に表1の条件で処理したX線回折図形を示す。No.1の条件で形成された膜は黄金色の色調が得られ(200)面の配向性を有するTiN被膜が得られた。No.2の条件で形成された膜はTiCl<sub>4</sub>の消費量の変動が生じた為、基材の表面が酸化され茶褐色の色調になった。回折図形はNo.1と異なりTiNの(200)面のピークが低く基材のα相が大部分であった。

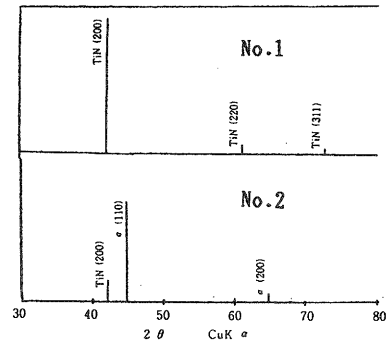
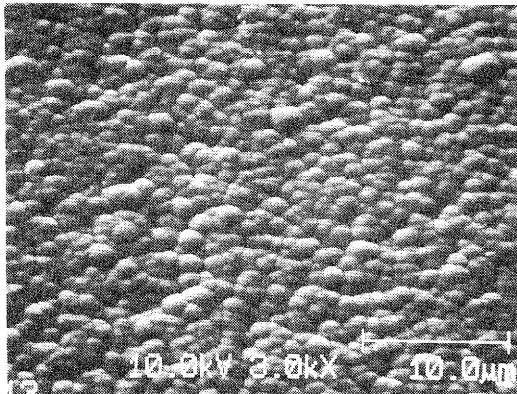


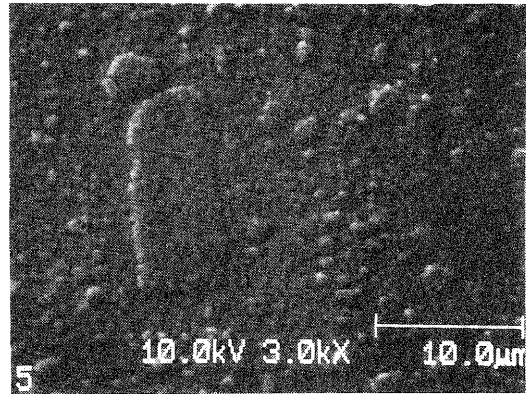
図4 コーティング層のX線回折図形

#### 3-2 コーティング層の表面観察および表面硬さ

写真2にTiN膜のSEM写真を示す。No.1の条件で形成されたTiN膜は均一で微細な粒状化合物が堆積している。表面硬さはHV1500前後であった。一方、No.2の条件で形成されたTiN膜は不均一な粒状の化合物があばた状に堆積しており表面硬さはHV800前後であった。このことは前述のX線回折図形からも明らかに基地の酸化の影響を受け膜質が不均一になったと考えられる。



No. 1



No. 2

写真2 TiN膜の表面組織

#### 3-3 コーティング層の表面分析

処理条件の違いによるTiN膜の表面性状を調べるためAESによる表面および深さ分析を行った。図5のAES分析結果からわかるように良好な膜のNo.1についてはTiN膜の不純物であるO、Clの量が極表面層は比較的高い値を示したがスパッタリングに従って5Atomic%以下の低い値を示した。茶褐色の色調を有したNo.2についてはOの量がスパッタリングしたにもかかわらず15Atomic%の高い値を示した。このことから不均一な膜であるNo.2はTiCl<sub>4</sub>の消費量の変動により基材の酸化腐食が起りTiO<sub>2</sub>が生成したと考えられる。

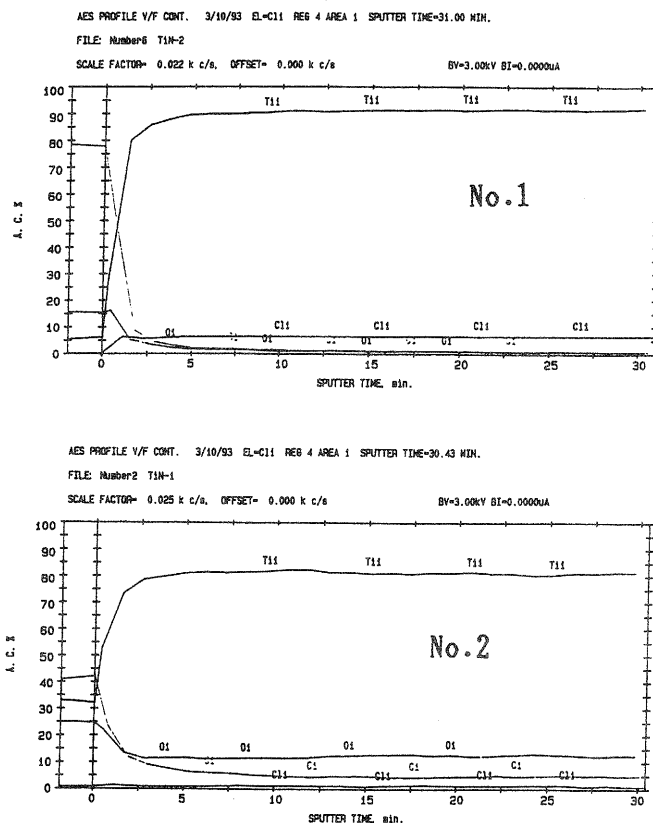


図5 AES分析結果

#### 4. まとめ

PCVDによるSKD11材のTiNコーティングの処理条件の検討を行った結果、次のことが言える。

- (1) PCVDによるTiNのX線回折パターンは(200)面の配向性を有する。
- (2)  $TiCl_4$ の消費量の変動により基材の酸化腐食が起こり易い。

#### [参考文献]

- (1) 石井 芳郎 プラズマCVDによるTiN膜の形成とプラズマ診断, 溶融塩, Vol134, No. 3 (1991. 9)
- (2) 日本電子工業(株)技術資料, プラズマ熱処理技術, P15~16

# ゾルーゲル法による新機能性光学ガラス セラミックスの作成条件に関する研究

技術第二科 前川 昭 Akira Maegawa

あらまし：ゾルーゲル法は、従来法と比較して高価な機器を使用せずに比較的容易にガラスセラミックスが製造できる方法として注目されている。また最近、フォトニクス材料として注目されている半導体微結晶や貴金属微粒子をドーブした非線形光学ガラスは現在、スパッタリング法などで製造されているが、ゾルーゲル法の特徴を活かすことで製造できる。そこで、本年度はゾルーゲル法で金微粒子含有ガラスを作製し、作製条件を検討した。その結果、金微粒子含有ガラスは作製できたが、現時点では金粒子の粒径を制御できず非線形性を発現させるには至らなかった。

## 1. まえがき

CuClなどの半導体微結晶や金などの貴金属微粒子を析出させたガラスはフィルターガラスとして使われているが、最近、CdS、Se<sub>1-x</sub>微結晶ガラスで高い3次の非線形特性を示すことが報告<sup>1)</sup>されて以来、これらのガラスは非線形光学ガラスとして注目され、活発な研究がなされている。これらのガラスは透明なマトリックス中に数nm程度の微結晶を分散させたもので、ガラスを熱処理して作製されている。これらの微結晶や微粒子をガラスマトリックス中に閉じこめる方法としては、ガラスの結晶化法のほかには、スパッタリング法によるガラス薄膜法<sup>2)</sup>やイオン注入法<sup>3)</sup>がある。だが、これらの方法は、まだ一般的でなく、高額な機器が必要であり実用的とはいえない。そこでゾルーゲル法を利用すれば、比較的容易に、高額な機器を必要としないで種々のセラミックスやガラスを合成できる。また、ゾルーゲル法の特徴を活かすことで、種々の半導体や貴金属微粒子をドーブしたガラスの作製が可能であり、非線形光学ガラスの研究を進めるうえで多くの材料を提供でき、更に、実際的な応用も可能であり注目すべき方法と言えよう。そこで、今回は金微粒子含有ガラスをゾルーゲル法での作製を試みた。

## 2. 実験方法

### 2-1. 試料の作製

ゾルの調整は野上ら<sup>4)</sup>の二段階加水分解法を用い、以下のように作製した。

#### (1)ゾルの作製

原料には生地ガラスのシリカガラスの原料としてテトラエトキシシランSi(O<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>を用い、金源として塩化金酸または塩化金酸ナトリウムを用いた。まず、モル比でSi(O<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>1モルに対して1:1:0.0027モルのH<sub>2</sub>O、C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH、HClの混合溶液にSi(O<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>を滴下し1時間攪拌し、Si(O<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>を部分加水分解した後、Si(O<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>1モルに対して4:1:0.011モルのH<sub>2</sub>O、C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH、HClまたはNH<sub>4</sub>OHの混合溶液で加水分解した後、水で溶解した塩化金酸または塩化金酸ナトリウムを

ガラス状態で金として0.1 mol%になるように加え、室温で1時間攪拌した。

### (2)乾燥ゲルの作製

その後、攪拌均質化した溶液を1 mm φの孔をあけたテフロンコンテナにそそぎ入れ、図-1の条件の温度に調節した乾燥器の中で乾燥した。

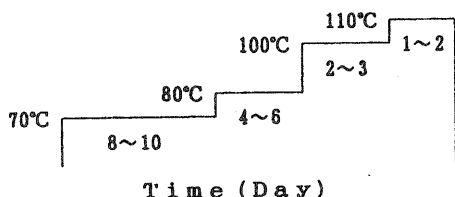


図-1 ゲルの乾燥温度プログラム

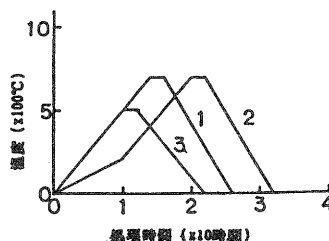


図-2 乾燥ゲルの熱処理プログラム

### (3)乾燥ゲルの熱処理

乾燥ゲルの熱処理は図-2の条件でプログラム昇温装置付電気炉で行った。

作製した試料は表-1のとおりであった。

表-1. 作製した試料の組成と処理温度

試料番号	第二段階触媒	金源物質	乾燥終了温度 (°C)	熱処理パターン
1	NH <sub>4</sub> OH	NaAuCl <sub>4</sub>	80	1
2	NH <sub>4</sub> OH	NaAuCl <sub>4</sub>	100	1
3	NH <sub>4</sub> OH	NaAuCl <sub>4</sub>	110	1
4	NH <sub>4</sub> OH	NaAuCl <sub>4</sub>	110	3
5	NH <sub>4</sub> OH	HAuCl <sub>4</sub>	110	1
6	HCl	HAuCl <sub>4</sub>	110	1
7	HCl	HAuCl <sub>4</sub>	110	2

### 2-2. 光吸収スペクトルの測定

乾燥ゲルやガラス試料の光吸収スペクトルは自記分光光度計を用いて200 nmから800 nmの範囲で測定した。

### 2-3. X線回折測定

乾燥ゲルやガラス試料はX線回折装置を用いて、管電圧40 kV、管電流50 mAでCu K $\alpha$ 線を使用して測定した。

### 2-4. 非線形感受率の測定

乾燥ゲルやガラス試料は縮退四波混合測定装置を用いて、非線形感受率 $\chi^3$ を測定した。

## 3. 結果および考察

乾燥ゲルはX線回折によると非晶質特有のハローパターンを示すだけであった。(図-3)加熱処理したガラスのX線回折パターンは乾燥ゲルとほとんど同じく基本的に非晶質のハローパターンを示すが $2\theta = \text{約} 3.8^\circ$ と $\text{約} 4.4^\circ$ に結晶析出による微弱な回折ピークが見られた。(図-4)このピークはハナワルト法から立方晶のAuと同定でき、 $2\theta = \text{約} 3.8^\circ$ のピークが(111)であり、 $2\theta = \text{約} 4.4^\circ$ のピークが(200)と帰属できた。乾燥して得られたゲルは乾燥終了温度が

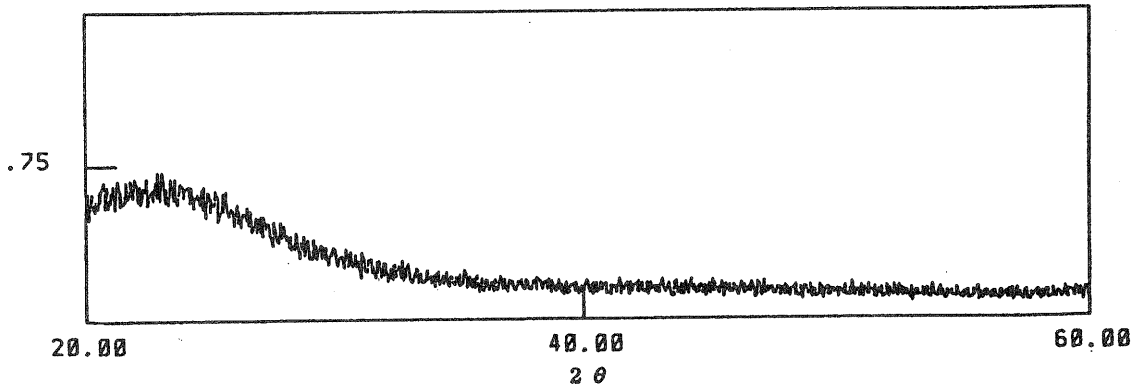


図-3 乾燥ゲルのX線回折パターン

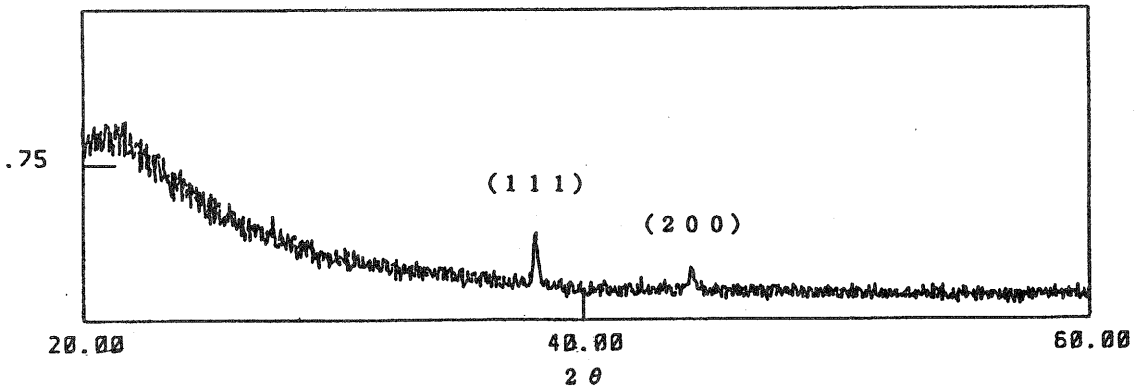


図-4 加熱処理後のガラス試料のX線回折パターン

低いほど黄色に着色し乾燥終了温度が高くなるほど退色が進んだ。(図-5) この黄色は金源として加えられた塩化金酸イオンの  $Au^{3+}$  イオンに基づくものであり、乾燥温度が高くなるほど、ゲル中の  $Au^{3+}$  イオンが減少したものと考えられる。また、加熱処理をしたガラスにはこの吸収ピークがなく、 $Au^{3+}$  イオンは消滅したものと考えられる。

また、加熱処理したガラスの光吸収スペクトルは第二段階触媒、金源物質、乾燥ゲルの乾燥温度および加熱処理のパターンにより、変化した。乾燥終了温度の違いによる熱処理後のガラスの光吸収スペクトルのピークは乾燥終了温度が高いほど短波長側にシフトして

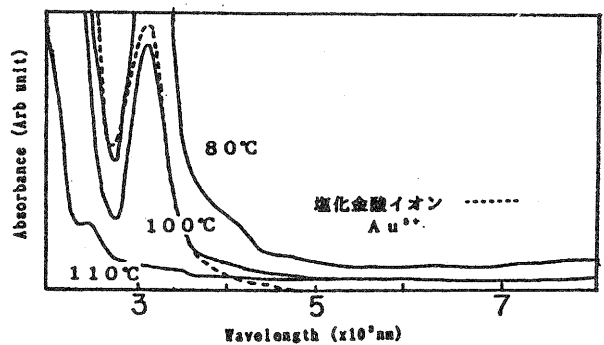


図-5 乾燥終了温度の違いによる乾燥ゲルの光吸収スペクトルの差

いる。(図-6) また金源として添加する物質による熱処理後のガラスの光吸収スペクトルのピークは塩化金酸が塩化金酸ナトリウムより低波長側へシフトし、吸収強度も弱くなっている。(図-

7) 熱処理温度は500、700、900℃を行ったが、900℃では原型をとどめない状態まで粉末化し、結晶化した。加熱温度が変化してもピーク位置は変化せず、加熱温度が高くなるほど吸収強度が強くなった。(図-8) また昇温パターンの違いにより昇温時間の長いパターン時に光吸収スペクトルのピークが約650nm付近にシフトした。(図-9)

Turkevich<sup>5)</sup>によれば、金コロイドによる吸収スペクトルのピークは金粒子の粒子径が大きくなると長波長側へシフトし、赤色ないし赤紫色の発色(500nm付近に吸収を持つ)は粒子径が約100nmまでとしている。これから、これらの試料の金の粒子径は乾燥終了温度が高くなるほど小さくなり、金源として塩化金酸ナトリウムを使用した方が小さくなり、昇温時間が短いと小さくになると考えられる。そこで520nm付近と650nm付近にピークのある試料-3と-7について金粒子の粒径をX線回折法で得られた回折ピークの半価幅とScherrerの式から求めた。それぞれの試料の金粒子の粒径は約52nmと約250nmであり、Turkevichの結果と一致した。

作製した乾燥ゲルや加熱処理したガラスを縮退四波混合測定装置で $\chi^3$ を測定したがいずれの試料ともシグナルは観測されなかった。これは非線形性に関与する金粒子の粒子径が数nm程度と言われており、今回作製した乾燥ゲルやガラス中の金粒子の粒径が数十nm以上であったためと考えられる。

#### 4. まとめ

1. ゴルゲル法により金微粒子含有ガラスは作製できた。
2. 作製時の条件(乾燥温度、金源物質の種類、加熱処理等の昇温条件など)により金微粒子の

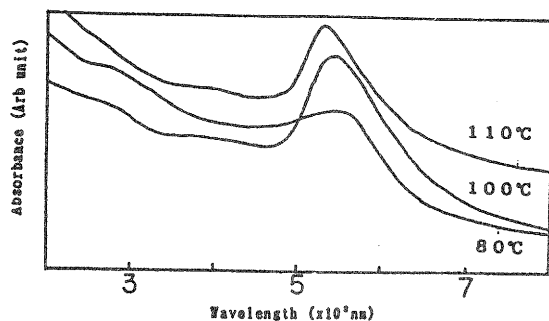


図-6 乾燥終了温度の違いによるガラス試料の光吸収スペクトルの差

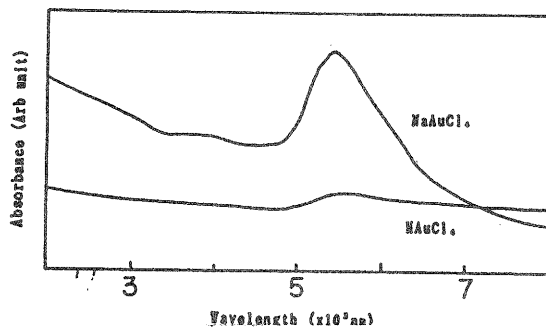


図-7 金源物質の違いによるガラス試料の光吸収スペクトルの差

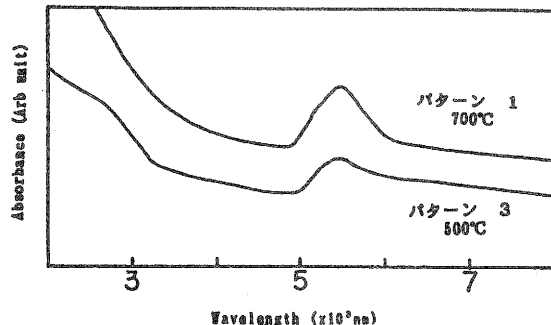


図-8 熱処理温度の違いによるガラス試料の光吸収スペクトルの差

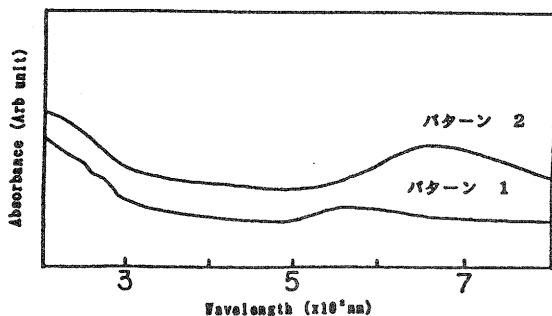


図-9 熱処理パターンの違いによるガラス試料の光吸収スペクトルの差

粒径が影響することが分かった。

3. 今回、作製した金微粒子含有ガラスは金微粒子の粒径が数十nm以上であったため、非線形性は持たなかった。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたって御指導をいただいた小島一男研究参与（立命館大学理工学部助教授）に感謝します。

## [参考文献]

- 1) R. K. Jain, R. C. Lind, J. Opt. Soc. Am., 73, 647-53 (1983)
- 2) H. Nask, K. Tunemoto, Y. Tokumitsu, Y. Osaka, Jpn. J. Appl. Phys., 28, L862-64 (1989)
- 3) M. Nogami, Y. Zhu, Y. Tohyama, K. Nagasaka, J. Am. Ceram. Soc., 74, 238-240 (1991)
- 4) K. Fukumi, A. Chayahara, K. Kadono, T. Sakaguchi, Y. Horino, M. Miya, J. Hayakawa, M. Satpi, Jpn. J. Appl. Phys., 30, L742-744 (1991)
- 5) J. Turkevich, Gold Bull., 18, 125-131 (1985)

# ゼオライト機能性材料の開発 (研究連携推進事業)

技術第二科 前川 昭 Akira Maegawa  
松本 价三良 Yoshisaburou Matsumoto

あらまし：ゼオライトはアルミノケイ酸塩化合物で、その結晶水は100 付近の低温加熱により放出され水蒸気になることから沸石と言われている。結晶水を包蔵している細孔は結晶水を失っても構造を保っているため、いろいろな気体分子を吸着する。これに他の原料を水と混練、静置および焼成することにより、ゼオライトが発泡剤、バインダーになり多孔質セラミックスを形成する。この方法はその過程が単純で、かつ省エネルギーである。また、原料においても、利用範囲の限られた天然ゼオライトや滋賀県内に産出する未利用資源を活用するため、これらの資源の有効利用の範囲が拡大できる。本研究ではゼオライトと県内産未利用原料を用いた多孔質セラミックスを作製し、その機能性の調査を目的とし、本年度は天然ゼオライトや県内産未利用原料の特性を調査した。その結果、ゼオライトや長石質、粘土質資源についてその特性（含水率、粒度分布など）を明らかにした。

## 1. まえがき

近年、機能性材料の開発が盛んに行われているが、その中でも多孔質材料がその一つとして注目されている。このことは多孔質材料が化学工業、生化学工業、水処理施設などの分野に広く使用されているためである。多孔質の機能は、細孔の径、分布、形状等に依存し、最近では、細孔の物理的、化学的性質を精密に制御して、化学物質の分離や吸着、精製、イオン交換、触媒作用、化学反応、化学合成等に利用するために研究されている。

一方、現在の環境汚染は従来の工場や事業場の排水処理装置で除去可能な有機性汚濁物や重金属などから活性炭やイオン交換樹脂を使用するトリクロロエチレンなどの化学物質や窒素、リン除去対策の問題に変化している。このため、水質浄化用の活性炭が多用されているが、その再生使用には問題が多く、また強度などの物理的性質にも欠点が多いと言われている。

多孔質セラミックスは活性炭などの有機質多孔体と比較して、高温での使用が可能であり耐有機溶媒性、高強度、高硬度をもつのが特徴である。しかしながら、この分野に関して現在のところ系統的に扱われた報告は少ない。そこでゼオライト機能材料の開発の前段階として、天然ゼオライトや副資材となる県内産資源の特性評価を行った。

## 2. 実験方法

今回調査した県内産資源として石灰岩、珪長石、下水道活性汚泥焼成灰、琵琶湖底質などを用いた。採取した原料を表-1に、採取地点を図-1に示した。琵琶湖底質の採取についてはコアサンプラーを用い柱状試料を採取し、表層から約30cmまでを調査試料とした。また、天然ゼオライ



トとしては栃木県大谷産のものを用いた。湿試料については室温で乾燥した。その後振動ミル（HEIKO 製作所製）で粉碎した。

特性評価項目として含水率、強熱減量、鉱物組成、化学組成、粒度分布を測定した。

### 2-1. 含水率、強熱減量

含水率、強熱減量は底質調査法により測定した。

### 2-2. 鉱物組成

鉱物組成は（株）理学電気ガイガーフレックス型X線回折装置を用いて、電圧40kV、電流30mA、CuK $\alpha$ で2°から60°の範囲を走査速度4°/minで測定した。また、測定結果はハナワルト法で同定した。

### 2-3. 化学組成

化学組成は（株）理学電気3270型蛍光X線装置を用い、ガラスビート法で測定した。

### 2-4. 粒度分布

粒度分布は（株）セイシン企業オクタゴン200型電磁振動ふるい分け器を用いて、1000、300、150、75 $\mu$ mのメッシュ径のふるいで分級し、重量法で測定した。

## 3. 結果および考察

### 3-1. 含水率、強熱減量

含水率と強熱減量の結果を表-2に示す。含水率は琵琶湖底質の内、北湖で採取した

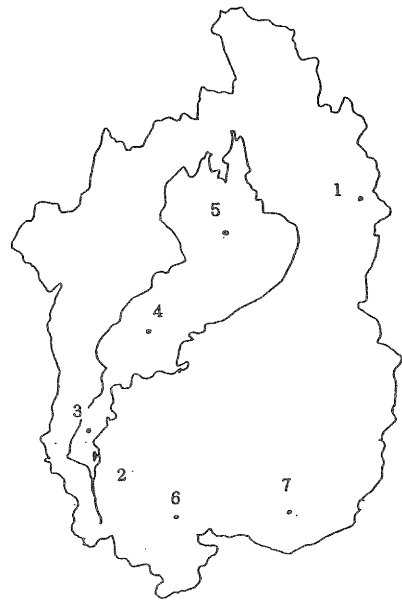
試料が14.6、12.1%と高い値を示したが、その他の試料は1%未満から3%であった。強熱減量は粘土鉱物を含有する底質などが有機物を多く含んでいた。

### 3-2. 鉱物組成

鉱物組成の結果を表-3に示す。石灰岩以外は石英や、長石を主成分とするアルミノケイ酸塩鉱物であった。また、大谷石の主成分は天然ゼオライトに一種であるクリノプチロライトであった。

### 3-3. 化学成分

化学成分は底質と珪長石のみ測定した。その結果を表-4に示す。珪長石はSiO<sub>2</sub>、底質がSi



- 1. 石灰岩 伊吹町
- 2. 焼成灰 草津市矢橋
- 3. 底質A 琵琶湖 唐崎-伊佐々川中央
- 4. 底質B 琵琶湖 南比良-長命寺中央
- 5. 底質C 琵琶湖 今津-長浜中央
- 6. 珪長石 信楽町
- 7. 頁岩 甲賀町

図-1 県内産資源の採取地点

表-1 原料の含水率および強熱減量

原料名	含水率 (%)	強熱減量 (%)
石灰岩	<1.0	<1.0
焼成灰	<1.0	1.4
底質A	2.7	5.1
底質B	14.6	6.5
底質C	12.1	6.7
珪長石	<1.0	<1.0
頁岩	1.8	1.9
大谷石	<1.0	<1.0

O<sub>2</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が主成分であった。琵琶湖底質のFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は採取した3地点で比較すると採取地点が北のものほど含有量が高かった。

表-2 原料の鉱物組成

原料名	鉱物名
石灰岩	カルサイト
焼成灰	石英、未同定物質
底質A	石英、長石、S、B、C、K、雲母
底質B	石英、長石、S、B、K、雲母
底質C	石英、長石、S、B、C、K、雲母
珪長石	石英、長石、雲母
頁岩	石英、長石、雲母
大谷岩	クリノプチロライト、石英、長石

S：スメクタイト、 B：パーミキュライト、  
C：クロライト、 K：カオリナイト

表-3 原料の化学組成 (wt%)

	底質A	底質B	底質C	珪長石
SiO <sub>2</sub>	61.40	56.73	57.65	75.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.44	18.07	15.93	12.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.59	6.54	7.20	0.97
TiO <sub>2</sub>	0.65	0.69	0.78	0.07
CaO	0.54	0.51	1.08	0.07
MgO	1.08	1.40	1.69	0.73
K <sub>2</sub> O	0.91	0.90	0.87	0.11
Na <sub>2</sub> O	0.11	0.20	0.33	3.48
MnO	0.11	0.20	0.33	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	1.17	0.24	-
TOTAL	98.93	98.90	98.70	99.53

### 3-4. 粒度分布

ふるいによる粒度分布の結果を図-2に示した。底質以外の原料は75 μm以下に約50%から70%分布するが底質は75 μmから1000 μmまでの範囲に広く分布した。

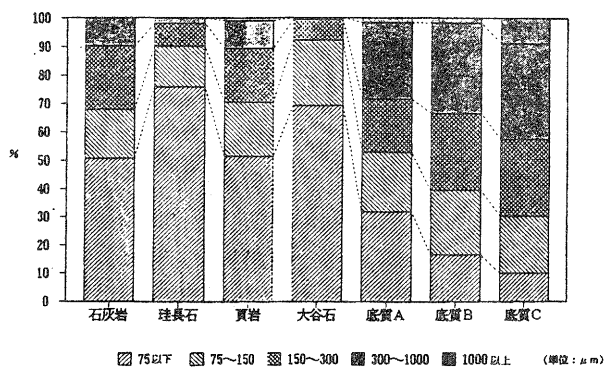


図-2 電磁電動ふるい器による粉度分布

## 4. おわりに

この研究は、研究の一部を龍谷大学の小泉教授、後藤助教授に委託し、本年度より研究連携事業として開始した。

本年度はゼオライト機能性材料の開発の前段階として、原料となる天然ゼオライトと県内産資源の特性評価を行った。次年度以降は機能評価を繰り返し、機能を左右する因子である気孔径、気孔量の制御の応用技術の研究を行う予定である。

工業技術センター研究報告

第 7 号

平成5年7月 印刷発行

発行 滋賀県工業技術センター

滋賀県栗太郡栗東町上砥232

TEL (0775) 58-1500

印刷 (有)森田印刷

蒲生郡蒲生町上南313-1