

ISSN 0914-3750

REPORTS  
OF  
THE  
INDUSTRIAL  
RESEARCH  
CENTER  
OF  
SHIGA  
PREFECTURE

1993 研究報告

滋賀県工業技術センター

# 目 次

## 研究概要

- 電子機器の電磁環境評価法の研究（第五報）…………… 1 - 1  
木村昌彦、堤 誠、澤田 浩、山元伸一
- 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…………… 2 - 1  
櫻井 淳
- 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（第三報）…………… 3 - 1  
小川栄司、中島 孝、井上和夫、亀井且有、桑田一仁、黒川博行
- ハフ変換の量子化誤差評価に基づく線分抽出法…………… 4 - 1  
月瀬寛二、藤原良一、壺井芳昭
- 移動部品把持のためのロボットの制御…………… 5 - 1  
深尾典久
- シリコンモノマーのプラズマ重合がフィルム-金属蒸着膜間の接着性に及ぼす影響について… 6 - 1  
中村吉紀、松川 進、岩井順一、堀井滋夫
- 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製条件に関する研究…………… 7 - 1  
前川 昭
- 高圧下における酵素反応に関する研究（第二報）…………… 8 - 1  
松本 正

## 技術開発報告

- セラミックス分野における技術計算ソフトの開発（第一報）…………… 9 - 1  
横井川正美
- デザイン手法の高度化に関する研究（第五報）…………… 10 - 1  
野上雅彦

## 実験レポート

- 光センシング技術による表面粗さ判定法の研究（第三報）…………… 11 - 1  
河村安太郎
- 高分子複合材料の非破壊評価に関する研究…………… 12 - 1  
井上栄一
- ゼオライト機能性材料の開発…………… 13 - 1  
前川 昭
- 機能性微粒子の利用技術に関する研究（第一報）…………… 14 - 1  
阿部弘幸
- 強化繊維と耐熱性エンブラの複合化の研究…………… 15 - 1  
那須喜一
- 自然素材製品の開発（第一報）…………… 16 - 1  
山下誠児

## 資 料

- 地域区分別に見た本県製造業の概要…………… 17 - 1  
児島聖治

# 研究報告

# 電子機器の電磁環境評価法の研究（第五報）

## 電波吸収材の試作と特性評価に関する研究（2）

技術第一科	木村 昌彦	Masahiko Kimura
京都工芸繊維大学	堤 誠	Makoto Tsutsumi
	澤田 浩	Hiroshi Sawada
日光化成(株)	山元 伸一	Shin-ichi Yamamoto

あらまし：高度情報化社会の今日、電波利用の多様化、ビルの高層化等によって起こ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、炭素粒子を混入した損失誘電体材料により、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、単層の均一材料でも、その表面に複合化した周期構造を装荷することによって、2GHzの帯域幅で、減衰量-20dB以上のものが得られた。また、炭素粒子の配合比を適切に調整することによって、さらに薄型化が可能となった。

### 1. まえがき

衛星通信、移動体通信等高度情報化がめざましく進展している今日、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こり、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、機器の誤動作がそのまま人命に関わるなど、重大な要素を含んでいる。したがって、こういった電磁波環境の悪化への対応として、これらの対策技術の確立、環境整備が急務であり、測定設備としての電波暗室のニーズも高まってきている。しかし、こうした場面で用いられる電波吸収体は、まだ種類、用途が限られており、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パーソナルハンディホン（PHP）や工場内あるいはオフィス内無線LAN（構内情報通信網）の環境づくりにおいても、高性能電波吸収体の開発が強く望まれている。

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、炭素微粒子をエポキシ樹脂に混入し、損失誘電体材料として構成したものを作成して、材料の配合比による性能改善とともに、材料表面の構造的な違いによる特性向上の検討を行った。

### 2. 試作材料

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損失源となる炭素粒子を加圧成形して作製した。

まず最初に、どれくらいの炭素含有量で、どの程度の誘電率を示すのか把握するため、4種類のテストピースにより予備実験を行って特性の目安をつけたあと、炭素量3.25vol%でガラスバルーンの量が違うものを3種類、そしてここを中心にその前後に均等に炭素量を増減したものをそれぞれ2種類ずつ、さらにそのまた前後に1種類ずつ、合計9種類の試作テストピースを作製した。

したがって炭素粒子の配合比率が1.5～5.0vol%まで変えたものができ、これらのテストピースにより50MHzにおける誘電率と誘電正接を測定した。その結果を図1に示す。

図中で、同じ炭素含有率でも複数のプロットがあるのは、ガラスバルーンの配合比率を変えているためである。このグラフからは、炭素含有率が1.5vol%から5vol%までの範囲において、誘電率は指数関数的に変化し、2.8から8.0まで調整できることが分かる。また、誘電率の微調整ぐらいなら炭素粒子の含有量によらなくても、ガラスバルーンの増減でも可能なことを示している。

なおこれらの材料の導電率[S/m]は、直流では $10^{-13}$ オーダーと非常に小さいが、10GHzぐらいのマイクロ波帯では0.1~0.2前後となり、電波吸収体として都合の良い値になる。<sup>11)</sup>

### 3. アンテナによる測定

#### 3-1 平面電磁波が試料に垂直に入射する場合

図2にアンテナを使った測定ブロック図を示す。この測定は、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。ここでは測定帯域をX帯の8.0~12.4GHzとし、送受信アンテナ間距離26cm、アンテナ試料間距離165cmで行った。

#### 3-2 電磁波が斜入射する場合

送受信アンテナを、それぞれ垂直とのなす角を $30^\circ$ または $45^\circ$ に設置し、試料表面に電磁波が角度をもって入射した場合の反射特性を測定した。

また、ホーンアンテナを試料の側面にセットし、ここから入射した電磁波が周期構造を介して、どれだけ表面に放射、散乱していくかを測定した。

### 4. 実験結果と考察

#### 4-1 表面周期構造による吸収特性の向上

一般的に、吸収体の特性を上げるため、材料中で徐々に配合を変えて傾斜特性を持たせたり、特性の違った材料を複数組み合わせさせて多層構造にしたりするが<sup>(2)</sup>、単一材料でも、その表面に周期的な凹凸を持たせてやると、反射減衰特性が向上することがこれまでの研究で分かった。<sup>(3)</sup> 前回の報告<sup>(4)</sup>では、材料に炭素繊維を用いたもので実験を行ったが、今一つ満足のいく特性は得られなかった。そこで、今回は炭素粒子を損失源とした材料により開発を試みた。

まず、大きさ50x100cmで1枚1cmの厚さの試作材

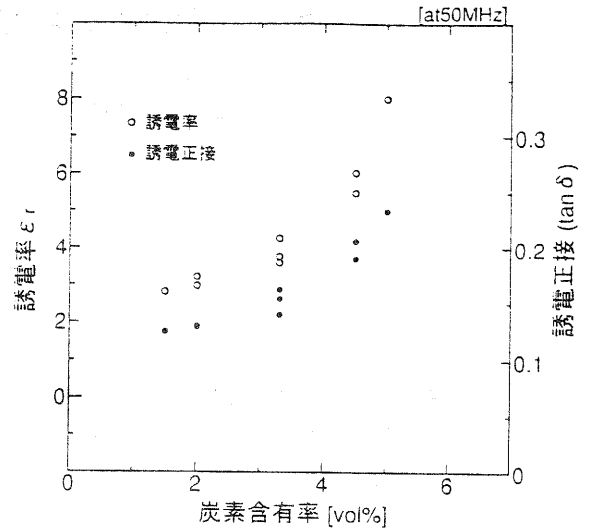


図1 炭素含有量に対する誘電率・誘電正接特性

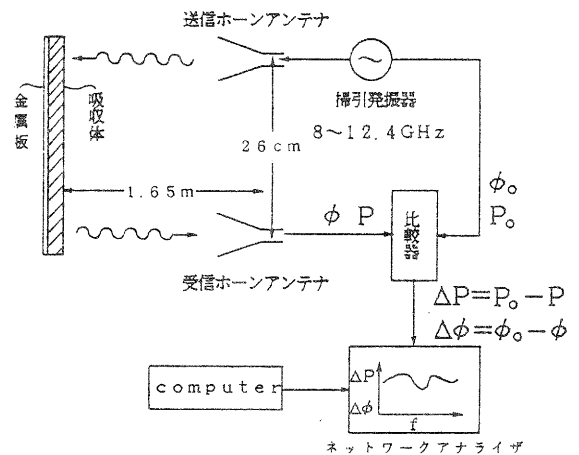


図2 アンテナによる測定ブロック図

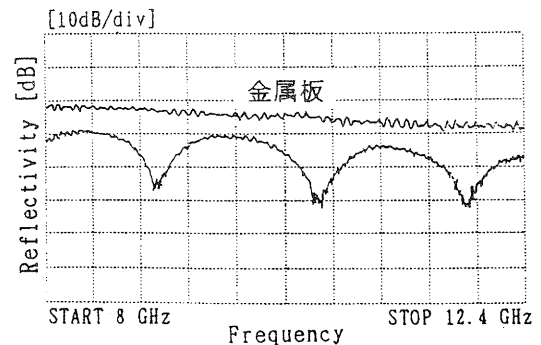


図3 平板状吸収体の吸収特性

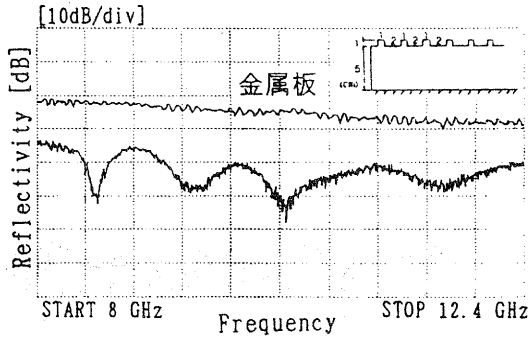


図4 単一周期構造による吸収特性

料を5枚重ねて図2の回路により、平板の状態垂直射入特性を測定した結果を図3に示す。これを見ると、厚さの影響を受け、定在波特性が現れており、部分的には300MHz程度の帯域幅で、約-15dBの減衰が得られるが、まだこれでは電波吸収体としては不十分である。そこで、その表面に同じ材料で矩形の凹凸を装荷することによって、図4のように、特性が改善できる。この時の凹凸の状態は、突起の幅、高さとも1cmでピッチ3cmである。この特性を見ると、平板では部分的に-15dBが得られるだけであったのが、単一周期の周期構造を装荷してやるだけで、部分的には-20dB、X帯全域で-10～-15dBが確保されているのが分かる。このように特性が改善されるのは、空間から入射してきた電磁波が表面の凹凸により吸収体内部に引き込まれ、これが導波モードに変換されて吸収体内を横方向に伝搬することになり、材料の損失分で熱に変換され消滅するためと考えられる。

そして、さらにその周期構造を図5のように2種類のピッチで複合化してやると、すなわち、ある間隔の2個の突起を1組(ピッチp)とし、このペアを別の異なる間隔(ピッチq)で材料表面に配置することにより、図6(a)のように9.5から11.5GHzの範囲で、平均10dB特性が改善され、この帯域では-20dB以上の減衰量が得られ、かなりの広帯域化が可能となる。この場合の周期構造は、突起の高さd、幅wは図4の単一周期構造の場合と同じ1cmで、小さいピッチpを2cm、大きいピッチqは5cmとしている。しかしながら、この場合凹凸より下のベースの部分の厚みが5cmあり、とても薄型とはいえない。

そこでさらに配合を細かく調整したところ、ベースの厚みが1cmで、図6(b)のような特性のものが得られた。これを図6(a)のベース厚が5cmの場合と比較すると、材料配合比が異なるが、10GHzぐらいまでは大きな差はなく、11GHz以上の帯域では、薄板の方が5～8dBほど特性が悪くなっている。しかし、薄くなった分、重量が軽くなるので、この場合だと約1/5になり、若干特性の低下はあるものの、軽量化のメリットはかなり大きいと考えられる。もともと密度は $0.58\text{g/cm}^3$ と水に浮く軽さで、ゴムフェライトの1/6程度、フェライトタイルの1/10以下の重さである。

そこですらに配合を細かく調整したところ、ベースの厚みが1cmで、図6(b)のような特性のものが得られた。これを図6(a)のベース厚が5cmの場合と比較すると、材料配合比が異なるが、10GHzぐらいまでは大きな差はなく、11GHz以上の帯域では、薄板の方が5～8dBほど特性が悪くなっている。しかし、薄くなった分、重量が軽くなるので、この場合だと約1/5になり、若干特性の低下はあるものの、軽量化のメリットはかなり大きいと考えられる。もともと密度は $0.58\text{g/cm}^3$ と水に浮く軽さで、ゴムフェライトの1/6程度、フェライトタイルの1/10以下の重さである。

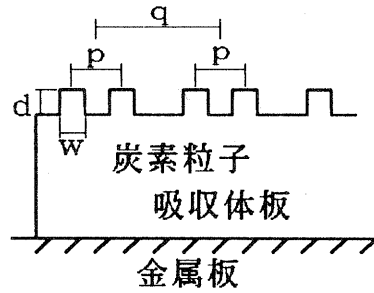
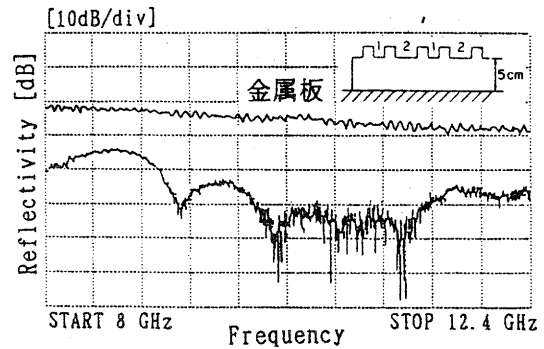
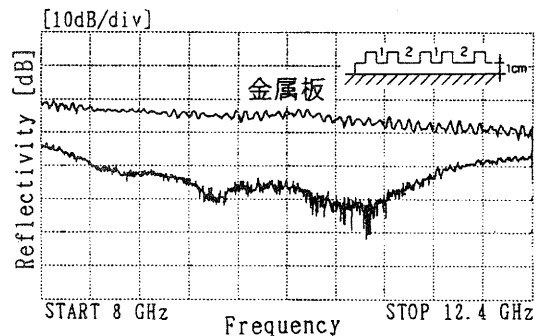


図5 表面に装荷する周期構造



(a) 厚板の場合



(b) 薄板の場合

図6 複合周期構造による吸収特性

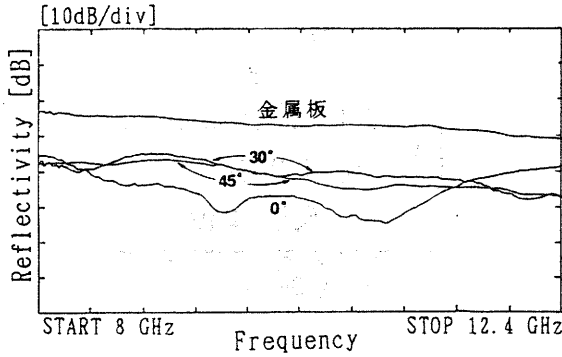


図7 反射減衰特性の角度依存性

#### 4-2 反射減衰特性の角度依存性

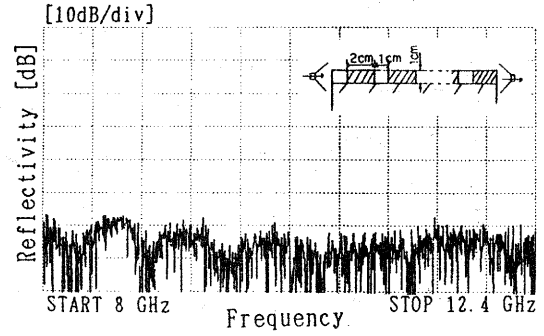
ベース厚 1cm の表面に複合周期構造を装荷した材料に、垂直とのなす角  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  で TE 波を入射させて、その反射特性を見た。図7がその結果である。 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  とともに大きな差はなく、X帯全域で平均して 15dB の減衰を示している。ただ、 $0^\circ$  (垂直入射) に比べると、 $8.5 \sim 11.5\text{GHz}$  の帯域で  $10 \sim 15\text{dB}$ 、特性は低下している。

次に、4-1 項で述べた、空気中から入射した電磁波が吸収体内で導波モードに変換され減衰するというを確認するため、やや吸収特性の低い材料を用いて、金属板の上に厚さ 1cm、幅 2cm の試作吸収体を 1cm の間隔で並べ、その間には炭素粒子を含まないガラスバルーン混入エポキシ樹脂を挟んだ構成のものを被試験体とした。ここで吸収特性のやや低い材料を使ったのは、減衰しすぎて測定しにくくなるのを防ぐため、周期構造が異なるのもそのためである。そして、この側面から入射した電磁波が、その上面方向の空間にどの程度放射されているか測定した。

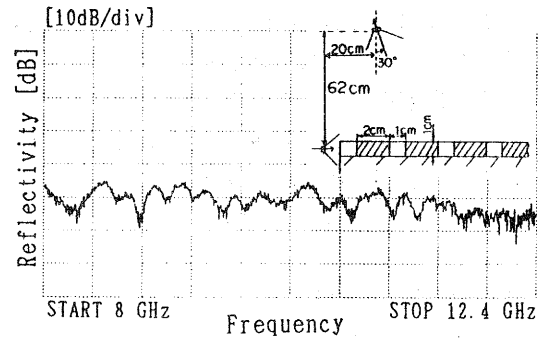
吸収体端面の片側側面から入射し、反対側側面で受信したときのレベルは図8 (a) であり、入射信号は吸収体内で減衰してしまい、反対側にはほとんど到達していないことが分かる。次に、この吸収体に同じように電磁波を入射し、図8 (b) のようなアンテナ配置で、吸収体上面に放射されてくる電磁波を測定した。これをみると、図8 (a) に比較して全帯域で平均  $10 \sim 15\text{dB}$  受信レベルが上がっていることが分かる。これは、電磁波が吸収体の周期構造上面に放射されているものだと考えられる。

#### 4-3 周期構造の解析

今回試作した電波吸収体の表面形状は矩形であるが、解析を容易にするため、厚さを半無限で、吸収体表面の形状を正弦波状のものと考えて、誘電率、導電率および正弦波の山から谷までの深さをそれぞれ 5.0、0.1 S/m、2.0cm に選び、周期構造のピッチ P を変化させて計算した<sup>(1)</sup> 結果が図9である。ピッチを 2cm、3cm、4cm と変化させた場合を表しているが、いずれもある周波数で大きく減衰する帯域がある。これは、入射電磁波の自由空間での波長がそれぞれのピッチに一致する周波数において、高次モードの電磁波が発生し、その影響で吸収特性が急激に悪化することが分かる。



(a) 周期構造方向への伝搬



(b) 周期構造表面からの放射

図8 周期構造における電磁波の伝搬と放射

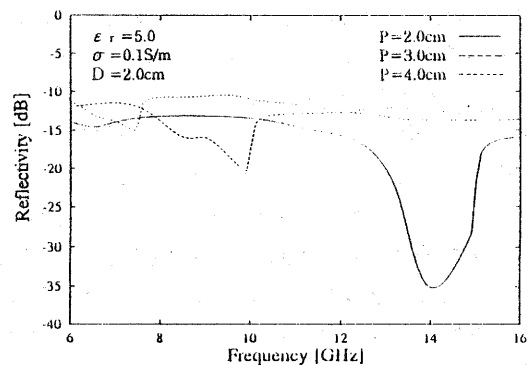


図9 反射減衰特性のピッチ依存性

ここでは、周期構造の山から谷までの深さDを2cmとしたので、これが波長に相当する15GHz付近で大きなピークをもっているが、谷の深さを変えることによりこのピークは周波数軸上を可変できる。

## 5. むすび

電波吸収体の研究そのものは、古くからなされており、その歴史は長い。しかし、近年になって材料技術が進歩するにともない、新しい形態、構造の吸収体の開発が活発化してきている。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行ったところ、次の結果が得られた。

- (1) 炭素粒子を混入した、誘電性材料による平板電波吸収体では、帯域幅300MHzで-15dBの減衰量しか得られないが、この表面に周期構造を装荷してやることにより、X帯の全域で-15dBが得られ、部分的には-20dBのものが可能である。
- (2) 吸収体表面の周期構造を単一のピッチではなく、二種類のピッチを複合化した構造にすると、さらに広帯域化でき、2GHzの幅で-20dBの吸収特性が得られる。
- (3) 11GHz以上を重視しないのであれば、配合比調整により(2)の場合の約1/5に薄型化、軽量化できる。
- (4) 今回エポキシ樹脂を使用したのが、さらにコスト低減を図る場合、あるいは耐候性を持たせる場合は樹脂そのものの検討も必要かと思われる。

なお、ピッチを二重化した表面周期構造をもった電波吸収体に関して、3者により特許申請を行った。

### [参考文献]

- (1) 西村, 澤田, 木村, 山元, 堤: "炭素微粒子を含むエポキシ樹脂を用いた電波吸収体", 電子情報通信学会技術研究報告 MW93-98(1993)
- (2) 清水 他監修, 電磁波の吸収と遮蔽, 日経技術図書 (1989)
- (3) 木村, 山元, 澤田, 堤: "炭素粒子を用いた電波吸収体に関する一考察", 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 G250(1993)
- (4) 木村, 堤, 西村, 山元, 吉川: "電子機器の電磁環境評価法の研究(第四報)", 滋賀県工業技術センター研究報告 (1992)



# 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

## 画像理解による画像処理技術の高度化

技術第一科 櫻井 淳 Atushi Sakurai

あらまし：画像処理技術を用いて、生産工程のより高度な自動化を行うためには、画像処理技術に人間の知識を組み込んだ画像理解の技術を導入することが有効であると考えられる。本研究では、画像理解の一手法である正則化法を用いて、ステレオ画像より対象物の3次元形状を認識する方法について検討を行った。ステレオ画像の対応点問題を視差に関するエネルギー汎関数の最小化問題として取り扱い、アニーリング法によりエネルギーを最小化させる方法を適用したところ、従来の方法では対応点の検索が困難な、画像においても、両画像の視差状態を求めることが可能であった。

## 1 まえがき

産業分野での自動化技術は、画像処理技術を中心に近年目ざましく発達して来ている。今後、これらの技術がさらに発達し、将来、ロボットに人間の役割を代行させるようにするには、外界の状況を正しく見る視覚機能に加え、状況を理解する認識機能や状況に適応して行動を行う判断機能を与える必要がある。

コンピュータを用いて対象物の三次元情報を得る方法は、レーザー光などを対象物に当て測定を行う能動的方法とカメラの画像のみを用いる受動的方法とに大きく分けられる。受動的方法の代表的な方法は、二台のカメラの画像の対応点より三角測量の原理を用いて対象物までの距離を求めるステレオ法である。ステレオ法は、測定する対象物に対して何ら影響を与えることなく、距離情報を得ることが出来るが、類似の対応点が複数存在する画像やノイズ等の影響によって情報の欠落している画像などにおいては、対応点の検索は困難な問題である。しかし、人間は、経験や学習により得た知識を利用して、容易に両画像の対応点を認識することができる。

そこで、本研究では、画像理解の第一歩として、ステレオ画像情報に知識情報を組み合わせた処理により、両画像間の対応点の検索を行い、もって対象物の3次元形状を認識する方法について検討を行った。

## 2 ステレオ法による立体視の原理

図1は、ステレオ法による立体視の原理を示したものである。二台のカメラの水平方向の基準線は、同一直線上にあると仮定している。カメラの焦点距離を  $f$ 、二台のカメラ間の距離を  $l$ 、対象物  $P$  の両カメラ画像上での投影点を  $x_r, x_l$  とすると、これらは、式 (1) の関係にある。従って、カメラから対象物までの距離  $Z_p$  は、式 (2) で与えられる。<sup>(1)</sup>

$$\frac{Z_p}{(Z_p + f)} = \frac{l}{l + (x_r - x_l)} \quad (1)$$

$$Z_p = \frac{f l}{x_r - x_l} \quad (2)$$

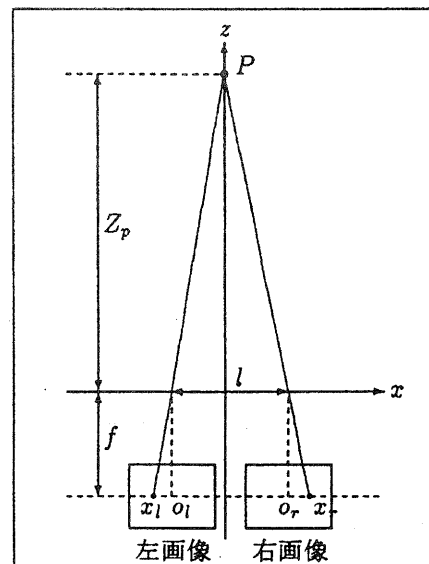


図1: ステレオ法による立体視

### 3 正則化

#### 3.1 正則化理論

画像処理においては、ノイズや光源の反射による画像情報の欠落や画像の複雑さなどの影響により、与えられたデータからだけでは解が一意に求まらないことが多い。正則化とは、このような画像情報に人間が持っている対象に関する何らかの知識情報を与えることにより、その画像条件下での最適解を導出する手法である。これは、ある適切な制約条件を用いて解の存在空間を制限することにより、解が求まらない不良設定問題 (ill-posed problem) を解の求まる良設定問題 (well-posed problem) に変える手法である。ステレオ法においては、対象物の表面が連続した面で構成されているという知識情報を、正則化法における制約条件として用いる。<sup>(2),(9)</sup>

#### 3.2 ステレオ画像の正則化方程式

視線が水平なカメラから得たステレオ画像では、3次元空間内の点は、左右の画像上で必ず同一走査線上に現れる。すなわち、左右画像の明るさをそれぞれ  $L(x, y)$ ,  $R(x, y)$ 、求める視差配列を  $D(x, y)$  とすると、左画像内の各点  $(x, y)$  に対応する右画像内の点は  $(x + D(x, y), y)$  となる。また、この時、対象物の表面は連続した面で構成されており、対象物までの距離は連続的に変化すると仮定すると、ステレオ画像の対応点問題は、式 (3) に示すように、両画像間の類似度を評価する第1項と、制約条件として与えた対象物の表面の滑らかさを評価する第2項とのエネルギー汎関数の最小化問題と考えることができる。ここで、 $\lambda$ は正則化パラメータであり、距離の滑らかさの制約条件を考慮する度合いを決める重み付け係数である。<sup>(4)</sup>

$$E = \int \int \{ [R(x + D(x, y), y) - L(x, y)]^2 + \lambda \left[ \left( \frac{\partial D(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial D(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] \} dx dy \quad (3)$$

### 4 エネルギー汎関数の最小化法

#### 4.1 アニーリング法

アニーリングは、いわゆる焼きなましのことで、物質を高温からゆっくり冷却して規則正しい結晶構造を造り出す温度制御の過程である。アニーリング法とは、このような物理系の過程に似せた方法でエネルギー関数を最小化する最適化手法である。<sup>(5),(6)</sup> アニーリング法のアルゴリズムを以下に示す。

```
現在の状態を  $S$ 、 $S$ のエネルギーを  $E(S)$ 、温度を  $T$ として、
状態  $S$ の初期状態としてランダム値を、温度  $T$ の初期値として十分高い温度を与える。
while ( $T > 0$ ) {
    状態  $S$ をランダムに変化させた状態  $S'$ を与える。
     $\Delta E = E(S') - E(S)$ ;
    if ( $\Delta E \leq 0$ ) {現在の状態を  $S$ から  $S'$ に遷移させる}
    else if { $P(T, \Delta E)$ の確率で現在の状態を  $S$ から  $S'$ に遷移させる}
    何度繰り返しても  $E(S)$ が小さくならない時  $T$ を減少する。
```

ここで  $P(T, \Delta E)$  は、状態を遷移する確率で、 $T$ に関しては単調増加関数、 $\Delta E$ に関しては単調減少関数であり、 $T = 0$  のとき  $P(T, \Delta E) = 0$  となる。

#### 4.2 エネルギー汎関数の最小化手法

エネルギー汎関数の最小化は、以下の条件のアニーリング法により、視差配列  $D(x, y)$  の状態を確率的に遷移させ行う。

- ステレオ法の簡易化のため、右目画像は対象物の正面方向からのカメラの画像、左目画像は対象物の左45度方向からのカメラの画像とし、視差配列  $D(x, y)$  の値は、対象物の高さを表すと考える。

- 視差配列  $D(x, y)$  の初期状態は、0 から対象物の最大高さまでのランダムな整数値とする。
- 視差配列  $D(x, y)$  の状態を遷移させる確率  $P(\Delta E, T)$  は、エネルギーの変化量  $\Delta E$  と温度  $T$  とにより、式 (4) で与える。

$$P(\Delta E, T) = \exp(-\Delta E/T) \quad (4)$$

- 初期温度  $T$  は十分に高く設定する。
- 前回のエネルギー値  $E_{old}$  に対し、指定回数の繰り返し計算を行なった後のエネルギー値  $E_{new}$  が 5 % 以上減少していない場合、 $T$  を一度に 1/2 減少させる。
- 計算の指定回数は、(画像面積 × 対象物の最大高さ) により与える。
- $\lambda$  は、アニーリングの計算の最初に、式 (5) により求める。

$$\lambda = \frac{\int \int \{ [R(x + D(x, y), y) - L(x, y)]^2 \} dx dy}{\int \int \{ (\frac{\partial D(x, y)}{\partial x})^2 + (\frac{\partial D(x, y)}{\partial y})^2 \} dx dy} \quad (5)$$

- アニーリング計算は、温度  $T$  の減少を行なっても、エネルギーの減少がほとんど起こらなくなった時点で終了する。

## 5 実験結果

本手法ので 3 次元形状の認識の効果を調べるため、以下の条件で実験を行った。

### 5.1 $\lambda$ を変化させた場合

$\lambda$  は、対象物までの距離の滑らかさの考慮の度合いを表す係数である。そこで、部分的に切断されたウエディングケーキ状の対象物の画像を用いて、 $\lambda$  の値の変化が結果に及ぼす影響を調べる実験を行った。図 2 に示す実験画像は、コンピュータにより合成した  $128 \times 128$  サイズの対象物モデルのランダムステレオグラム画像である。図 3 に、対象物の形状を復元した結果を示す。図 3 の画像の白色部は対象物の高さの最大を示し黒色部は最小を示す。

### 5.2 初期温度を変化させた場合

初期温度  $T$  は、解が局所的な最小値に陥らないように、十分大きく設定する必要がある。初期温度  $T$  の変化に対する影響を調べるため、図 2 の対象物のランダムステレオグラム画像を用いて、初期温度の設定を変えて行った実験結果を図 4 に示す。

### 5.3 ノイズのある画像

ノイズ等の原因で情報が欠落した場合の形状復元の効果を調べるため、図 2 の対象物のランダムステレオグラム画像に種々の割合のノイズを与えて行った実験結果を図 5 に示す。ノイズの % 値は、与えたランダムノイズの全面積面積に対する割合を示す。また、図 6 に、ノイズ除去の効果を調べるため、対象物までの距離の滑らかさの制約を強めて行った実験結果を示す。

### 5.4 形状変化の大きい対象物画像

大きな形状変化を持つ対象物画像に対する形状復元の効果を調べるため、高さ形状の高いウエディングケーキ状の対象物のランダムステレオグラム画像を用いて行なった実験画像を図 7 に示す。

### 5.5 テキスチャ変化の少ない画像

図 8 にテクスチャ変化の少ない対象物画像を示す。この画像では、両画像の各画素の対応点が 1 対 1 に決まらないため、前述の方法で実験を行うと図 9 の第 1 過程に示すような実験結果となる。この結果は、テクスチャの変化の現れる部分のみ距離情報が正しく抽出でき、変化の無い部分はまったく距離情報が求まっていない。そこで、テクスチャの変化の少ない画像に対しては、アルゴリズムを以下に示す 3 段階の過程に分け形状復元の処理を行った。実験結果を図 9 に示す。

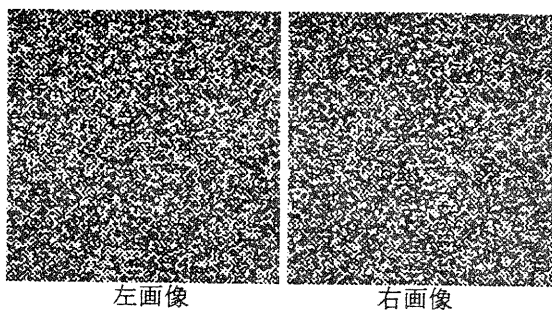


図 2: ウェディングケーキ画像

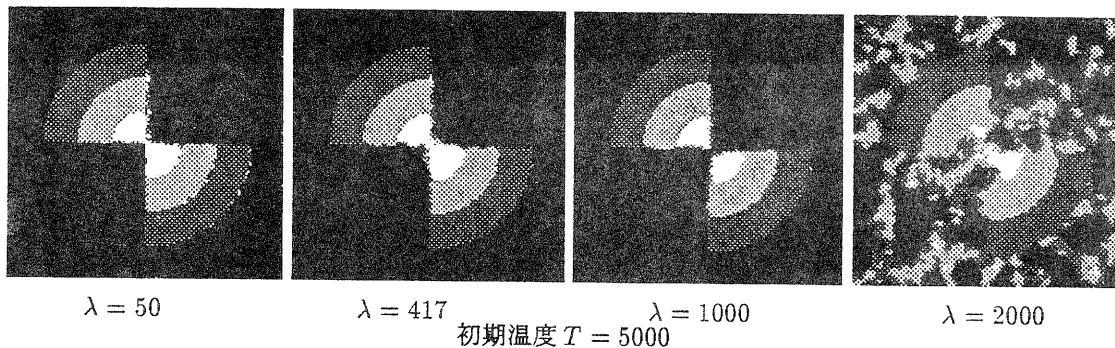


図 3:  $\lambda$  の値を変化させた場合の形状復元画像

- 第1過程** 通常の手法により形状を復元する。この時、対象物画像のテクスチャの変化する部分のみ、正しく形状抽出が行える。
- 第2過程** 着目している画素が、テクスチャの変化の少ないエリア内にあるために対応点が一意に決まらない場合は、その画素と同一走査線上で最も近いテクスチャの変化する部分の画素の視差値を、その画素の値として割り当てる。この時、状態を遷移し易くするため、一時的に温度を上げる。
- 最終過程** 再び、高い初期温度を設定し状態遷移の確率を高くするとともに、 $\lambda$  の値を大きくし滑らかさの制約を増し、第2過程で発生する形状の不連続部分を修正する。

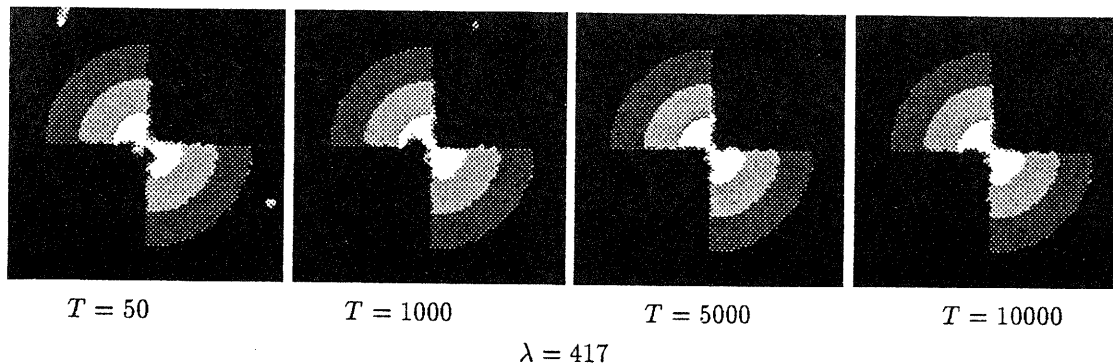


図 4: 初期温度を変化させた場合の形状復元画像

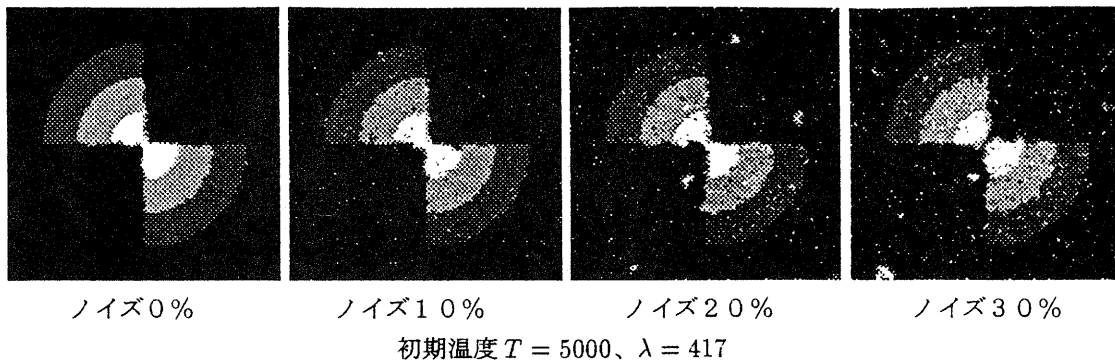


図 5: ノイズを与えた場合の形状復元画像

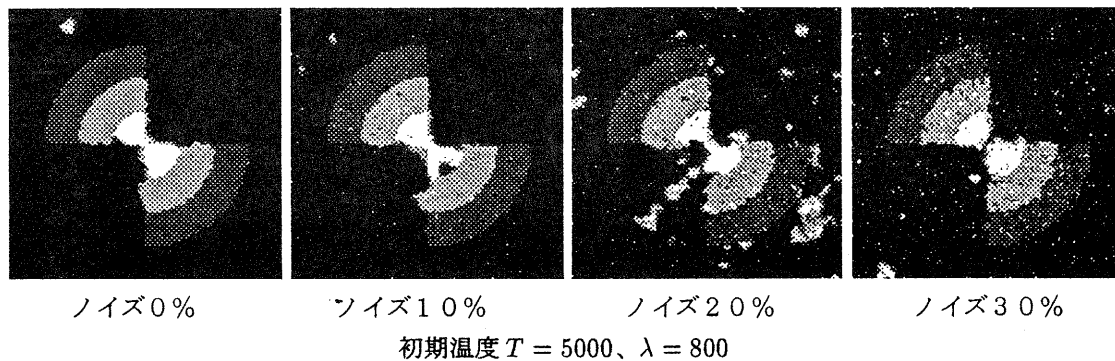


図 6: ノイズを与えた場合の形状復元画像 (滑らかさの制約を強化)

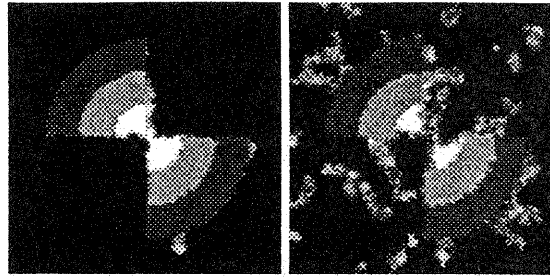
## 6 考察

### 6.1 $\lambda$ について

$\lambda$ は、エネルギー汎関数の最小化において、両画像間の各画素の対応性の評価と、対象物の距離の滑らかさの制約の評価とのどちらを重視するかを決める係数であるが、図3の結果に示すように、 $\lambda$ の値を小さく設定すると、両画像の間の画素の対応性は考慮されるが、隣接する画素との連続性があまり考慮されないため、隣接する画素が不連続な状態になる。これは、点在するノイズの除去が出来ないことを意味する。また、逆に $\lambda$ の値を大きく設定すると、隣接する画素の連続性は考慮されるが、両画像の各画素の対応性があまり考慮されないため、正しい距離情報が求められなくなる。すなわち、 $\lambda$ の値は、両画像の画素の対応性と隣合う画素の連続性の条件が均等に考慮されるように、エネルギー汎関数の第1項と第2項のエネルギー値がほぼ同じオーダーになるように設定するのが最適である。図3では $\lambda = 417$ が、この設定を行った場合の結果である。

### 6.2 初期温度について

初期温度は、状態がエネルギー最小化の過程で局所的な最小値に陥らないように、十分に大きい値に設定しなければならない。しかし、初期温度を大きく設定することは、アニーリングの計算量を多くすることになる。計算時間を考慮した場合、この実験画像では、図4に示すように初期温度を5000℃程度に設定するのが最適であった。



最大高さ 6

最大高さ 9

初期温度  $T = 5000$ 、 $\lambda = 417$

図 7: 形状変化の大きい対象物画像に対する形状復元画像

### 6.3 ノイズのある画像について

図 5 の結果に示すように、画像に多くノイズがあると正しい結果が得られなくなる。これは、ノイズの存在する画素においては、両画像の対応が正しく取れないためである。図 6 に示すように、 $\lambda$  の値を大きくすることにより、画素の対応性の制約を弱め距離の滑らかさの制約を強くすると、多少点在するノイズの除去を行うことが出来るが、逆に、距離の精度を悪くすることにもなる。

### 6.4 距離変化の大きい対象物画像について

計算誤差については、図 7 の左図に示すように、距離の不連続部で滑らかさの制約により誤差が現れる。これについては、距離の不連続部の情報を何らかの手段で与え、部分的に滑らかさの制約条件を弱める方法が考えられる。また、図 7 の右図のように局所的な最小状態に陥る場合は、初期温度の設定を高くすることにより局所的な最小状態に陥らないようにするとともに、繰り返し計算回数を更に多くする必要がある。

### 6.5 テキスチャの変化の少ない画像について

テクスチャの変化の少ない画像については、図 9 の結果よりわかるように、テクスチャの変化する部分より得た距離情報を、うまく状態遷移の過程に利用することにより、正しい結果を導くことが可能であった。

## 7 むすび

本研究では、コンピュータによる画像理解の第一歩として、ステレオ画像情報に人間が持つ知識情報を与え、対象物の 3 次元形状を認識する方法について検討を行った。対象物の形状が連続的に変化するという制約条件を用いることにより、ノイズのある画像やテクスチャの変化の少ない画像などのような対応点検索が困難な画像においても、対象物の形状をほぼ認識することが出来た。今後は、正則化法における制約条件の与え方をさらに検討し、不連続な対象物画像の形状の復元において発生する誤差を減少する方法などについて検討をする必要がある。

## 謝辞

本研究について御指導いただいた池田克夫先生（京都大学工学部教授）、小川均研究参与（立命館大学理工学部教授）、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。

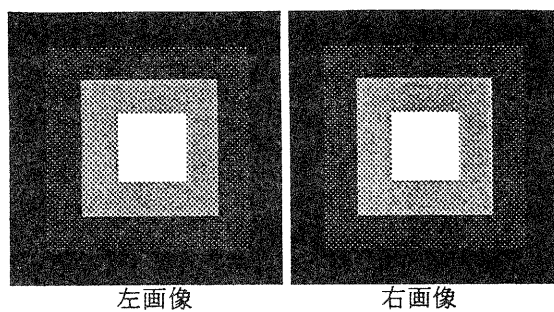


図 8: テキスチャの変化の少ない画像

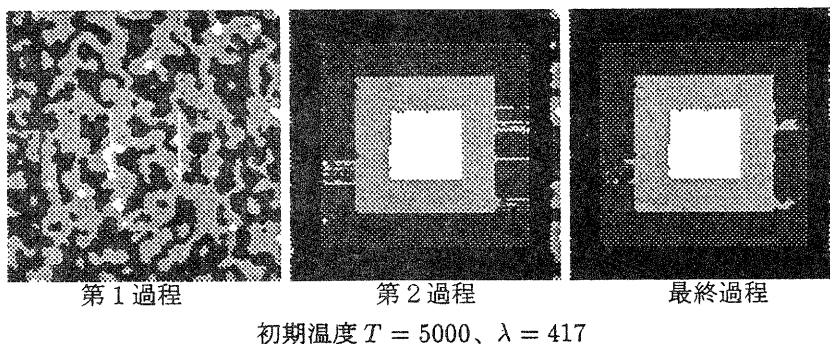


図 9: テキスチャの変化の少ない画像に対する形状復元画像の過程

## 参考文献

- (1) 尾上守夫 : "画像処理ハンドブック、昭晃堂(1989)
- (2) T.Poggio, V.Torre and C.Koch : "Computational vision and regularization theory", Nature, 317, 6035, pp.314-319(1985)
- (3) 坂上勝彦、横矢直和 : "弛緩法と正則化", 情報処理, 30, 9, pp.1047-1057(1989)
- (4) Barnard S. T. : "Stochastic stereo matching over scale", Int. Journal Computer Vision, 3, 1, pp.17-32(1989)
- (5) Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. Jr. and Vecchi, M.P. : "Optimization by Simulated Annealing", Science, Vol.220, No.4598, pp.39-69(1983)
- (6) 深尾毅 : "アニーリング法—一つの最適化手法—", 信学誌, Vol.70, No.12, pp.1247-1250(1987)

# 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（第三報）

技術第一科	小川 栄司	Eiji Ogawa
滋賀県立信楽窯業試験場	中島 孝	Takashi Nakajima
立命館大学理工学部	井上 和夫	Kazuo Inoue
	亀井 且有	Katsuari Kamei
	桑田 一仁	Kazuhito Kumeda
	黒川 博行	Hiroyuki Kurokawa

あらまし：多入力多出力で非線形な特性を備え、熟練者が経験と勘により運転を行っているような制御対象には、ファジィ制御の利用は有効な手段である。ところが、ファジィ制御は、人間の扱うあいまいな言語表現やノウハウに基づいて実現される制御手法であるが故に、最適な制御条件の設定は難しく、メンバーシップ関数や制御ルールのチューニングには多大な時間と労力が費やされている。そこで、ファジィ制御導入時におけるメンバーシップ関数や推論ルールの獲得と自動チューニングの手法についての検討を行った。その結果、シミュレーション上ではあるが、比較的良好な制御ルールとメンバーシップ関数を得ることができた。また、焼成現場における操作性と耐環境性の向上に着目し、焼成炉と制御装置の仕様をより実用的なものに変更し、自動焼成モデル炉の構築を行った。

## 1. まえがき

現在、信楽における陶磁器製品の製造業は、大半の企業が典型的な多品種少量の生産形態をとっている。これに適合する焼成炉として、現在もっとも数多く使用されているのが、液化石油ガス（LPG:Liquefied Petroleum Gas）を燃料としバッチ焼成を行なう、倒炎窯の一種である自然吸気式のシャトル窯である<sup>(1)</sup>。

自然吸気式のシャトル窯は、操炉や窯詰めが簡単で省力化を進め易い、設備コストが安価であるなど、多くの長所を備えるが、その反面、ベンチュリー式バーナによる自然吸気式であるが故に、炉内の温度と雰囲気との相互干渉により燃焼特性が複雑に変化する非線形な特性を有し、その焼成工程の管理は容易ではない。このため、焼成中の炉内の温度と雰囲気との十分な管理の行われている事例はごく少なく、窯詰め品の量や風速などの気象条件によりその焼成条件は絶えず変化し、製品の均質化、高品質化、省力化、省エネルギー化などの達成のため、解決されねばならない問題は多い。

そこで、本研究では、既設の自然吸気式のシャトル窯の有効利用を前提に、焼成工程の自動化を図ることにより、陶磁器製品の焼成における前述の問題を解決し、製品のコストダウンに寄与することを目的として、焼成炉の制御にファジィ制御を適用した自動焼成システムの開発とその有効性の確認を行ってきた<sup>(2),(3)</sup>。

ファジィ制御では、人間の扱うあいまいな情報をメンバーシップ関数として定量化し、熟練者の持つ制御に関するノウハウに基づいて設定されたファジィ推論ルールに従って制御を行う。このため、焼成炉のように多入力多出力で非線形な特性を備え、熟練者の経験と勘により運転が行われているような制御対象には、ファジィ制御の利用は非常に有効な手段であるといえる。ところが、それ故に最適な制御条件の設定は難しく、制御ルールやメンバーシップ関数のチューニングには多大な時間と労力が費やされている。

そこで、今回は上記のファジィ制御による自動焼成システムの実用化に向けての懸案事項の中から、ファジィ制御導入時におけるファジィルールとメンバーシップ関数の獲得およびメンバーシップ関数の自動チューニングの手法についての検討を行う。また、焼成現場における操作性と耐環境性の向上を重視し、焼成炉と制御装置の仕様をより実用的なものに変更した自動焼成モデル炉を構築したので、その概要を報告する。



## 2. 焼成炉制御のためのファジールールとメンバーシップ関数の獲得

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ファジールールとして記述できるが、その反面、最適なファジールールの獲得やメンバーシップ関数の調整には多大な時間と労力が必要となっている。

このような問題を解決する一つの試みとして、ニューラルネットワーク (NN:Neural Network) の学習法であるバックプロパゲーション (BP:Back Propagation) 法の適用を可能としながら、単一の NN の結合を工夫しファジィ推論の構造を持たせた NN を利用して、熟練者が実際に制御を行ったデータから自動的にファジールールの獲得とメンバーシップ関数の調整を行う研究がなされている<sup>(4)-(6)</sup>。

ここでは、焼成炉のファジィ制御シミュレーション<sup>(7),(8)</sup> から得られたデータをもとに、上記 NN を用いてファジールールの生成とメンバーシップ関数の調整を自動的に行い、その有効性を確認する。

### 2-1 ファジィ推論の構造を持つニューラルネットワーク

ファジールールとメンバーシップ関数の自動生成・自動調整に用いる NN は、ファジィ推論による推論値の計算過程を NN の構造で実現し、決定すべきパラメータを NN の結合加重に対応づけたものである。これらの結合加重を BP 法を用いて更新することにより、ファジールールの生成とメンバーシップ関数の調整を自動的に、しかも同時に行うことができる。図 1 に、2 入力 ( $x_1, x_2$ ) 1 出力 ( $y$ ) 3 前件部メンバーシップ関数における NN の構成例を示す。

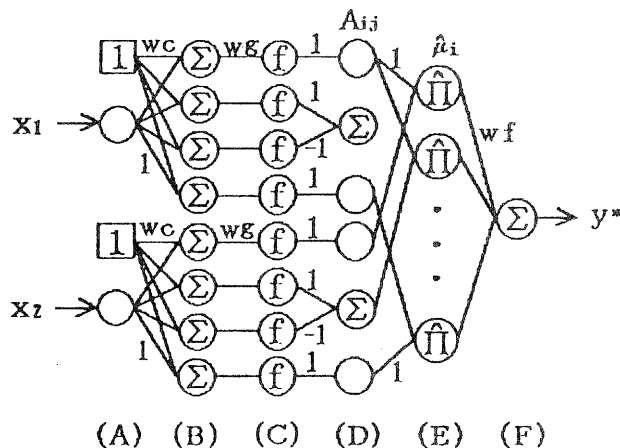


図 1 NNの構成例

図中の丸および四角の記号はユニットを表し、ユニット間の記号  $w_c, w_g, w_f$  および  $1, -1$  は結合荷重を表す。また、(A) 層の  $1$  の記号を持つユニットは、常に一定値  $1$  を出力するバイアスユニットであり、(B) (D)(F) 層の  $\Sigma$  および (E) 層の  $\Pi$  の記号を持つユニットは、入力の線形和および線形積を出力し、それぞれ次式で定義される。

$$\Sigma(x) = \sum_k x_k \quad (1)$$

$$\Pi(x) = \prod_k x'_k \quad (x'_k = x_k / \sum_k x_k) \quad (2)$$

する。記号のないユニットは、単に入力を出力に分配している。(C) 層の  $f$  の記号を持つユニットにおいては、その入力  $x$  に対する出力  $f(x)$  が次式のシグモイド関数で定義される。

$$f(x) = 1 / (1 + \exp(-x)) \quad (3)$$

まず、(A)層に加えられた入力  $x_1, x_2$  は、(B)層にて結合荷重  $W_c$  がバイアスとして加算され、それに  $W_g$  を掛けたものが (C) 層のユニットの入力となり、(C) 層の出力は (3) 式より次式のようになる。

$$f(x) = 1 / (1 + \exp(-wg \cdot (x + wc))) \quad (4)$$

すなわち、結合荷重  $W_c, W_g$  は、シグモイド関数の中心位置および傾きを定めるパラメータとなる。結合荷重  $W_c, W_g$  を各シグモイド関数毎に適当な値に設定することにより、(D) 層の出力は (C)-(D) 層間の結合荷重 1, -1 と (D) 層の  $\Sigma$  の記号を持つユニットにより、図 2 のように符号の異なる 2 つのシグモイド関数の和として構成され、図 3 に示すような前件部メンバーシップ関数となる。

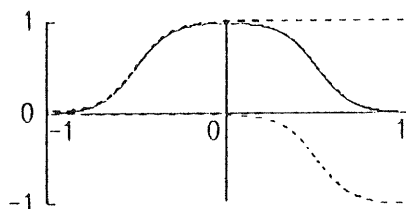


図 2 疑似台形型メンバーシップ関数の実現

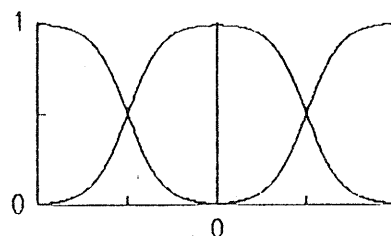


図 3 前件部メンバーシップ関数

(E) 層では、異なる入力に対する前件部メンバーシップ関数同志のグレードから、各ファジィルールに対する前件部適合度が求められ、これが (E) 層の全ユニットより得られる前件部適合度の総和が 1 となるように規格化した値 (重心) として出力される。最後の (F) 層では、(E) 層の出力である規格化された前件部適合度と後件部定数を意味する結合荷重  $W_f$  との積和が求められる。これにより、ファジィルールの後件部を定数で表現し、前件部の適合度を乗算で、推論値を前件部適合度と後件部定数との積和で求める簡略化したファジィ推論<sup>9)</sup> を実現している。

この NN では、結合荷重  $W_c, W_g$  を学習により変化させることによって前件部メンバーシップ関数の調整を行い、また、結合荷重  $W_f$  の初期値をすべて 0 としてファジィルールが全く存在しない状態から  $W_f$  を学習させることによりファジィルールの生成を行う。

## 2-2 ファジィ制御による焼成炉制御

自然吸気式のシャトル窯は、炉内の温度と雰囲気とが互いに影響を及ぼし合う非線形な特性を持つ。このため、昨年度開発したファジィ制御による自動焼成システムでは、図 4 に示すように、まず炉内温度の目標値と測定値の偏差  $\Delta T$  と偏差の変化分  $\Delta^2 T$  により燃料のガス圧  $\Delta F$  を推論し、次に得られたガス圧  $\Delta F$  と炉内雰囲気の目標値と測定値の偏差  $\Delta O_2, \Delta CO$  および偏差の変化分  $\Delta^2 O_2, \Delta^2 CO$  よりエアダンパーの操作量  $\Delta D$  を推論している。これにより、炉内雰囲気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している。

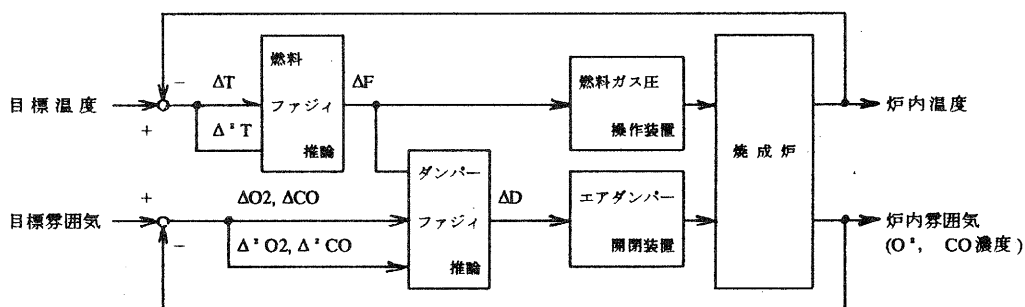


図 4 ファジィ制御による焼成炉制御方法

自動焼成実験システムにおいて使用したファジィルールとメンバーシップ関数は、図4に示す制御系を別途開発した焼成炉モデル<sup>(10),(11)</sup>に適用し、その制御特性が最も良好となる値に設定した。その時のファジィルールを表1と表2に、メンバーシップ関数を図5に、シミュレーション結果を図6に示す。

表1 燃料操作ファジィルール

		$\Delta T$		
		炉内温度の偏差		
$\Delta^2 T$		低い(P)	丁度良い(Z)	高い(N)
炉内 変化温 傾向 の	下 降(P)	増やす	増やす	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

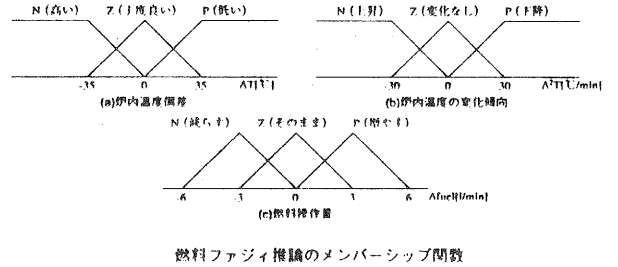


表2 エアダンパー操作ファジィルール (還元焼成時)

		$\Delta CO$			
		炉内一酸化炭素濃度の偏差			
$\Delta F$		低い(P)	丁度良い(Z)	高い(N)	
燃料 操作 量 の 変 化 傾 向	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

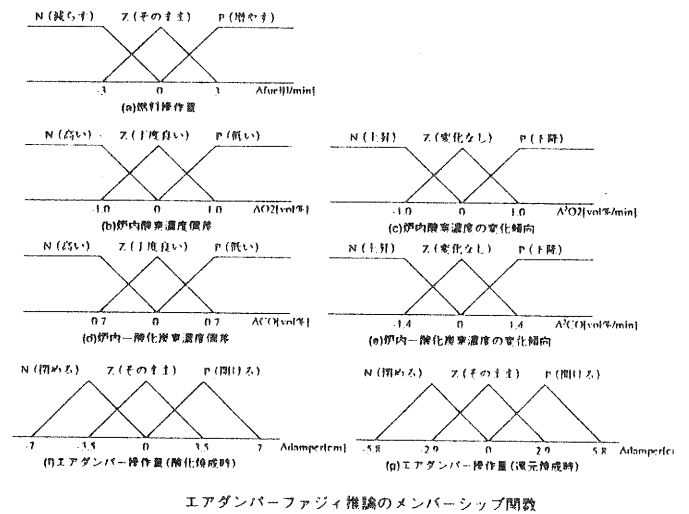


図5 ファジィ制御のメンバーシップ関数

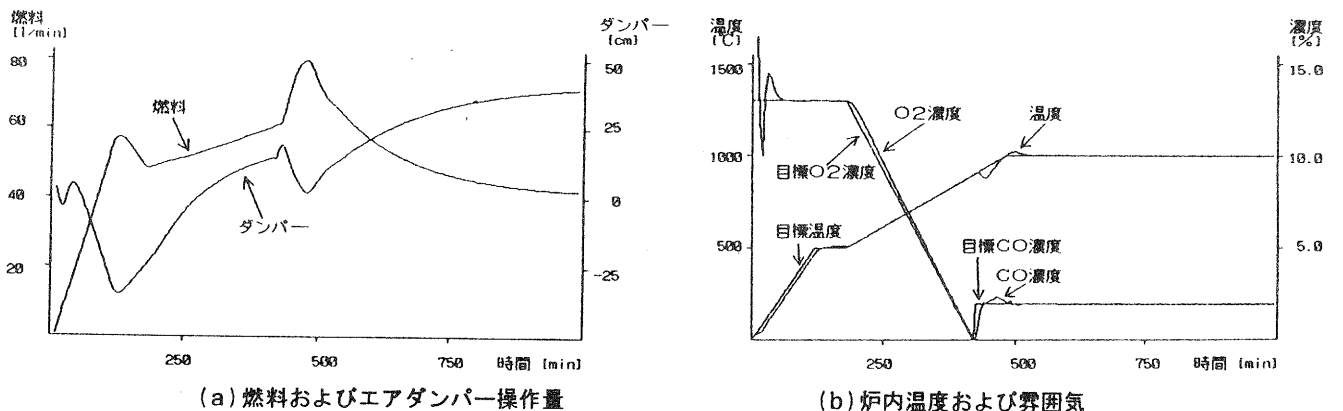


図6 焼成炉モデルによるシミュレーション結果

### 2-3 ニューラルネットワークによるファジィルールの生成とメンバーシップ関数の調整

ここでは、図6のシミュレーションデータをもとに、ファジィ推論の構造を持つNNを用いて、焼成炉制御のためのファジィルールの生成と前件部メンバーシップ関数の調整を行う。

図 6(b) の炉内温度データから  $\Delta T, \Delta^2 T$  を、図 6(a) の燃料ガス供給データから  $\Delta F$  を抽出し、 $\Delta T, \Delta^2 T$  を NN の入力、 $\Delta F$  を教師信号として、NN による推論値と教師信号の誤差の変化分が微小になるまで学習を行う。同様に、図 6(a) の燃料ガス供給データから  $\Delta F$  を、図 6(b) の一酸化炭素濃度データから  $\Delta CO, \Delta^2 CO$  を、図 6(a) のエアダンパー開度データから  $\Delta D$  を抽出し、 $\Delta F, \Delta CO, \Delta^2 CO$  を NN の入力、 $\Delta D$  を教師信号として学習を行う。なお、NN 中の結合荷重  $W_c, W_g$  の初期値は、前件部変数  $\Delta F, \Delta CO, \Delta^2 CO$  のメンバーシップ関数が、焼成炉モデルによるチューニングにより得られた図 5 のメンバーシップ関数にできるだけ似た図 7 に示す形状となる値に設定する。また、結合荷重  $W_f$  の初期値は、すべてファジィルールが全く存在しない状態を示す値である 0 とする。

上記により得られた学習後のファジィルールを表 3, 表 4 にメンバーシップ関数を図 8 に示す。

表 3 NN による燃料操作ファジィルール

		$\Delta T$	炉内温度の偏差		
			$\Delta^2 T$	低い(P)	丁度良い(Z)
炉内 温度 傾度 の 向	下 降(P)		-4.44	1.21	0.86
	変化なし(Z)		3.84	0.38	-2.80
	上 昇(N)		-8.69	-5.58	-0.12

表 4 NN によるエアダンパー操作ファジィルール (還元焼成時)

		$\Delta CO$	炉内一酸化炭素濃度の偏差				
			$\Delta F$	$\Delta^2 CO$	低い(P)	丁度良い(Z)	高い(N)
燃料 操作 量	増やす (P)	下 降(P)			0.12	0.08	0.04
		変化なし(Z)			1.52	-3.69	-1.17
		上 昇(N)			-0.01	-0.96	-0.44
	そのまま (Z)	下 降(P)			2.59	0.05	-0.03
		変化なし(Z)			3.02	0.01	-2.18
		上 昇(N)			-1.60	-0.12	-0.07
	減らす (N)	下 降(P)			0.03	0.08	-0.03
		変化なし(Z)			1.05	3.29	-2.87
		上 昇(N)			0.03	0.07	-0.13

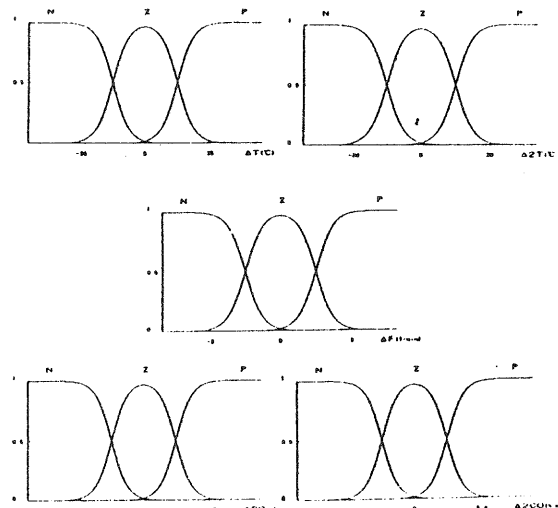


図 7 学習前のメンバーシップ関数

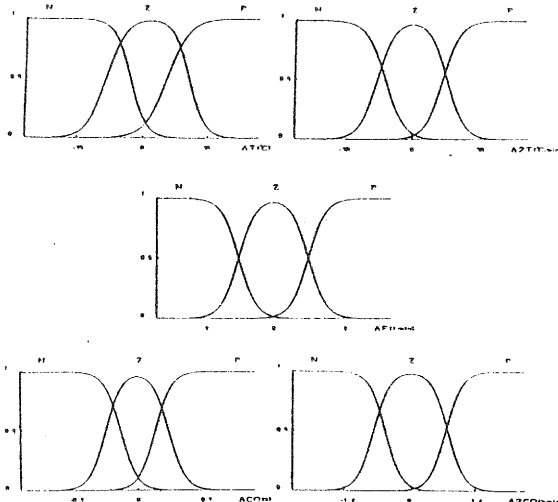


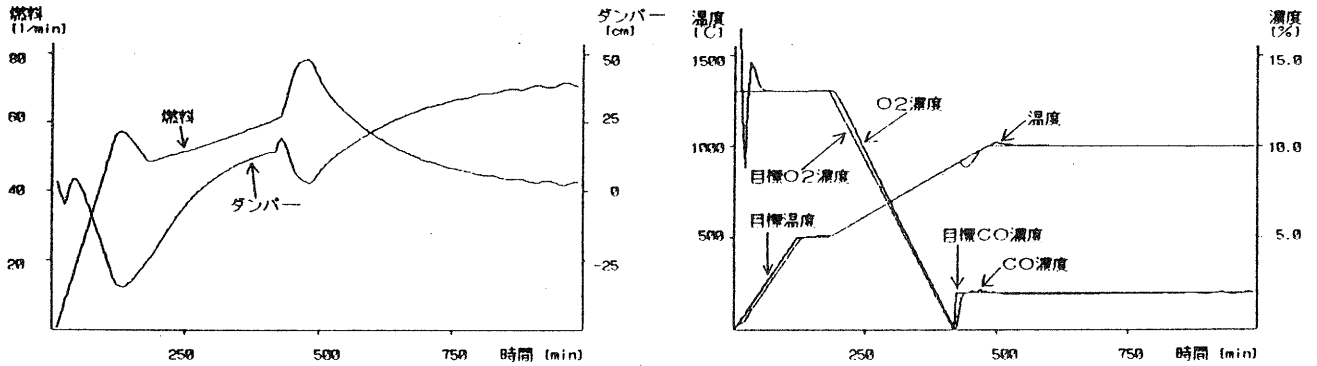
図 8 学習後のメンバーシップ関数

NN により獲得したメンバーシップ関数とファジィルールを図 4 に示した制御系に適用し、前出の焼成炉モデルにより図 6 と同じ目標値に対してシミュレーションを行った結果を図 9 に示す。

#### 2-4 考察

表 3, 表 4 に示す NN により生成されたファジィルールの数値に着目すると、数値の正負が表 1, 表 2 に示す実験システムにおけるそれと、ほぼ一致していることがわかる。このことから NN は、熟練者からのヒア

リング結果により生成した実験システムのファジィルールとほぼ同様のものを、焼成データより抽出していることがわかる。図9に示すシミュレーション結果も、実験システムとほぼ同様の制御結果を示しており、本手法の有効性を確認することができる。



(a) 燃料およびエアダンパー操作量

(b) 炉内温度および雰囲気

図9 NN獲得データによるシミュレーション結果

### 3. 焼成炉制御のためのメンバーシップ関数の自動チューニング

焼成炉は、その大きさや構造など多種多様であり、それぞれ固有の燃焼特性を持っている。このため、ファジィ制御により焼成炉の制御を行うためには、それぞれの焼成炉に適したメンバーシップ関数やファジィルールを設定する必要がある。

前章では、NNによるファジィルールの生成とメンバーシップ関数の調整の可能性と有効性を示したが、ここでは、焼成炉モデルによる繰り返し制御のシミュレーションにより、メンバーシップ関数の自動チューニングを試み、その有効性を検討する。

#### 3-1 最急降下法によるメンバーシップ関数の自動チューニング

昨年度までに開発した実験システムで使用しているメンバーシップ関数は、図5に示したように、互いに0.5で交わる二等辺三角形型である。このため、メンバーシップ関数のあいまいさの幅が決まれば、メンバーシップ関数の形も一意に決まる。そこで、制御結果があらかじめ定めた評価関数を満足するように、各メンバーシップ関数におけるあいまいさの幅を繰り返し制御の中で変化させ、自動的にチューニングを行う。

チューニングは、以下に示す9つのメンバーシップ関数のあいまいさの幅に対して行う。

$W_{\Delta T}$ : 温度偏差	$W_{\Delta^2 T}$ : 温度偏差の変化分
$W_{\Delta O_2}$ : O <sub>2</sub> 濃度偏差	$W_{\Delta^2 O_2}$ : O <sub>2</sub> 濃度偏差の変化分
$W_{\Delta CO}$ : CO 濃度偏差	$W_{\Delta^2 CO}$ : CO 濃度偏差の変化分
$W_{\Delta F}$ : 燃料操作量の増減分	
$W_{\Delta D}$ : エアダンパー操作量の増減分 (酸化焼成時)	
$W_{\Delta R}$ : エアダンパー操作量の増減分 (還元焼成時)	

チューニングの際の評価関数には、一度のシミュレーションにより得られる炉内温度の自乗誤差平均  $E_T$  [°C]、O<sub>2</sub> 濃度の自乗誤差平均  $E_{O_2}$  [%]、CO 濃度の自乗誤差平均  $E_{CO}$  [%] に対し、下記の  $J(W)$  を定義する。

$$J(W) = \alpha(E_T) + \beta(E_{O_2}) + \gamma(E_{CO}) \quad (5)$$

ただし、 $\alpha = 1.0$ ,  $\beta = 10.0$ ,  $\gamma = 100.0$

ここで、 $W$  は前記の9つのメンバーシップ関数のあいまいさの幅を次元とするベクトルである。また、 $\alpha, \beta, \gamma$  は、それぞれ  $E_T, E_{O2}, E_{CO}$  に対する重みであり、経験的に定めたものである。

メンバーシップ関数の自動チューニングは、(5)式に示した評価関数  $J(W)$  が最小となる方向にベクトル  $W$  を変化させる最小化問題として考えることができる。今回は、最急降下法を利用して評価関数  $J(W)$  の最小点の探索を行う。

評価関数  $J(W)$  は多峰性の強い関数である。このため、各探索点における傾斜は、その前後への傾斜をもとに(6)式により決定する。

$$\frac{J(W^{(k)} + \Delta W^*) - J(W^{(k)} - \Delta W^*)}{2\Delta W^*} \cong \frac{J(W^{(k)})}{W^*} = p^{*(k)} \quad (6)$$

ここで、 $\Delta W^*$  は  $W$  の各次元における微小変化量であり、下記のように経験的に定めたものである。また、 $p^{*(k)}$  は、各次元における傾きを表す。

$$\begin{aligned} \Delta W_{\Delta T} &= 0.01, & \Delta W_{\Delta^2 T} &= 0.01 \\ \Delta W_{\Delta O_2} &= 0.00001, & \Delta W_{\Delta^2 O_2} &= 0.00001 \\ \Delta W_{\Delta CO} &= 0.00001, & \Delta W_{\Delta^2 CO} &= 0.00001 \\ \Delta W_{\Delta F} &= 0.001, & \Delta W_{O_{\Delta D}} &= 0.001, & \Delta W_{RAD} &= 0.001 \end{aligned}$$

メンバーシップ関数のあいまいさの幅は、次式のように更新する。

$$W^{*(k+1)} = W^{*(k)} - \tau \cdot p^{*(k)} \quad (7)$$

ここで、 $\tau$  は更新時の歩み幅であり、経験的に下記のように定める。

$$\begin{aligned} \tau_{\Delta T} &= 0.01, & \tau_{\Delta^2 T} &= 0.01 \\ \tau_{\Delta O_2} &= 0.00001, & \tau_{\Delta^2 O_2} &= 0.00001 \\ \tau_{\Delta CO} &= 0.00001, & \tau_{\Delta^2 CO} &= 0.00001 \\ \tau_{\Delta F} &= 0.001, & \tau_{O_{\Delta D}} &= 0.001, & \tau_{RAD} &= 0.001 \end{aligned}$$

各パラメータの更新は、評価関数  $J(W)$  の変化が微小になるまで行う。

### 3-2 自動チューニング結果と制御シミュレーション

自動チューニングに際してのメンバーシップ関数のあいまいさの幅の初期値は、以下の通りとした。

$$\begin{aligned} W_{\Delta T} &= 50.0, & W_{\Delta^2 T} &= 25.0 \\ W_{\Delta O_2} &= 2.0, & W_{\Delta^2 O_2} &= 1.0 \\ W_{\Delta CO} &= 2.0, & W_{\Delta^2 CO} &= 1.0 \\ W_{\Delta F} &= 1.0, & W_{O_{\Delta D}} &= 1.0, & W_{RAD} &= 1.0 \end{aligned}$$

上記初期値により、前出の焼成炉モデルを利用して、図6と同じ目標値に対してシミュレーションを行った結果と、29回目の自動チューニング後のシミュレーション結果を図10に示す。また、本自動チューニングによるシミュレーション結果と、図6に示した試行錯誤的に行ったチューニングによるシミュレーション結果を表5に比較する。

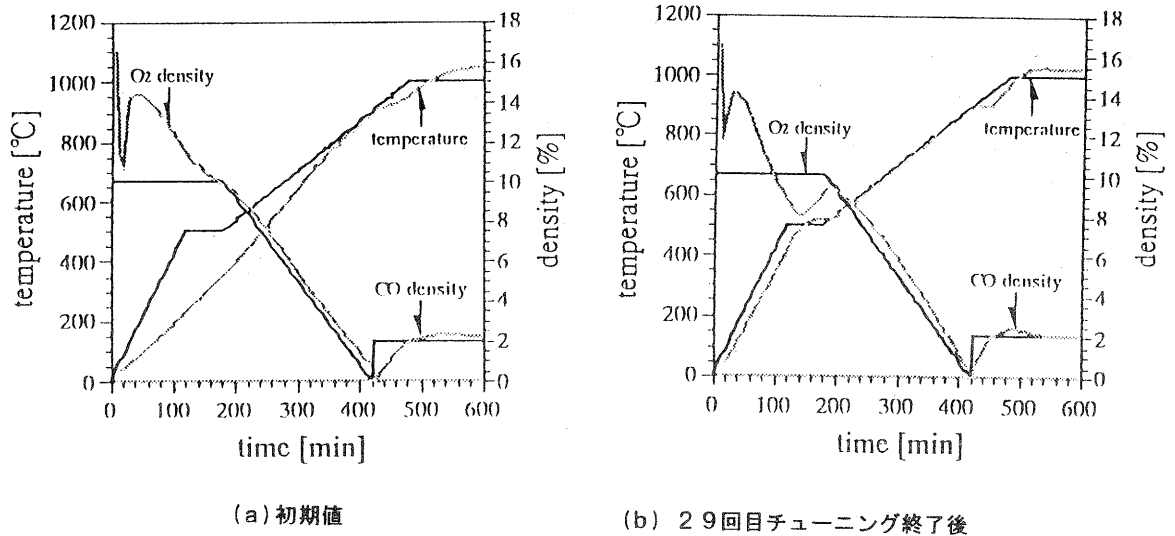


図10 チューニング結果

表5 最急降下法によるチューニングと試行錯誤的なチューニングの比較

	自乗積差平均			消費燃料 [ℓ]	温度低下 [°C]	オーバーシュート [°C]
	湿度[°C]	酸素濃度[%]	一酸化炭素濃度[%]			
最急降下法による チューニング	25.0	0.840	0.0850	30790.0	49.0	29.0
試行錯誤的なチューニング (シミュレーション結果2)	7.30	0.180	0.0300	30886.0	57.0	24.0

### 3-3 考察

図10のシミュレーション結果から、本手法によりほぼ良好にチューニングが行われていることがわかる。しかし、図6と図10および表5を見比べてみると、本手法によるチューニング結果は、試行錯誤的に行ったチューニング結果と比べて、決して良い結果とは言えない。

これは、本手法において設定した評価関数が多峰性の強い関数であり、多くの局所最小点が存在することに大きな要因があるものと考えられる。今後は、評価関数の多峰性を考慮に入れた手法、例えばシミュレーテッドアーニリング法などへの拡張の検討が必要である。

## 4. 自動焼成モデル炉の構成と仕様

昨年度までに開発した実験システムは、実験段階におけるプログラムのメンテナンスや実験データ保守の利便性を考慮して、焼成炉の側にデスクトップ型パーソナルコンピュータを設置しソフトウェアにより制御を行う形でシステムを構成した。ところが、本システムの設置される環境は、焼成炉制御という性格上、粉塵が多く空調の行き届かない高温の環境にさらされることとなる。また、現場での操作性を考慮すると、多くのキーの並んだキーボードは必ずしも操作性が良いとはいえず、改善が望まれるところであった。

そこで、本システムの実用化と産地への技術移転を目指し、耐環境性と操作性を向上させた自動焼成モデルを開発した。今回、開発した自動焼成モデル炉のシステム構成を図11に、その仕様を表5示す。

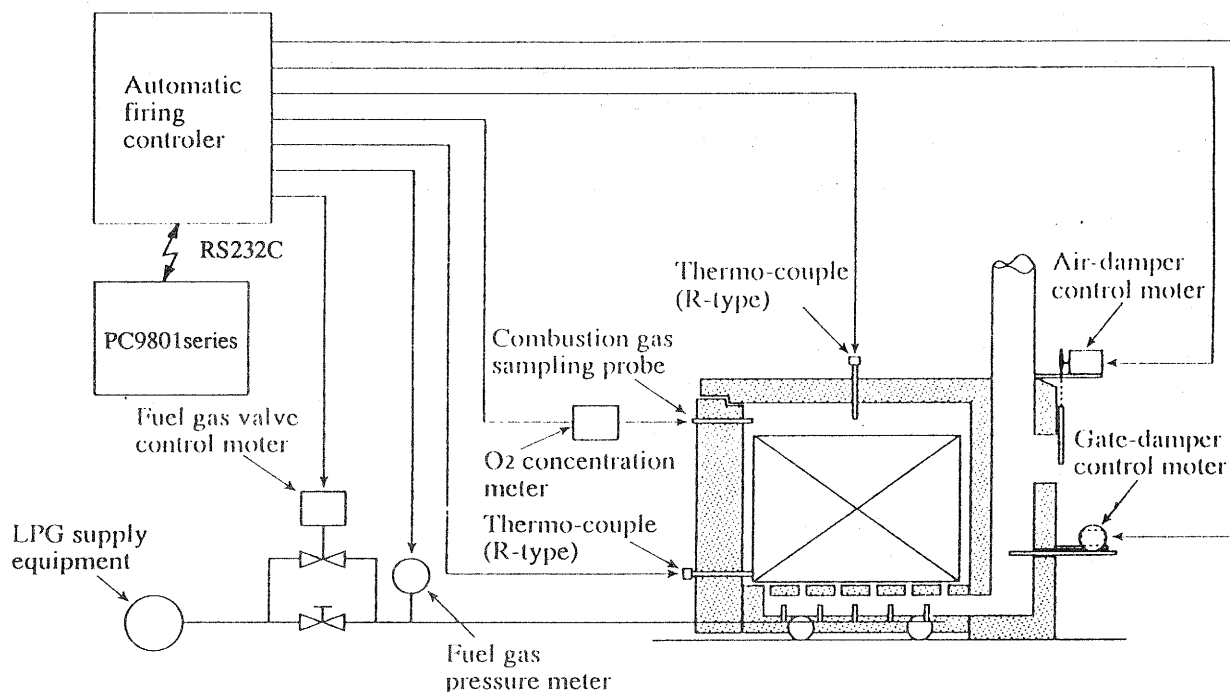


図 1 1 自動焼成モデル炉のシステム構成

表 5 自動焼成モデル炉の仕様

焼成炉	容量 燃料	0.5m <sup>3</sup> 液化石油ガス (ブタン : プロパン = 7 : 3)
測定部	温度測定範囲 雰囲気測定範囲 (O <sub>2</sub> )	0 ~ 1600[ °C ] -15 ~ 21[vol%]
制御部	ガス圧制御範囲 エアダンパー制御範囲 ゲートダンパー制御範囲 ガスバーナ制御	Off / 300 ~ 1200[mmH <sub>2</sub> O] 0 ~ 200[mm] 0 ~ 230[mm] 自動点火 / 消火
制御装置	コンピュータ 運転モード 表示機能 ログ機能 通信機能	IPC-BX/M10(98), i80386SX(20MHz), MS-DOS3.3 Manual, Automatic, PID, Fuzzy 測定データ表示 (炉内温度, 雰囲気) ログファイル作成、プリントアウト RS232C, Basic Protocol (JIS C 6362)
管理端末	管理機能 通信機能 動作環境	測定データモニタ、焼成データメンテナンス RS232C, Basic Protocol (JIS C 6362), Hayes-AT PC9801series および互換機 (MS-DOS)

#### 4-1 焼成炉

自動焼成モデル炉は、滋賀県立信楽窯業試験場所有の自然吸気式のシャトル窯 (0.5m<sup>3</sup>) に対し、昨年度までに開発した実験システムとほぼ同様の改造を施して構築した。自動焼成モデル炉では、実験システムと比較して容量の小さな焼成炉を制御対象とすることにより、焼成の繰り返し実験を容易にするとともに、容量の異なる焼成炉に対する制御特性の比較データの取得を目指している。



#### 4-2 測定部

焼成炉内の温度の測定は、炉の天井および戸前下部に R-type 熱電対を取り付け、炉内上下の温度をそれぞれ測定できるようにした。また、焼成炉内の雰囲気測定は、戸前上部にサンプリングプローブを取り付けて燃焼ガスを採取し、燃焼ガス中の水蒸気除去用の冷却器を通過させた後、ジルコニア酸素濃度分析計に導入し、 $O_2$ 濃度およびCO濃度を測定した。これらの測定値は、熱電対温度変換器およびジルコニア酸素濃度分析計の出力信号(4～20mA)により、制御部に伝送される。

#### 4-3 操炉部

燃料のガス圧の操作は、従来の手動ガス圧調整バルブと並列に自動制御用バルブを設置し、コントロールモータによって駆動するとともに、差圧発信器を配管に設置し現在のガス圧を測定できるようにした。また、エアダンパーとゲートダンパーの開閉用にもコントロールモータを設置し制御部から駆動するとともに、コントロールモータの回転軸に設置されたポテンシオメータにより現在の開度を測定できるようにした。さらに、焼成初期の低温時にも細やかな温度制御を実現するために、個々のベンチュリー式バーナに電磁弁と火炎口付近に電熱ヒータを設置し、バーナ毎の点火/消火の機能を追加した。これらの機能は、制御部からの接点信号により動作し、測定値は、差圧変換器およびポテンシオメータ変換器の出力信号(4～20mA)により、制御部に伝送される。

#### 4-4 制御装置

自動焼成モデル炉の制御部は、焼成現場における操作性と耐環境性(耐熱性、耐粉塵性 etc.)を重視し、実験システムでのデスクトップ型パーソナルコンピュータを中心とする構成から、制御盤内にFA用コンピュータ、各種変換器、リレーシーケンス回路などを内蔵した制御装置を中心とする構成に変更した。これにより、現場では焼成目標データ選択スイッチと焼成開始スイッチの操作だけで自動運転が可能となる。また、自動焼成のための制御データの設定や焼成状況の監視のため、制御装置にはRS232Cによる通信機能を追加し、別途開発した管理端末ソフトウェアをインストールしたパーソナルコンピュータからメンテナンス等が行えるようにした。

#### 4-4 管理端末

実験システムにおける焼成炉制御ソフトウェアから、焼成モニタ機能および焼成データメンテナンス機能を分離独立させ、管理端末ソフトウェアとして開発した。本ソフトウェアは、PC9801シリーズおよびその互換機上で動作し、RS232Cインターフェースにより制御装置と接続し使用する。モデムの使用に備えて Hayes-AT コマンドもサポートした。これにより、モデムを利用して電話回線により接続すれば、遠隔地でのモニタやメンテナンスも可能となる。

### 5. むすび

ファジィ制御により自動制御を行うには、ファジィルールやメンバーシップ関数の同定手段が問題となる。本研究では、ファジィ制御の新規焼成炉への導入時の対応手法についての検討を行った。

まず、ファジィ推論の構造を持つニューラルネットにより、ファジィルールの自動生成とメンバーシップ関数の自動調整を試みた。その結果、シミュレーション上では、焼成炉モデルを使用したチューニングにより生成した場合と同様に、ほぼ良好な制御結果を得ることができ、本手法の有効性を確認することができた。

次に、焼成炉モデルに対する制御シミュレーションにより、最急降下法によるメンバーシップ関数の自動チューニングを試みた。しかし、設定した評価関数が多峰性の強い関数であるため、本手法では最適なメンバーシップ関数を得ることは困難であった。最適なメンバーシップ関数を得るためには、評価関数の多峰性を考慮に入れたチューニング手法への拡張が必要であると考えられる。

今回の研究は、いずれも焼成炉の近似モデルを対象とし検討を行ったものであり、実際の焼成炉に対して

も本手法が有効であるかどうかは、現在のところ不明である。しかし、本研究は、実炉におけるファジィルールやメンバーシップ関数の自動生成・自動調整の可能性を示すとともに、新規に自動焼成システムを稼働させる際の初期値としての適切なパラメータを得る手法として、近似焼成炉モデルを利用することの有効性を示すものとして評価できるものと考えられる。

今後は、実炉における熟練者の制御データによるメンバーシップ関数の自動生成・自動調整、実炉上での自動チューニングなど検討を行い、その可能性と有効性の確認を行う必要がある。

#### [参考文献]

- (1) 今西康博ほか：LPG 焚シャトル陶磁器焼成炉の効率的な練炉方法の検討について，滋賀県立信楽窯業試験場業務報告， pp.33-41(1980)
- (2) 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， pp.23-32(1991)
- (3) 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（第二報），滋賀県工業技術センター研究報告， pp.12-22(1992)
- (4) 堀川慎一ほか：ファジィニューラルネットワークの構成法とその性能評価，第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集， pp.57-62(1990)
- (5) 堀川慎一ほか：ファジィニューラルネットワークの構成法(III)，第7回ファジィシステムシンポジウム講演論文集， pp.493-496(1991)
- (6) 堀川慎一ほか：ファジィニューラルネットワークの構成法と学習法，日本ファジィ学会誌， vol.4， No.5， pp.906-928(1992)
- (7) 桑田一仁ほか：陶器焼成炉のファジィ制御(I)－メンバー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， S53(1992)
- (8) 桑田一仁ほか：ファジィ制御による陶器焼成炉の温度・雰囲気制御，第37回システム制御情報学会研究発表講演論文集， pp.503-504(1993)
- (9) 市橋秀友ほか：PID と FUZZY のハイブリッド型コントローラー，第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集， pp.97-102(1988)
- (10) 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， G42(1991)
- (11) 桑田一仁ほか：陶器焼成炉のモデリングとファジィ制御，システム制御情報学会論文誌，第7巻，第4号， pp.10-21(1984)

# ハフ変換の量子化誤差評価に基づく線分抽出法

技術第一科	月瀬 寛二	Kanji Tsukise
龍谷大学理工学部	藤原 良一	Ryoichi Fujiwara
龍谷大学理工学部	壺井 芳昭	Yoshiaki Tsuboi

あらまし：ハンドアイシステムにおいて入力画像から対象物体の形状や向きを求めるために、画像をハフ(Hough)変換して対象物体の輪郭線を抽出することが多い。しかし、実際には画像中のノイズの影響やハフ変換の量子化誤差などから、十分な精度を持った輪郭線が得にくいという問題がある。そこで、本報告では、ハフ変換の量子化誤差を評価することによって、高精度にまた重複無く線分を抽出する手法を提案し、実例によって本手法の有効性を示す。

## 1. まえがき

ロボットによるハンドアイを実現するためには、画像から部品の輪郭線を抽出し、形状や向きの情報を得なければならない。ところが、実画像ではノイズの影響やハフ変換の量子化誤差などから、十分な精度を持った輪郭線の線分が得にくい。そのため松山らが文献(1)で述べている様に、ハフ変換の効率化と高精度化について多くの研究がなされてきた。同論文によれば、効率化という観点から ①エッジの局所的特徴の利用 ②変換パラメータの逐次的利用 ③ハフ平面の解像度の階層化などの研究が行われ、一方、集積点の高精度化という観点から ①ハフ曲線集積点の鮮鋭化 ②ハフ軌跡群の分布形状に基づく方法などの研究が行われていることがわかる。最近では、ハフ平面にフィルタ処理を施して高精度化を行う研究<sup>(2)</sup>や、ハフ平面を $\gamma$ - $\omega$ パラメータ空間に非線形変換して可変標準化を行い高精度に集積点を抽出する研究<sup>(3)</sup>、<sup>(4)</sup>も行われている。

本報告では、ハフ変換の量子化誤差を評価した結果を元に、 $\Delta\rho/\Delta\theta$ と画素の座標値の関係から $\theta$ の精度の過不足の定量化を行い、高精度に効率良く線分を抽出する新しい手法を提案する。

まず2.では、ハフ変換の一般的な問題点を明らかにし、3.では、ハフ平面の量子化サイズとハフ曲線の振幅の関係、およびハフ曲線の交点における量子化の影響について述べ、ハフ変換の問題点の定量化を行う。4.では、定量化された問題点の解決法を示し、5.では、量子化誤差評価に基づく線分抽出法のアルゴリズムを示す。そして、6.でこれらの問題点が現れている事例について、線分抽出に本報告の新たなアルゴリズムを組み込んだ実験結果を示す。

## 2. ハフ変換による線分抽出の問題点

対象とする画像は、カメラから得た像を平滑化処理などの前処理を行い、次にこの画像からエッジ画素を抽出し、細線化処理を施した図1に示す様なエッジ画像である。

エッジ画像にハフ変換を適用し線分抽出を行う際の問題点は、次の2点である。①ハフ平面でハフ曲線の交点を表す複数の極大値を全て探索しなければならない。②ハフ平面の量子化やエッジ画像のノイズなどの影響によりハフ曲線の交点が明確に現れにくい。

これらの理由により、ハフ平面上での交点探索が困難となる。

## 3. ハフ平面の量子化による問題

### 3-1 ハフ変換の定義式

ハフ変換は、画像内の各画素 $(x, y)$ を式(1)で定義されるパラメータ $\rho, \theta$ に変換し、 $\rho$ - $\theta$ 平面の極大値の $\rho, \theta$ から直線を検出する手法<sup>(5)</sup>、<sup>(6)</sup>である。本報告では、式(1)から導かれる式(2)を元にして問題点の定量化

を行う。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

$$= \sqrt{x^2 + y^2} \sin(\theta + \alpha) \quad (2)$$

ただし、

$$\tan \alpha = \frac{x}{y}$$

### 3-2 ハフ曲線の振幅と量子化サイズ

対象画像のX-Y平面の原点に近い画素 $(x_1, y_1)$ と離れたの画素 $(x_2, y_2)$ で、図2の様にハフ曲線の振幅が大きく異なる。従って、原点から離れた画素のハフ曲線を、量子化されたハフ平面で飛びが無く連続して描くために $\Delta\theta$ を小さく設定する必要がある。ところが、 $\Delta\theta$ を小さく設定すると原点に近い画素では、ハフ曲線が複数の $\theta$ の値に対し $\rho$ が同一の値を取るようになる。

$\theta$ 軸を $\Delta\theta$ の間隔で分割し $\rho$ を描く時、 $\rho$ の変化分 $\Delta\rho_\theta$ は、

$$\Delta\rho_\theta = \sqrt{x^2 + y^2} \cos(\theta + \alpha) \Delta\theta \quad (3)$$

である。 $\rho$ 軸の量子化を $\Delta\rho$ 、 $\theta$ 軸を $\Delta\theta$ とすると、 $\theta$ 軸を $\Delta\theta$ 刻みでハフ曲線を描いた時、飛びが無く連続して描くためには、

$$\max \cos(\theta + \alpha) = 1 \quad (4)$$

なので、

$$\max \Delta\rho_\theta = \sqrt{x^2 + y^2} \Delta\theta \leq \Delta\rho \quad (5)$$

すなわち、

$$\Delta\theta \leq \frac{\Delta\rho}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (6)$$

を満足する必要がある。

例えば、画像が $512 \times 512$ 画素で構成される時、 $\Delta\rho$ を1とすると、ハフ曲線が連続するためには、式(6)から $\Delta\theta = 0.0014 \text{ rad} = 0.079^\circ$ に設定する必要がある。また、 $0 \leq \theta < 180^\circ$ の範囲を描くためには、 $\theta$ 軸を2270分割しなければならない。 $\rho$ 軸は、 $-511 < \rho \leq 511\sqrt{2}$ の値を取るので1234分割する必要がある。つまり、2 byteで $\rho$ - $\theta$ 配列を定義すると、5.6 Mbyteの記憶容量を用意しないと飛びが無く連続したハフ曲線が描けない。

一方、 $\theta$ 軸の刻みを $\Delta\theta = 1^\circ$ としてハフ曲線を描いた場合、式(1)よりX-Y平面の(511, 511)の画素で、

$$\max \Delta\rho_\theta = \sqrt{x^2 + y^2} \Delta\theta = 12.6 \quad (7)$$

となり、 $\rho$ の値に最大13の飛びが生じることがわかる。

### 3-3 ハフ曲線の交点における量子化の影響

線分の両端点の画素 $(x_1, y_1)$ と $(x_2, y_2)$ について考える。式(1)を元にして、 $\rho_1$ と $\rho_2$ の差を次式で求める。

$$\begin{aligned} \rho_1 - \rho_2 &= (x_1 - x_2) \cos \theta + (y_1 - y_2) \sin \theta \\ &= L \sin(\theta + \beta) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 $L$ は線分の長さで

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

$$\tan \beta = \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2}$$

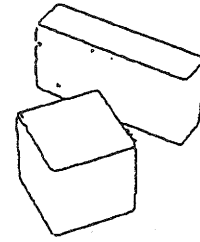


図1 エッジ画像の例

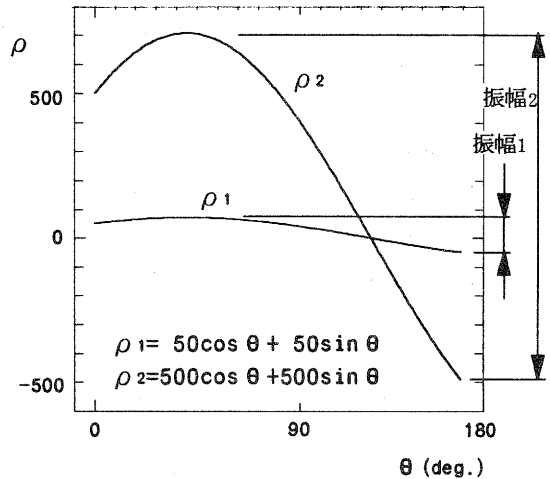


図2 Hough曲線の振幅

である。式(8)より、 $\rho_1$ と $\rho_2$ の差の変化分 $\Delta(\rho_1 - \rho_2)$ は、

$$\Delta(\rho_1 - \rho_2) = L \cos(\theta + \beta) \Delta\theta \quad (9)$$

ハフ曲線の交点付近で、

$$\rho_1 - \rho_2 = L \sin(\theta + \beta) = 0 \quad (10)$$

すなわち、

$$\sin(\theta + \beta) = 0 \quad (11)$$

$$\cos(\theta + \beta) = \pm 1 \quad (12)$$

なので、

$$\Delta(\rho_1 - \rho_2) \approx \pm L \Delta\theta \quad (13)$$

となる。

以下では簡単のため傾きが正の場合だけを考えることにすると、両端点の画素のハフ曲線が量子化された $\rho$ - $\theta$ 平面で交わるためには、

$$\Delta(\rho_1 - \rho_2) \approx L \Delta\theta \leq \Delta\rho \quad (14)$$

すなわち

$$L \leq \frac{\Delta\rho}{\Delta\theta} \quad (15)$$

を満たす必要がある。式(15)は、線分長 $L$ が $\Delta\rho/\Delta\theta$ 以下であれば必ず $\Delta\theta$ 変化させた時に $\Delta(\rho_1 - \rho_2)$ が $\Delta\rho$ より大きくなるので、交点に交点 $(\rho_0, \theta_0)$ にボーティングされるが、これより長い線分では $\theta$ 軸をボーティングされない可能性を意味する。また式(14)から、線分長 $L$ が短いと複数の $\theta$ の値で $\rho_1 - \rho_2 = 0$ となることがあり、ボーティングの極大値が二つ以上の $\theta$ で現れることがわかる。

以上から、問題点は次の二点である。

①  $L > \Delta\rho/\Delta\theta$ の長い線分では、交点にボーティングされないことがある。 (図3 (a))

②  $L \leq \Delta\rho/\Delta\theta$ の短い線分では、複数の $\theta$ に渡りボーティングの極大値が現れることがある。 (図3 (b))

#### 4. 量子化誤差評価に基づく線分抽出法

##### 4-1 同一点にボーティングされない問題の解決法

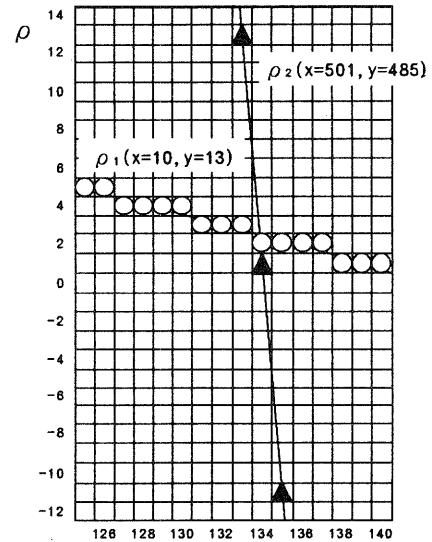
前節で述べた様に、線分の構成画素の内、 $\Delta\rho/\Delta\theta$ 以上離れた点は同一点にボーティングされないことがあるが、これ以下の点は必ず同一点にボーティングされる。従って、ボーティングの極大値 $\geq (\Delta\rho/\Delta\theta)$ となる $(\rho_0, \theta_0)$ を中心として $\Delta\theta$ を細分し、この近辺のみ $\theta$ の精度の高いハフ曲線を描けば、交点が高精度に抽出できる。

画像サイズを $M \times M$ とすると、最長の線分長は $\sqrt{2}M$ である。この最長線分についても同一交点にボーティングされることを保証するには、式(14)を元にして、

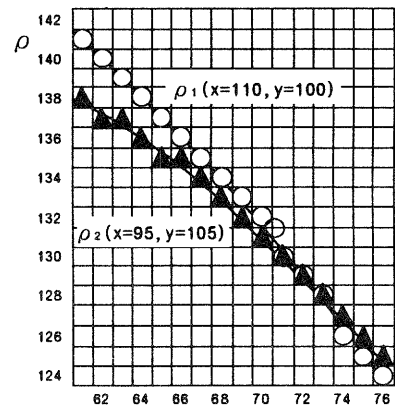
$$\Delta\theta' = \frac{\Delta\rho}{\sqrt{2}M} \quad (16)$$

であれば良いことがわかる。

つまり、 $M=512$ 、 $\Delta\rho=1$ 、 $\Delta\theta=1^\circ$ でハフ曲線を描いた時、ボーティング値が $L > (\Delta\rho/\Delta\theta) = 57.1$ となる交点付近でのみ、 $\Delta\theta$ を $\Delta\theta' (=1/(\sqrt{2}M))$ に細分すれば、最長線分上の全ての点が同一交点にボーティングされる。



(a)  $\theta$  (deg.)



(b)  $\theta$  (deg.)

○△ : Voting Point

図3 Hough曲線の交点

#### 4-2 複数のθに渡りポーティングの極大値が現れる問題の

##### 解決法

##### 4-2-1 線分構成画素の座標値とハフ曲線の交点

式(6)から、線分構成画素のX-Y平面上の座標位置により次の二種類のハフ曲線の交点があることがわかる。

(1) 極大値がハフ平面上で隣接して現れる。

[条件1]

$$\sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{\Delta\rho}{\Delta\theta} \quad (17)$$

線分の構成画素(x, y)が条件1を満たす場合、ハフ曲線は連続しており、図3(b)の様に極大値を取るρ, θはハフ平面上で隣接しているため極大値探索が容易である。

(2) 極大値がハフ平面上で不連続に現れる。

[条件2]

$$\sqrt{x^2 + y^2} > \frac{\Delta\rho}{\Delta\theta} \quad (18)$$

線分の構成画素(x, y)が条件2を満たす場合、ハフ曲線に飛びが生じ、極端な場合には図4の様に同じ極大値をとる点の不連続が続く。従って通常の極値探索法で単に極大値を探索した場合、単一の交点であるべき点が複数の極大点として検出されることになる。

そこで、長い線分におけるポーティングのズレ等を考慮し、

$$\max_{i,j} \sum_{k=1}^1 f(\theta_i, \rho_j + k\Delta\rho) \quad (19)$$

となる最長線分のθ<sub>i</sub>, ρ<sub>j</sub>を選択する。先に述べた様に、複数の極大値のρの値がΔρ間隔でなくても、θはΔθ間隔であるので、連続して極大値を取るθの中央値を求める。

##### 4-2-2 エッジ画素の探索とハフ曲線の除去

4-2-1項で抽出されたθ<sub>i</sub>, ρ<sub>j</sub>から求められる直線に沿ってエッジ画素(x<sub>e</sub>, y<sub>e</sub>)を探索し線分構成画素を求める。次に、ハフ平面上の複数の極大値を同時に消去するために、大和らが提案した様に、線分構成画素に対応するハフ曲線をハフ平面から除去<sup>(7)</sup>する。その後、次に長い線分を4-2-1項の方法により抽出する。これを繰り返せば、長い線分から重複なく高精度に直線を抽出できる。

##### 4-2-3 抽出された直線の最相当てはめ

式(19)のポーティング結果から、次に示す内容の抽出された直線の最適性が保証されている。

(1) 45° ≤ θ<sub>i</sub> < 135° の場合、

$$y = \frac{1}{\sin\theta_i}(\rho_j - x\cos\theta_i) \quad (20)$$

を中心にして距離Δρの範囲内にポーティング値と同じn個の画素がある。

(2) 0° ≤ θ<sub>i</sub> < 45° , 135° ≤ θ<sub>i</sub> < 180° の場合、

$$x = \frac{1}{\cos\theta_i}(\rho_j - y\sin\theta_i) \quad (21)$$

を中心にして距離Δρの範囲内にn個の画素がある。

従って、検出された直線を中心にして距離±Δρの幅の中に最大個数の画素が入っているという意味で最相当てはめになっているので、再度最小二乗近似を行う必要はない。

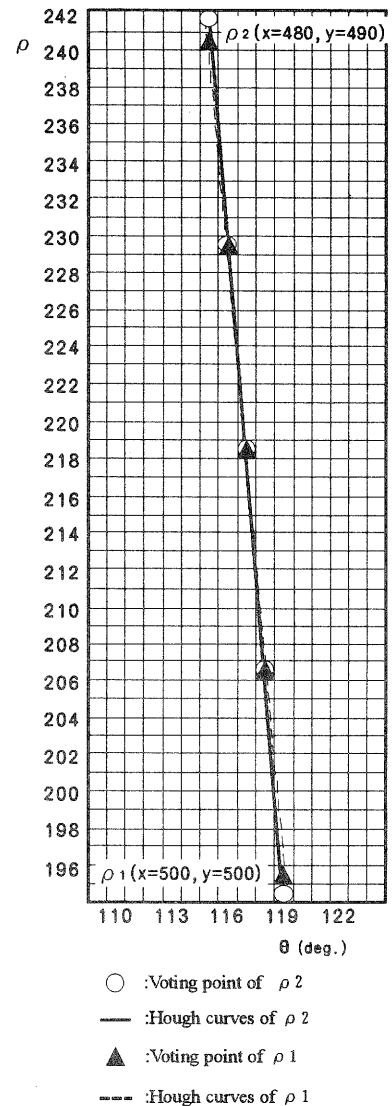


図4 Hough曲線の交点の飛び

## 5. 線分抽出アルゴリズム

前章で述べた原理に従って、線分抽出のアルゴリズムを以下に示す。

### ① 量子化サイズの決定

ハフ平面の $\rho, \theta$ 各軸の量子化サイズ $\Delta\rho, \Delta\theta$ を決める。

### ② ハフ曲線の描画

エッジ画像の各画素について、 $\Delta\theta$ 刻みで $\theta$ を変えながら、

$$\rho_i = x \cos \theta_i + y \sin \theta_i$$

を計算し、ハフ平面にボーティングする。

### ③ 最長線分の $\rho, \theta$ 抽出

$$m_{ij} = \max_{i,i} f(\theta_i, \rho_j) \quad (22)$$

となる $\theta_i, \rho_j$ を求める。最大値を取る点の一つであればこれを選択する。複数ある場合は、

$$m_{ij} = \max_{i,j} \sum_{k=-1}^1 f(\theta_i, \rho_j + k\Delta\rho) \quad (23)$$

を最大のボーティング値の $\theta_i, \rho_j$ について計算し、

$$n = \max(m_{ij}) \quad (24)$$

となる $\theta_i, \rho_j$ を決める。 $n$ が指定値(検出すべき最短線分長)より小さければ、エッジ画像中には検出すべき線分が存在しないので終了となる。

### ④ ボーティング総数 $n > (\Delta\rho/\Delta\theta)$ の場合

$(\theta_i - \Delta\theta/2) \leq \theta \leq (\theta_i + \Delta\theta/2)$ の区間で $\Delta\theta$ を細分し、この区間だけ詳細なハフ曲線を描き最大値を探索する。複数ある場合は、次の⑤のb)と同様の処理をして $\theta'_i, \rho'_j$ を決める。

### ⑤ ボーティング総数 $n \leq (\Delta\rho/\Delta\theta)$ の場合

a)  $\theta_i, \rho_j$ が一つのときはこれを選択する。

b) ボーティング総数 $n$ の $\theta, \rho$ の組が複数ある場合、 $\theta$ が $\Delta\theta$ 間隔で連続してればその中央値を選択し、連続していなければ、別個の線分と判断する。これで、最長線分の $\theta'_i, \rho'_j$ が決まる。

### ⑥ X-Y平面上の最長線分の始点と終点の決定

a)  $45^\circ \leq \theta'_i < 135^\circ$  の場合

$x_i$ をパラメータとして次式から $y_i$ を求める。

$$y_i = \frac{1}{\sin \theta'_i} (\rho'_j - x_i \cos \theta'_i)$$

$y_i - 1 \sim y_i + 1$ 間のエッジ画素の有無を調べる。エッジ画素のある $x_i$ が予め指定された数以上連続していれば線分の始点とし、エッジ画素の無い点が指定された数以上連続した時、この線分の終点とする。また、画面の端に達した時も終点とする。

b)  $0^\circ \leq \theta'_i < 45^\circ, 135^\circ \leq \theta'_i < 180^\circ$  の場合

$y_i$ をパラメータとして

$$x_i = \frac{1}{\cos \theta'_i} (\rho'_j - y_i \sin \theta'_i)$$

についてa)と同様の探索を行う。

### ⑦ 最長線分構成画素のハフ曲線の除去

上のステップで抽出された最長線分を構成する全ての画素について、ハフ平面からハフ曲線を除去する。

その後、③～⑦を繰り返し行う。

## 6. 実験結果

### 6-1 同一点にボーティングされず $\Delta\theta$ の細分が必要な例

4-1節で述べたように、長い線分の構成画素は、ハフ曲線が同一交点にボーティングされず、 $\theta, \rho$ 各軸の量子化の影響も大きく現れる。この結果、本来一本の直線として抽出されるべき線分が、二本以上の直線に

分割されて抽出されることがある。その一例を図5～図7に示す。図5は実験対象の2値化したエッジ画像（画像の大きさ：512×480画素）で、ここから直線を抽出する。図6は何も対策せずにハフ変換を行い線分を抽出した結果である。図7は量子化誤差評価により自動的に $\Delta\theta$ の細分を行い直線を抽出した結果である。

図5のLine element Aに着目すると、何も対策せずにハフ変換を行った場合、Line element Aは表1のLine3とLine9の二本に分割されて抽出されている。表2は、再度エッジ画像を入力し、Line element Aから抽出されたLine3のハフ平面に於けるポーティング結果である。 $\rho=429, \theta=45^\circ$  で極大値151を示しており、151個の画素しかこの交点にポーティングされていない。

次に、 $\Delta\theta'=0.1^\circ$  として細分を行い再度ポーティングした結果が表3で、 $\rho=428, \theta=44.8^\circ$  で極大値158を示している。 $\Delta\theta$ の自動細分アルゴリズムを組み込んだ方式で直線を抽出した結果が表4である。表1のLine3とLine9は表4ではLine3の一本の直線として抽出されている。

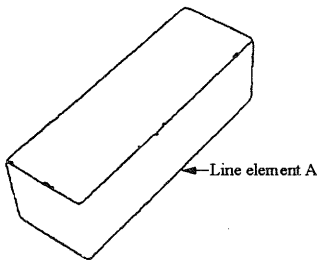


図5 エッジ画像(1)

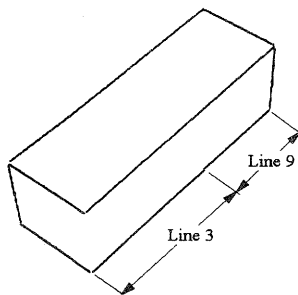


図6 抽出された線分(未対策)

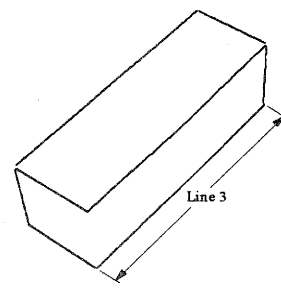


図7 抽出された線分  
(量子化誤差評価に基づく)

表1 エッジ画像(1)から抽出された線分(未対策)

No	start - end	L	$\rho$	$\theta$	V
1	95, 261-333, 54	315	259	49	194
2	191, 326-426, 99	327	367	46	181
3	202, 405-334, 273	187	429	45	156
4	334, 54-425, 97	101	-92	115	76
5	111, 346-198, 405	105	225	124	76
6	93, 267-188, 328	113	173	123	73
7	91, 268-109, 344	78	-23	166	63
8	427, 102-424, 180	78	430	2	63
9	334, 271-422, 183	124	428	45	60

表2 Line3の $\rho=429, \theta=45$ 近辺のポーティング結果

$\rho \backslash \theta$	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
432	7	10	21	35	0	0	5	29	6	14	11
431	11	13	11	30	0	0	24	16	17	11	7
430	14	18	24	22	60	0	42	21	16	11	11
429	10	11	15	30	69	151	37	19	15	11	8
428	10	11	14	26	53	66	38	21	12	11	9
427	9	13	20	22	50	20	27	20	17	12	9
426	12	16	15	28	10	4	36	21	13	11	11

表3  $\rho=429, \theta=45$ 近辺で $\Delta\theta$ を細分したポーティング結果

$\rho \backslash \theta$	44.5	44.6	44.7	44.8	44.9	45.0	45.1	45.2
434	0	0	0	0	0	0	0	0
433	0	0	0	0	0	0	0	0
432	0	0	0	0	0	0	0	0
431	0	0	0	0	0	0	0	0
430	0	0	0	0	0	0	0	21
429	105	92	81	77	79	151	109	87
428	124	143	154	158	138	66	108	67
427	9	3	3	3	21	20	21	61
426	4	2	3	3	2	4	2	4
425	2	5	3	3	4	1	3	2
424	3	1	2	2	2	5	3	4

表4 エッジ画像(1)から抽出された線分(量子化誤差評価に基づく)

No	start - end	L	$\rho$	$\theta$	V
1	93, 262-333, 54	318	259	49.0	208
2	188, 328-426, 100	330	367	46.2	222
3	424, 180-202, 404	315	428	44.8	158
4	109, 345-199, 405	108	226	123.8	80
5	336, 55-425, 97	98	-94	115.3	78
6	92, 267-187, 327	112	175	122.6	80
7	427, 102-423, 179	77	432	2.9	69
8	91, 269-109, 343	76	-25	166.4	67

L:抽出された線分長

V:ポーティング値



## 6-2 複数のθに渡りポーティングの極大値が現れる例

短い線要素が画像原点から離れた位置にある場合、ハフ曲線に飛びが生じ複数のθに渡り極大値が現れる。図8のLine element Bの場合、通常の極値探索では、表5のポーティング結果の $(\rho, \theta) = (453, 1), (448, 0)$ の2点がそれぞれ極大値として検出される。しかし、4-2節で述べた様に本来一本の直線である。そこで、これらの点のθの中央値を求め $(\rho, \theta) = (448, 0)$ として線分を抽出する。ただし、極大値の組が偶数の場合は、θの平均値より小さい中央値を採用する。結果は表6のLine11および図9である。線分抽出後は、抽出アルゴリズムのステップ⑦により複数の極大点は同時に消去される。

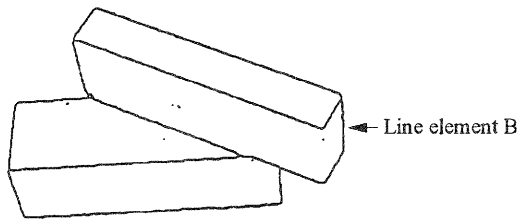


図8 エッジ画像(2)

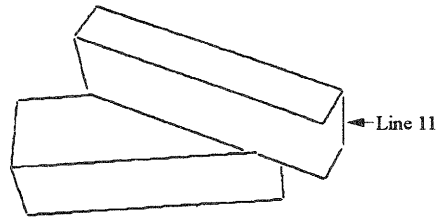


図9 抽出された線分 (量子化誤差評価に基づく)

表5 線要素Bのポーティング結果

$\rho \backslash \theta$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
458	0	0	25	4	3	6	3	0	0	0	0
457	0	0	10	3	6	2	1	0	0	0	0
456	0	0	11	4	4	1	1	0	0	0	0
455	0	0	7	4	2	2	0	0	0	0	0
454	0	0	2	4	4	2	0	0	0	0	0
453	0	38	3	4	4	3	0	0	0	0	0
452	0	8	4	4	3	1	0	0	0	0	0
451	0	3	3	3	2	0	0	0	0	0	0
450	0	9	3	4	2	0	0	0	0	0	0
449	0	2	4	3	2	0	0	0	0	0	0
448	38	4	4	4	1	0	0	0	0	0	0
447	8	4	3	3	1	0	0	0	0	0	0
446	6	2	5	2	0	0	0	0	0	0	0
445	4	4	4	2	0	0	0	0	0	0	0
444	3	4	5	3	0	0	0	0	0	0	1
443	3	4	3	1	0	0	0	0	0	0	2

表6 エッジ画像(2)から抽出された線分 (量子化誤差評価に基づく)

No	start - end	L	$\rho$	$\theta$	V
1	129, 382-384, 368	255	388	87.0	186
2	112, 333-358, 320	246	339	86.8	200
3	181, 201-427, 291	262	126	110.2	201
4	193, 259-345, 317	163	172	111.1	119
5	200, 169-446, 256	261	92	109.6	208
6	361, 322-428, 347	72	171	111.0	55
7	119, 266-112, 335	69	146	6.0	49
8	121, 264-192, 260	71	270	87.0	48
9	178, 202-190, 253	52	-128	167.0	42
10	113, 336-128, 380	46	3	161.0	42
11	448, 264-448, 312	48	448	0.0	38
12	447, 258-428, 290	37	516	30.0	33
13	384, 335-386, 366	31	-366	177.0	28
14	446, 317-430, 346	33	545	30.0	28
15	199, 171-179, 198	34	262	37.0	26

## 7. むすび

本報告では、 $\rho$ - $\theta$ 平面の量子化誤差と量子化されたハフ曲線およびハフ曲線の交点の関係を明確にした。その結果、 $\Delta\rho/\Delta\theta$ と画素の座標値の関係から、 $\Delta\theta$ の精度が不足した場合には自動的に必要な区間だけθの精度を上げて $\rho, \theta$ を決められることを定量的に示した。また、一つの線要素に対するポーティングの極大値が複数現れる場合にも、重複無く線分が抽出できることを示した。提案したアルゴリズムにより、全ての線分が長いものから重複なく、また $\Delta\theta$ を粗く設定しても線分を高精度に抽出できる。実験では、長い線要素が $\Delta\theta$ の細分により抽出精度が向上し一本の線として抽出される例と、短い線要素で極大値が複数現れても一本の線が抽出される例を示した。

今後は、対象物の角である線分の交点を明らかにし、抽出されていない線分の補足などの再構成を行って、ハンドアイシステムへの応用のため物体形状の認識や向きを求める予定である。

### [参考文献]

- (1) 松山隆司, 輿水大和: "Hough変換とパターンマッチング", 情報処理, 30, 9, pp.1035-1046 (1989).
- (2) 森本正志, 尺長健, 赤松茂, 末永康仁: "可変フィルタによるハフ変換の高精度化", 信学論(D), J75-

D2, No. 9, pp. 1548-1556 (1992).

- (3) 和田俊和, 藤井高広, 松山隆司: "  $\gamma$ - $\omega$  ハフ変換 —可変標準化による $\rho$ - $\theta$ パラメータ空間のひずみの除去と投票軌跡の直線化—", 信学論(D), J75-D2, No. 1, pp. 21-30 (1992).
- (4) 関真規人, 和田俊和, 松山隆司: " デジタル直線の幾何学的特性に基づいた  $\gamma$ - $\omega$  Hough変換の高精度化", 情処研資, CV84-2, pp. 7-14 (1993).
- (5) Hough P.V.C.: "Method and Means for Recognizing Complex Patterns", U.S. Patent, 3069654 (1962).
- (6) Duda R.O. and Hart P.E.: "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures", Comm. ACM, 15, 1, pp. 11-15 (1972).
- (7) 大和淳二, 稲葉稔智, 石井郁夫, 牧野秀夫: " Hough変換を用いた線分検出の高精度化", 信学論(D), J72-D2, No. 1, pp. 85-92 (1989).

# 移動部品把持のためのロボットの制御

## 学習制御法により得られた入力パターンの補間

技術第一科 深尾 典久 Norihisa Fukao

あらまし：従来よりロボットと視覚を組み合わせ、ベルトコンベア上を流れる部品を把持する手法について研究を行っている。昨年度までに移動物把持のためのアルゴリズムの検討、装置の開発および実験を行った結果、比較的遅い速度ではベルトコンベア上を流れる部品を把持することが可能となった。しかし、本研究で用いているロボットは、各軸独立のフィードバックによる制御を行っているため、ロボット手先の動作中の位置精度は、サーボ遅れにより高速となるほど悪化する。そのため、部品の移動速度を上げると、把持が不可能となる。

そこで本報告では、ロボットの動作精度を向上させるため、学習制御法を用いる。また、学習制御法においては予め特定のパターンについて実際にロボットを動かして理想入力パターンを習得する必要があるが、今回の場合目標パターンが予め与えられていないので全ての可能性について入力パターンを形成することは困難である。そこでこの問題を克服するため、時間軌道および空間軌道に関する入力パターンの補間法を提案し、実験により有効性を確める。

### 1 まえがき

本研究で用いるロボットは、一般的な産業用ロボットと同様に、各軸独立のフィードバック制御によるロボットコントローラを用いており、高速化によるサーボ誤差の増加によって運動中のハンド先端の位置精度が低下するため、ベルトコンベアがある速度以上の場合には部品の把持が不可能となる。この誤差を減少させるためには種々の方法が提案されているが、本研究では産業用ロボットの利用技術という観点から、実際に利用し易い学習制御法による方法を用いる。学習制御法は、繰り返し練習することによって、与えられた理想の運動フォームを自動的にロボットが獲得する手法であり、同一の条件での試行の繰り返しが可能な場合にその有効性が報告されている<sup>①</sup>。

学習制御法の利点としては、システムの動力的なパラメータを知る必要がないこと、再現性のある外乱に強いこと、実装が比較的容易なこと等があげられる。しかし欠点として、学習により得られる入力トルクパターンは、空間軌道や時間軌道の異なる別の目標運動パターンには利用できないことが挙げられる<sup>②</sup>。従って従来の方法では運動パターンごとに学習を行う必要がある。一方、ここで考えるロボットとベルトコンベアシステムの場合、ベルトコンベアの速度を変えるとロボットの手先の目標軌道を変化させなければならず、多くの速度パターンについて学習する必要がある。さらに、一般の作業ではベルトコンベアの運動に対して直角方向の位置について、任意の位置に把持物体が置かれると考えるべきである。従って、任意の位置に置かれた物体を把持するためにはベルトコンベアの運動と平行なさまざまな目標軌道に対して学習しなければならない。そこで、このような問題を解決するために予めいくつかの目標運動パターンについてのみ学習を行い、その近傍の未知の運動パターンについては、補間により入力パターンを生成する手法について検討および実験を行う。

本報告では2章で機器構成および問題設定について論じ、3章で時間軌道の補間法について説明する。時間軌道の補間法に関しては、空間軌道が同一で時間軌道の異なる3種類の入力パターンが学習により得られた場合に、それらと時間軌道の異なる目標軌道への入力パターンが、学習することなく3種類の入力パターンから直接得られることが既に示されているが<sup>③</sup>、シミュレーション結果のみによってその有効性が確認されているにとどまり、実機を用いた考察はなされていない。4章では空間軌道の補間法に関して、作業座標系にお

いて線形関係が成立する目標軌道の組み合わせに対して、入力線形補間法の精度について議論を行う。さらに5章では、提案した補間法の有効性を実験により検討する<sup>(6),(7)</sup>。

## 2 ベルトコンベアシステムへの学習制御法の適用およびその場合の問題点

### 2.1 機器構成

本研究では、Fig.1 に示す構成のシステムを考える。このシステムは、マニピュレータ、ベルトコンベア、CCDカメラおよび画像処理装置からなり、ロボットが把持すべき部品はベルトコンベア上の任意の位置に置かれ移動する。

CCDカメラはベルトコンベア上部に設置され、部品が視野を通過するときの画像を取り込み、画像処理を行うことによりその時刻における部品の位置および姿勢情報を得る。また、ベルトコンベアは、一定の速度で部品を運びその速度は予め計測しておくことができる。マニピュレータは水平3軸とハンド部を鉛直方向に駆動する直動関節からなる。マニピュレータの実際の位置および速度信号は、各軸に取り付けたエンコーダのパルス及びその微分値を用いる。本研究で特に重要なマニピュレータの第1関節および第2関節に関する仕様をTable1に示す。また、ハンド部の質量は1.1 kgであり第2リンク先端に位置する第2関節の関節軸上に取り付けられている。

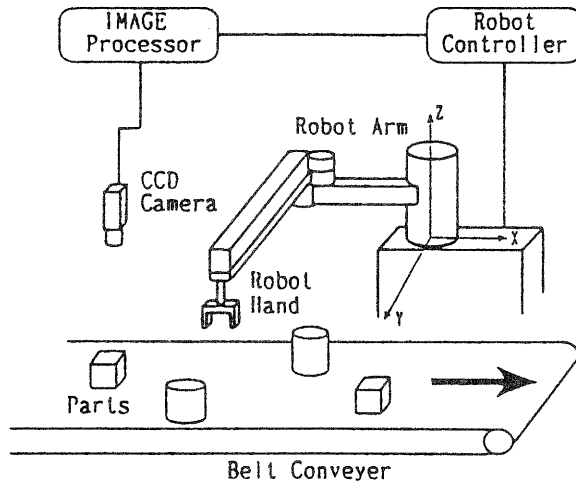


Table 1: Specifications of the robot

	Link1	Link2
Length (mm)	405	395
Center of gravity (mm)	270	255
Mass (kg)	14	11
Inertia ( $\text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$ )	4.38	3.59
Armature inertia ( $\text{gf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$ )	5.2	1.7
Transmission ratio	131	80

Fig. 1: An industrial robot and a conveyor system

### 2.2 移動物の把持

ベルトコンベア上の部品を把持するために、ハンドがベルトコンベア上を流れる部品と同期した等速直線軌道となる様に目標軌道を計画する。このとき、作業座標系を  $xy$  平面がベルトコンベア面と平行で  $x$  軸がベルトコンベアの進行方向である直交座標系とし、ハンドの目標軌道  $p_t = [x_t, y_t]^T$  は、初期位置ベクトル  $p_s = [x_s, y_s]^T$  および  $x$  軸方向の等速速度  $v_x$  を用いて次式で与えられるとする。

$$\begin{aligned}
 x_t &= \begin{cases} x_s + \frac{v_x}{2} \left( t - \frac{T_1}{\pi} \sin \frac{t}{T_1} \pi \right) & (0 \leq t \leq T_1) \\ x_s + \frac{v_x}{2} (2t - T_1) & (T_1 < t \leq T_2) \\ x_s + \frac{v_x}{2} \left( t + \frac{T_3 - T_2}{\pi} \sin \frac{t - T_2}{T_3 - T_2} \pi - T_1 + T_2 \right) & (T_2 < t \leq T_3) \end{cases} \\
 y_t &= y_s
 \end{aligned} \tag{1}$$

すなわち、ハンドは  $0 \leq t < T_1$  の間加速、 $T_1 \leq t < T_2$  の間等速、 $T_2 \leq t < T_3$  の間減速し、 $t = T_3$  で停止する。そして、等速時間にハンドを降下させて把持を行う。

作業座標系の  $x$  方向の目標速度を Fig.2 に示す。逆運動学を解いて関節角における目標軌道を求め、それをマニピュレータに指令して、先端にとりつけられたハンドにより把持を行う。

等速速度  $0.2\text{m/sec}$  の比較的遅い速度で把持実験を行ったところ、最大位置誤差は  $0.9\text{mm}$  であった。ただし、位置誤差は作業座標における目標位置と実際のハンドの位置の間の距離であり、最大位置誤差は実行時間全体での位置誤差の最大値である。この場合はハンドと部品との間の余裕があるため、画像処理等により生じる誤差を加えても良好に把持が行えた。

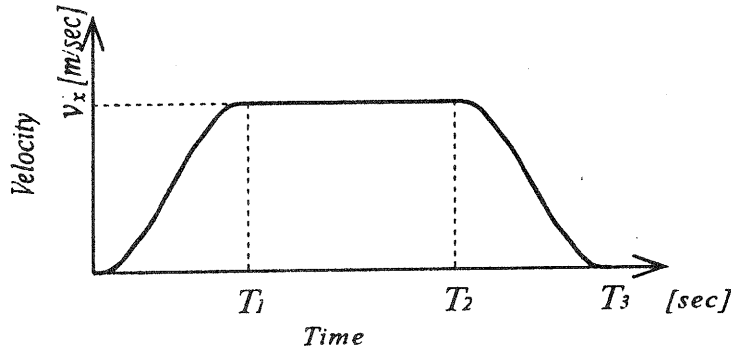


Fig. 2: Desired velocity pattern in task coordinates

### 2.3 ハンドの軌道誤差および学習制御法の適用

本システムの効率を高めるためには、ベルトコンベアを速度を上げ、高速で流れる部品を把持できることが望ましい。しかし高速化すると、目標軌道と現実のマニピュレータの軌道の間でサーボ誤差が増加するため、運動中のハンド先端の  $xy$  平面内での位置精度が低下し、ある速度以上では部品の把持が不可能となる。等速速度  $v_x$  が  $1\text{m/sec}$  として実験を行ったところ、最大位置誤差は  $3.17\text{mm}$  となった。本システムにおいては、画像処理等によっても誤差が生じるため、サーボ遅れのみによって  $3\text{mm}$  程度の誤差が生じると、安定した把持が行えなくなる。

そこで、作業座標の  $xy$  平面、すなわち Fig.1 に示すマニピュレータの第1および第2関節に学習制御法を適用し、動作精度の向上を試みた。今回は、次式で定義する P 型学習制御法<sup>®</sup> を用いた。

$$\begin{aligned}
 e_k &= y_d - y_k \\
 y_0^* &= y_d \\
 y_{k+1}^* &= y_k^* + \Theta e_k
 \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、

$y_d$ : 目標角速度

$y_k$ :  $k$  回目の試行におけるマニピュレータの角速度

$y_k^*$ :  $k$  回目の試行に用いる指令角速度、

$e_k$ : 角速度の誤差

$\Theta$ : 学習ゲイン

である。学習ゲイン $\Theta$ は時不変の対角マトリクスであり、今回は $\Theta = \text{diag}[0.9, 0.9]$ とした。

学習制御法により得られた入力を用いることにより最大位置誤差は3.6mmであったものが0.13mmまで改善され、把持のために十分な精度が得られた。しかしながら、学習制御法により精度の良い入力を得るためには、実際に数回マニピュレータを動かす必要があるため、このシステムのように任意の目標軌道に対処しなければならない場合適用が困難である。そこで、次章以降に学習制御法により得られた入力パターンの補間法を提案するとともに、このマニピュレータの第1および第2関節を用いた実験およびシミュレーションにより、提案した方法の効果を検討する。

### 3 学習により得られた入力の時間軌道補間

関節における粘性およびクーロン摩擦を考慮したロボットのダイナミクスを、次式で与える。

$$\begin{aligned} R(q(t)) \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \left( \frac{dq(t)}{dt} \right)^T S(q(t)) \left( \frac{dq(t)}{dt} \right) \\ + D \frac{dq(t)}{dt} + g(q(t)) + h(\text{sgn}(\frac{dq(t)}{dt})) = u(t) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

$q(t)$ : 時間  $t$  の関数として与えられる関節角ベクトル ( $n \times 1$ )

$$q(t) = [q^1(t), q^2(t), \dots, q^n(t)]^T,$$

$R(q)$ : ロボットの慣性行列 ( $n \times n$ ),

$S(q)$ : コリオリ力および遠心力を規定する位置に依存するテンソル ( $n \times n \times n$ ),

$D$ : 粘性係数行列 ( $n \times n$ ),

$g(q)$ : 重力項ベクトル ( $n \times 1$ ),

$h(\text{sgn}(\frac{dq}{dt}))$ : クーロン摩擦項ベクトル ( $n \times 1$ ),

$$h(\text{sgn}(\frac{dq(t)}{dt})) = [h^1 \text{sgn}(\frac{dq^1}{dt}), h^2 \text{sgn}(\frac{dq^2}{dt}), \dots, h^n \text{sgn}(\frac{dq^n}{dt})]^T$$

ここで  $\text{sgn}(\cdot)$  ( $1 \leq i \leq n$ ) は  $q^i$  の符号である。

$u(t)$ : 入力トルクベクトル ( $n \times 1$ ).

である。この時、空間軌道が同一で時間軌道が異なる3種類の目標軌道が、

$$\begin{aligned} q_1(t) & \quad 0 \leq t \leq T_1 \\ q_2(t) & \quad 0 \leq t \leq T_2 \\ q_3(t) & \quad 0 \leq t \leq T_3 \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられるとする。ここで  $T_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) は、各々の目標軌道の終了時刻である。これらの目標軌道を実現する入力パターンが学習により得られた場合にそれらを用いて、空間軌道は同一であるが時間軌道が異なる任意の目標軌道に対する入力パターンを構成することを考える。

まず、目標軌道  $q_i(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) を実現する入力パターン  $u_i(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) が学習により得られると仮定すると、次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} R(q_i(t)) \frac{d^2 q_i(t)}{dt^2} + \left( \frac{dq_i(t)}{dt} \right)^T S(q_i(t)) \left( \frac{dq_i(t)}{dt} \right) \\ + D \frac{dq_i(t)}{dt} + g(q_i(t)) + h(\text{sgn}(\frac{dq_i(t)}{dt})) = u_i(t) \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (5)$$

次に $q_i(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) と空間軌道が同一で時間軌道が異なる他の目標軌道が

$$q_0(t) \quad 0 \leq t \leq T_0 \quad (6)$$

で与えられるとする。ただし各々の目標軌道において次式の関係が成り立つと仮定する。

$$q_0(t) = q_1(t/k_1) = q_2(t/k_2) = q_3(t/k_3) \quad (7)$$

ここで $k_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) は正のスカラーであり、時間軌道変化の要因となる比例定数である。すなわち $1/k_i > 1$ の場合に高速となり $1/k_i < 1$ の場合に低速となる。原理的には、時間軸が一定の比率で変化しない場合に対しても本方式を拡張することが可能である。ただし、ここではベルトコンベアシステムへの応用を中心に考えるので、一定比率でも十分な利用価値があると考えられる。

この時以下の関係に注意する。

$$\frac{dq_0(t)}{dt} = \frac{1}{k_i} \frac{dq_i(t/k_i)}{d(t/k_i)} \quad (8)$$

$$\frac{d^2q_0(t)}{dt^2} = \frac{1}{k_i^2} \frac{d^2q_i(t/k_i)}{d(t/k_i)^2} \quad (9)$$

ここで(7)式の関係を考慮し(5)式における $t$ を $t/k_i$ で置き換えると、

$$\begin{aligned} & R(q_i(t/k_i)) \frac{d^2q_i(t/k_i)}{d(t/k_i)^2} + \left( \frac{dq_i(t/k_i)}{d(t/k_i)} \right)^T S(q_i(t/k_i)) \left( \frac{dq_i(t/k_i)}{d(t/k_i)} \right) \\ & + D \frac{dq_i(t/k_i)}{d(t/k_i)} + g(q_i(t/k_i)) + h(\text{sgn}(\frac{dq_i(t/k_i)}{d(t/k_i)})) = u_i(t/k_i) \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (10)$$

(10)式に(7)(8)(9)式の関係を代入すると、

$$\begin{aligned} & k_i^2 \left\{ R(q_0(t)) \frac{d^2q_0(t)}{dt^2} + \left( \frac{dq_0(t)}{dt} \right)^T S(q_0(t)) \left( \frac{dq_0(t)}{dt} \right) \right\} \\ & + k_i \left\{ D \frac{dq_0(t)}{dt} \right\} + g(q_0(t)) + h(\text{sgn}(\frac{dq_0(t)}{dt})) = u_i(t/k_i) \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (11)$$

さらにこの関係は次式のように書ける。

$$\begin{bmatrix} k_1^2 I & k_1 I & I \\ k_2^2 I & k_2 I & I \\ k_3^2 I & k_3 I & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(t/k_1) \\ u_2(t/k_2) \\ u_3(t/k_3) \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで $I$ は単位行列を表す。また $P_i(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P_1(t) &= R(q_0(t)) \frac{d^2q_0(t)}{dt^2} + \left( \frac{dq_0(t)}{dt} \right)^T S(q_0(t)) \left( \frac{dq_0(t)}{dt} \right) \\ P_2(t) &= D \frac{dq_0(t)}{dt} \\ P_3(t) &= g(q_0(t)) + h(\text{sgn}(\frac{dq_0(t)}{dt})) \end{aligned} \quad (13)$$

目標軌道 $q_0(t)$ を実現するための入力パターン $u_0(t)$ は $P_i(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ )を用いて、

$$u_0(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) \quad (14)$$

となる。

(12)式左辺の行列の行列式は Vandermonde の行列式となり、 $k_i = k_j$  ( $\forall i, j; i \neq j$ ) とならない限り 0 とならない。従って(12)(14)式を用いて、求める入力パターン $u_0(t)$ は次式のように、既知の3種類の入力パター

ン $u_i(t/k_i)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) を用いた単純な線形結合で表せる.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_0(t) &= \begin{bmatrix} I & I & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1^2 I & k_1 I & I \\ k_2^2 I & k_2 I & I \\ k_3^2 I & k_3 I & I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1(t/k_1) \\ \mathbf{u}_2(t/k_2) \\ \mathbf{u}_3(t/k_3) \end{bmatrix} \\ &= +\alpha_1 \mathbf{u}_1(t/k_1) + \alpha_2 \mathbf{u}_2(t/k_2) + \alpha_3 \mathbf{u}_3(t/k_3) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -\frac{(1-k_2)(1-k_3)}{(k_3-k_1)(k_1-k_2)} \\ \alpha_2 &= -\frac{(1-k_3)(1-k_1)}{(k_1-k_2)(k_2-k_3)} \\ \alpha_3 &= -\frac{(1-k_1)(1-k_2)}{(k_2-k_3)(k_3-k_1)} \end{aligned}$$

すなわち未知の入力パターン $\mathbf{u}_0(t)$ は, 学習制御法により得られた入力パターン $\mathbf{u}_i(t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) を時間変化した入力パターン $\mathbf{u}_i(t/k_i)$  と, 時間変化の比率を決める要因である定数 $k_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) のみを用い, 構成することができる. そのとき実際にロボットを動かして学習する必要はない.

#### 4 学習により得られた入力空間軌道補間

本章では, 空間的に異なるいくつかの目標軌道を実現する理想入力パターンが学習制御により与えられたとき, それらを用いて別の目標軌道を実現する入力を作成する方法について検討する. ただし, 空間的に異なるあらゆる目標軌道を考慮する事は, 運動学および動力学的に異なる運動パターンの中で補間を行うことであり, これらの持つ強い非線形性のため一般に厳密な理想入力を簡単な線形補間などによって得ることは難しい. そのため, ベルトコンベアシステムへの応用を主目的として, 空間軌道の組み合わせに条件を設け, その範囲で近似的に補間入力を作成する方法を提案する.

仮に目標運動の終了時刻が異なっても前章の方法によって時間軸を変化させて同じ終了時刻とできるので, ここでは, 各々の目標軌道で同じ終了時刻 $T$ を定める. 本研究で対象としているベルトコンベアシステムの場合, ベルトコンベアに沿った2つの軌道 $p_1, p_2$ とその中間の新たな軌道 $p_0$ について Fig.3(a) に見られるように

$$\begin{aligned} p_0(t) &= \beta_1 p_1(t) + \beta_2 p_2(t) \\ \beta_1 + \beta_2 &= 1 \end{aligned} \quad (16)$$

が成立していることは容易に理解できる. また, Fig.3(b) に示される例なども (16) 式を満たす場合であり, 比較的多くの作業において適用されると思われる.

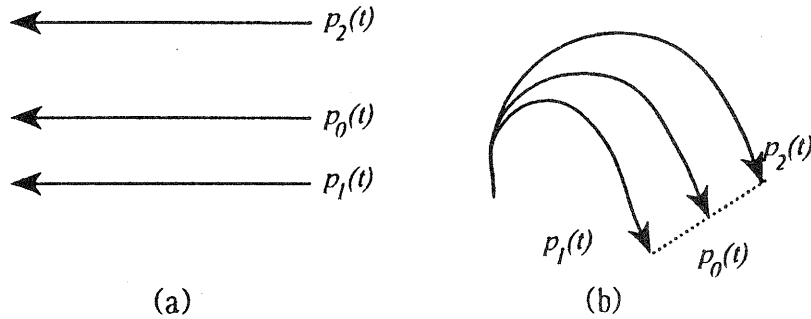


Fig. 3: Examples of desired motions with linearity



以下では、本研究で対象とする平面内での運動について (16) 式を用いて考える。目標軌道  $p_0$  を実現するための近似的な関節角入力  $\tilde{u}_0$  を得る単純な方法として、

$$\tilde{u}_0 = \beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 \quad (17)$$

を考える。ここで  $u_1(t)$  と  $u_2(t)$  はそれぞれ、直交座標での目標軌道  $p_1(t)$  と  $p_2(t)$  を実現する関節角座標系での理想入力パターンである。

当然ながら、ロボットマニピュレータの運動学および動力学的な非線形性のために、近似入力  $\tilde{u}_0(t)$  は  $u_0(t)$  と異なる。しかし現実的には  $p_1(t)$  と  $p_2$  の間隔が十分に小さければ、 $\tilde{u}_0$  と  $u_0$  の違いは非常に小さいものであると考えて良い。  $\tilde{u}_0$  の近似精度を議論するため、(3) および (17) 式より得られる次の関係に注意する。

$$\begin{aligned} \tilde{u}_0 - u_0 &= \beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 - u_0 \\ &= \beta_1 (R_1 J_1^{-1} - R_0 J_0^{-1}) \ddot{p}_1 + \beta_2 (R_2 J_2^{-1} - R_0 J_0^{-1}) \ddot{p}_2 \\ &\quad + \beta_1 (R_0 J_0^{-1} \dot{J}_0 J_0^{-1} - R_1 J_1^{-1} \dot{J}_1 J_1^{-1} + \dot{p}_1^T J_1^{-T} S_1 J_1^{-1} - \dot{p}_0^T J_0^{-T} S_0 J_0^{-1} + D(J_1^{-1} - J_0^{-1})) \dot{p}_1 \\ &\quad + \beta_2 (R_0 J_0^{-1} \dot{J}_0 J_0^{-1} - R_2 J_2^{-1} \dot{J}_2 J_2^{-1} + \dot{p}_2^T J_2^{-T} S_2 J_2^{-1} - \dot{p}_0^T J_0^{-T} S_0 J_0^{-1} + D(J_2^{-1} - J_0^{-1})) \dot{p}_2 \\ &\quad + \beta_1 (g_1 - g_0) + \beta_2 (g_2 - g_0) + \beta_1 (h_1 - h_0) + \beta_2 (h_2 - h_0) \end{aligned} \quad (18)$$

ここで  $q_i$  は  $p_i$  と対応する関節角ベクトル、また  $R_i = R(q_i)$ ,  $S_i = S(q_i)$ ,  $J_i = J(q_i) = \partial p_i / \partial q_i$  (ヤコビアン行列) である。ヤコビアン行列が正則、すなわち目標軌道  $p_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) が特異姿勢をとらないと仮定すると、

$$\|\tilde{u}_0 - u_0\| \leq C_1 \|p_1 - p_0\| + C_2 \|\dot{p}_1 - \dot{p}_0\| + C_3 \|p_2 - p_0\| + C_4 \|\dot{p}_2 - \dot{p}_0\| \quad (19)$$

ここで  $\|\cdot\|$  は適当なノルム、 $C_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) は正のスカラールを表す。(16) 式を (19) 式へ代入すると、

$$\|\tilde{u}_0 - u_0\| \leq (\beta_2 C_1 + \beta_1 C_3) \|p_1 - p_2\| + (\beta_2 C_2 + \beta_1 C_4) \|\dot{p}_1 - \dot{p}_2\| \quad (20)$$

さらにベルトコンベアシステムの場合、目標軌道  $p_1$   $p_2$   $p_0$  が同じ速度パターンを持つので、特に、

$$\|\tilde{u}_0 - u_0\| \leq (\beta_2 C_1 + \beta_1 C_3) \|p_1 - p_2\| \quad (21)$$

となる。

仮に、係数  $C_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) が小さい値であるとするなら、 $\tilde{u}_0$  は  $u_0$  の良い近似であるといえる。その場合には  $p_1$  と  $p_2$  の差がかなり大きくても  $\tilde{u}$  と  $u$  の差は小さくなる。逆に、係数  $C_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) があまり小さくないとき  $u_0(t)$  の良い近似を得ることはできない。その様な場合には  $p_1$  と  $p_2$  の間に他の目標軌道を定め、それを実現する理想入力を学習制御により準備すべきである。

係数  $C_1$ ,  $C_3$  の値を適切に評価することは一般には難しいが、近似精度を議論するための興味深い特性は (18) 式右辺第 1 項などに現れる。すなわち、

$$\|\beta_1 (R_1 J_1^{-1} - R_0 J_0^{-1}) \ddot{p}_1\| \leq \|\beta_1 \ddot{p}_1\| \{ \|R_1 - R_0\| \|J_1^{-1}\| + \|R_0\| \|J_1^{-1} - J_0^{-1}\| \} \quad (22)$$

を得る。

この不等式の右辺第 1 項は慣性行列  $R$  の非線形性、すなわち動力学的な非線形性を示す。多くの産業用ロボットでは、比較的大きな減速比を持つことから、モータのロータ慣性を含む慣性行列  $R$  の対角要素が支配的となる。ゆえに、マニピュレータの姿勢に依存する慣性行列  $R$  の変化はそれほど大きくないと考えられる。第 2 項はヤコビアン行列の非線形性、すなわち運動学的な非線形性を示す。従って、目標軌道が特異点近傍を含む場合、その付近での逆ヤコビアン行列  $J^{-1}$  の強い非線形性による補間性能の劣化が見られるであろうと予想される。

## 5 実験

### 5.1 時間軌道補間に関する適用法

本実験で考えているマニピュレータの関節は水平の2軸型であり、重力の影響を考慮する必要はない。従ってクーロン摩擦を無視できると仮定すると(5)式は、

$$R(q_i(t)) \frac{d^2 q_i(t)}{dt^2} + \left( \frac{dq_i(t)}{dt} \right)^T S(q_i(t)) \left( \frac{dq_i(t)}{dt} \right) + T \frac{dq_i(t)}{dt} = u_i(t) \quad i = 1, 2 \quad (23)$$

とおける。従って(13)式において $P_3(t)$ は省略できるので、(14)式および(15)式はそれぞれ、

$$u_0(t) = P_1(t) + P_2(t) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} u_0(t) &= \begin{bmatrix} I & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1^2 I & k_1 I \\ k_2^2 I & k_2 I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_1(t/k_1) \\ u_2(t/k_2) \end{bmatrix} \\ &= \alpha_1 u_1(t/k_1) + \alpha_2 u_2(t/k_2) \end{aligned} \quad (25)$$

となる。ここで、

$$\alpha_1 = \frac{(1 - k_2)}{k_1(k_1 - k_2)}, \quad \alpha_2 = \frac{(1 - k_1)}{k_2(k_2 - k_1)}$$

である。

### 5.2 産業用ロボットのフィードフォワード入力形式

入力パターンはマニピュレータへ与えるトルクパターンとして定義されているが、本実験で用いたマニピュレータは多くの産業用ロボットと同様に、位置と速度の指令値のみを自由に設定できるようになっている。そこで学習によって構成するフィードフォワード入力 $v$ は、真の目標軌道 $q_d$ に対する見かけ上の指令軌道 $q_d^*$ の差によって与える。すなわち、関節角入力トルクパターン $u$ を次のように与える。

$$u = K_p(q_d^* - q) + K_v(\dot{q}_d^* - \dot{q}) \quad (26)$$

$$= K_p(q_d - q) + K_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + v \quad (27)$$

ここで $K_p$ 、 $K_v$ は位置および速度のフィードバックゲイン行列であり、フィードフォワードは、

$$v = K_p(q_d^* - q_d) + K_v(\dot{q}_d^* - \dot{q}_d) \quad (28)$$

によって与えられる。(27)式において学習により $q_d - q \approx 0$ 、 $\dot{q}_d - \dot{q} \approx 0$ となっていることから、学習終了後は $u \approx v$ と見なせる。従って、時間軌道補間と空間軌道補間のフィードフォワード入力として(28)式の $v$ を利用する。

### 5.3 時間軌道補間の実験結果

目標直線軌道 $p_{t0}$ 、 $p_{t1}$ 、 $p_{t2}$ を(1)式に示される運動パターンで与える。また、このパラメータをTable2に示す。これらの軌道は、空間的にはFig.4(a)に示されるものとなる。

これらの軌道から逆運動学を解いて、関節角座標で記述された目標軌道 $q_{d0}$ 、 $q_{d1}$ 、 $q_{d2}$ をサンプリングタイム6msec,3msec,9msecで用意する。すなわち、デジタル値として記憶される目標軌道 $q_{d0}$ 、 $q_{d1}$ 、 $q_{d2}$ の $i$ 番目の値は、それぞれ空間上の同じ位置を指す。補間性能を評価するため、以下の3種類の入力を用いた場合の目標軌道と実際のマニピュレータ手先軌道の誤差を比較した。

i.  $q_{d0}$  についてのフィードバック制御のみ

ii.  $q_{d0}$  についての学習制御

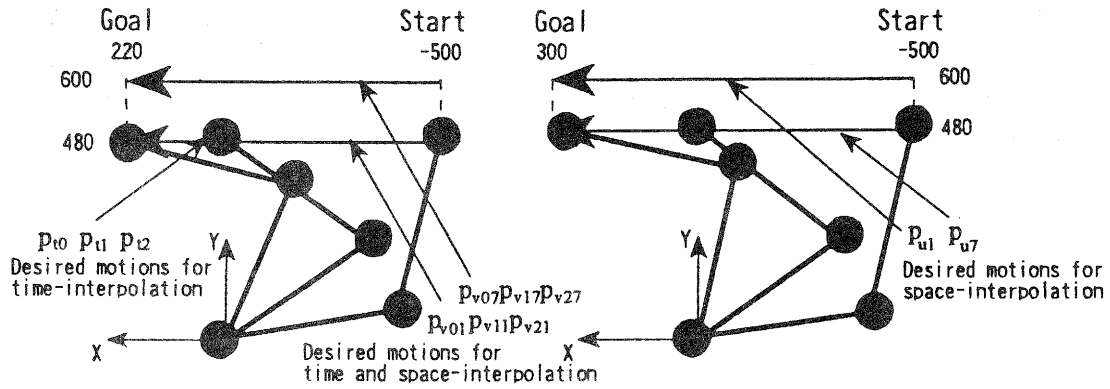


Fig. 4: The top view of the robot

Table 2: Parameters of desired motion patterns in task coordinates

	$v_x[m/sec]$	$T_1[sec]$	$T_2[sec]$	$T_3[sec]$
$p_{t0}$	0.45	1.0	1.6	2.6
$p_{t1}$	0.9	0.5	0.8	1.3
$p_{t2}$	0.3	1.5	2.4	3.9

Initial position  $p_s = (-0.5[m] \ 0.48[m])^T$

Terminal position  $p_g = (0.22[m] \ 0.48[m])^T$

### iii. $q_{d0}$ についての (25) 式に示される入力補間法

それぞれの作業座標での誤差の時間履歴を Fig.5(a) に示す。これによると作業座標における最大位置誤差は、iのフィードバック制御のみによる場合 1.75mm, iiの学習制御による場合 0.07mm, そして iiiの補間を行った場合 0.1mm であり、学習制御による場合と補間による場合を比較するとその差はノイズレベルに収まる。このことから、この補間法によりほぼ完全なフィードフォワード入力パターンを得られると考えることができる。

## 5.4 空間軌道補間の実験結果

本節では、4章で提案した空間軌道が異なる目標軌道のための近似入力補間法について実験を行う。まず Table 3 および Fig.4(b) に示されるように、時間軌道が同じで空間軌道が平行な 7 種類目標軌道  $p_{ui}$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) を定義する。これらの軌道はベルトコンベアに沿った直線運動を意味している。また、逆運動学を解いて関節角座標での目標軌道  $q_{di}$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) を求め、ベルトコンベアの外側の 2 直線に対応する軌道  $q_{d1}$  と  $q_{d7}$  を実現する入力を学習制御によって準備しておく。そして、それらの入力パターンと (17) 式に示される補間法を用い、 $q_{di}$  ( $i = 2, 3, \dots, 6$ ) についての入力を形成する。ここで係数  $\beta_1, \beta_2$  は y 軸方向の距離の比率とした。

空間補間性能を評価するため、それぞれの目標軌道  $q_{di}$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) に対し以下の 3 種類の入力を用い、目標軌道と実際のマニピュレータの動作の誤差を比較した。

- i.  $q_{di}$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) についてのフィードバック制御のみ
- ii.  $q_{di}$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) について学習制御
- iii.  $q_{di}$  ( $i = 2, 3, \dots, 6$ ) について (17) 式に示される入力補間法

y座標を横軸にとった各軌道ごとの最大位置誤差を Fig.5(b) に示す。これによると作業座標における最大位置誤差は、iのフィードバック制御のみによる場合 3.17mm から 3.27mm の範囲、iiの学習制御による場合そ

それぞれの軌道で 0.13mm 以下, iiiの補間を行った場合ベルトコンベアの中央付近の軌道でも 0.26mm 以下であった。このことから, 近似入力による補間の結果は, 学習制御による結果と比較すると精度が劣るが, フィードバック制御のみの場合に比べ十分な精度の向上がみられることがわかる。また, 中央の目標軌道 $q_{d4}$ についての作業座標における誤差の時間履歴を, Fig.5(c) に示す。

Table 3: Parameters of desired motion patterns in task coordinates

	$p_s ([m], [m])^T$	$p_g ([m], [m])^T$	
$p_{u1}$	$(-0.5, 0.48)^T$	$(0.3, 0.48)^T$	$v_x = 1.0[m/sec]$ $T_1 = 0.5[sec]$ $T_2 = 0.8[sec]$ $T_3 = 1.3[sec]$ $p_s$ : Initial position $p_g$ : Terminal position
$p_{u2}$	$(-0.5, 0.50)^T$	$(0.3, 0.50)^T$	
$p_{u3}$	$(-0.5, 0.52)^T$	$(0.3, 0.52)^T$	
$p_{u4}$	$(-0.5, 0.54)^T$	$(0.3, 0.54)^T$	
$p_{u5}$	$(-0.5, 0.56)^T$	$(0.3, 0.56)^T$	
$p_{u6}$	$(-0.5, 0.58)^T$	$(0.3, 0.58)^T$	
$p_{u7}$	$(-0.5, 0.60)^T$	$(0.3, 0.60)^T$	

## 5.5 時空間軌道補間

本節では, 時間軌道補間と空間軌道補間を併用した場合について検討する。そのためにベルトコンベアの両端に沿った 2つの異なる空間軌道の各々について, 2種類の時間軌道を設定する。これらを  $p_{v11}$ ,  $p_{v21}$ ,  $p_{v17}$ ,  $p_{v27}$  とし, Table4 および Fig.4(a) に示す。まず時間軌道のみが異なる 2組の基本目標軌道 $p_{u11}$ と $p_{u21}$  および  $p_{u17}$ と $p_{u27}$ から, 各々の中間の速度である目標軌道 $p_{v01}$ および $p_{v07}$ を実現する入力パターンを(25)式によって時間補間する。次にそれらを用いて, 目標軌道 $p_{v0i}$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ )を実現する入力を(10)式によって空間補間する。

本実験についても前節と同様に補間性能を評価するため, フィードバック制御のみの場合, 学習制御を行った場合および補間を行った場合について比較した。各軌道の Y 座標を横軸にとった各軌道ごとの最大位置誤差を Fig.5(d) に示す。最大位置誤差は, フィードバック制御のみの場合 1.7mm 以上であるのに対し, 学習制御による場合 0.09mm 以下, 補間による場合 0.14mm 以下であり, 補間によっても十分な精度の向上がみられる。

## 6 むすび

学習制御により習得した入力パターンから他の目標軌道を実現するための, 時間軌道および空間軌道に関する 2つの補間法を提案した。そしてこれらの方法を用いて, 別の目標軌道に対する精度の良い入力パターンが実現できることを実験的に確認した。

今回の実験は, 2自由度のロボットのみを用いたが, 今後 6自由度のロボットについても実験を行う必要がある。また今回は, 対象物にロボットハンドが接触しない場合についてのみ実験を行ったが, 提案した補間法はどちらも, 接触環境のロボットにも適用できると予想される。接触環境においては, ロボットと環境の間の摩擦力の影響を計算することは一般に困難であるため, 提案した方法は実用的な観点からさらに重要となると思われる。

## 謝辞

本研究についてご指導いただいた川村貞夫研究参与(立命館大学助教授)に深く感謝いたします。

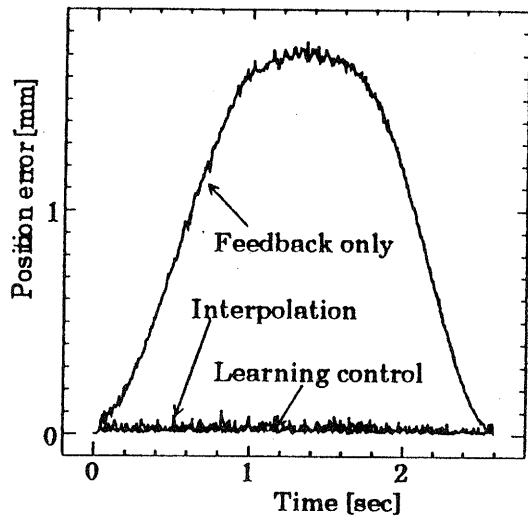
Table 4: Parameters of desired motion patterns in task coordinates

	$p_s([m], [m])^T$	$v_x[m/sec]$	$T_1[sec]$	$T_2[sec]$	$T_3[sec]$
$p_{v11}$	$(-0.5, 0.48)^T$	0.9	0.5	0.8	1.3
$p_{v21}$	$(-0.5, 0.48)^T$	0.3	1.5	2.4	3.9
$p_{v17}$	$(-0.5, 0.60)^T$	0.9	0.5	0.8	1.3
$p_{v27}$	$(-0.5, 0.60)^T$	0.3	1.5	2.4	3.9
$p_{v01}$	$(-0.5, 0.48)^T$	0.45	1.0	1.6	2.6
$p_{v02}$	$(-0.5, 0.50)^T$	0.45	1.0	1.6	2.6
$p_{v03}$	$(-0.5, 0.52)^T$	0.45	1.0	1.6	2.6
$p_{v04}$	$(-0.5, 0.54)^T$	0.45	1.0	1.6	2.6
$p_{v05}$	$(-0.5, 0.56)^T$	0.45	1.0	1.6	2.6
$p_{v06}$	$(-0.5, 0.58)^T$	0.45	1.0	1.6	2.6
$p_{v07}$	$(-0.5, 0.60)^T$	0.45	1.0	1.6	2.6

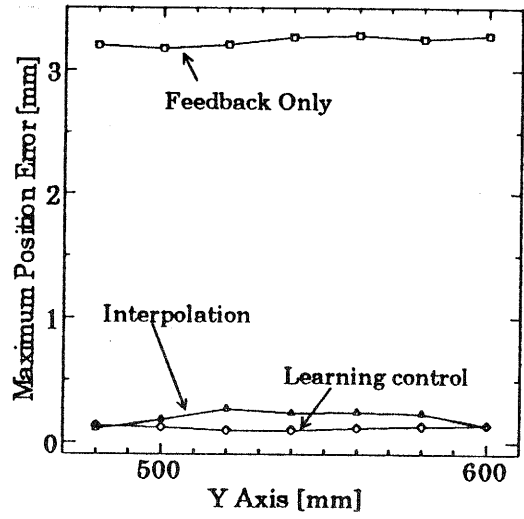
$p_s$  : Initial position

[参考文献]

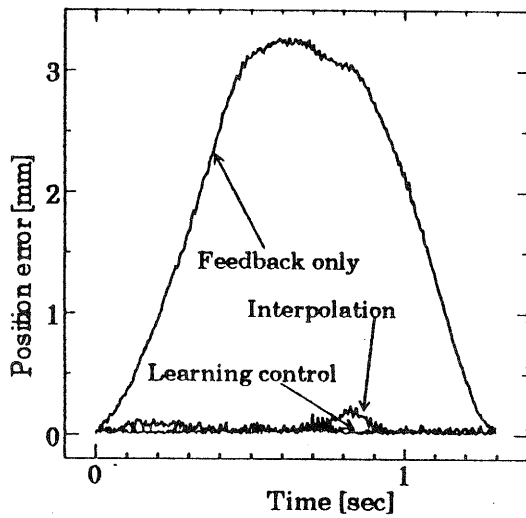
- (1) 深尾:滋賀県工業技術センター研究報告(1992), PP. 40-45
- (2) S.Arimoto, S.Kawamura and F.Miyazaki: "Bettering operation of robots by learning", J. of Robotic Syst. 1,123-140(1984)
- (3) J.J.Craig:"Adaptive Control of Mechanical Manipulators", pp.85-99,Addison-Wesley(1988)
- (4) J.M.Hollerbach:"Dynamic Scaling of Manipulator Trajectories", Trans. of the ASME 102/Vol106(1984)
- (5) S.Kawamura, F.Miyazaki and S.Arimoto: "Intelligent Control of Robot Motion Based on Learning Method", Proc. of IEEE international symp. on intelligent control(1987)
- (6) 深尾, 月瀬, 川村: "移動している部品のロボットアームによる把持", 日本機械学会 D and D Conf.'93 Vol.B,pp.273-277(1993)
- (7) 深尾, 月瀬, 川村: "ロボットの学習制御における入力パターンの補間法", 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集,pp.929-930(1993)



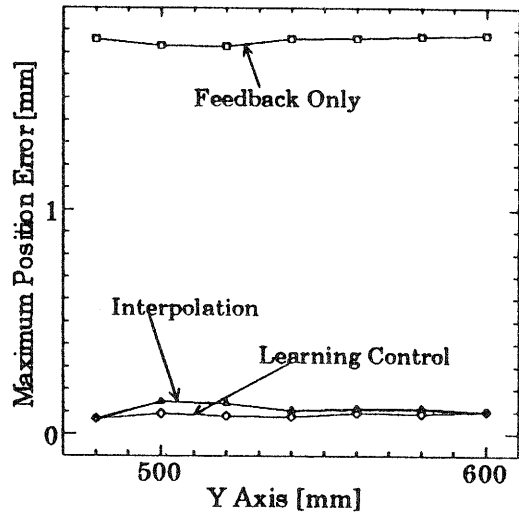
(a) Time interpolation



(b) Space interpolation



(c) Trajectory error in  $q_{d4}$



(d) Time and space interpolation

Fig.5: Experimental results

# シリコンモノマーのプラズマ重合が フィルム－金属蒸着膜間の接着性に及ぼす影響について

技術第二科 中村 吉紀 Yoshiki Nakamura  
松川 進 Susumu Matsukawa  
(株)麗光 岩井 順一 Jun-ichi Iwai  
堀井 滋夫 Shigeo Horii

あらまし：ポリプロピレンフィルム（PP）上でビニルトリメトキシシランのプラズマ重合を行い、その上にアルミニウム（Al）を真空蒸着し、PP/Al複合膜を作製した。プラズマ重合条件とPP/Alの接着性との関係を調べ、高い接着強度が得られる条件を求めた。0.2 Torr以下では薄膜が、0.3 Torr以上では粉体の生成が認められた。0.05～0.1 Torrでは、低放電電力（数W以下）、短時間（数十秒以下）と言った比較的弱い条件で高い接着強度が得られた。高接着強度を得るには、一定量以上のケイ素が導入される必要があるであったが、今回の実験では同時に酸素も導入されていた。今後はプラズマ重合と蒸着の連続処理について検討する必要がある。重合膜自体はシリコンポリマーに近い構造を有していると考えられたが、最表面は酸化されていた。10W以上では、重合時間が長くなり膜厚が大きくなると、接着強度は低下した。この原因としては、基材であるPP表面の分解、あるいは重合膜の凝集破壊が考えられた。

## 1. はじめに

ポリプロピレンは接着性が低く、何らかの表面処理を施さないと十分な接着強度が得られない。このための表面処理の1つとしてプラズマ処理がある。成形物の表面をプラズマ処理すると塗膜との接着性が向上することから、自動車バンパーなどへの利用が進められている<sup>(1)</sup>。

一方、プラズマ処理はプラスチックフィルムの接着性改良にも有効であり、特にプラズマ処理が金属蒸着膜との接着性に及ぼす影響についても、ポリプロピレン<sup>(2)</sup>、ポリエチレンテレフタレート<sup>(3)</sup>、ポリイミド<sup>(4)</sup>などを用いた研究が行われている。

我々は前報<sup>(5)</sup>において、ポリプロピレンフィルム（PP）の高周波酸素プラズマ処理を行い、アルミニウム蒸着膜（Al）との接着性に及ぼす影響について調べた。その結果、PP/Al複合膜の接着性は、酸素極性基の導入、主鎖の切断によるWeak Boundary Layer（WBL）の生成、およびエッチングの主に3つの因子によって決まることが分かった。

今回は、フィルムと金属薄膜との間に第3の層を形成することによる接着性の改善を試みた。すなわち、PP上でシリコンモノマーのプラズマ重合を行い、重合条件とPP/Alの接着性との関係について調べた。また、XPSによる重合膜の分析を行った。

なお、シリコンモノマーのプラズマ重合に関する研究としては、重合機構などの基礎研究<sup>(6)</sup>のほか、保護被膜<sup>(7)</sup>、光学材料<sup>(8)</sup>などへの利用を考えた研究が行われているが、異種材料間の接着性との関連を調べた研究はほとんど見られない。

## 2. 実験

### 2-1 試料

PPフィルムは二村三晶（株）製の未延伸、未処理フィルム（厚さ25 $\mu$ m）をそのまま用いた。シリコンモノマーとしてはビニルトリメトキシシラン（VTMSi、信越化学、SL-815、bp. 123 $^{\circ}$ C）を用いた。蒸着源のアルミニウムは三菱化成（株）製の高純度アルミニウム線（1.5mm $\phi$ 、99.9%）を約10mmに切って使用した。

## 2-2 プラズマ重合

プラズマ重合はサムコインターナショナル研究所（株）製のプラズマ重合装置PD-2を用いて行った。重合条件は、RF電源：13.56MHz、電極：容量結合型内部電極、電極間距離：17mm、基板径：150mm $\phi$ 、基板温度：20 $\pm$ 3 $^{\circ}$ C、である。基板（下部電極）上にフィルムを置き、5 $\times$ 10 $^{-5}$ Torr以下にまで減圧したのち、モノマーガスを単独で導入して所定の圧力とし、所定の放電電力、処理時間でプラズマ重合を行った。

## 2-3 アルミニウム蒸着

前報<sup>6)</sup>の方法により、Alの膜厚が400 $\pm$ 50 $\text{\AA}$ になるように蒸着した。

## 2-4 はく離強度の測定

前報<sup>6)</sup>の方法によりはく離に要した荷重（gf/15mm）を求め、便宜上gではく離強度を表示した。

## 2-5 XPS分析

X線光電子分光分析（XPS）は、プラズマ重合したフィルムの一部を切りとり、（株）アルバックファイ製 ESCA Model 15400に移して分析した。X線源はMg K $\alpha$ （400W）を用いた。表面の化学組成は、元素の原子数濃度（atm%）の比、Si/CおよびO/Cで示した。深さ方向分析は、アルゴンイオンを用い、加速電圧3.3kV、電流値25mAでスパッタした。ただし、スパッタ中はX線の照射は行っていない。

## 3. 結果と考察

### 3-1 プラズマ重合条件とはく離強度

PP上でVTMSiのプラズマ重合を行い、重合時の圧力、重合時間、放電電力がPP/Alの接着性に及ぼす効果について調べた。なお、未処理のはく離強度は10gであった。

#### (1) 圧力の効果

放電電力を1W、重合時間を5秒～5分とした時の、圧力とはく離強度との関係をFig. 1に示す。1Wでは、はく離強度は重合時間には余り依存せずほぼ同じ値を示した。0.05～0.1Torrでは175g以上あったが、0.2Torrでは低下した。なお、0.3Torr以上では表面に白色粉体の生成が認められた。プラズマ処理における圧力の効果としては、角田ら<sup>9)</sup>による報告がある。彼らは、ポリエチレンやポリテトラフルオロエチレンのグロー放電により、0.1Torr付近でぬれ性や接着性が最大になることを認めている。前報<sup>6)</sup>のPPの酸素プラズマ処理の場合にも、0.1Torrでプラズマ効果（この場合はWBLの生成）が最大となる結果が得られており、今回のプラズマ重合においてもほぼ同様な圧力効果が認められた。

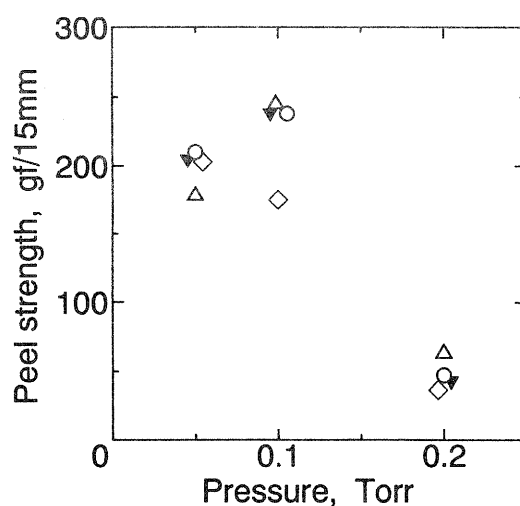


Fig.1 Relationship between the peel strength of PP/Al and the pressure at plasma polymerization of VTMSi (Power 1W)

◇ 5sec      ○ 60sec  
▼ 15sec     △ 300sec



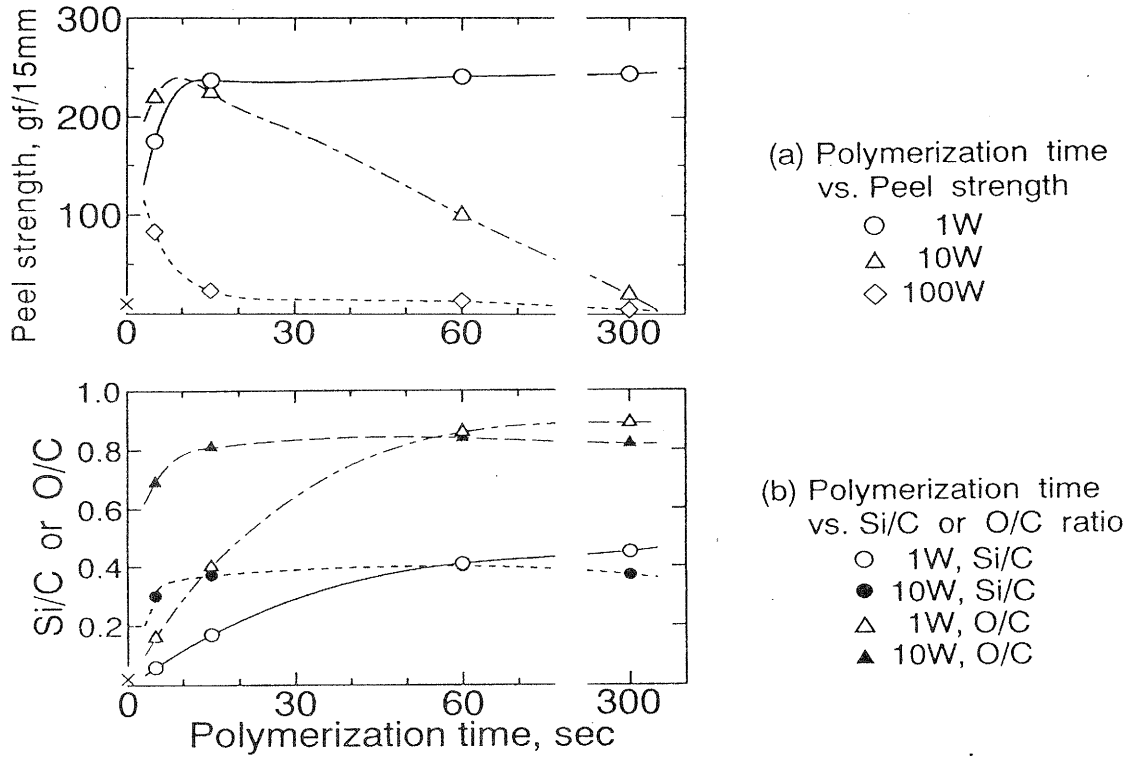


Fig.2 Effects of the polymerization time on (a)the peel strength of PP/Al and (b)the Si/C and O/C ratios (Pressure 0.1Torr)

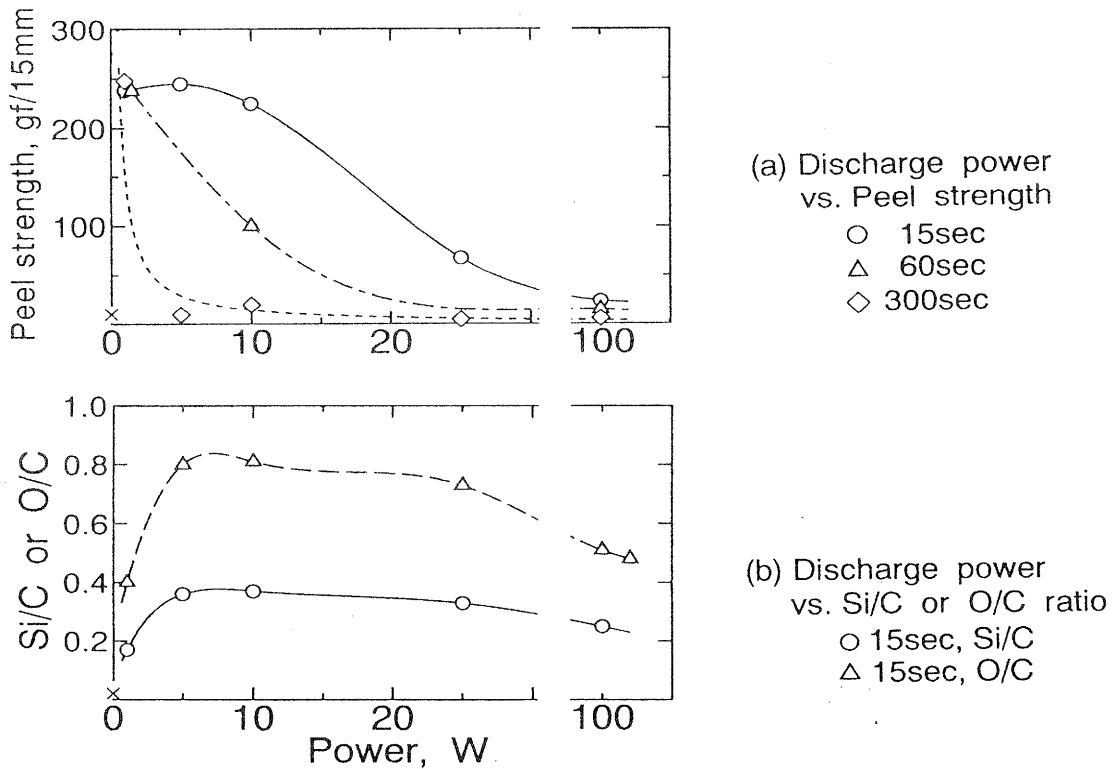


Fig3. Effects of the discharge power on (a)the peel strength of PP/Al and (b)the Si/C and O/C ratios (Pressure 0.1Torr)

## (2) 重合時間および放電電力の効果

以下の実験は0.1 Torrで行った。Fig. 2 (a)に1W、10W、および100Wにおける重合時間とはく離強度との関係を示す。1Wでは5～15秒にかけて強度が増加し、それ以降5分までは200g以上の強度が得られた。それに対して、100Wでは5秒で80gを示したものの、それ以降は未処理と同じレベルにまで低下し、5秒以上では実質的な強度は得られなかった。ただし、100Wでも5秒以下の短時間重合では、高い強度が得られる可能性は残されていると思われる。10Wではその中間的な結果が得られた。はく離強度は急激に増加し5秒で既に200g以上に達したが、15秒以降は時間とともに減少した。

Fig. 3 (a)には重合時間を一定とした時の、放電電力とはく離強度との関係を示した。電力の増加とともに強度は低下した。特に重合時間が長い場合において、はく離強度は大きく低下した。15秒以下の短時間重合では10Wまで許容されるが、5分の長時間重合で高強度を得るには1Wが放電電力の上限であった。

### 3-2 プラズマ重合膜のXPS分析

#### (1) 最表面の分析

未処理PPおよびプラズマ重合膜表面のXPS分析を行った。未処理PPでは炭素と極微量の酸素が認められた( $O/C=0.004$ )。0.1 Torr中、1Wおよび10Wで重合した場合の分析結果をFig. 2 (b)に示す。重合の指標としてSi/CおよびO/Cを用いた。1Wにおいては、Si/Cは時間とともに増加し、60秒以降ではSi/C $\approx$ 0.4で飽和した。はく離強度との関係では、15秒のSi/C $\approx$ 0.17以上で高強度が得られた。一方、10Wでは既に15秒においてSi/C $\approx$ 0.4で飽和していた。10Wと1Wとを比較すると、飽和値はほぼ0.4で等しかったが、10Wの方がSi/Cの初期増加は急激であった。一方、両電力でのはく離強度の変化をみると(Fig. 2 (a))、最大値はほぼ同じで、しかもはく離強度の初期増加率も10Wの方が大きくなっており、Si/Cの増加パターンと類似した傾向を示した。最も異なる点は、10WにおいてSi/Cが飽和した後に、はく離強度が低下した点である。この点については後で考察する。

重合膜がPP表面を次第に被覆して行く過程を考えると、Si/Cが約0.2以上となるような状態において高い接着性が得られると思われる。また、Si/Cが飽和値に達した時点で、PP表面は重合膜によって完全に被覆されたと考えられる。このように考えると、Si/Cの増加曲線の初期の傾き、および飽和値に到達する時間からみて、10Wでの重合速度は1Wに比較して数倍大きいと推定される。

次に、酸素量について見ると、O/Cの変化はSi/Cの挙動とほぼ相関しており、O/Siの比は重合条件によらずほぼ2であった。酸素プラズマ処理に関する以前の研究<sup>9)</sup>で、はく離強度が発現する初期においては、表面の酸素量が接着性に大きく影響することが分かっており、今回の場合も酸素量と接着性との関係を十分考慮する必要がある。酸素の一部は大気中に取り出した時に表面に導入された可能性が高く、今後はプラズマ重合と蒸着を連続的に行うことによって、シリコン系重合膜の効果と酸素の効果を分離して検討する必要がある。

上述のように10W、15秒以上では、Si/CおよびO/Cが飽和しているにもかかわらずはく離強度は低下した。同様の結果は放電電力が大きくなった場合にも認められた(Fig. 3)。表面に官能基が十分量導入された後に接着性が低下する現象は、酸素プラズマ処理の場合にも認められており、その原因として基材PP主鎖の分解によるWBLの生成が考えられた。今回もプラズマ重合中のWBLの生成が原因の1つとして考えられるが、ここではさらにプラズマ重合膜という第3成分が間にあるためより複雑であると言える。そこで次に重合膜の深さ方向分析を行った。

#### (2) 深さ方向分析

はく離強度が重合時間とともに変化した0.1T、10Wで、15秒、60秒、および300秒について重合膜の深さ方向分析を行った。はく離強度は各々220g、100g、20gであった。(有機物のイオンスパッタによる深さ方向分析は余り一般的ではないが、ここではシリコン系のプラズマ重合

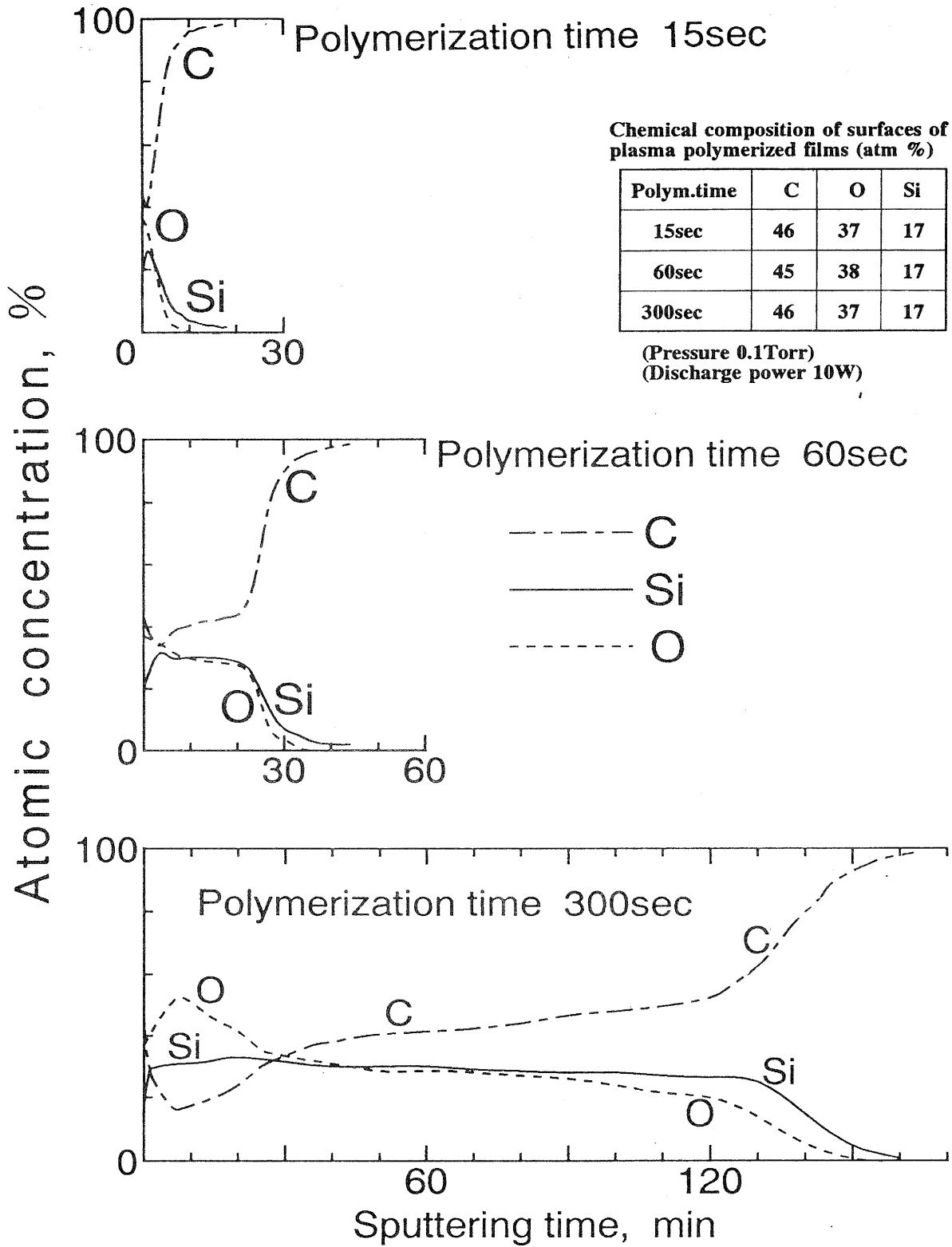


Fig.4 Depth profiles of Si-containing films polymerized for 15, 60 or 300sec  
(Pressure 0.1Torr, Discharge power 10W)

膜であることから試行的に行ってみた。) 同じ条件でスパッタした結果を Fig. 4 示す。明らかに重合時間とともに、ケイ素を含む重合膜の膜厚が大きくなった。Fig. 4 中の表に示したように、重合膜の最表面層の組成は同じであった。表面に近い部分は内部に比べやや酸化されており、その厚さも重合時間とともに大きくなった。15秒重合では膜厚が小さく急激に変化しているが、60秒および5分では、ケイ素と酸素が約30%、炭素が約40%の層が認められた。より内部においては先に酸素が減少し、次いでケイ素が0%となった。それとともに炭素が増加しPP層に達した。

15秒重合の膜について、C1sとSi2pピークの分析を行った。Fig. 5に示すように最表面では酸素に結合した炭素が多いが、スパッタによってC-O等のピークは減少した。Si2pの結合エネルギーは最表面では102.6eVと高く、SiO<sub>2</sub>の103.4eVに近かった。内部では101.4eVと明らかに低下しており、ポリジメチルシロキサンの結合エネルギー<sup>(10)</sup>と一致した。

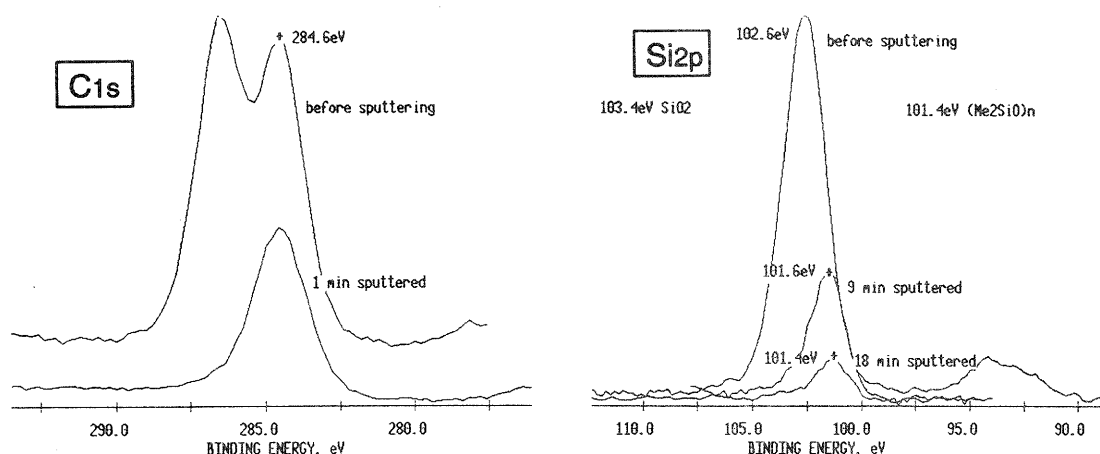


Fig.5 C1s and Si2p spectra of the plasma polymerized film of vinyltrimethoxysilane before and after sputtering (Pressure 0.1Torr, Discharge Power 10W)

以上のように、重合膜内部は有機シリコンポリマーに近い構造を有しているが、最表面層では酸化が起こっていると考えられた。しかし、最表面の組成が同じでも、重合膜の厚さが異なることによって、はく離強度は220gから20gまで大きく変化しており、膜厚が大きく影響している可能性も考えられる。Fig. 6にこれらのはく離界面の状態を示す。15秒重合の高強度のはく離界面ではA1はほぼ完全にPPに付着しており、逆に60秒以上重合した中～低強度のものでは、A1はPPには付着していなかった。上でも述べたように、後者のはく離機構としては、(1) Competitive Ablation and Polymerization) 機構<sup>(11)</sup>による基材PP表面での分解反応、または(2)膜厚が大きいことによるシリコン系重合膜内部での凝集破壊、などが考えられ今後さらに検討して行く。

#### 4. むすび

PPフィルム上にビニルトリメトキシシランのプラズマ重合膜を形成し、PPとA1蒸着膜間の接着性に及ぼす影響について検討した。重合条件とはく離強度との関係を調べるとともに、重合膜のXPS分析を行った。

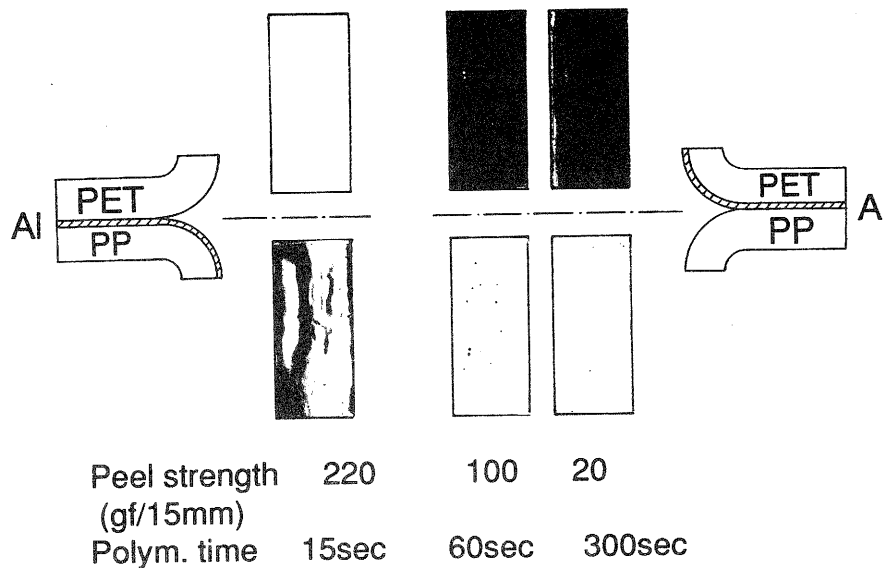


Fig.6 Interfaces appeared by peeling of PET/AI/PP  
(Pressure 0.1Torr, Discharge Power 10W)

(1) 圧力が0.3 Torr以上では粉体が生成した。成膜には0.1 Torr以下が適していた。この圧力範囲で、数W以下でかつ数十秒以下の比較的弱い重合条件で高い接着強度が得られた。放電電力と重合時間の2つの因子は関連しており、例えば10Wでは15秒以下で、1Wでは5分でも高強度が得られた。10W以上では、いったん増加した接着強度は重合時間とともに減少した。

(2) 接着強度の増加と表面の化学組成(Si/C、O/C)は良く一致しており、重合膜の生成が接着強度に寄与していると考えられた。ただし、重合膜がプラズマ重合と蒸着処理の間に空気酸化された可能性が高いので、今後連続処理について検討する必要がある。

(3) 接着強度の再減少と重合膜最表面の組成との間には相関が認められなかった。同じ構造を有すると考えられる重合膜でも、重合時間が長く、従って膜厚が大きくなるほど接着強度は低下した。原因としては、長時間反応によるPPの分解、あるいは重合膜自体の凝集破壊が考えられた。

(4) 重合膜はシリコンポリマーに近い構造を有しており、その表面は酸化されているものと考えられた。

#### 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)に感謝します。

#### 参考文献

- (1) K. Tsutsui, A. Iwata, S. Ikeda, J. Coatings Technol., 61(776), 65 (1989).
  - (2) J. Friedrich, I. Loeschke, J. Gahde, Acta Polymerica, 37(11/12), 687 (1986).
  - (3) 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).
  - (4) 谷川聡, 中前勝彦, 松本恒隆, 高分子論文集, 47(1), 41 (1990).
  - (5) 中村吉紀, 松本价三良, 梅林和美, 桑原信夫, 日本接着学会誌, 29(5), 197 (1993)
  - (6) G. Akovali, M. Y. Boluk, Polym. Eng. Sci., 21(11), 658 (1981).
- A. M. Wrobel, M. R. Wertheimer, J. Dib, H. P. Schreiber, J. Macromol. Sci., Chem., A14(3), 321 (1980).

- (7)長田義仁他, “プラズマ重合”, 東京化学同人, p148~153 (1986).
- (8)N. Inagaki, T. Nishio, K. Katsuura, J. Polym. Sci., Polym. Lett. Ed., 18, 765 (1980).
- (9)角田光雄, 千葉克義, 福村勉郎, 工業化学雑誌, 72(11), 2451 (1969).  
角田光雄, 大場洋一, 千葉克義, 福村勉郎, 日本化学会誌, 1978, 659 (1978).
- (10)G. E. Muilenberg ed., "Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy", p52, Prekin Elmer Corporation (1978).
- (11)H. Yasuda, T. Hsu, Surf. Sci., 76(1), 232 (1978).

# 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 作製条件に関する研究

技術第二科 前川 昭 Akira Maegawa

あらまし：金などの微粒子をドーブしたガラスは高い3次の光学非線形性を有している。このため、光通信時代のフォトニクス材料として光コンピューターなどのスイッチング素子として期待されている。金微粒子ドーブガラスは現在、熔融法、スパッタリング法、イオンプレーティング法などで作製されている。これらの方法では、熔融法を除いて実用的とはいえない。そこで、簡便に金微粒子ドーブガラスを作製することを目標として、金属アルコキシドと無機塩からゾルーゲル法を用いてバルク体の金微粒子ドーブシリカガラスの作製を試みた。ゾルーゲル法で作製された多孔質ゲルは熱処理により収縮、緻密化し、シリカガラスが生成した。また、熱処理により、粒子径3～4 nmの金微粒子がガラス中に成長した。この結果、作製したバルク体の金微粒子含有シリカガラスの非線形感受率 $\chi^3$ は縮退四波混合測定装置での測定から $2.4 \times 10^{-12}$  e. s. u. と見積もられた。これは熔融法で作製された金微粒子ドーブシリカガラスの $\chi^3$ と同じオーダーであった。

## 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<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>微結晶含有ガラスで高い3次の非線形光学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程度の微結晶や微粒子を分散されたもので、微結晶や微粒子成分を溶解し、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、ガラス中での結晶成長法のほかには、スパッタリング法<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、高額な機器を必要とするなど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、種々の半導体微結晶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、注目すべき方法と言えよう。そこで、本研究は昨年度から引き続いて金微粒子ドーブガラスのゾルーゲル法での作製法を検討した。

## 2. 実験方法

### 2-1. 試料の作製

#### (1) ゾルの作製

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

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(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>を用い、金源として塩化金酸ナトリウムNaAuCl<sub>4</sub>を用いた。まず、モル比でSi(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>1モルに対して1:1:0.027モルのH<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, HClを含む混合溶液にSi(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>を滴下し1時間攪拌し、Si(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>を部分加水分解した後、Si(OC<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, NH<sub>4</sub>OHの混合溶液で加水分解した後、NaAuCl<sub>4</sub>水溶液をガラス状態で金として0.005 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ポリスチレンコンテナにそそぎ入れ、室温で密封して一週間放置後、密栓をはずして乾燥した。

## (3) 乾燥ゲルの熱処理

作製した乾燥ゲルを種々の条件でPID付き電気炉（モトヤマ製、SUPER-C）を用いて、加熱処理した。

### 2-2. 熱分析装置による測定

作製した乾燥ゲルのTG-DTAは熱分析システム（リガク製、TAS-200）を用いて、室温から1400℃の範囲で測定した。

### 2-3. 比重の測定

乾燥ゲルやガラス試料の比重は固体比重測定装置（島津製作所製、SGM-220G）を用いて、ケロシンを使用してアルキメデス法により測定した。

### 2-4. 比表面積の測定

乾燥ゲルやガラス試料の比表面積は、自動ガス吸着装置（日本ベル、ベルソープ28SA）を用いて、ガス吸着法により以下の条件で測定した。

前処理：真空乾燥、120℃、3時間 吸着質：窒素ガス 恒温室温度：40℃ 吸着温度：77.0K 平衡時間：300sec

### 2-5. 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（島津製作所製、UV-220）を用いて、300nmから900nmの範囲で測定した。

### 2-6. 非線形感受率の測定

乾燥ゲルやガラス試料の非線形感受率 $\chi^3$ は、図-1に示した縮退四波混合測定装置を用いて測定した。

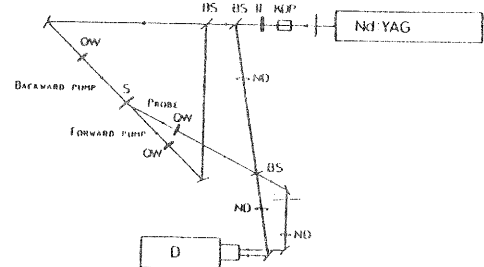


図-1. 縮退四波混合装置の概略

KDP:KDP crystal,IF:CuSO<sub>4</sub> solution filter and i.r cut-out filter,QW:λ/4 plates,BS:beam splitters,ND:neutral density filters,S:sample,D:streak camera

## 3. 実験結果および考察

### 3-1. 乾燥ゲルの熱的性質

作製した乾燥ゲルのTG-DTA曲線を図-2に示した。乾燥ゲルのTG曲線は100℃までに約10%

の減量を示し、その後250℃程度まで減量せず、250℃~600℃にかけ約10%の減量がみられた。また、DTA曲線は100℃までにブロードな吸熱ピークがあり、300℃付近にシャープな発熱ピークが、また、その高温側に400℃にかけてブロードな発熱ピークが見られた。また、1100℃を越える付近で大きな吸熱側へのピークがあった。Kawaguchi<sup>6)</sup>らの

報告によれば、これらの熱的挙

動はまず100℃までの減量をとまなう吸熱ピークがゲル中の水分の蒸発に基ずくものであり、300℃付近のシャープな発熱ピークがアルコールの燃焼であり、その高温側のブロードなピークが有機物の燃焼であると帰属しており、今回作製したゲルの熱的挙動も同様に帰属できると考えられ

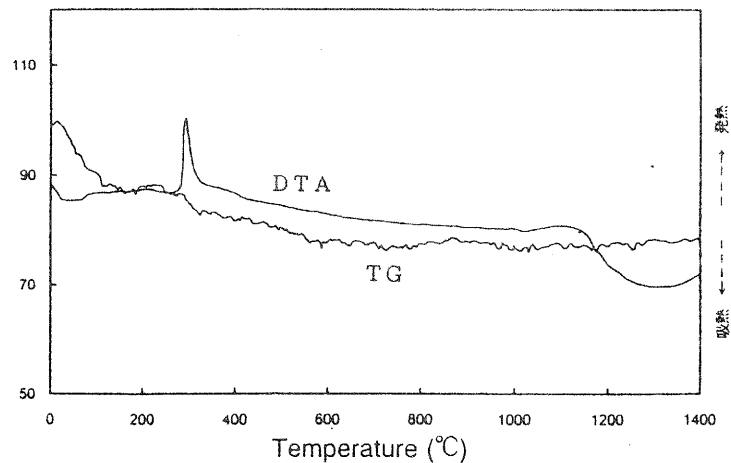


図-2. 乾燥ゲルのTG-DTA曲線



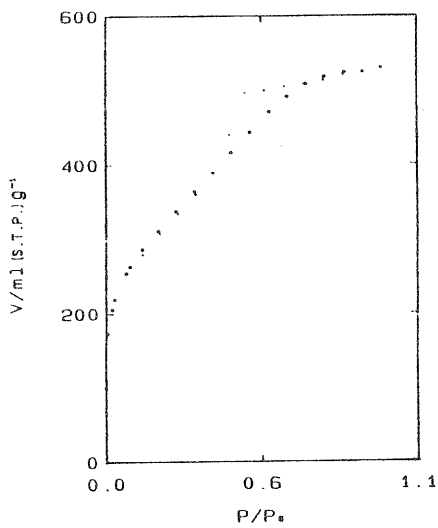
る。

### 3-2. 乾燥ゲルの熱的挙動と緻密化

作製された乾燥ゲルは多孔質と考えられるので、ガス吸着法により多孔性を評価した。

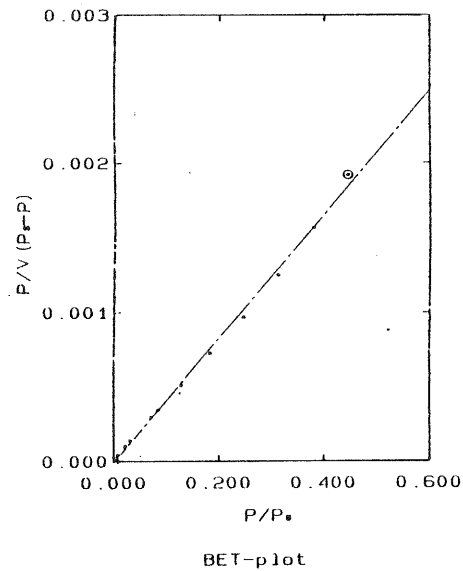
得られたゲルの窒素ガス吸着の代表的な等温吸着曲線として加熱前の乾燥ゲルの等温吸着線を図-3に示した。吸脱着等温線にヒステリシスが現れており、これはポーラスガラスなどのメソポアよりできている吸着剤に観測される等温線と類似しており、今回作製したゲルもこのような多孔質構造を持っていると考えられる。得られたデータを用いBET多点プロット法による比表面積を乾燥ゲルと加熱ゲルについて求めた。代表的なBET多点プロットとして乾燥ゲルに対するプロットを図-4に示した。また、加熱による比表面積の変化を図-5に示した。乾燥ゲルの比表面積は約1050 m<sup>2</sup>/gであったものが、加熱処理により700℃付近までは徐々に約800 m<sup>2</sup>/g程度まで減少し、700℃以上から急激に減少し、1000℃で10 m<sup>2</sup>/g以下に減少した。

これら比表面積の変化からみたゲルの緻密化は加



Adsorption isotherm of N<sub>2</sub> gas at 77K

図-3. 乾燥ゲルの窒素ガス吸着の等温吸着線



A <sub>wt</sub>	: 1048.60 [m <sup>2</sup> /g]
V <sub>m</sub>	: 240.92 [ml/g]
C	: -966.29
r	: 0.99943

図-4. 乾燥ゲルのBET多点プロット

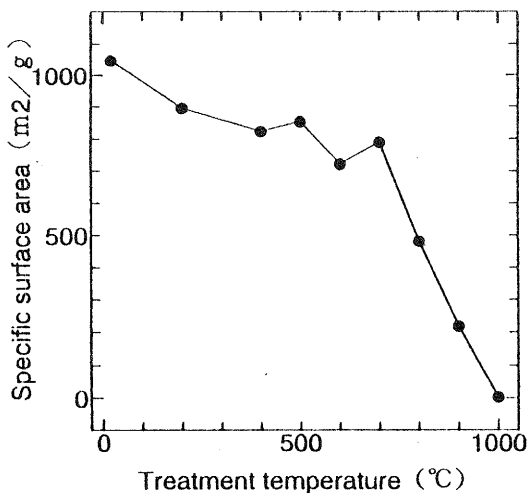


図-5. 加熱処理によるゲルの比表面積の変化

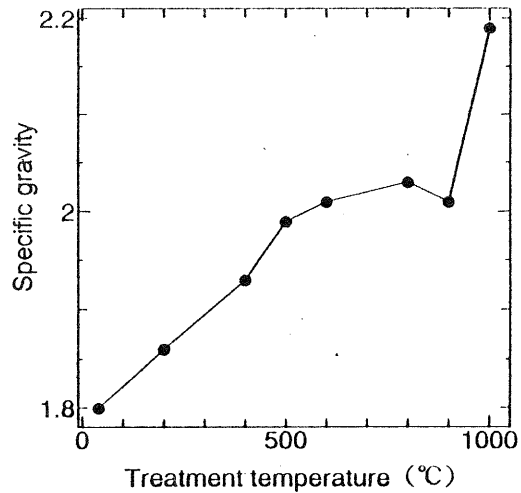


図-6. 加熱処理によるゲルの比重の変化

熱により700℃まで徐々に進行し、700℃からは多孔質構造の緻密化が急激に進行しほぼ1000℃で無孔化したものと考えらる。

測定された比重の加熱による変化は図-6に示した。乾燥ゲルの比重は1.80であったが、加熱とともに900℃まで徐々に増加し、900℃から急激に増加して、1000℃で、2.19に達し、溶融法によって作製された石英ガラスの比重2.20とほぼ同じになった。比重の変化からみたゲルの緻密化は比表面積の変化とはズレがあり、緻密化過程になんらかの違いがあることを示唆している。

これらから、作製した乾燥ゲルは、加熱により緻密化し、1000℃で完全に無孔化しシリカガラスになったものと考えられる。

### 3-3. 加熱にともなう光吸収スペクトルの変化

作製したゲルの外観は無色透明であり、また、加熱されたゲルは加熱とともに赤紫から紅色に呈色していた。加熱ゲルの光吸収スペクトルの加熱温度、昇温速度、加熱時間における変化を図-7、8、9に示した。ゲルの吸収スペクトルは加熱により520~530nm付近にピークをもつ金微粒子によるプラズモン吸収帯が成長した。Arnold<sup>6)</sup>によれば吸収帯の吸収ピークの最大値の半値幅(FWHM)と金微粒子の粒子径には、粒子径の分散が無視できるとき $r_B = v_F / \Delta\omega_{1/2}$  ( $r_B$ : 金微粒子の粒子径、 $v_F$ : 金のフェルミ速度 $1.39 \times 10^8 \text{ cm/s}$ 、 $\Delta\omega_{1/2}$ : FWHM)の関係が成り立つ。この関係式を使って、得られた吸収スペクトルからゲル中の金微粒子の粒子径を求め、加熱温度、昇温速度、加熱時間との関係を検討した。その結果を図-10、11、12に示した。加熱温度の増加に対して、900℃までは金微粒子の粒子径は徐々に増加し、900℃以上で急激に増加した。これは、比重の変化と同様な挙動であり、金粒子の成長とベースガラスの比

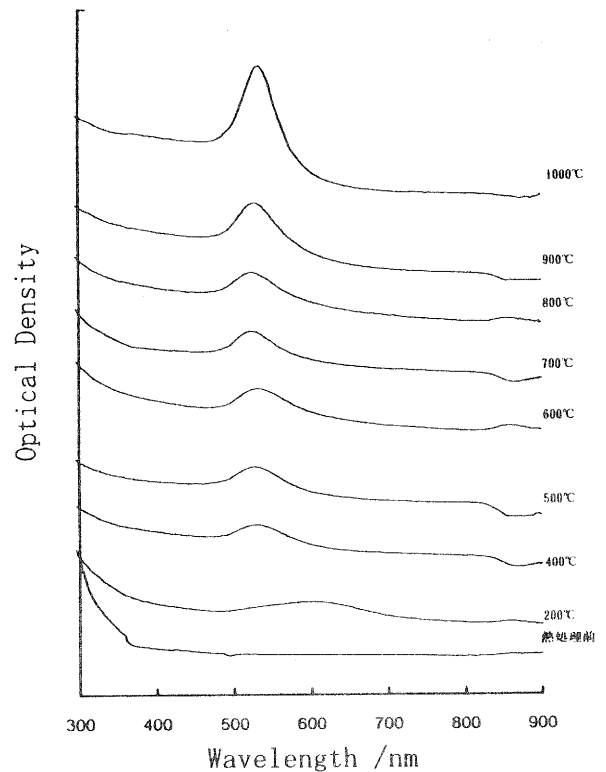


図-7. 加熱温度によるゲルの吸収スペクトルの変化

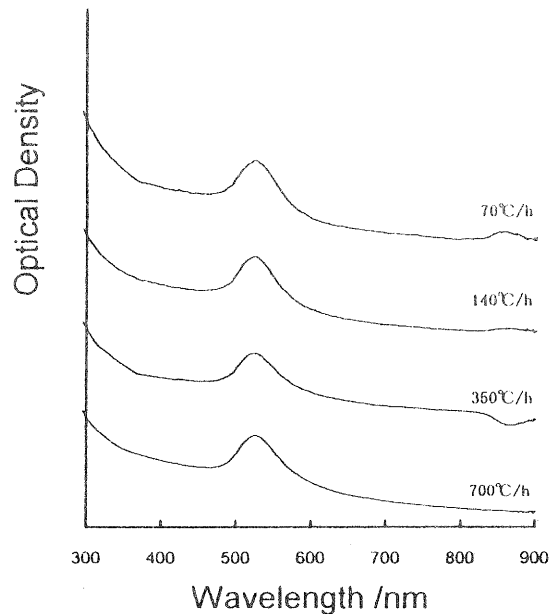


図-8. 昇温速度によるゲルの吸収スペクトルの変化

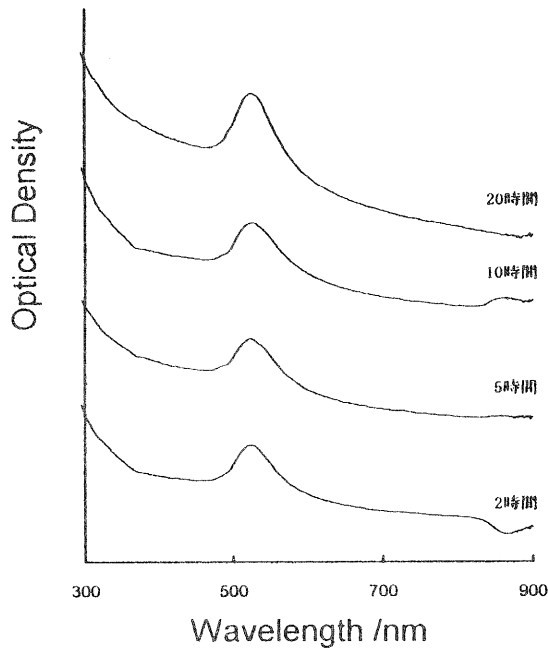


図-9. 加熱時間によるゲルの吸収スペクトルの変化

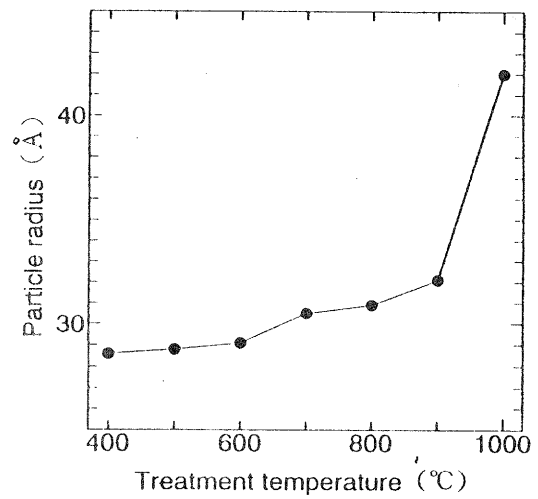


図-10. 加熱温度による金粒子の粒子径の変化

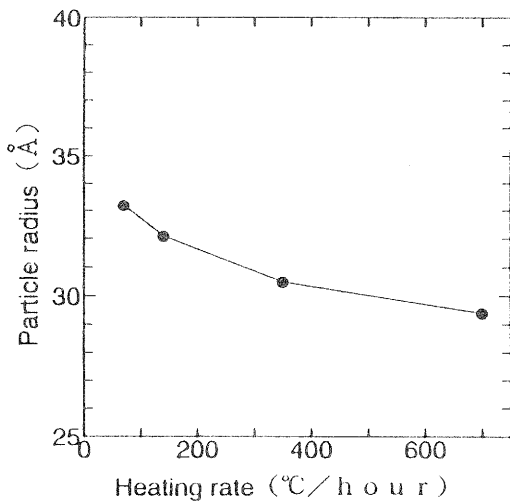


図-11. 昇温速度による金粒子の粒子径の変化

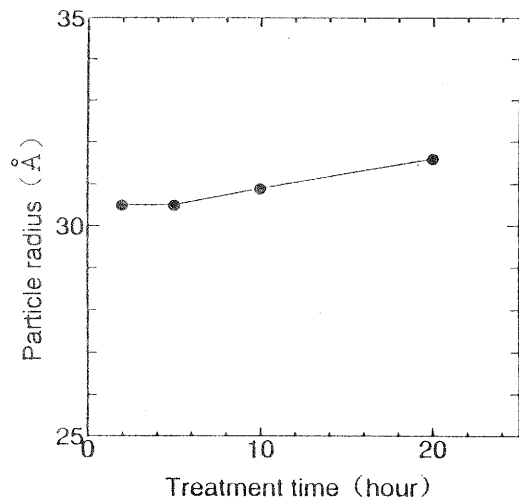


図-12. 加熱時間による金粒子の粒子径の変化

重から考えられる緻密化になんらかの関係があるものと考えられる。次に、昇温速度と金粒子の粒子径の間には、大きな変化はないが早い昇温速度ほど粒子径が小さく、遅い昇温速度ほど粒子径が大きくなる傾向であった。加熱時間による粒子径の違いも大きな差は存在しないが、加熱時間が長くなるほど粒子径が大きくなり、金微粒子が成長するものと考えられる。

### 3-4. 縮退四波混合測定装置による非線形感受率の測定

縮退四波混合測定装置により測定した値から計算した400°Cと800°Cで加熱処理されたゲルと1000°Cで加熱処理されたガラスの非線形感受率 $\chi^3$ はそれぞれ $4.0 \times 10^{-13}$ 、 $7.5 \times 10^{-13}$ および $2.4 \times 10^{-12}$  e.s.u.であった。

加熱処理温度が高くなるほど $\chi^3$ は高くなっており、1000°Cで加熱処理されたガラスの $\chi^3$ は、

Kadonoら<sup>m)</sup>により報告された溶融法で作製された金微粒子ドーブガラスの $\chi^3: 3.6 \times 10^{-13} \text{e.s.u.}$ と同じオーダーであった。

#### 4. まとめ

1. 作製したバルク体の多孔質の乾燥ゲルは熱処理により $1000^\circ\text{C}$ で無孔化し、シリカガラスになった。

2. 熱処理によりゲルは金微粒子のプラズモン吸収にもとずいて赤く発色し、生成した金微粒子の粒子径は $3\sim 4 \text{nm}$ であった。

3. 作製した金微粒子ドーブシリカガラスの3次の非線形感受率 $\chi^3$ は $2.4 \times 10^{-12} \text{e.s.u.}$ であり、溶融法で作製された金微粒子ドーブガラスと同じオーダーであった。

#### 5. 謝辞

本研究を遂行するにあたってご指導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）と非線形感受率の測定やご指導をしていただいた角野広平博士、福味幸平博士（大阪工業技術研究所）に感謝します。

#### 6. 参考文献

- 1) R. K. Jain, R. C. Lind, J. Opt. Soc. Am., 73, 647-653(1983)
- 2) H. Nask, K. Tunemoto, Y. Tokumitsu, Y. Osaka, Jpn. J. Appl. Phys., 28, L862-864(1989)
- 3) K. Fukumi, A. Chayahara, K. Kadano, T. Sakaguchi, Y. Horino, M. Miya, J. Hayakawa, M. Sato, Jpn. J. Appl. Phys., 30, L742-744(1991)
- 4) M. Nogami, Y. Zhu, Y. Tohyama, K. Nagasaka, J. Am. Ceram. Soc., 74, 238-240(1991)
- 5) H. Kawaguchi, H. Hishikura, J. iura, Y. Kokubu, J. Non-Cryst. Solids 63, 61-(1984)
- 6) G. W. Arnold, J. Appl. Phys., 46, 4466-(1975)
- 7) K. Kadono, T. Sakaguchi, H. Wakabayashi, T. Fukumi, H. Yamanaka, M. Miya, H. Tanaka, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 283, 903-908(1993)

## 高圧下における酵素反応に関する研究（第二報）

Bacillus subtilis液化型 $\alpha$ -アミラーゼによる直鎖アミロース加水分解生成物に及ぼす圧力効果

技術第二科 松本 正 Tadashi Matsumoto

あらまし：食品への高圧利用研究をさらに発展させる目的で、高圧下における酵素反応について研究を進めている。前報ではBacillus subtilis 起源の液化型 $\alpha$ -アミラーゼを、3種類のデンプン（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）に高圧下で反応させたところ、圧力の増加とともにグルコース、マルトースやマル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。本年度は本現象の原因を解明するため、基質として完全直鎖のアミロースを用いて検討を行った。その結果、圧力の増加に伴うマルトオリゴ糖の組成変化を明確に把握することができ、圧力の増加に伴うマルトオリゴ糖の組成変化についていくつかの知見が得られた。

### 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、平成4年度より「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方法すなわち高圧下での酵素反応について検討を開始した<sup>(14),(15)</sup>。

ところで、我々の行っている高圧利用技術と酵素利用技術のジョイントである高圧下において酵素反応を行う研究については、反応速度論からの高圧効果の研究である Morild の解説<sup>(16)</sup>、わが国においては高圧下における酵素（主にプロテアーゼ）の反応制御を目的とした功刀の研究<sup>(17)~(19)</sup> や高圧下における変性のしやすさからタンパク質を選択分解する岡本らの研究<sup>(20)</sup> があるくらいで研究例の絶対数が少なく、林もこの分野の研究発展の必要性を述べている<sup>(21)</sup>。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 $\alpha$ -アミラーゼについて生成物に注目して研究を行っている。

その結果、平成4年度の研究により可溶性デンプン、バレイショデンプン、トウモロコシデンプンに高圧下で細菌 $\alpha$ -アミラーゼを作用させると、圧力の上昇とともにマルトペンタオース等の重合度の高いマルトオリゴ糖の割合が増加し、平均重合度が高くなることがわかった<sup>(14),(15)</sup>。この要因には、高圧による酵素の立体構造の変化、基質の立体構造の変化、酵素と基質の結合状態の変化等種々考えられる。本現象の原因を探るべく検討を行っているが、天然のデンプンには $\alpha$ -1, 6結合で高度に分枝したアミロペクチンを含み、また、アミロースにおいても若干の $\alpha$ -1, 6結合や1, 3結合を含むことから、反応終了時においても大きなリミットデキストリンが残り、また直鎖領域が短いため、本現象の原因を探るための基質としてはあまり好ましくない。そこで、今回基質として酵素反応により合成された完全直鎖アミロースを用いて検討を突

施したのでその結果を報告する。

## 2. 実験材料

- 1) 酵 素 : *Bacillus subtilis* 液化型  $\alpha$ -アミラーゼ (生化学工業製)
- 2) 基 質 : 完全直鎖アミロース (酵素合成品、分子量約 30 万、中壱酢店製)  
可溶性デンプン (和光純薬製、活性測定に使用)

## 3. 実験方法

### 3-1 高圧下での直鎖アミロースの酵素消化

- 1) 酵素溶液 : 0.02 モル塩化カルシウムを含有する 0.05 モル酢酸ナトリウム緩衝液 pH 6.0 に、上記  $\alpha$ -アミラーゼを所定の濃度に溶解したものを酵素溶液とした。
- 2) 基質溶液 : 上記直鎖アミロースをジメチルスルフォキシド (DMSO) に数時間膨潤させた後、最終濃度 1% になるように上記緩衝溶液で希釈したものを基質溶液とした。
- 3) 反応温度 : 約 40°C、概ね 38°C から 44°C の範囲で反応を行った。酵素反応で約何度と言うのは正確さの点からは好ましくないが、装置の性質上 40°C に設定しても断熱圧縮により温度は上昇し、圧力保持中に徐々に低下していく。本現象は現装置では、どうしても避けられない問題点として残る。
- 4) 高圧装置 : 三菱重工業製 食品用加圧試験装置 MFP-7000 型を用いた。
- 5) 反応方法 : まず、常圧で酵素反応が進まないように酵素溶液を 30 分間以上氷冷しておき、酵素溶液 1 ml と基質溶液 3 ml をすばやく混合して、ポリエチレン製の容器に封入する。そして、すばやく高圧装置に入れ、所定の圧力を加える。この間約 1 分から 2 分を要した。所定圧力にて所定の時間保持したのちは、できる限りすばやく容器を取り出し、2.0% スルフォサリチル酸 0.1 ml を添加し酵素反応を停止した。この操作には約 30 秒を要した。

### 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、反応溶液の一部を高速液体クロマトグラフ (島津製作所製 LC-9A 型) を用い分析した。検出には示差屈折計を用いた。

## 4. 実験結果

### 4-1 高圧下における $\alpha$ -アミラーゼ活性の変化

生成物の変化を検討する前に、本研究に使用した  $\alpha$ -アミラーゼの活性に及ぼす圧力の影響を検討した。酵素活性は、酵素溶液を適当な濃度 ( $10^{-4}$  mg/ml) に希釈した後、可溶性デンプン (1%) を基質に反応を行い、還元糖の増加をソモギー-ネルソン法で測定することにより求めた。その結果、図 1 に示すように 150 MPa までは相対活性が上昇し、150 MPa で常圧の 118% と最大になり、それ以後は圧力の上昇とともに活性は低下していく傾向を示し、600 MPa では常圧の 17% にまで低下した。150 MPa までの活性

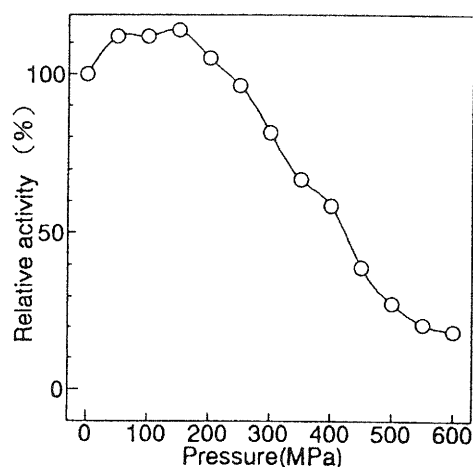


Fig.1. Effect of pressure on the hydrolysis of soluble starch by *Bacillus subtilis*  $\alpha$ -amylase. Substrate concentration was 10 mg/ml and enzyme concentration was  $10^{-4}$  mg/ml. Hydrolysis was performed at various pressure and 40°C for 30 min., and activity was determined by Somogyi-Nelson method.

上昇は体積効果、以後の活性低下は圧力による酵素タンパク質の変性が原因であると考えられる。

#### 4-2 反応圧力による生成物の変化

完全直鎖アミロースを基質として、40℃、pH 6.0において圧力を0.1~700MPaまで変化させて *Bacillus subtilis* 液化型 $\alpha$ -アミラーゼ(500 units/ml)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2-A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150MPaまでマルトペンタオース(DP=5)は300MPaまで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)はほとんど変化しなかった。マルトヘキサオースは200MPaまではほとんど存在しなかったが、250MPa以上で大きく増加し、450MPa以上ではもっとも組成比の高いオリゴ糖となった。この変化は、現在の観察においては非常に興味深いものに思える。マルトヘプタオース以上の鎖長のオリゴ糖は全圧力条件下でほとんど検出されなかった。

この結果をマルトオリゴ糖の平均重合度でみると分かりやすく、図2-(B)のように圧力の上昇とともに平均重合度が増加していることがわかる。

なお、可溶性デンプン、トウモロコシデンプン、パレイショデンプン等の分子内に分枝構造を持つ天然デンプンを基質に用いた場合は、基質に対するオリゴ糖の回収率が概ね60%程度しか反応は進行しないが、完全直鎖アミロースを基質に用いた場合、反応はほぼ100%進行することがわかった。

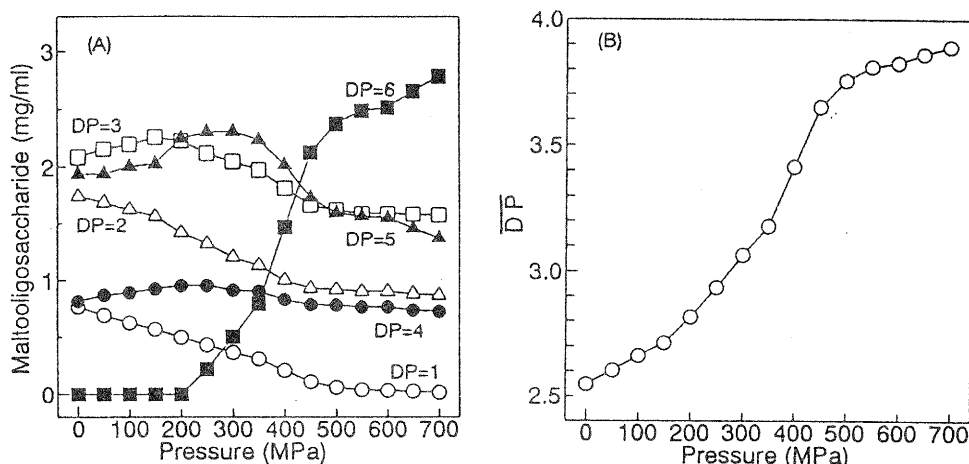


Fig.2. Effect of pressure on the product composition(A) and mean degree of polymerization (DP) of maltooligosaccharide(B) of *Bacillus subtilis*  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose. Substrate concentration was 10 mg/ml and enzyme concentration was 500 units/ml. Hydrolysis was performed at various pressure and 40℃ for 30 min., and maltooligosaccharide(DP=1~7) was determined with HPLC.

#### 4-3 反応時間の影響

本実験は、生成物に着目するものであるため、基質に対してかなり過剰の酵素を添加して反応を実施した。そのため、反応は30分間である程度進行していると考えられるが、完全直鎖アミロースを基質とした場合分枝構造がないことから、反応液中に存在する基質の鎖長が短くなるにつれ酵素と基質の生産的な結合が起こる確率が減少し反応速度は遅くなるが、さらに反応は進むものと考えられ、また上記で得られた結果は例えば高圧下では酵素の活性が著しく低下する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可能性もある。そこで、0.1MPa、150MPa、300MPa、500MPaにおいて反応時間を変化させて、生成物組成の変化を検討した。

その結果を生成したマルトオリゴ糖の平均重合度とともに、それぞれ図3から図6に示す。

300MPaまでは、反応時間の増加とともに、マルトオリゴ糖組成は鎖長の長い糖(マルトテトラオース、マルトペンタオース、マルトヘキサオース)が減少し、鎖長の短い糖(グルコース、マルトース、マルトトリオース)が増加し、平均重合度が低下するという傾向を示した。すなわち、これらの圧力では反応時間30分以上においても、反応は徐々に進行しまだ生成物の平衡点に達していないことがわかった。これに対し、

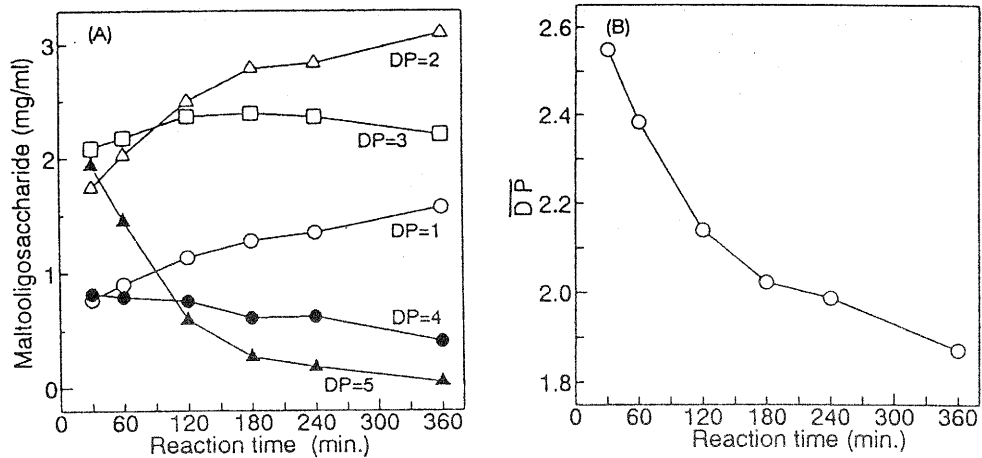


Fig.3. Effect of reaction time on the product composition(A) and mean degree of polymerization (DP) of maltoligosaccharide(B) of  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose at 0.1MPa and 40 °C. See Fig.2 for other conditions.

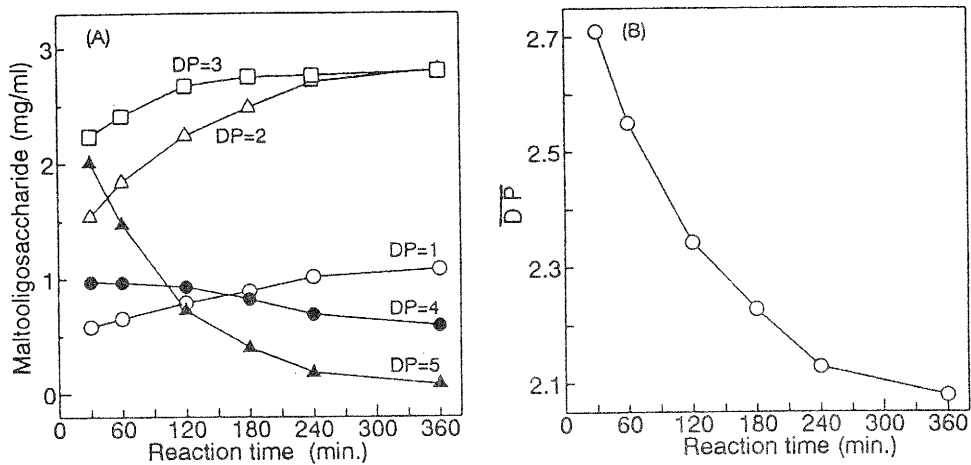


Fig.4. Effect of reaction time on the product composition(A) and mean degree of polymerization (DP) of maltoligosaccharide(B) of  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose at 150MPa and 40 °C. See Fig.2 for other conditions.

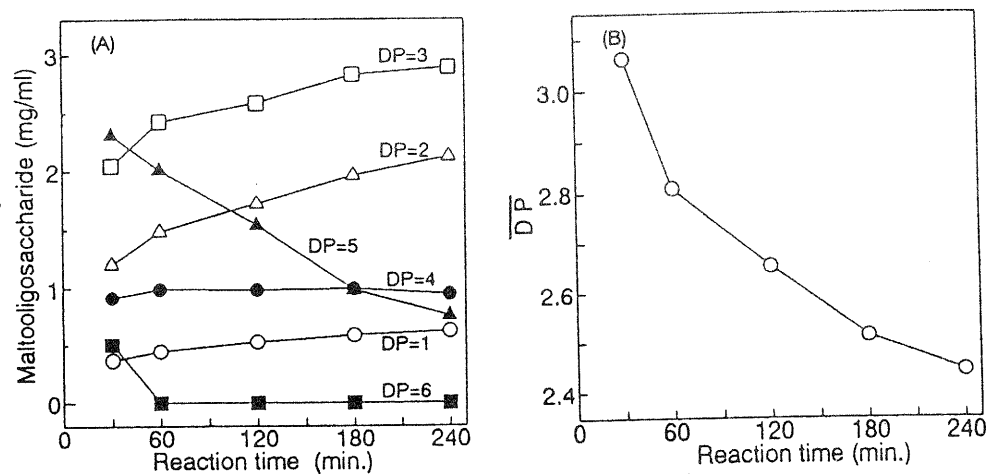


Fig.5. Effect of reaction time on the product composition(A) and mean degree of polymerization (DP) of maltoligosaccharide(B) of  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose at 300MPa and 40 °C. See Fig.2 for other conditions.



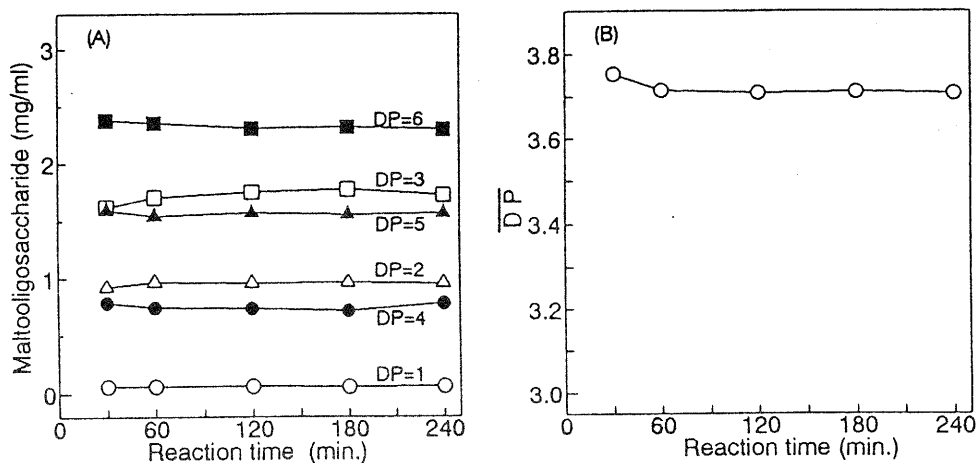


Fig.6. Effect of reaction time on the product composition(A) and mean degree of polymerization (DP) of maltooligosaccharide(B) of  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose at 500MPa and 40°C. See Fig.2 for other conditions.

500MPaでは30分以上反応時間を延長してもマルトオリゴ糖組成に変化は観察されず、反応の平衡点に達しているのか、酵素が圧力変成してしまいほとんど反応が進行していないかのどちらかが考えられる。

#### 4-4 高圧付加前の反応進行の検討と高圧付加後の反応

繰り返しになるが、本実験は生成物に着目するため基質に対し大過剰の酵素を添加している。常圧下での反応を極力抑えるため、酵素を氷冷して混合し、すばやく圧力を付加しているが、それでも酵素添加から圧力付加までに約30秒程度を要し、さらに所定圧力に到達するまでに約30秒~90秒を要する。高圧が付加されるまでは、常圧下で反応が進行し、高圧付加後所定圧力到達までは、圧力が刻々と変化しながら反応が進行する。高圧付加直後から所定圧力到達までの反応については、現在の設備では検討が難しいので無視するとして、高圧付加前の常圧下での反応について検討を加えた。

すなわち、通常の実験操作と同じ条件で高圧付加直前に反応を止め、マルトオリゴ糖組成の分析を行ったところ、マルトース 0.860 mg/ml、マルトトリオース 1.544 mg/ml、マルトテトラオース 0.722 mg/ml、マルトペンタオース 1.351 mg/ml、マルトヘキサオース 2.863 mg/mlとなり、高圧付加前はかなり反応が進行していることがわかった。すなわち、高圧付加前にアミロースはマルトヘキサオースを主成分とするマルトオリゴ糖混合物に分解され、以後の高圧下での反応においては、マルトヘキサオースが基質となっていることがうかがえる。

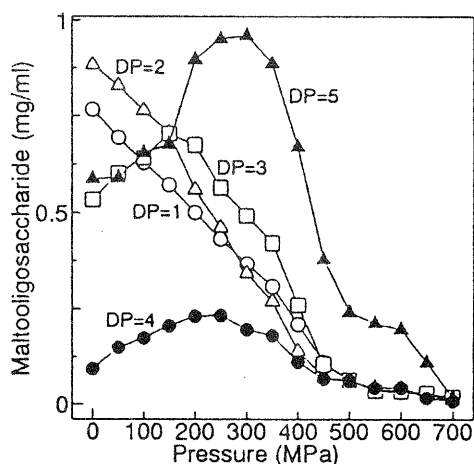


Fig.7. Effect of pressure on the increment of maltooligosaccharide of  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose after really applied pressure. See Fig.2 for other conditions.

そこで、高圧下の反応のみにおいて各生成物が純粋にどれだけ生成したかを見るため、4-2項の結果より、高圧付加前の生成物の組成を差し引き、プロットした。その結果図7に示すとおりグルコース、マルトースの生成量は圧力の増加とともに減少していった。また、マルトトリオースは圧力の増加とともに150 MPaまで、マルトテトラオースは250 MPaまで、マルトペンタオースは300 MPaまではそれぞれ増加し、以後減少していき、700 MPaでほぼ0になった。これは、4-1項で示したように150 MPa以上の高圧下では酵素タンパク質が圧力変成し活性が低下したためと考えられる。

しかし、この結果からのみでは圧力の増加とともに鎖長の長いマルトオリゴ糖組成の増加する理由が本アミラーゼの活性部位の構造変化によるものか、単に圧力変成による活性低下により反応の途中を観察しているのかは不明である。

#### 4-5 低酵素濃度での検討

次に、圧力を付加する前に行う酵素溶液と基質溶液の混合、プラスチック容器への封入、高圧試験装置へのセット等一連の常圧下で行う操作途中でのマルトオリゴ糖の生成を押さえるため、酵素濃度を低下させ実験を行った。酵素濃度を、4-2項で行った実験の1/50すなわち10単位/mlにしたところ、一連の常圧下の操作途中で検出されるマルトオリゴ糖はなかった。すなわち、次の結果はいずれも高圧付加後に生成したマルトオリゴ糖と考えられる。

完全直鎖アミロースを基質として、40℃、pH6.0において圧力を0.1~700 MPaまで変化させて *Bacillus subtilis* 液化型 $\alpha$ -アミラーゼ(10 units/ml)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8に示す。

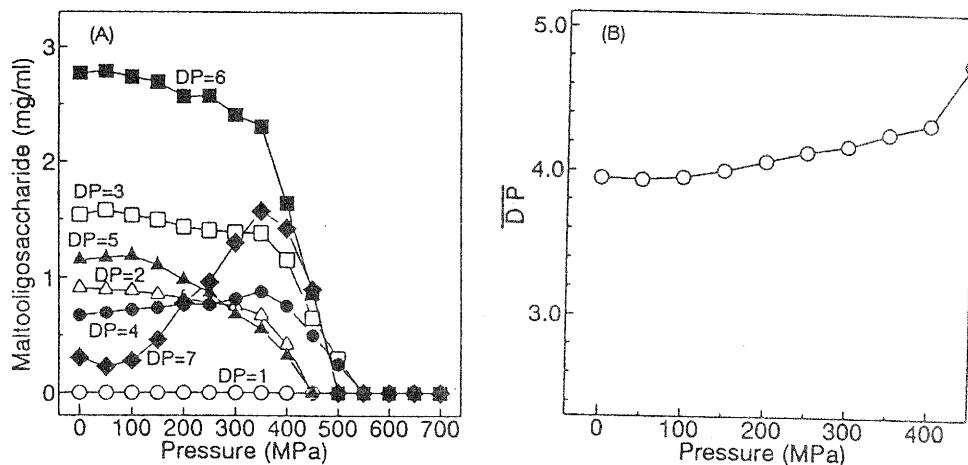


Fig.8. Effect of pressure on the product composition(A) and mean degree of polymerization ( $\overline{DP}$ ) of maltooligosaccharide(B) of *Bacillus subtilis*  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose. Substrate concentration was 10 mg/ml and enzyme concentration was 10 units/ml. See Fig.2 for other conditions.

30分間の反応では全圧力下においてグルコースはほとんど検出されなかった。以下各オリゴ糖の挙動は次のとおりである。マルトースは350 MPaまで徐々に以後急激に減少し450 MPaで検出されなくなった。マルトトリオースは350 MPaまで徐々に以後急激に減少し550 MPaで検出されなくなった。マルトテトラオースは350 MPaまで徐々に増加し以後比較的緩やかに減少し、550 MPaで検出されなくなった。マルトペンタオースは150 MPaまではごく僅かに増加したが以後比較的ゆっくりと減少し、450 MPaで検出されなくなった。マルトヘキサオースは350 MPaまで徐々に以後急激に減少し500 MPaで検出されなくなった。マルトヘプタオース(DP=7)は350 MPaまで比較的急に増加し以後急激に減少し、500 MPaで検出されなくなった。そして、550 MPa以上ではもはやどのオリゴ糖も検出されなかった。

#### 4-6 低酵素濃度における反応時間の影響

繰り返しになるが完全直鎖アミロースを基質とした場合分枝構造がないことから、反応液中に存在する基

質の鎖長が短くなるにつれ酵素と基質の生産的な結合が起こる確率が減少し反応速度は遅くなるが、さらに反応は進むものと考えられ、また上記で得られた結果は例えば高圧下では酵素の活性が著しく低下する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可能性もある。そこで、0.1MPa、200MPa、400MPaにおいて反応時間を変化させて、生成物組成の変化を検討した。その結果を生成したマルトオリゴ糖の平均重合度とともに、それぞれ図9から図11に示す。

0.1MPaにおいては、反応時間の増加とともにグルコース、マルトース、マルトトリオースおよびマルトテトラオースが徐々に増加し、マルトペンタオースが比較的多く増加し、マルトヘキサオースが比較的大きく減少していった。マルトヘプタオースは反応時間30分に若干検出されたが、60分以後は検出されなくなった。すなわち、これらの圧力では反応時間30分以上においても、反応は徐々に進行し、まだ生成物の平衡点に達していないことがわかった。また、酵素濃度が500単位/mlの場合とは、変化するマルトオリゴ糖の種類が異なった。200MPaではグルコースは全く検出されず、マルトヘプタオースも30分に検出されただけで60分以降は検出されなかった。マルトースとマルトテトラオースが反応とともにほ

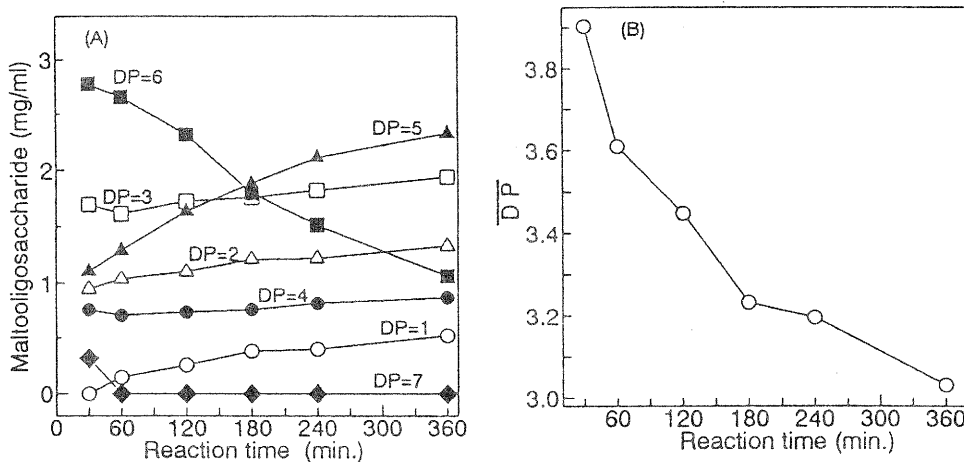


Fig.9. Effect of reaction time on the product composition(A) and mean degree of polymerization (DP) of maltooligosaccharide(B) of  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose at 0.1MPa and 40°C. See Fig.8 for other conditions.

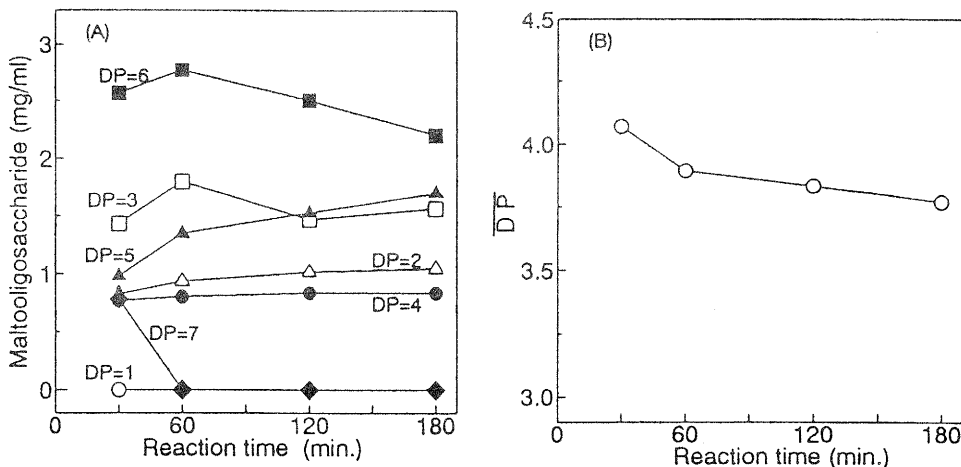


Fig.10. Effect of reaction time on the product composition(A) and mean degree of polymerization (DP) of maltooligosaccharide(B) of  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose at 200MPa and 40°C. See Fig.8 for other conditions.

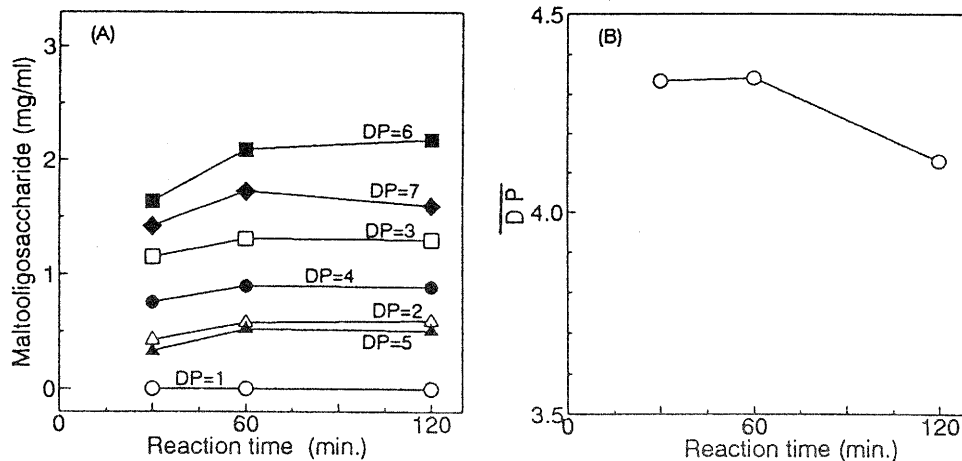


Fig.11. Effect of reaction time on the product composition(A) and mean degree of polymerization (DP) of maltooligosaccharide(B) of  $\alpha$ -amylase digest of absolute linear amylose at 400MPa and 40 °C. See Fig.8 for other conditions.

んの少しずつ増加し、マルトトリオースは60分まで増加し、以後減少し再び増加するという挙動を示した。マルトペンタオースは時間とともに増加し、マルトヘプタオースは逆に減少した。200MPaにおいても、30分以降も反応は徐々に進行しているものと考えられる。400MPaにおいては60分までは、グルコースを除くすべてのマルトオリゴ糖が増加し、以後ほとんど変化しなく、マルトヘプタオースが若干減少した。圧力変成により酵素活性が低下し、反応速度が遅くなっているためと考えられる。

#### 4-7 転移反応の存在の確認

次に転移反応により生成物が変化しているかどうかについて検討を行った。グルコース、マルトース、マルトトリオースをそれぞれ7mg/mlの濃度で含有する基質溶液3mlに酵素溶液1mlを加え常圧、100、300、500MPaの各圧力で30分間反応させた。

その結果、いずれもマルトテトラオースやマルトペンタオースの生成は観察されず、反応前後で全く同じ糖組成を示した。

## 5. 考察

完全直鎖アミロースに高圧下で*Bacillus subtilis*  $\alpha$ -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、圧力が増加すれば酵素濃度や反応時間によって種類は違うが、鎖長の長いマルトオリゴ糖の組成が増加し、平均重合度が増加するという現象を再確認した。この現象の理由としては次の4つが考えられた。

- 1) 酵素の立体構造が変化し、酵素と基質の結合様式が変化した。
- 2) 基質の立体構造が変化し、酵素のアタックする位置が変化した。
- 3) 酵素活性が低下した結果、見かけの反応速度が低下し、反応の途中を観察している。
- 4) 高圧下では $\alpha$ -アミラーゼが転移反応を触媒しやすくなり、低重合度のオリゴ糖から高重合度のオリゴ糖が生成した。

そこで、詳細に検討した結果、純粋な高圧下では酵素活性の低下により反応速度が遅くなり、500MPa以上ではほとんど反応が進まず、マルトヘキサオースやマルトヘプタオース等*Bacillus subtilis*  $\alpha$ -アミラーゼと生産的な結合をしやすいマルトオリゴ糖が少し分解したに留まった。したがって500MPa以上の高圧下での原因は、3)の酵素活性の低下が原因と考えられるが、100MPaから450MPaでは、酵素活性の低下による反応速度の低下とともに、酵素の立体構造の変化が依然として残る。

$\alpha$ -アミラーゼの反応は、一段階の反応ではなくアミロースから比較的長いオリゴ糖が生じ、さらに低分子のオリゴ糖へと反応が進んでいき、様式もシングルアタックではなくマルチプルアタックであるため、生

成物の組成からのみの解析を難しくしている。今後は、本研究データを酵素反応様式からのシミュレーションモデルと比較しながら検討を進める必要がある。そして、今年度実施できなかった速度論的な取扱いを至急に行わなくてはならない。

## 6. おわりに

最後に、本実験を行っていく上での問題点であるが、大きな問題点が幾つか存在する。

まず、酵素反応実験は精密な温度制御が必要であるのに、現在の装置では容器の熱容量が大きく、また、すばやく圧縮する必要性から断熱圧縮になるため反応中の温度制御が非常に困難である。また、反応途中に攪拌や振とうを行いたいが、困難である。なお、これは反応容器に超音波発信機をつけることによって比較的簡単に解決できると考えている。さらに、所定圧力に到達した後反応を行いたいが、基質と酵素の混合を高圧容器内で行うことは不可能であり、どうしても常圧下で混合し、すばやく高圧にすることになるし、酵素反応の停止も高圧下では困難である。これらの問題点は正確な速度論的取扱いを難しくしている。

筆者の希望としては、高圧容器内に酵素、基質および反応停止溶液を入れておき、所定圧力に加圧し、装置全体が一定温度に安定した後、遠隔操作でもってこれらを順次混合できるような装置が開発できれば本分野の研究が一層発展するものと考えている。

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（1988）。
- (2) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告， 3， 77（1989）。
- (3) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告， 4， 107（1990）。
- (4) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告， 5， 78（1991）。
- (5) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告， 6， 110（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（1990）。
- (8) 松本正， 林力丸：「加圧食品－研究と開発－」（林力丸編）， pp. 237， さんえい出版（1990）。
- (9) 松本正：食品と開発， 25（12）， 21（1990）。
- (10) 松本正：農化， 65， 388（1991）。
- (11) 松本正：「加圧食品と高圧生物学」（林力丸編）， pp. 368， さんえい出版（1991）。
- (12) 松本正：材料， 41， 294（1992）。
- (13) 松本正：「生物と食品の高圧科学」（林力丸編）， pp. 346， さんえい出版（1993）。
- (14) 松本正：滋賀県工業技術センター研究報告， 7， 59（1993）。
- (15) 松本正：「生物と食品の高圧科学」（林力丸編）， さんえい出版（印刷中）。
- (16) E. Morild, *Adv. Protein Chem.*, **34**, 93(1981)
- (17) 功刀滋， 「食品への高圧利用」（林力丸編）， pp. 103， さんえい出版（1989）。
- (18) 功刀滋， 「加圧食品」（林力丸編）， pp. 53， さんえい出版（1990）。
- (19) 功刀滋， 「高圧科学と加圧食品」（林力丸編）， pp. 74， さんえい出版（1991）。
- (20) 岡本已恵子， 林力丸， 「加圧食品」（林力丸編）， pp. 59， さんえい出版（1990）。
- (21) 林力丸：「生物と食品の高圧科学」（林力丸編）， pp. 1， さんえい出版（1993）。

# 技術開発報告

# セラミックス分野における技術計算ソフトの開発（第一報）

## アレキサンダーサンディの原形論によるモデリングソフト

技術第二科 横井川 正美 Masami Yokoigawa

あらまし：中小企業が多いセラミックス分野の技術支援ソフトの第一弾としてパソコン上で動作する造形支援ソフトを開発した。モデリングの方法にアレキサンダーサンディの原形論を用い、ソフトを操作することにより、造形心理や色彩などの感性が磨かれるように工夫した。

また、ソフトウェアのレスポンス（応答性）はユーザーの使用感に大きく影響するので、種々の関数の処理速度については言語と機種両面から評価した。さらに、C言語におけるグラフィックスやマウス機能の諸問題についても詳細に検討した。

### 1. はじめに

パソコンも”ソフトがなければただの箱”と称されてから久しいが、未だ使いやすく役に立つソフトは少ない。Windowsやマルチメディアという言葉が氾濫し、そのソフトウェアのデモや広告に感動するが、あまりにも高機能で汎用性に富むため、日常の業務には使いにくく、また使いこなせないが現状である。

工業分野においても先端産業や大手の多い業種はソフト開発に莫大な投資をし、優れたソフトを開発して利用しているが、地場産業などの中小零細企業ではそれが難しい。また、伝統産業などでは形状や材質の設計に長年の経験や勘を必要とすることが多く、その専門知識とソフトウェア開発能力がなかなか両立しない。

そこで、当所ではCやBASICといった言語やメカトロ、インタフェースなどの応用技術の講習会の開催し、中小企業の技術力向上のための支援をしている。また、ソフト開発においては機器制御やデザインを中心に進行している。本研究ではその分野をセラミックスとし、パソコンで処理しやすい造形や各種技術計算に関するソフトウェアの開発を目的とした。このセラミックス分野の技術計算はその製造工程で種々必要となるため、筆者は以前から陶磁器の素地や釉薬の調合計算ソフトを手掛けてきた<sup>(1)</sup>が、パソコンを取り巻く環境が当時に比べ格段に進歩したので再考する必要がある。今回はそのうちの形状開発という分野にスポットを絞った。ただ、既存のCADソフトと類似してものでは開発する意味がないので、モデリング手法にアレキサンダーサンディの原形論という従前にはない手法を用いた。このモデリング（形をつくる）という作業はパソコン処理においても非常に手間がかかる部分であるが、この原形論は形状は限定されるものの座標計算をパソコン任せにするため、データの入力数は非常に少ない。なお、ユーザーインターフェースはマウスのみとし、リアルタイムメッセージにより、初心者でもマニュアルレスの操作ができるように工夫した。

### 2. ソフトウェア開発における諸問題

#### 2-1. ソフトウェア開発言語

現在、アプリケーションを作成するための言語としてはCやC++が主流である。BASICは実行速度の遅さや構造化が困難であることなどから”パソコン=BASIC”という8ビット時代から比べると利用者は減っているが、最近ではこの点も解消され、Windows向けに新たな展開をしている。OSについては、もう数年もすれば、特殊な用途以外のアプリケーションソフトはすべてWindows上ということになるかもしれないが、現時点では高度なハードウェアがないと処理速度などの点で不満が多くなる。そこで、開発言語としてはTurbo C++というボーランド社のCコンパイラとし、環境はMS-DOS上とした。

#### 2-2. 開発機種と動作機種

中小企業での機器の導入のしやすさやソフト利用ユーザー数を考慮すれば、ワークステーションなどは問

題外でパソコンしかない。ただ、どのような機種で開発し、そのソフトの動作可能機種については重要な問題である。現在のパソコンのシェアはPC98、DOS/V、Machintoshが御三家であり、このいずれかに対応させなければ存在価値がないが、全機種で動作するソフトの開発は難しいので、占有率が50%程度と最も高いPC-9800シリーズ（互換機も含む）向けに作成した。参考までに開発環境を紹介する（表1）。

表1. 開発環境

機種名	NEC PC-H98SmodelU8
CPU	80486SX 20MHz + ODP
RAM	9.6M バイト
HDD	130M バイト

### 2-3. 言語の処理速度とライブラリー

作成するソフトがGUI（グラフィックユーザーインターフェース）に優れたフレンドリーさを志向し、さらに画面上に数多くのグラフィックスを描画するため、グラフィック関数の速度はソフトを使用する際の快適性に大きく影響する。言語の処理速度は一般には漠然とアセンブラ、C、BASICの順に速いという認識しかないので、グラフィック関数を中心にテキスト表示や数値計算の速度について測定した。使用言語は表2のとおりである。

表2. 使用言語

言語	処理	メーカー	名称	略称
BASIC	インタプリタ	NEC	N88 日本語 BASIC(86) Ver.6.0 (DOS版)	N88
BASIC	インタプリタ	KSP	BASIC/98 FAST Ver.3.11	B98
BASIC	コンパイラ	マイクロソフト	Quick BASIC Ver.4.5	QB
C	コンパイラ	マイクロソフト	Quick C Ver.2.0	QC
C	コンパイラ	ボーランド	Turbo C++ Ver.1.0 2nd EDITION	TC++

ただ、B98のこのバージョンが486で動作しなかったため、機種をPC-9801NS/T（CPU 80383SL(98)20MHz）とし、DOSは3.3Dでconfig.sysに特殊なEMSドライバーなどを登録しない条件で測定した。なお、コンパイラについては統合環境からとEXEファイルからとでは速度が異なるので、EXEファイルからの処理速度に統一した。表3はその測定結果である。（単位は秒）

表3. 言語の処理速度の比較

処理内容	回数	BASIC命令	N88	B98	QB	C命令	TC++	C命令	QC
単純ループ	100万	FOR_NEXT	117	30	18	for	0.88	for	1.77
テキスト出力	10万	PRINT	74	40	30	cprintf	30	cprintf	38
整数加算	10万	I+J	41	5	3	i+j	0.14	i+j	0.26
三角関数	10万	SIN	94	61	19	sin	15	sin	41
点描画	10万	PSET	63	34	14	putpixel	13	_setpixel	5
線描画	1万	LINE	22	18	15	line	15	_lineto	15
塗り込み長方形	1000	LINE, BF	14	13	13	bar	15	_rectangle	15
円描画	1万	CIRCLE	25	21	20	circle	796	_ellipse	78
楕円描画	1000	CIRCLE, 0.5	19	19	17	ellipse	63	_ellipse	8
塗りつぶし	100	PAINT	15	12	9	floodfill	34	_floodfill	9

C言語の優位性は単純ループや算術演算などのCPUに依存する処理に現れるが、グラフィックスやテキスト処理においてはあまりない。円の処理内容は中心（320,200）とし、半径100の円を描かせているのであるが、TurboC++のcircleの遅さは気になる。半径に比例して遅くなる点やBASICに比べて楕円に変更したときの落ち込みの少なさなどから、描画メカニズムが特殊なのであろうか。また、テキスト出力にはテキ



ストビデオ関数 (conio.h) の cprintf を用いたが、標準入出力関数 (stdio.h) の printf は 3 割程度遅くなる。TC++ と QC の比較については、TC++ は計算速度、QC はグラフィック速度でそれぞれ有利という結果になった。

C 言語の規格にはグラフィック処理のようにマシンに依存するものは標準化されていないので、BGI (Borland Graphics Interface) のようなコンパイラ付属のライブラリーを使用するわけであるが、BASIC に慣れた人はグラフィック関数 (ピクセル、ドロー、フィル) の色属性が別定義であることや、QC の円、楕円の形状定義が中心や半径でなく、外接する四角形とする点などはなかなか馴染めないと思われる。他には次のような方法がある。

- ① グラフィック LIO という N88-BASIC 用の ROM ルーチンを用いる。
- ② MS-DOS 付属の GRAPH.SYS と GRAPH.LIB を用いる。
- ③ 市販のグラフィックライブラリーを用いる。

このグラフィック LIO (Logical Input Output) を利用したライブラリーは BASIC ライクにグラフィック関数が操れるので多くの本<sup>④</sup>~<sup>⑥</sup>で紹介されている。その処理速度は TC++ を用いて評価したところ、ほぼ QB で作成した EXE ファイルと同じであった。

#### 2-4. 機種別処理速度

最近のパソコンの話題はハードウェアでは Pentium、Power PC といった高性能 CPU に関するものが多い。そして、これらの CPU の能力を把握するためのベンチマークテストが雑誌の紙上を賑わせているが、前機種との比較が多く、新機種の優位性を誇張させるようにテスト内容を選択している場合もある。そこで、前述と同様のテストを NEC とエプソン機について 10 数種について行った。表 4 はその一部である。

表 4. 機種別処理速度

機種名	Af	Ap	Bs	FA	NS/T	EX	VM
CPU	Pentium	486DX2	486SX	486SX	386SL98	80286	V30
クロック (MHz)	60	66	33	16	20	12	10
for	0.03	0.09	0.18	0.37	0.88	1.36	3.10
cstdio	5	6	7	25	30	32	70
add (x100)	0.7	1.4	3	6	13	24	60
sin	0.14	0.26	4	8	15	24	64
line	7	5	5	8	15	8	148

パソコンの処理速度は CPU の種類とクロック周波数の高さで決まることはよく知られている。すなわち、8086、V30 を 1 とすると、80286、80386、80386SX が 2、486SX、486DX が 4、486DX2 が 3.4 の比になり、この定数にクロック周波数の倍率を掛けた値が CPU のおおよそ性能となる<sup>(6)</sup>。また、Pentium は 486DX2 のほぼ 2 倍である。

単純ループや計算の速度はほぼ上記の関係は成り立ったが、グラフィックスやテキストの処理速度はやや複雑である。それは CPU 能力のほかに EGC (Enhanced Graphic Charger) やローカルバスの有無などのハードの要素とライブラリーのアルゴリズムなどのソフトの要素が絡み合うためである。98 について言えば、グラフィックスは EGC の差で VX 以降大きく向上しており、テキストは MATE などのローカルバス採用機種が数倍速い。結局、グラフィックスの描画速度は計算処理能力ほど CPU の影響を受けないので、Windows のようなグラフィックスを多用した環境では CPU アクセラレータよりむしろグラフィックチップ (S3 の 86C928 やシーラスロジックの GD5428 など) 搭載アクセラレータのほうが有用とされるのであろう。

#### 2-5. マウスドライバー

C 言語には標準でマウスの処理機能がないため、マウスを利用したアプリケーションを作成するとき、何らかのマウスドライバーを使用しなければならない。幸い、Turbo C++ には MS-DOS に付属する NEC 製のマウスドライバーに対応した pc98mouse という命令がある。これを用いれば、マウス制御が実現できるわ

けであるが、このドライバーの標準のマウスは緑色で 16 × 32 ドットと異様に大きい。色や形状は変更できるが、グラフィック画面がマウスと重なったときに XOR がとられて色が変わる点は DOS 版の Lotus1-2-3R2.4J などで気づかれたかたもあるだろう。Windows のような自然なマウス環境を実現するためにマウスドライバーについて調べた。その一覧は表 5 のとおりである。

表 5. マウスドライバー一覧

ソフト名	プログラム名	サイズ	日付	制御方式
MS-DOS 3.3D	mouse.sys	4395	91-11-08	NEC
MS-DOS 5.0A	mouse.sys	11770	92-11-11	NEC
	mouse.com (Ver.7.02)	21166	92-11-11	MS
Quick BASIC Ver.4.5	mouse.sys	8127	89-10-18	MS
	mouse.com (Ver.6.00)	8431	89-10-18	MS
Quick C Ver.2.0 (NEC)	mouse.com (Ver.8.20J)	63987	93-05-10	MS

\*MS は Microsoft の略

mouse.sys (デバイスドライバ) は config.sys に device=mouse.sys などとして組み込むのに対し、mouse.com (常駐プログラム) は autoexec.bat などのバッチファイルに記述して常駐させる。

ドライバーの利用方法は、AX レジスタや BX レジスタに使用したいファンクションの機能コードとその他の必要情報を各レジスタに設定して割り込みタイプ 33H (INT33H) を実行すればよい。

問題は制御方式に 2 つのタイプに存在することであるが、この差異を吸収する関数を作成すれば、ユーザーはマウスドライバーの種類を意識することなく、手持ちのドライバーを使用すればいいことになる<sup>(7)</sup>。

表 6 はその差異吸収に利用できるファンクションである。

表 6. ファンクション 03H の機能の比較

機能		NEC-MOUSE	MS-MOUSE
カーソル位置 の取得	入力	AX = 03H	同 じ
	出力	AX = 左ボタン 0:OFF -1:ON	BX [ bit0 ] = 左ボタン 0:OFF -1:ON
		BX = 右ボタン 0:OFF -1:ON	BX [ bit1 ] = 右ボタン 0:OFF -1:ON
		CX : 水平位置 DX : 垂直位置	同 じ 同 じ

カーソル位置取得のファンクション (03H) は、NEC-MOUSE では AX レジスタに左ボタンの状態 (0 か -1) を返すのに対して、MS-MOUSE では AX レジスタの内容を壊さない。すなわち、MS-MOUSE では 3 のままである。初期化関数実行時にこの情報をグローバル変数に書き込めば、この変数を利用してドライバーの差異を吸収することができる。具体的な手順としては

変数 Mskind の設定 → AX レジスタに 3 を設定 → INT 33H の実行 → Mskind=(AX の出力 == 3)

とし、右辺が真なら Mskind=1 となり MS-MOUSE、偽なら Mskind=0 となり NEC-MOUSE であることがわかる。この変数 Mskind を種々の関数から参照して一方の制御方式に統一する。

入出力のパラメータが異なる機能には、カーソル移動範囲の設定 (水平、垂直) やボタンの押下、解放回数とその最終座標などがある<sup>(8) ~ (10)</sup>。このことを考慮して次の関数を作成した。

- ①マウスドライバーの初期化 (機種情報の取得)
- ②マウスの表示 (3 つの形状)
- ③マウスの消去
- ④ボタン情報と位置の取得

⑤マウス位置の設定

⑥マウスの動的位置の取得

⑦マウスクリックの検知 (ボタン種を返す)

⑧マウストラッグの位置の取得

⑨マウス移動範囲の設定

以下、テクニックを要する関数のみ、その手法と問題点を述べる。

②はファンクション(01H)で実現できるが、問題は形と色である。NEC-MOUSE ではデフォルトで緑色の大きいマウスであり、Ver7.02以前のMS-MOUSEもサイズは小さいものの灰色である。さらに、前者はG-VRAMの1プレーンに対してのみ表示するため、バックにグラフィック画面があるとXORがとられて色が変わる。また、後者は拡張グラフィックス(16色)使用時のパレット8から15で輝度が変わる。MS-WINDOWSの付属のVer.8.2Jは白色でこの問題もないが、ドライバーの差異吸収とカーソル位置で形状を変化させる必要があるので独自に関数を設計した。方法はグラフィックス画面で目的形状(中身)とその輪郭をメモリーに保存し、マウスの移動検知により、古い場所の修復→新しい場所のデータの保存→中身のOR出力→輪郭のXOR出力を繰り返すというものである。

④と⑨は出力や入力のパラメータが異なるので変数 Mskind で三項演算させた。

⑥は最も頻度が高いと思われる関数で④の関数から座標取得のみに機能を絞った。

⑦も重要な関数でループ内のリピートを避けるための処理(立ち上がりエッジの検出とその微分処理)が必要である。

⑧はマウスボタンを押しながら移動する処理であり、ファンクションの05Hと06Hで実現するのが一般的かもしれないが、ここでは④の関数を組み合わせてその座標をポインター出力させる方法をとった。

以上、これらの関数群を ymouse.h とし、利用することにした。

### 3. アレキサンダーサンデーの原形論によるモデリングソフト

#### 3-1. アレキサンダーサンデーの原形論とは

7つの基本図形(図1の部品NO1から7)を結合させることにより、器形を得るという方法であり、アレキサンダーサンデーという人が考案した<sup>(1)</sup>。組み合わせる数や基本図形の形状を少し変化させることにより、種々の形状を導き出すことができる。単純な原理のモデリング手法であるが、既存の汎用CADソフトでは非常に手間がかかり、実用にならないので独自に開発することにした。陶磁器や木工などの形状開発に職人芸のセンスを必要とする伝統産業は後継者不足が深刻化しているため、こういったソフトによる支援は意義深いと考える。

#### 3-2. マンマシンインターフェース

Windows や machintosh が使いやすいといわれるのは、キーボードの代わりにマウスとアイコン(内容が連想できる絵記号)をインターフェースにし、直感的な操作が可能になっているためである。今回作成したソフトは、入力手段をマウスのみとし、グラフィカルな画面設計とリアルタイムのメッセージ出力により、マニュアルなしでも操作できるように工夫した。ただ、日本人は絵文字より漢字一字のほうがわかりやすいので、漢字アイコンを採用した。

#### 3-3. 開発ソフトウェアの初期画面

左半分を図形表示エリアとし、右半分には操作ボタンを配置した。(図1)モノクロ印刷用にアレンジ

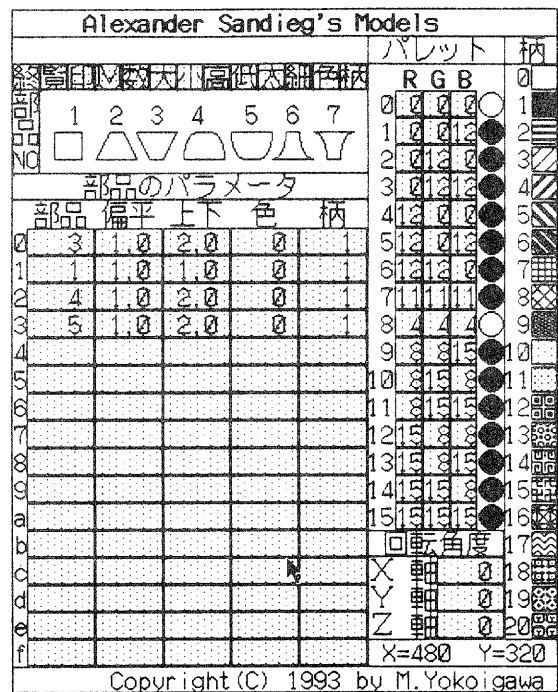


図1 初期画面の右半分(操作ボタン)

マウスを薄い網掛けのボタン上に移動すると、ボタンは画面上で押したように変化し（左辺と上辺を黒く、右辺と下辺を白くする）、メッセージエリア（漢字アイコンの上）に現在の状況が表示される。その場所でマウスクリックすれば、メッセージに示すイベントを実現することができる。すなわち、部品のパラメータの増減、部品数の増減、パレットの変更、全体の変形などである。（図2）次にプログラムを構成する関数または機能について順に述べる。

### 3-4. 部品表示パラメータ

7つの基本図形を画面上に表示するのに必要な引数は部品番号、図形の左上の座標、上辺の長さ、アスペクト比（扁平率）、上辺下辺の比である。斜辺の曲線（部品4から7）は楕円弧とした。

### 3-5. 二次元モデルの座標計算

最上部の部品のパラメータが決まれば、その下の部品の左上の座標は決まるので部品数に応じて計算を繰り返す。

### 3-6. 部品パラメータのデジタル処理

マウス位置検出関数（グラフィック座標）とクリック検出関数（左：1、右：2）を作成したのでマウス位置からパラメータの種類、クリックボタンの種類で数値を増減させ、描画関数に渡す。

### 3-7. 部品パラメータのアナログ処理

割愛したが初期画面の左部分にはデフォルトで4個の部品からなるモデルを表示させている。マウスを斜辺や底辺に移動し、ドラッグすることにより上下左右に伸縮させることができる。

### 3-8. 部品の色と柄の変化

RGB各成分の輝度を変化させることにより、4096色に対応した。（ただし、同時発色は16色）柄についてはBGI標準の11パターンから20パターンに増やした。この機能を用いれば、隣接する色や柄のマッチング試験が行える。

### 3-9. 陰影による立体感

光線追跡法によるシェーディングやシャドウイングが一般によく用いられるが、この方法はマシンの能力が要求するので高速描画が可能なグラデーションによる方法を用いた。すなわち、幅を規則的（三角関数による）に細くした基本図形（RGBの輝度を1ずつ増加させてある）を用意し、太く色の濃い図形から順に塗り重ねた。Mボタンをクリックすることにより、このモードに入るわけであるが、立体感の表現として十分実用に耐える。

### 3-10. ワイヤフレームによる三次元表示

線の連結による単純な三次元表示法である。本手法はモデルが器形（軸嚢形）であるので、回転体を形成するパラメータ（断面のXY座標、回転角度）が必要になる。そこで、モデルの下辺の中点を基準点（0,0）とした座標系に回転させる点を変換した。ただ、X座標は楕円弧の部品もあるので3分割点をサンプリングした。回転角度は操作画面をクリックして変化させる

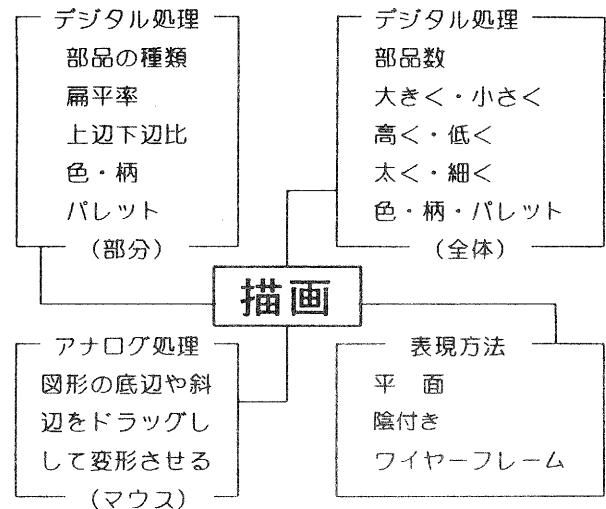


図2. 主な割り込みイベント

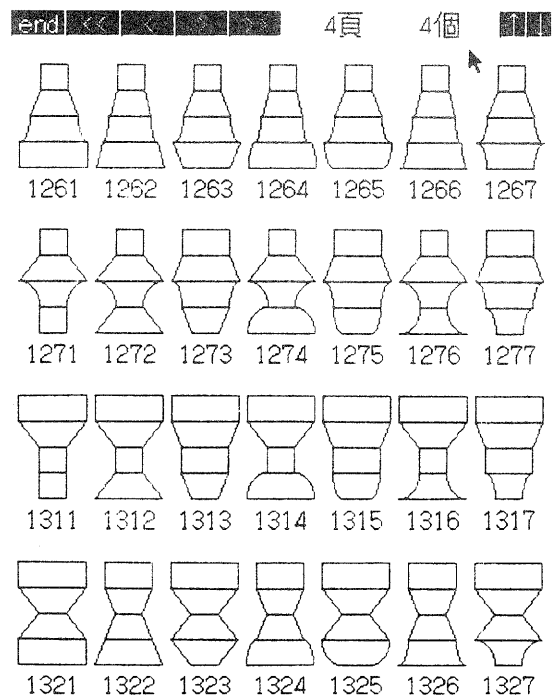


図3. 一覧表示画面

ことにした。また、このモードは M ボタンを 2 回クリックすることにより実現する。回転による座標変換と描画に関する考え方は文献 2 などに詳述されているので省略する。

### 3-11. 一覧表示

漢字アイコンの覧をクリックすれば、このモードに入る。図 3 はその表示例である。上記のボタンで表示ページの変更や構成部品を増減をおこなう。

### 4. 本ソフトを用いた形状開発例

本ソフトを用いて信楽焼の陶器の形状を作ってみた。図 4 はそれぞれ丸花瓶、鶴首花瓶、プランター、花台の例であり、そのパラメータについては表 7 の 1~4 に示す。筆者はデザインが専門でないのであまり格好はよくないが、表 7 のデジタルデータを変化させたり、適当に斜辺や底辺を引っ張るなどをすれば改良が可能である。

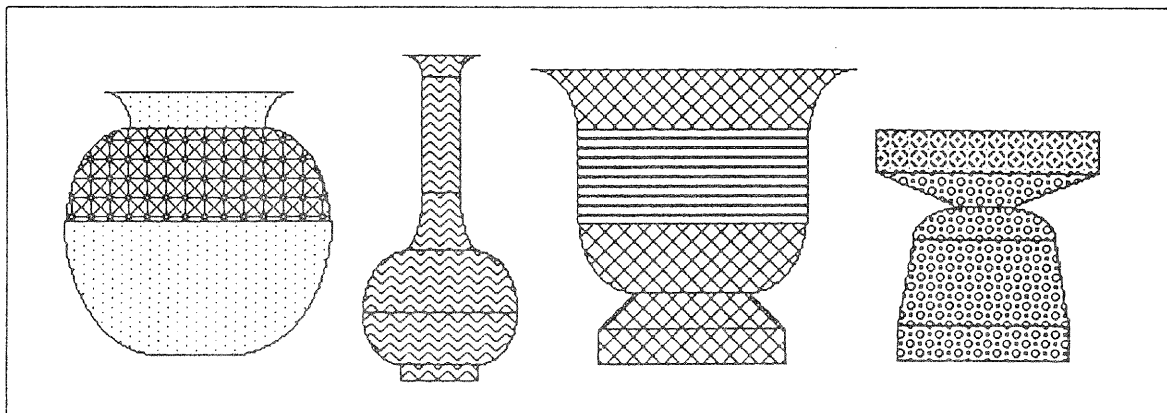


図 4. 陶器の形状作成例

表 7.1 丸花瓶

NO	ASP	TBR
7	0.3	1.4
4	0.7	2.0
5	1.8	3.6

NO : 部品番号

ASP : 偏平率

TBR : 上辺下辺比

表 7.2 鶴首花瓶

NO	ASP	TBR
7	0.6	2.0
1	3.0	1.0
6	1.5	2.0
4	0.8	2.0
5	0.7	2.0
1	0.2	1.0

表 7.3 プランター

NO	ASP	TBR
7	0.3	1.4
1	0.4	1.0
5	0.6	2.0
2	0.3	1.6
1	0.2	1.0

表 7.4 花台

NO	ASP	TBR
1	0.2	1.0
3	0.6	4.0
4	0.6	2.6
2	0.6	1.2
1	0.2	1.0

### 5. まとめ

セラミックスの造形を支援するソフトウェアを C 言語を用い、MS-DOS 上で開発したが、その過程で種々の知見を得たので列記する。

1. DOS 環境での GUI プログラミングは画面設計に自由度が大きく、オリジナルな環境を構築できるが、関数の設計に非常に手間がかかる。また、一般ユーザーは日頃使っているソフトに近い操作のほうが使いやすいことが多く、プログラマーの苦勞が報われないことが多い。今後は DOS 環境のソフトも Windows ライクになることは確実であるが、Windows 以上の操作性の追求も必要である。注目されるのは Windows と同様の高解像、多色化を DOS 上で実現するドライバーの出現である。もう、640 × 400 ドット 16 色の時代ではないのである。
2. 8 ビット時代には大多数の人が BASIC で挫折したが、16 ビット MS-DOS 時代になり、優れたワープロや表計算の出現によりやっとパソコンが使えるようになった。さらに、Windows 時代の幕開けにより、

ソフトの直感的な操作が可能となった。しかしながら、開発言語を取り巻く環境は決していいとはいえない。Cにしる、C++にしる、概念が難解であるため、まず理解に苦勞し、さらにエラーとの格闘をしなければならない。市販されている書籍の多くは全般を浅く解説してあるので何となく理解はできるが、日本人の英語のように読めるが話せないという状況、すなわちソースは読めるがプログラムを書けない状況に陥りやすい。重要なことは言語にこだわらず（表計算やデータベースのマクロ言語でも可）、目的意識を持つことである。

3. アプリケーションの処理速度については各言語の持つ諸関数の基礎的速度とそのアルゴリズムを把握が必要であることから種々の測定を行ったが、BASICのグラフィック描画速度がCに決してひけをとらないことがわかった。三次元の座標計算や光線追跡法に伴う複雑な計算がなければ、作成ソフト上の差は感じないかもしれない。最近のBASICはEXEファイル作成機能だけでなく、構造化やローカル変数などはC言語の良さを存分に取り入れているのですでに初心者の学習言語の域を脱している。Windows作成用にもVisual BASICが発売されているので、プロやマニアでもない限りCやC++の勉強は時間の無駄にも思える。
4. ユーザーそれも初心者が停滞なくソフトの操作ができるようにマウスのみインターフェースを採用した。ただ、DOS版のCコンパイラではマウス機能が充実しておらず、またドライバーの制御方式に違いがあることからそのライブラリーを作成することになった。今後はMS方式が主流になると思われるが、まだNEC方式もフリーウェアあたりでは使用され現役なので差異吸収ライブラリは意義があると思う。
5. 今回のソフトウェアはモデリングの部分を中心に置いたため、その後のテキストチャーマッピングなどや三次元処理などはデータを他の専門ソフトに移して行くことになる。課題としては曲線のバリエーションを増やすことや部品の接続場所の柔軟化などであろう。

最後に、パソコンは”こんなことであればいいな”という夢をかなえて道具になりうるものである。マルチメディア化の進行により、さらに地場産業や伝統産業などでも応用できる分野が増えるに違いない。

当所では今後いわゆる要素技術の研究だけでなく、実戦で即活用できるアプリケーションソフトの共同開発などの面でも支援する予定である。

## 謝 辞

本研究のモデリング手法を御教示いただいた信楽窯業試験場の伊藤公一氏に感謝します。

## 【参考文献】

- (1) 横井川正美：信楽窯業試験場業務報告、P20、(1985)
- (2) 河西朝雄：Cプログラミング技法、ナツメ社(1993)
- (3) 林晴比古：新C言語入門応用編、ソフトバンク(1991)
- (4) 柴田望洋：C 9 8スーパーライブラリ、ソフトバンク(1991)
- (5) 青山 学：グラフィックスに強くなる本、啓学出版(1993)
- (6) 高橋雄一：My Computer Magazine、Vol.17 No.4、P100、電波新聞社(1993)
- (7) 横地 聡：C MAGAZINE、Vol.5 No.9、P45、ソフトバンク(1993)
- (8) MS-DOS 3.3D プログラマーズレファレンスマニュアル Vol.2、NEC
- (9) 杉浦明美・柴崎忠生：DOS/Vプログラミング技法、翔泳社(1993)
- (10) 東京理科大学EIC：PC-9801プログラマーズBible、技術評論社(1994)
- (11) 坂本春幸：実用図案法、東京中央工学会(1934)
- (12) TURBO C++ LIBRARY REFERENCE Vol.1 Vol.2、BORLAND(1992)
- (13) 中山 茂：グラフィックスプログラミング入門、技報堂出版(1991)
- (14) 中山雅彦・井上俊宏：Turbo C++の応用50例、ソフトバンク(1992)

# デザイン手法の高度化に関する研究（第五報）

## 二次元インテリジェントデザイン手法の開発に関する研究（1）

技術第二科 野上 雅彦 Masahiko Nogami

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。当センターでは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（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。

本年度は、デザイン開発におけるクリエイティブワーク支援を目的に、イメージ言語によるグラフィックイメージ自動生成プログラムの開発を行なった。実験プログラムを作成し、バリエーションに制限はあるものの、相対的にはイメージに沿った図の生成が可能となった。

### 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への対応が当然のように要求される今、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、コンピュータを利用した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およびその活用を促進している。

多品種少量生産によりデザイナーへの負担は増加し、多くのアイデアを生み出す必要が生じている。デザイン現場でのコンピュータ利用は、アイデアプロセッサやデータベースを除くと、アイデア展開のために使われることは少ない。ここで、コンピュータのデータベース機能と計算能力を利用して、グラフィックデザインやプロダクトデザインにおけるクリエイティブワークを支援することが出来れば、デザイナーが多くのアイデアを創造することが可能となるであろう。

本年度は、平面のグラフィックデータに的を絞り、コンピュータによるクリエイティブワーク支援システムの開発を行なった。

### 2. 使用機器・開発言語

使用機器・開発言語は以下のとおりである。

1. コンピュータ Apple Macintosh IIfx
2. 開発言語 Symantec C++ 6.01, Think Class Library

機種選択は、普及性、計算能力と価格を考慮しパーソナルコンピュータベースでの開発を選択した。ターゲットとなるプラットフォームは、アップル社のSystem 7とマイクロソフト社のWindowsの二つが候補となるが、現在デザイン業界で標準となっているのはSystem 7&マッキントッシュであり、これを選択した。ウィンドウシステムに対応することで、生成したグラフィックデータの利用がスムーズに行なえる。

### 3. プログラム設計

ものを制作するにあたり、デザイナーには創り出そうとするもののイメージがもやもやしたものとして存在する。そのイメージを言語（文字）から視覚へと目に見える形に変換し、デザイナーにフィードバックすることで、デザイン開発におけるクリエイティブワークを支援することが可能となるのではないかと。

本年度では、ポスターやパンフレットなどの平面デザインに的を絞り、言語からグラフィックパターンを発生させることで上記支援を行う。

### 3-1 インターフェイス

デザイン作業を行う上では、コンセプトの設定が重要となる。コンセプトの設定がしっかりと行なわれていれば、求めるグラフィックイメージを言葉で表現することは容易なはずである。このプログラムでは、求めたいイメージのキーワードを入力することで、そのキーワードに沿ったグラフィックイメージを生成するものとした。

### 3-2 グラフィックファイル形式

作り出したグラフィックデータを利用するために、汎用性のあるファイル形式にする必要がある。ビットマップデータでは、PICT、TIFF、EPSF、ドローデータでは、PICT、EPSFなどが考えられる。PICTとはマッキントッシュ上の標準グラフィクスファイルで、マッキントッシュ上では汎用性が高いが機種依存性も高い。また、機能も比較的低い。TIFFはアルダス社、ヒューレットパッカード社などが共同で企画したもので、ビットマップグラフィクスデータの標準フォーマットとして広く利用されているものである。EPSFはアドビ社の開発によるグラフィックランゲージであるPostScript言語によって書かれたファイルである。機能は非常に高く、ドロー系グラフィクスデータで、デザイン現場での使用に耐える品質のものは事実上これだけである。

出力の品質、割付後のサイズ変更の自由度を考慮するとドローデータの選択になり、その中でもEPSFが最善と考えられる。

### 3-3 パラメータの設定

イメージ表現キーワードをプログラムに渡すために、何らかのパラメータに変換する必要がある。日本カラーデザイン研究所のイメージスケールの二本の軸であるSoft-Hard、Warm-Coolの二つパラメータで表現を試みた。

## 4. 実験プログラム

まず、二つのパラメータによりグラフィックイメージを作り出すことの効果を試験するためのプログラムを作成した。パラメータはダイアログで5段階に設定することとした(図1)。生成するイメージはモノクロのビットマップデータとし、ディザパターンでグレー階調を表現するものとした。

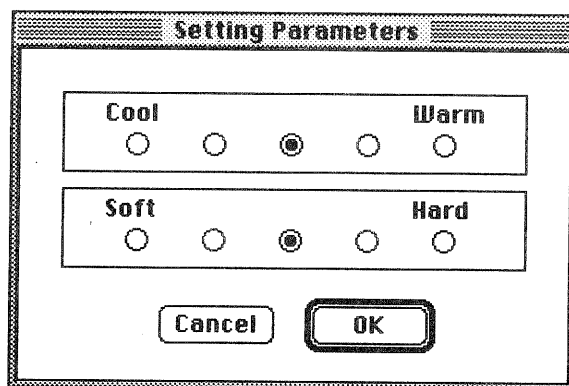


図1. 設定ダイアログ

### 4-1 単体のプリミティブによる表現

まず、位置は中心に固定した単体の図形を、大きさ、色の要素だけで変化させて表現を試みた(図2)。円と



三角形の配置されている軸はX軸がWarmからCool、Y軸がHardからSoftを表わしている。変化させた要素は大きさ、色、線の太さの三点である。

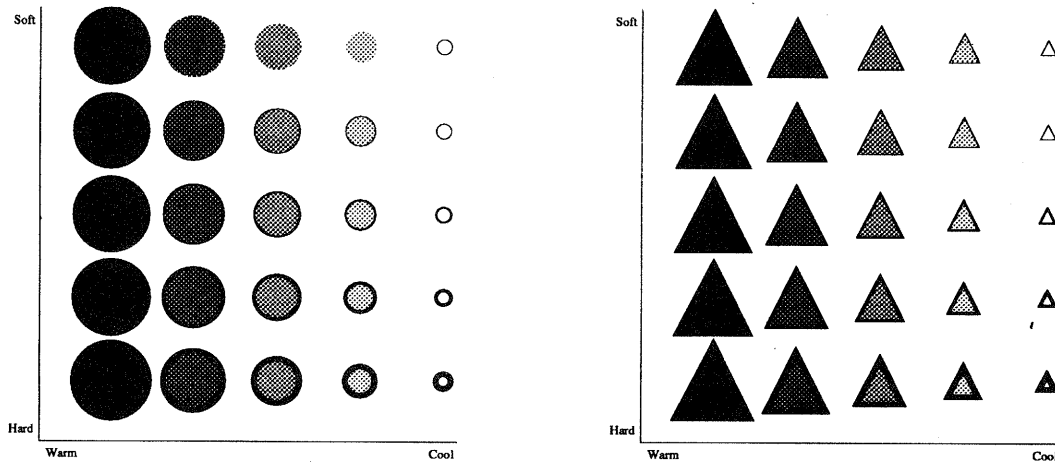


図2. 円と三角形の例

#### 4-2 同一図形の並び方による表現

大きさ、色は一定の6つの図形を、配列だけを変化させて表現を試みた(図3)。配置の制御の方法は、6個のオブジェクト分けるブロックの数、ブロックに振り分けるオブジェクトの数、ブロック内のオブジェクトの並び方(垂直、水平、斜線、ジグザグ)、ブロックの位置の四点である。

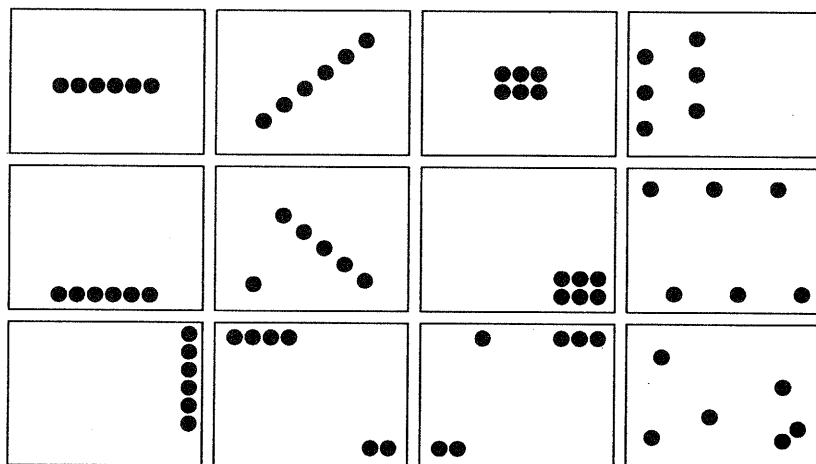


図3. 配列パターン

#### 4-3 複合表現

丸と三角ではプリミティブ形状自体の持つイメージにかなり違いがある。その要素と上記二つの要素、それ

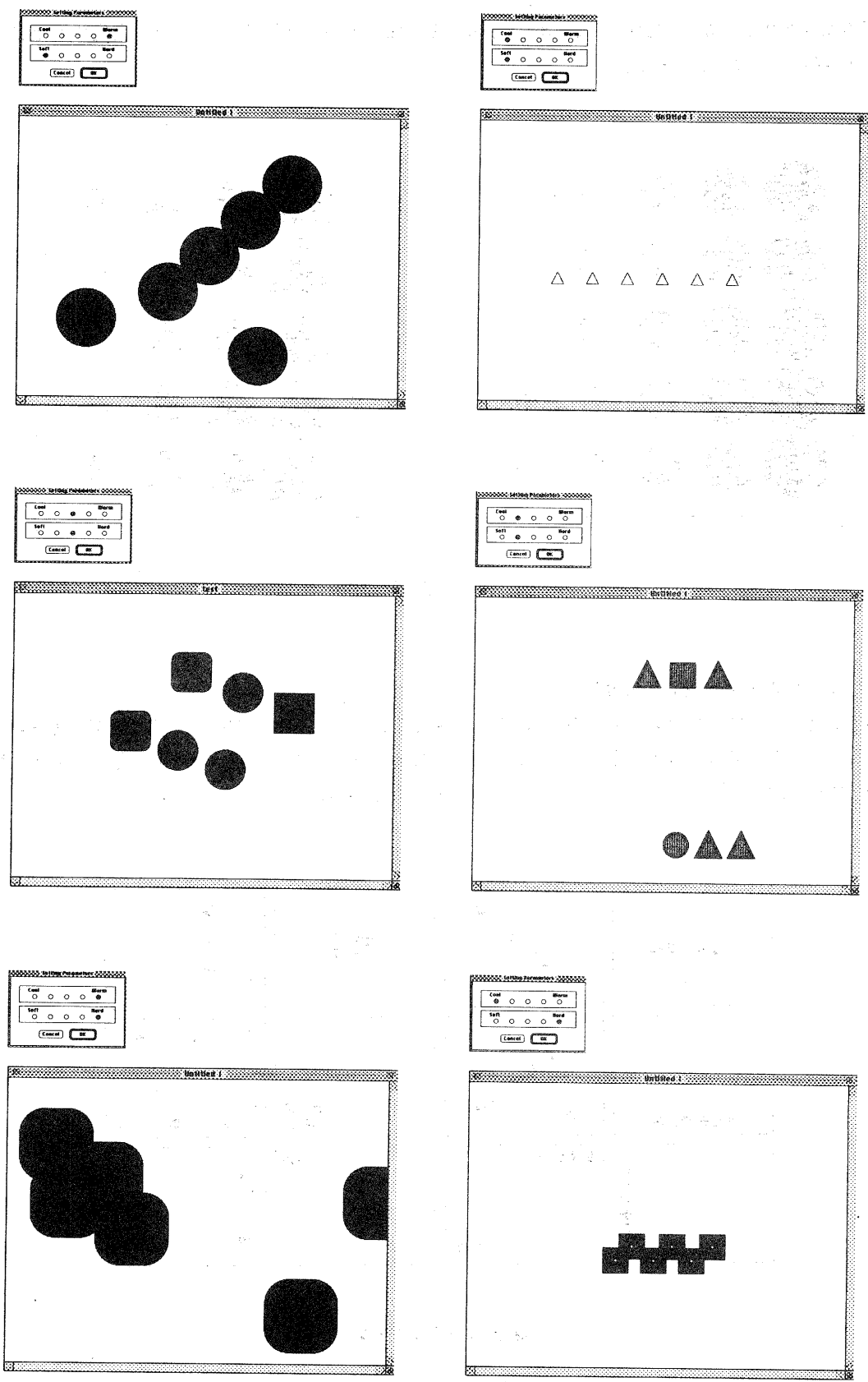


図4. 複合表現の例

に乱数を加えて表現を試みた(図4)。プリミティブは円、四角、角丸四角、三角の4種類を使用して構成を行った。

#### 4-4 考察

プリミティブの数、種類、大きさ、色などのバリエーションを制限しているため、図4の6つの図を比較してみると同じ様なものに見えるかもしれない。しかし、各図に対応するイメージ言語をあげてみると、1段目左の図は「かわいい」「うれしい」など、1段目右の図は「さっぱりした」「クリアな」、三段目左の図は「行動的な」「たくましい」など、3段目右の図は「メカニクな」と、相対的にはイメージに沿った図が生成されている。前記の制限を取り払っていくことで、多彩なグラフィックを生成することは可能となる。

#### 5. むすび

デザイナーのクリエイティブワークの支援を目的に、イメージ言語によるグラフィックイメージの自動生成プログラムの作成を行なった。今年度は、バリエーションに制限を持った実験プログラムの作成に留まったが、その条件下において、相対的にはイメージに沿った図が生成出来、プログラムの完成への展望は開けた。来年度も本研究を継続してプログラムの完成を行う。

今後の課題としては以下の点があげられる。

1. データのカラー化、ドローデータ化
2. キーワード入力インターフェイスの構築
3. EPSFへの保存

#### 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。

#### [参考文献]

- (1) 小林重順、カラーデザイン研究所:”カラーマーケティング戦略”
- (2) 高橋研究室:”かたちのデータファイル”

# 実験レポート

# 光センシング技術による表面粗さ判定法の研究（第三報）

技術第一科 河村 安太郎 Kawamura Yasutarou

あらまし：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、照射光源を多モード光ファイバーと白色光に変えたときの影響を検討し、2・3の興味ある知見を得た。

## 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。

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、正反射光法、鏡面反射率法、総散乱光法、対比光沢度法、スペckル法、偏光解析法、複合法などの提案や試作が行われた<sup>(1)~(3)</sup>。特に拡散反射光法と角度分布法を測定原理にした方法が実用性のある方法とされている<sup>(4)</sup>が、実用化されているものは少ない。そこで、最新のオプトメカトロニクス機器など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。

第一報<sup>(5)</sup>および第二報<sup>(6)</sup>で、研削加工面の表面粗さ $R_a$ の判定には直径0.8mm程度のスポット光を投光した時の反射光強度分布の分散値が使えることや切削加工面への反射光強度分布の適用についての知見が得られた。今回、投光光源とその影響についてさらに検討を加え、2・3の興味ある知見を得たので報告する。

## 2. 実験装置

図1は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。第一、二報は光源としてHe-Neレーザ（波長632.8nm）を用いていたが、今回は標準白色光源（アンリツ製・ハログランプ）を用いた。また、第一、二報は測定の自由度を持たせるため偏光面保存型光ファイバーおよびレーザ集光ユニット（日本科学エンジニアリング製）を用いて測定部と光源部を切り離していたが、今回は多モード型（GI型）光ファイバーと平行光投光レンズユニット（酒井硝子エンジニアリング製）を用いて同様の構成とした。またレンズユニットの先端にスリットを設けて、測定試料への投光する平行ビームの巾を調整するようにした。この違いについては3.に述べる。

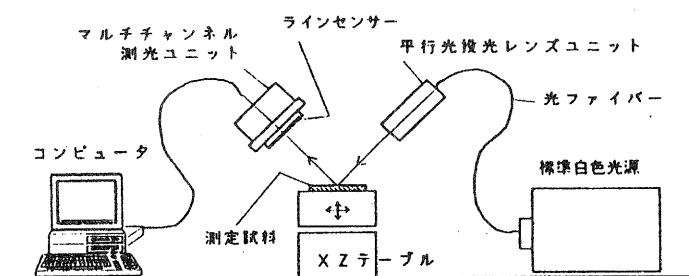


図1 反射光強度分布測定解析装置の概要図

図1は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。第一、二報は光源としてHe-Neレーザ（波長632.8nm）を用いていたが、今回は標準白色光源（アンリツ製・ハログランプ）を用いた。また、第一、二報は測定の自由度を持たせるため偏光面保存型光ファイバーおよびレーザ集光ユニット（日本科学エンジニアリング製）を用いて測定部と光源部を切り離していたが、今回は多モード型（GI型）光ファイバーと平行光投光レンズユニット（酒井硝子エンジニアリング製）を用いて同様の構成とした。またレンズユニットの先端にスリットを設けて、測定試料への投光する平行ビームの巾を調整するようにした。この違いについては3.に述べる。

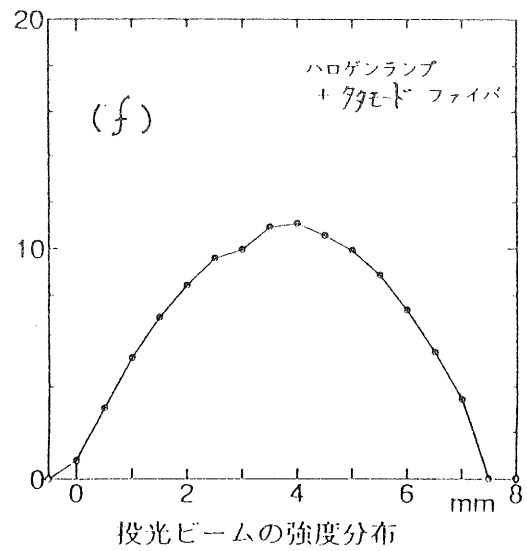
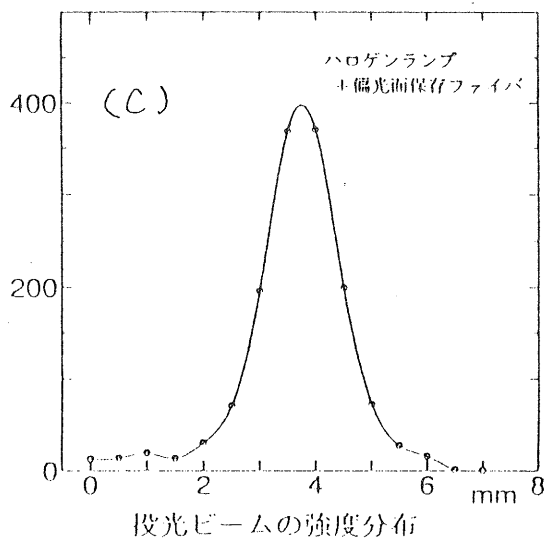
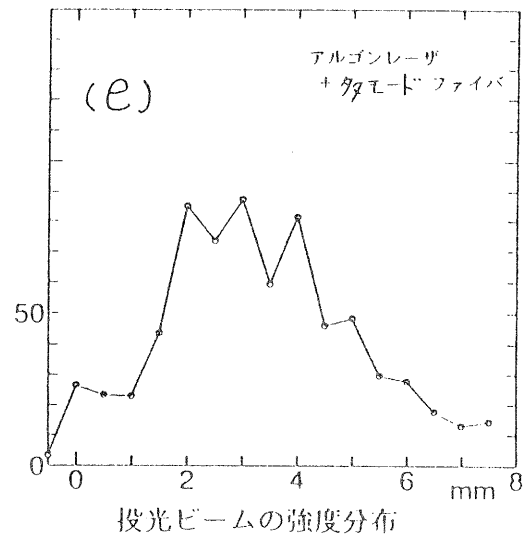
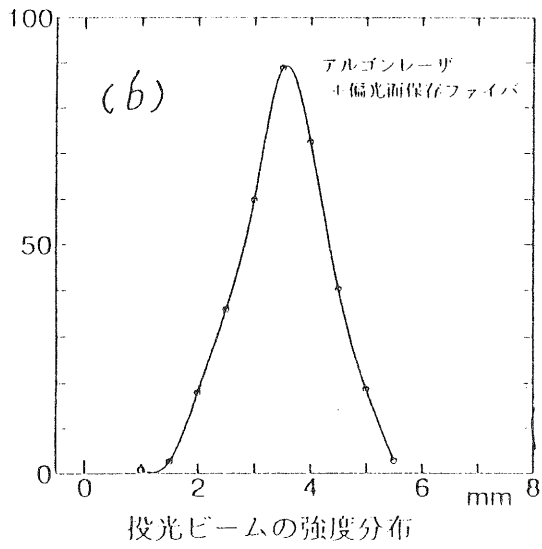
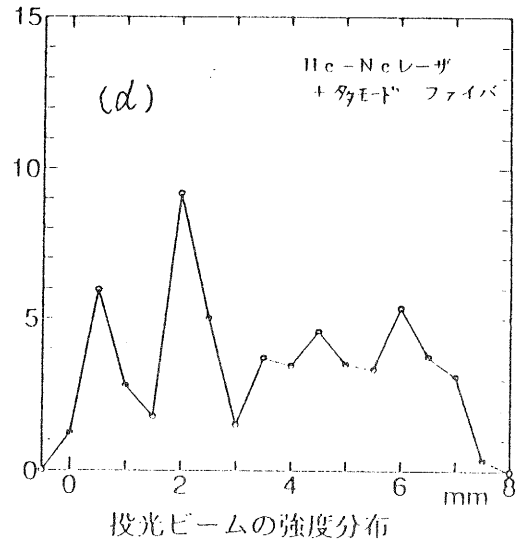
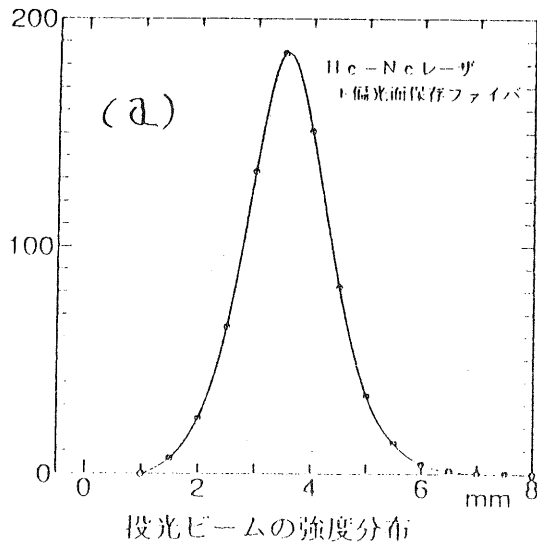


図2 各種光源と光ファイバーの組合わせにより作られる平行投光ビームの強度分布

試料からの反射光の測定は第一報と同じく蓄積型の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 t社製の粗さ標準片の平面研削加工面8レベル（No315のN1～N8）と平面切削加工面8レベル（No325N6～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。

### 3. 光源の種類と投射ビーム強度分布

前報では、スポット光ビームは、偏光面保存型光ファイバーおよびスポット用レーザ集光ユニットを用いて発生させてそのまま用い、ライン光は偏光面保存型光ファイバーとライン光用レーザ集光ユニットを用いて発生させ、その中央部を抜き出し用いた。しかし、投光ビーム内の強度分布についてはあまり検討を加えていなかった。そこで、今回その影響を検討するため数種の光源と光ファイバーを用いた場合の投光ビーム内の強度分布を測定した。

図2 a、図2 b、図2 c、図2 d、図2 e、図2 fは各種光源（HeNeレーザー波長 $632.8\mu\text{m}$ 、アルゴンレーザー波長 $514.5\mu\text{m}$ 、ハロゲンランプ）を2種の光ファイバー（偏光面保存型光ファイバーと多モード型光ファイバー）に導き、酒井硝子エンジニアリング製平行光投光レンズユニットから出てきたビーム径 $7.5\text{mm}$ の平行光の光強度分布を光パワーメータの入力用光ファイバーの先端を水平に移動させ $0.5\text{mm}$ おきに測定したものである。横軸は水平方向の位置を縦軸は各位置における光量を表している。但し図2 a～fの分布毎の受光量レベルは異なっており絶対値比較は出来ない。

図2 a、図2 b、図2 cは中央部に光量が集中したガウス分布をしている。これは偏光面保存ファイバーが分布屈折型で中央に寄り合うようにして光が進むためと考えられる。図2 d、図2 e、図2 fは前者に比べて全体に均一な光量分布となっている。これは多モード光ファイバーが段階屈折型で対向する2枚の鏡面の間を反射するような状態で進むためと考えられる。

図2 d、図2 eは場所による不規則な受光量の変動が現れている。これは多モード型では光が反射を繰り返して進行するため、反射角度の異なる光の間では位相が異なり光の干渉現象を起こすためと考えられる。これに比べ図2 a、図2 b、図2 cは場所による不規則な変動は現れていない。これは光がレンズを通る時の様に光屈折より曲げられるため進行する光の間に位相のズレは無く、光の干渉現象が現れなかったと考えられる。なおこの偏光面保存ファイバーは高価であるが、同一位相の光が伝達出来るということで干渉計などに用いられている。

図2 fは太鼓形で中央部はほぼ同じ高さであるが、これは白色光のため干渉現象が行いためと考えられる。

レーザ光は単一波長の光が高出力でとれるため、レンズ系の色収差などの影響を受けず、また容易に光干渉が得られるため高精度な計測には非常に便利である。しかし、干渉しやすいため逆にマイナス面が現れることもある。特に光ファイバーを用いる場合注意する必要がある。

高価な偏光面保存ファイバーを実用的な安価な多モードファイバーに替えるには、白色光源を用いる必要がある。そこで白色光を用いた場合の反射光強度分布への影響について検討した。

なお、半導体レーザとマイクロレンズを用いて直接照射し、光源部を小型化する場合はこの問題はなく今後この場合も検討していく必要がある。

## 4. 均一強度分布の平行ビーム（白色光源）を投射時の反射光強度分布

### 4-1 研削加工面

図3は研削加工面に白色ビーム平行光（試料面における照射光長さ $L=4.0\text{mm}$ ）を照射したとき反射光強度分布である。図3の5本の分布曲線は、下方より順にアルミ製反射ミラー（平面度 $=1/4\lambda$ ）、研削加工面No315N1、315N2、315N3、315N4（研削面の表面粗さ $Ra0.030、0.05$

3、0.133、0.21)における反射光強度分布である。また、右上の数値はこの分布曲線を正規分布と見た場合の標準偏差(分散値の平方根)を示している。横軸はラインセンサーの各素子の位置、縦軸は各素子の受光量である。なお分布曲線毎の受光量のレベルは異なっており、絶対値での比較は出来ない。

フィルターの中 何点長?? 1  
Y? (=0)? 5 MIR.315N1.N2.N3.N4 HXKU (MIR.A1.B1.C1.D1)

標準偏差  $\sigma$   
 $\sigma = 204.12$   
 $\sigma = 149.57$   
 $\sigma = 101.36$   
 $\sigma = 90.46$   
 $\sigma = 63.42$

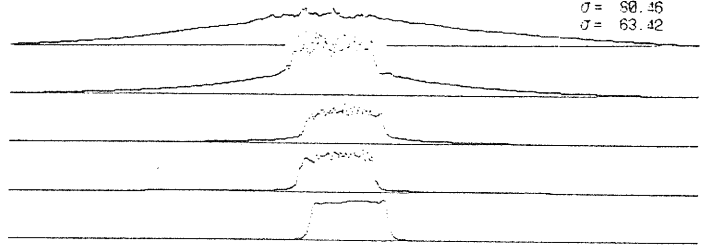


図3 各種研削面に白色平行光を照射時の反射光強度分布

図3のアルミ製反射ミラーの分布曲線は矩形をしており、今回用いた投射光が均一な強度分布を持った平行ビームであることが判る。図3のミラー以外の4つの分布曲線は、研削加工面の表面粗さが粗くなるに従って分布が広がると共に矩形形状の分布が少しずつ崩れ、台形の両外側ももりあがっている。

フィルターの中 何点長?? 10  
Y? (=0)? 2 SPOT 315N1.N2.N3.N4 (315N1X02.N2.N3.N4)

標準偏差  $\sigma$   
 $\sigma = 246.32$   
 $\sigma = 203.75$   
 $\sigma = 117.23$   
 $\sigma = 92.25$

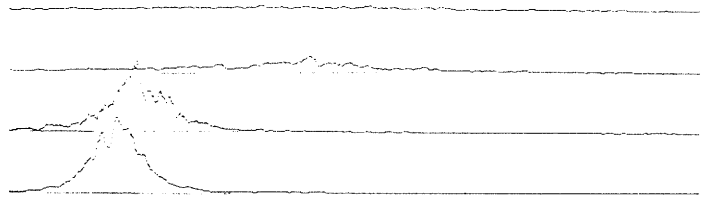


図4 各種研削面にHe-Neレーザースポット光を照射時の反射光強度分布

図4は第一報で示した研削加工面にスポット光を当てた場合のもので下方より順に研削加工面N0315N1、315N2、315N3、315N4における反射鏡強度分布である。N0315N1の分布は図2Aに示す分布とよく似ており、また表面粗さが粗くなるに従って分布が広がっており、図3と同じ傾向にあるといえる。すなわち、白色光を使った場合もレーザー光を使った場合と同じ傾向の反射光強度分布を示すといえる。

図5は研削加工面における白色ビーム平行光の反射光強度分布の分散値と表面粗さRaとの関係を表したものである。同じ表面粗さにおける繰り返しデータは1mmずつ測定場所を移動したものである。図より分散値と表面粗さRaの間には直線性があるといえる。

図6は第二報で示した研削面に3種のHe-Neレーザースポット光(投射面のスポット径d=1.0mm、0.8mm、0.6mm)を照射したとき分散値と表面粗さRaの関係に図5で示す関係を重ね合わせて示したものである。スポット光に比べ照射光長さの長い

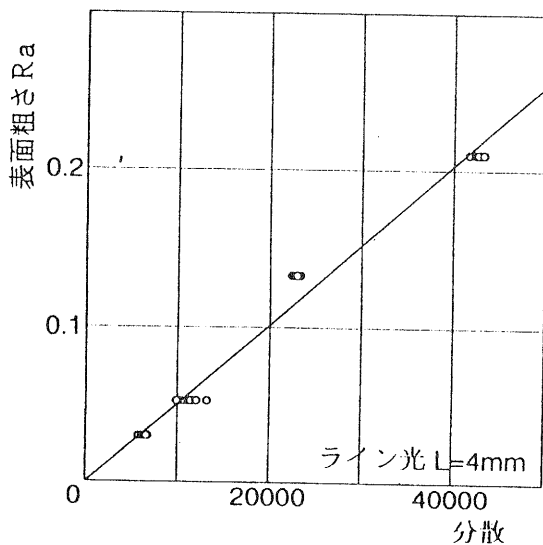


図5 反射光分布の分散値と表面粗さRaの関係 (研削標準試料面・白色平行光)

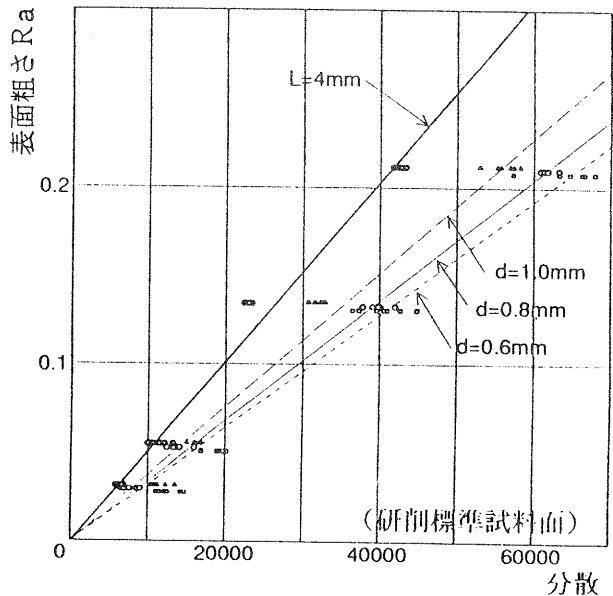


図6 反射光分布の分散値と表面粗さRaの関係 (白色光L=4mm、He-Neレーザー光d=1.0, 0.8, 0.6mm)





N7の断面曲線を縦方向と横方向に2倍に拡大した表面を持つ面(表面粗さは325N7の2倍のRa2.92)を前述の理論解析を用いてシミュレーションしたものである。上方に縦横2倍の断面曲線をもつ面の分布を示す。右側の山の分布曲線部が上方のほうが断面曲線の周期的な起伏によると思われる影響を強くあらわしているが、全体的に見てほとんど同じ分布曲線となっており、表面粗さRaに2倍の差があるとは見えない。よって今回の反射光強度分布から切削面の表面粗さを推し量ることは出来ない。

図10は前述の切削加工面の断面曲線(注:この断面曲線は表面粗さ測定機のデジタルデータを自作ソフトでフーリエ解析し再描画させたものである)である。下方から切削加工面No325N6, 325N7, 325N8である。図中の3曲線とも同じ倍率で縦方向に拡大表示されている。図10の各曲線の一波形分を比較すると高さ/波長の比(H/L)が下方から順に1.22、1.57、1.94と大きくなっている。

この高さ波長比が大きいと断面曲線の最大傾斜も大きいため、照射された光の反射光はより広い範囲に拡散すると考えられる。高さ/波長比の大きい切削加工面No325N8の方が高さ/波長比の小さい切削加工面No325N6に比べて、反射光強度分布の2山の間隔が広いのはこのためと考えられる。

すなわち図7の2山の間隔の変化は、切削面のこの相対的な形状の違いからきているものと考えられる。

なお、波型形状はバイトの摩耗などにより変化するため、この2山の間隔は切削工具の管理など有効と思われる。

## 5. まとめ

今回の研究で次のことが判った。

1. 反射光強度分布を用いて表面粗さを測定において、高価な偏光面保存ファイバーに替え実用的な安価な多モードファイバーを用いる場合は、レーザ光源では干渉するため、白色光源を用いる必要がある。
2. 光源として、白色光を用いた場合もレーザ光を用いたときと同じ傾向の反射光強度分布を示す。そして、表面粗さの測定に反射光分布の分散値が使える。
3. 研削面において照射光長さが長くなると分散値と表面粗さRaの関係直線は傾きが立ってくる。これは照射光長さが長くなると正反射による反射光の部分が増え相対的に拡散部分の割合が少なくなり、分布曲線の分散値が小さくなるからと考える。
4. 切削面においては反射光強度分布と表面粗さの間に一定の関係が成り立たない。
5. 切削面の反射光強度分布である2山分布の山と山との間隔は断面曲線の波形の高さ/波長比に関係していると考えられる。よって、波型形状と関係するバイトの摩耗など工具の管理に有効と考えられる。

今後は光源への半導体レーザの適用、切削面における反射光強度分布のバイト摩耗度合い検出への適用など、さらに検討を加え現場で使える表面粗さ判定機を試作していきたい。

## 参考文献

- (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編
- (5) 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
- (6) 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(第二報)」滋賀県工業技術センター研究報告 1992年度P23~31

# 高分子複合材料の非破壊評価に関する研究

## 超音波による繊維直角方向の縦弾性率の計測

技術第一科 井上 栄一 Eiichi Inoue

あらまし：強化用繊維の直角方向縦弾性率を測定する方法は2つに分類される。一つは単繊維から直接測定するもの、もう一つは一軸複合化した試験片を使い間接的に測定するものである。今までに行った研究により、間接法の一形式として超音波の伝播速度から複合則の適用によって繊維直角方向の弾性率の計算する方法が考えられる。

そこで本報では、炭素、ガラス、アラミド繊維について直接法と間接法による測定を行い両者の比較検討をした。その結果炭素繊維についてはほぼ文献値と同じ結果が得られたが、ガラス繊維については文献値よりも低く、またアラミド繊維についてはかなり値に開きがあった。

### 1. まえがき

複合材料設計において、その強化材の力学特性を知っておくことは重要である。特にFRPの場合、その強化用繊維が非常に小さな直径を有するため、繊維軸に直角方向の特性値は測定が困難とされ、複合化した試験片を引張試験した結果から求める間接的手法がほとんどであった。しかし最近、微小変位とその時の荷重変動を測定する技術が向上したため、川端や藤田らによって単繊維に対し直接力学試験を行って弾性率を求める方法も採られるようになってきている<sup>(2)(3)</sup>。一方、超音波速度測定による間接法は非破壊でかつ測定時間が短いという特長を有し、弾性率との間に良く知られた関係式が成立するため、FRPだけでなく強化用繊維自体の特性を把握することが可能である<sup>(4)</sup>。

本報では繊維学会で報告<sup>(1)</sup>した繊維体積含有率と音速の関係式を用いて、間接的に強化用繊維の直角方向の縦弾性率を求め、直接圧縮して求めた弾性率との比較を行う。

### 2. 実験

試料には、炭素繊維 (TORAYCA\_T300)、ガラス繊維 (ER2200)、アラミド繊維 (Kevlar49) を用い、図1に示すような手順で試験片を作成した<sup>(5)</sup>。

直角方向弾性率の単繊維測定には単繊維圧縮用に改造を加えた図2の島津製作所製粉体試料圧縮装置 PCT-200 を使用した。なお圧縮試験に使用した圧子は図3に示すダイヤモンド圧子を利用した。

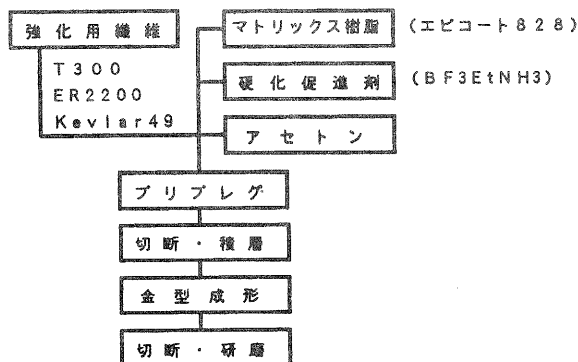


図1 試験片作成手順

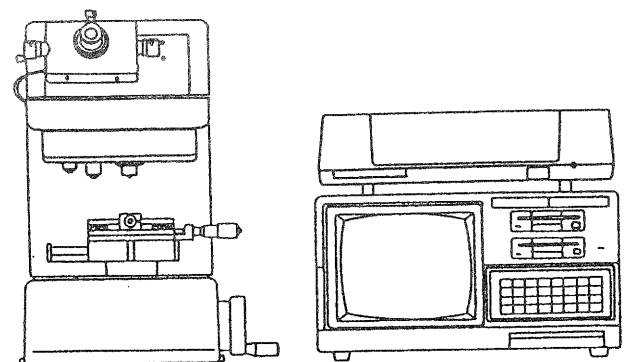


図2 圧縮試験装置<sup>(6)</sup>

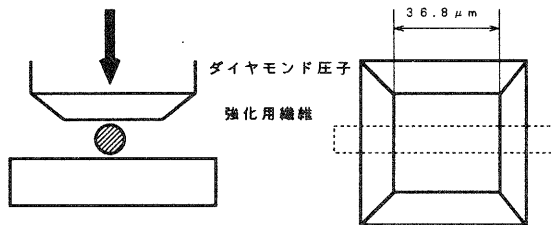


図3 圧縮試験圧子

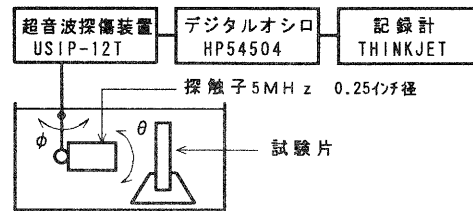


図4 超音波速度測定装置

また、超音波速度の測定は図4に示す装置を使用し、広帯域5 MHzの周波数を使用して既報<sup>(7)</sup>の方法により実験を行った。

### 2-1 直接法

直角方向弾性率 $E_t$ は、圧縮試験から求めた荷重-変位曲線上の2点を用いて、繊維の単位長さ当たりの圧縮力 $F$ 、繊維の半径 $R$ 、変化量 $U$ としてHertzの接触理論を適用して導出された式(1)<sup>(8)</sup>から計算によって求めた。

$$U = (4F / \pi) (1 / E_t) \cdot \{0.19 + \operatorname{arcsinh}(R / b)\} \quad (1)$$

$$b^2 = 4FR / \pi E_t$$

### 2-2 間接法

間接法による弾性率の算出は、弾性率 $E$ と密度 $\rho$ および音速 $C$ の関係式(2)と超音波の伝播方向を考慮して体積含有率 $V$ の複合則直列モデル式(3)を用い、試験片の繊維体積含有率 $V_f$ と音速 $C_c$ の各測定値( $V_{fi}$ ,  $C_{ci}$ )に最小自乗法を適用して実験式(4)を求めた。そして繊維体積含有率100%とした場合の $E_{f=100\%}$ を計算することで直角方向の弾性率を求めた。このときの繊維体積含有率は炭素繊維とガラス繊維については燃焼法を用い、アラミド繊維は水置換法による比重値から体積含有率を求めた。但し、式(2)~式(4)における添字 $f$ 、 $m$ 、 $c$ はそれぞれ繊維、マトリックス、複合材を意味する。

$$E = \rho C^2 \quad (2)$$

$$1 / E_c = V_f / E_f + V_m / E_m \quad (3)$$

$$V_f = \frac{P \cdot T - Q \cdot S}{P \cdot R - Q^2} \cdot \frac{1}{C_c^2} + \frac{R \cdot S - Q \cdot T}{P \cdot R - Q^2} \quad (4)$$

ただし、 $P = \sum 1$ 、 $Q = \sum (1 / C_{ci}^2)$ 、 $R = \sum (1 / C_{ci}^4)$ 、 $S = \sum V_{fi}$ 、 $T = \sum (V_{fi} / C_{ci}^2)$

## 3. 結果および考察

### 3-1 実験結果

直接法にて求めた各単繊維の直角方向弾性率を表1に示す。また各FRPの体積含有率と超音波速度の関係を図5に示し、最小自乗法を適用して計算により求めた直角方向弾性率を表2に、軸方向弾性率を表3に示す。但し軸方向弾性率の値は文献<sup>(9)</sup>によった。

表1 単繊維直角方向弾性率(直接法)

繊維種類	弾性率 (GPa)	標準偏差	変動率 (%)
炭素繊維 (T300)	16.8	1.81	10.8
ガラス繊維 (ER2200)	47.5	6.46	13.6
アラミド繊維 (Kevlar49)	1.8	0.36	20.2

表2 単繊維直角方向弾性率(間接法)

繊維種類	弾性率 (GPa)
炭素繊維 (T300)	23.6
ガラス繊維 (ER2200)	52.8
アラミド繊維 (Kevlar49)	17.3

表3 軸方向弾性率

	弾性率 (GPa)
炭素繊維 (T300)	230
ガラス繊維 (ER2200)	73
アラミド繊維 (Kevlar49)	125

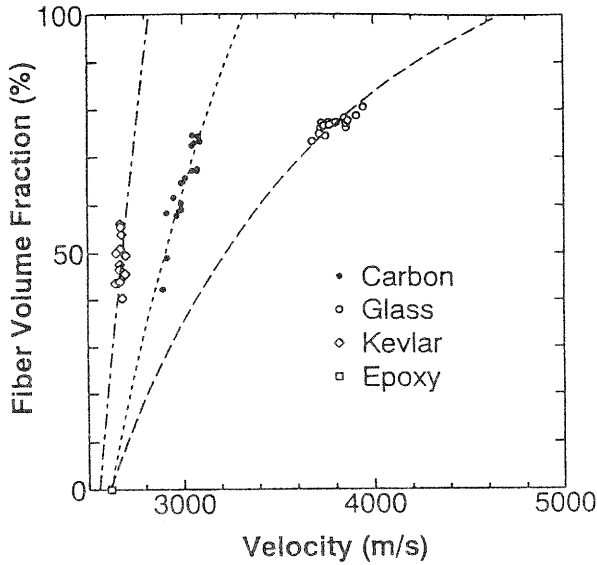


図5 超音波速度と体積含有率の関係

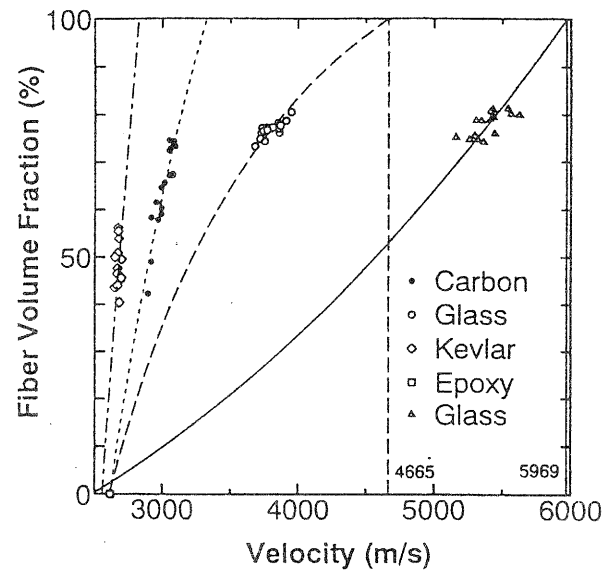


図6 超音波速度と体積含有率の関係

### 3-2 考察

直接法と間接法による弾性率値については、間接法による値の方が全体的に高い値を示している。これは超音波による手法が、応力-歪測定による通常の弾性率試験と比較して、変形速度が非常に速いこと、また本実験では、装置の構成上、縦波音速のみの測定値に基づいて計算しているためによると思われる。

表3の軸方向弾性率と比較すると、直接法によるものも間接法によるものも直角方向の弾性率が低くなっている。炭素繊維やアラミド繊維は異方性があるため、軸方向よりも直角方向の弾性率がかなり小さくなると思われるが、異方性がほとんどないと思われるガラス繊維についても約30%低い値となっており、紡糸時に異方性が生じた結果による可能性も考えられたので、軸方向についての実験を行い、複合則の並列モデルを適用した結果を図6に示す。これより、ガラス繊維の軸方向弾性率を計算すると84GPaになり、直角方向の値より高くなるため、異方性が存在している可能性が高いと考えられる。また炭素繊維の間接法による弾性率は、Kowalski<sup>(10)</sup>による Composite Cylinders Assemblage を用いた計算値の23.1GPaやSmith<sup>(11)</sup>による別手法を用いた超音波速度によるPAN系炭素繊維の弾性率値である16.9GPaと比較しても近い値となっている。最後にアラミド繊維については、直接法による値は文献(2)の値に近いが、間接法によるものはかなり大きな値となっている。これはアラミド繊維が粘弾性的性質を持つことや繊維の内部構造等の違いによるものと考えられる。

### 4. まとめ

炭素繊維、ガラス繊維およびアラミド繊維について粉体試料圧縮装置による圧縮試験を行い、繊維直角方向弾性率を単繊維から直接求めるとともに、単繊維を複合化した試験片の超音波速度と体積含有率の関係から最小自乗法を適用し間接的に弾性率を求めた。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 間接法で得られた値はいずれも直接法で得られた値より大きかった。
- (2) 間接法による炭素繊維の弾性率についてはほぼ妥当な値が得られたが、アラミド繊維については式(2)の適用性について検討が必要と思われる。
- (3) ガラス繊維については、文献値よりも低かったが、紡糸時の異方性による可能性が考えられる。
- (4) 音速変化は繊維や樹脂の中を伝わる直接波だけでなく、迂回波等によっても変化する<sup>(12)</sup>ため空孔や繊維径等についてこれらの影響の検討を行う必要がある

## 5. 謝辞

本研究を行うのに際し、直接法に関わる指導、助言を大阪工業技術研究所、中西洋一郎先生と藤田和宏先生からいただいた。また本研究全般にわたり木村良晴研究参与（京都工芸繊維大学）から指導、助言いただいたことをここに厚くお礼申し上げます。

### [参考文献]

- (1) 井上栄一、成沢雅紀、木村良晴、超音波速度による炭素繊維複合材料の繊維体積含有率の推定、繊維学会予稿集、10月、F-110 (1992)
- (2) S. Kawabata, Measurement of the Transverse Mechanical Properties of High-performance Fibres, J. Text. Inst., Vol.81, No.4 (1990)
- (3) K. Fujita et al., Proc. 37th Int. SAMPE Symposium and Exhibition, P.593 (1992)
- (4) J. E. Zimmer, James R. Cost, Determination of Elastic Constants of a Unidirectional Fiber Composite Using Ultrasonic Velocity Measurements, The J. Acoust. Soc. Am., Vol.47, No.3, p.795 (1970)
- (5) 山中仁敏、炭素繊維強化エポキシ樹脂のぬれ性に関する研究、滋賀県工業技術センター研究報告、p.67-72 (1987)
- (6) 島津製作所第二科学計測事業部、粉体試料圧縮試験装置取扱説明書
- (7) 井上栄一、超音波速度による炭素繊維複合材料の繊維体積含有率推定について、滋賀県工業技術センター研究報告、p.30-35 (1990)
- (8) S. Kawabata, Measurements of Anisotropic Mechanical Property And Thermal Conductivity of Single Fiber for Several High Performance Fibers, Proceedings of the 4th Japan-U.S. Conference on Composite Materials, P253 (1988)
- (9) 日本経済新聞社、日経メカニカル 2月19日号 (1990)
- (10) Ian M. Kowalski, Determining the Transverse Modulus of Carbon Fibers, SAMPE J., July/Aug., p.38 (1986)
- (11) Robert E. Smith, Ultrasonic Elastic Constants of Carbon Fiber and Their Composites, J. Appl. Phys., Vol.43, No.6, June (1972)
- (12) D. P. Hurst, J. A. G. Temple, Calculation of the Velocity of Creeping Waves and Their Application to Nondestructive Testing, Int. J. Pres and Piping, Vol.10, p.451 (1982)

# 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

あらまし：ゼオライトはアルミノケイ酸塩化合物で、その機能は吸着、イオン交換、触媒と多くの機能を持っている。また、ゼオライトは、その結晶水が100℃付近で放出され水蒸気になることから沸石と言われている。結晶水を失ってもそれを包蔵する細孔は構造を保っているため、いろいろな気体分子を吸着する。これを他の原料と水と混練し、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。また、多孔質セラミックスの原料としては、利用範囲の限られた天然ゼオライトと滋賀県内に産出する未利用資源を活用でき、これらの資源の有効利用が範囲が拡大できる。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、多孔質の作製条件の検討とその制御方法を検討するために多孔性の大きな要因のひとつである気孔量について、ゼオライトの配合比、混練水量、乾燥温度などについて検討し、その最適値を明らかにした。また、機能性の評価として多孔質セラミックスの対りん酸イオンの吸着性能を検討し、吸着性能に与えるpHなどの影響を明らかにした。

## 1. まえがき

近年、機能性材料の開発が盛んに行われており、その中で多孔質材料が注目されている。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、形状等に依存する。また最近では、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、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、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染物質や重金属によるものから、活性炭などを使用するトリクロロエチレンなどの化学物質や高度な処理設備が必要な窒素化合物やりん化合物の除去対策の問題に変化している。このため、種々の水質浄化用の吸着剤が多用されているが、その再生使用やコストなどに問題が多いのが現状である。

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、耐有機溶媒性、高硬度、高強度などを持つのが特徴である。しかしながら、この分野に関しての系統的な研究は少ない。そこで昨年度はゼオライト機能性材料の開発の前段階として、天然ゼオライトと県内産資源の特性評価を行ったが、本年度は、多孔質体の成形条件に関する検討と機能面としてりん酸イオンの吸着性能の評価を行った。

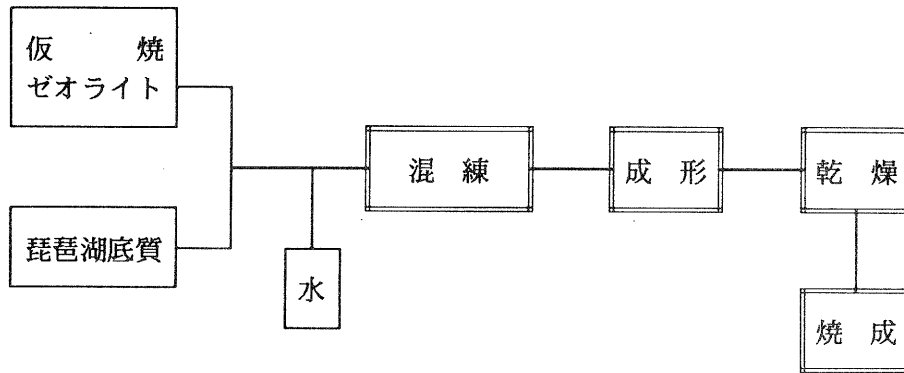
## 2. ゼオライト成形体の成形条件の検討

ゼオライトと県内産原料を用いた成形体については県内産原料として琵琶湖底質、頁岩粘土、下水道活性汚泥焼成灰、アプライト、石灰岩を検討したが、琵琶湖底質について詳細に検討したのでこれについて報告する。

### ゼオライトと琵琶湖底質との成形体の成形条件

天然ゼオライトとし粉碎した大谷石を用い、ゼオライト（正確には大谷石と称すべきであるが、便宜的に以下ゼオライトと記述する。）と琵琶湖底質の成形体の成形条件について検討した。

今回作成したゼオライト成形体の製造方法は以下に示した方法で行った。



### 2-1. ゼオライト、琵琶湖底質、水の混合比および乾燥温度

ゼオライト成形体を作成するために、600℃で仮焼したゼオライトと琵琶湖底質（南湖中央部）の混合比と混練時に添加する水の量および乾燥温度を検討した。

作成した成形体は多孔性を評価する指標としてその幾何学的体積を計測し、それと重量からみかけ比重を計算し、多孔性の大きな要因である気孔量を評価した。これらの成形体のみかけ比重と外観は、みかけ比重が0.80以上ではほとんど発泡がみられず多孔質を形成していない外観を示しており、0.80~0.60では一応多孔質の外観を示していた、また、0.60以下では十分な発泡があり、良好な多孔質の外観を示していた。乾燥温度を室温、60℃および70℃としたときの多孔体のみかけ比重の変化を図-1、2、3に示した。また、乾燥温度の違いによる水分の減量は図-4に示した。乾燥による水分の蒸発は、乾燥温度が60℃と70℃の場合にはほぼ一日で、室温では10日程度で完結した。

つぎに多孔体のみかけ比重に与える乾燥温度、添加水量、ゼオライト混合比などの要因がどのように影響するかを検討した。まず、各乾燥温度ごとに、添加水量に対してゼオライトと底質の各配合比でのみかけ比重の全データの平均値をプロットしたものを図-5に示す。これによれば添加水量が少ない70%でみかけ比重の小さいものが得られる傾向にあることがわかる。また、各水分量ごとに、乾燥温度に対してゼオライトと底質の各配合比でのみかけ比重の全データの平均値をプロットしたものを図-6に示す。これから、添加水量が100%や70%で乾燥温度が60℃付近でみかけ比重が最小になっている。これは乾燥温度が低すぎれば、乾燥スピードが遅いため、粘性が低い段階で生成した気孔組織が壊れ易くなっていると考えられ、また、乾燥温度が高すぎれば、十分に発泡しない間に粘性が高くなり、発泡不十分のまま固まったと考えられる。

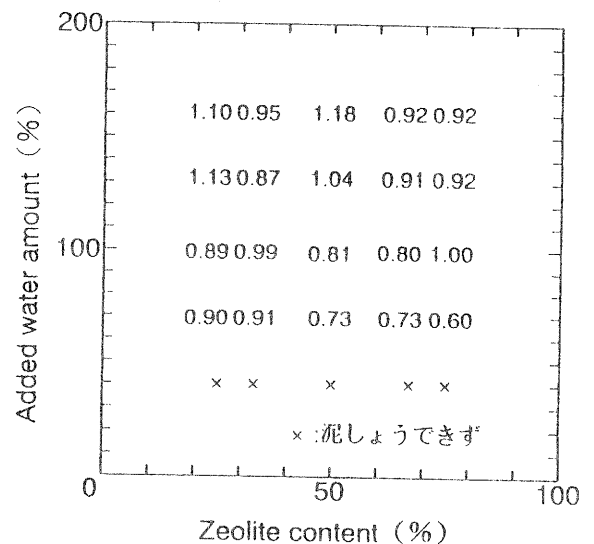


図-1. 室温乾燥で作製した多孔体のみかけ比重

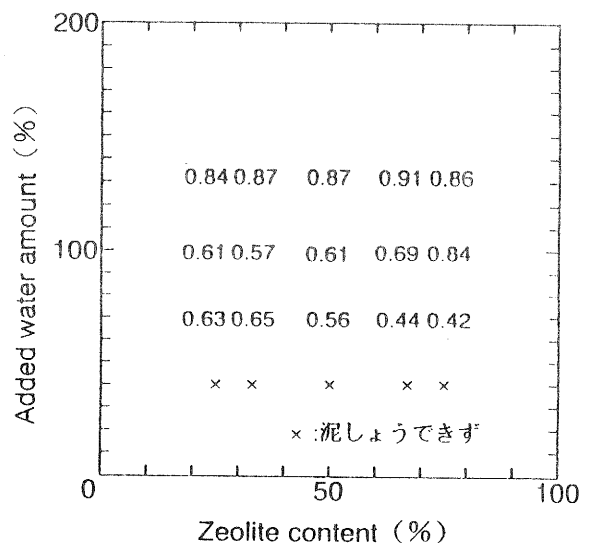


図-2. 乾燥温度60℃で作製した多孔体のみかけ比重



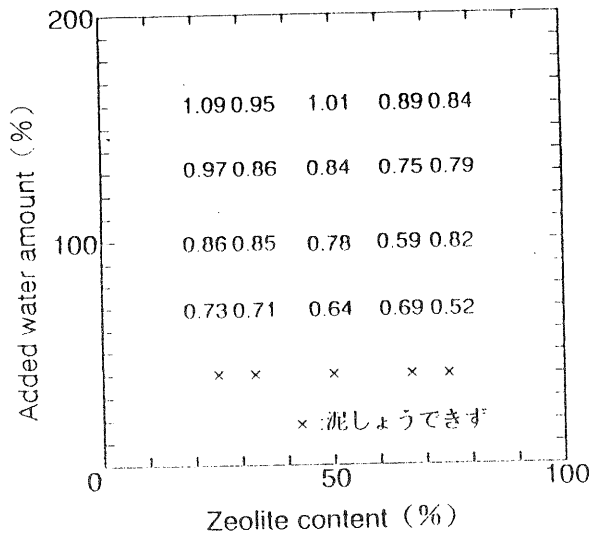


図-3. 乾燥温度70℃で作製した多孔体のみかけ比重

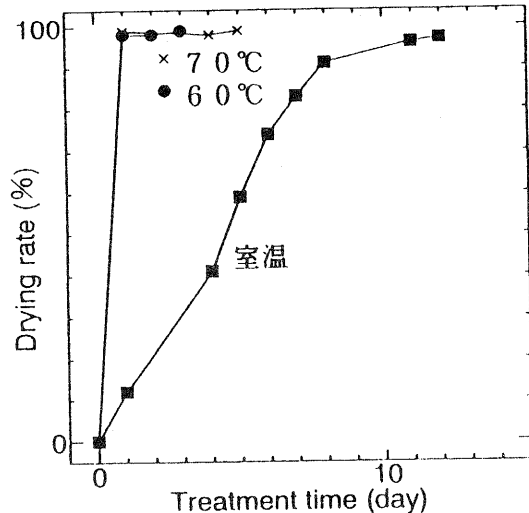


図-4. 乾燥温度の違いによる乾燥率の変化

また、各乾燥温度ごとに、ゼオライトと底質の配合比に対して各添加水量のみかけ比重の全データの平均値をプロットしたものを図-7に示す。乾燥温度が室温や70℃のものはゼオライトの含有量がおおいほどみかけ比重が小さくなっている。これに対して乾燥温度が60℃のものはゼオライトの含有量に関係なくほぼ一定であり、その値は他の乾燥温度に比較して小さい値であった。乾燥温度が60℃の場合は、他の乾燥温度に比較して、ゼオライトと底質の配合比がみかけ比重への影響が少ない結果であった。これらから、ゼオライトと琵琶湖底質の成形体の場合、添加水量は70%程度、乾燥温度は60%程度の場合にみかけ比重が小さいつまり気孔量の大きな成形体が作製でき、乾燥温度が60℃の場合、ゼオライトの含有量はあまり大きな要因ではないということがわかった。

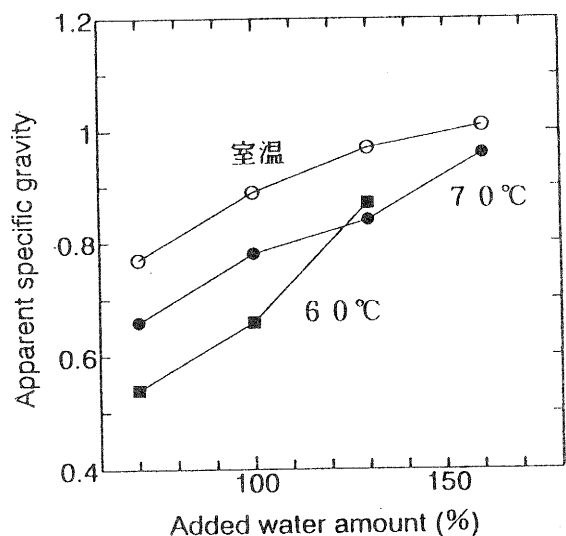


図-5. 多孔体のみかけ比重に与える添加水量の影響

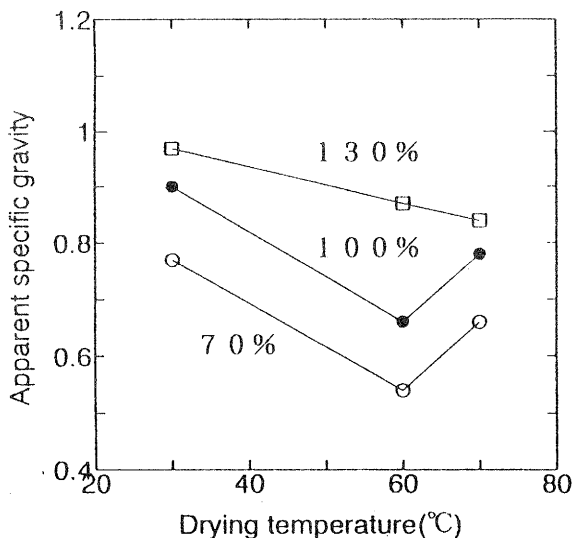


図-6. 多孔体のみかけ比重に与える乾燥温度の影響

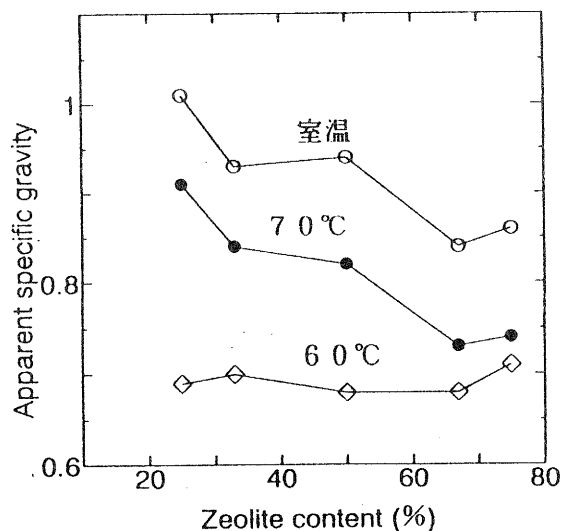


図-7. 多孔体のみかけ比重に与えるゼオライト含有量の影響

## 2-2. 乾燥成形体の焼結温度

ゼオライトと琵琶湖底質（混合比2:1、1:1、2:1の3種類、添加水量：固形分に対して70%、乾燥温度60℃）の乾燥成形体をPID昇温装置付き電気炉を用いて設定温度で2時間焼成した。その結果はいずれの試料も1100℃未満の温度では十分な焼成ができず、手で把持しただけで圧壊してしまった。1100℃以上ではいずれの試料も焼成でき、焼成物も十分な強度をもっていた。

## 3. 成形体等のりん酸イオンの吸着性能の評価

ゼオライトそのものは陽イオン交換性にもとづく吸着を示すが、りん酸イオン等の陰イオンには吸着を示さない。そこでりん酸イオンと難溶性塩を形成する陽イオンをゼオライトの前処理により導入するならば、このゼオライトはりん酸イオンに対して吸着性を示すと期待される。

### 3-1. 陽イオン交換ゼオライトの検討

そこで、りん酸イオンと難溶性塩を形成する陽イオンとしてAl、Ag、Ni、Caでゼオライトの一つであるシャブチロルフッ石をイオン交換し、所定のpH、所定のりん酸イオン濃度に調整された溶液を用いて吸着実験を行った。その結果を図-8に示す。これらの陽イオン交換ゼオライトは陽イオンの種類による吸着挙動が異なり、イオンにより特徴的な吸着を示した。

Alイオン交換ゼオライトの吸着はpH8~10付近で最大になり数meq/100gの吸着を示した。Agイオン交換ゼオライトの吸着はpH3~6にかけ一度低下し、pH6~10にかけ徐々に増加し、pH10から急激に増加しpH12付近で最大になっており、吸着量は約70meq/100gに達した。Niイオン交換ゼオライトの吸着はpH3から徐々に低下する傾向にあり、pH3の吸着量は数meq/100gであった。Caイオン交換ゼオライトの吸着はpH10程度までは3meq/100g以下であるが、pH10以上で急激に増加し、pH13で約80meq/100gになり、なおもpHの上昇とともに増加傾向にあった。

上記の結果からこれらの陽イオン交換ゼオライトの中で最大の吸着量を示したことから環境での使用を考慮してこれらの陽イオン交換ゼオライトの中から、本年度はCaイオン交換ゼオライトについて検討を行った。

### 3-2. Caイオン交換ゼオライトとその成形体や他の成形体のりん酸イオン吸着性能

種々の温度で焼成したCaイオン交換ゼオライトと底質の成形体、Caイオン交換ゼオライトと石灰岩やアプライトとの成形体やCaイオン交換ゼオライトのりん酸イオンの吸着効果を0.2mg/lのりん酸イオンを用いた吸着実験を行い評価した。

成形体等のりん酸イオンの吸着および溶出実験の結果は表-1に示した。ゼオライトと底質の成形体では焼成前の試料はりん酸イオンの吸着性能を示すが焼成後の試料は吸着試験後の試験溶液では負の吸着を示した。つまり、りん酸イオン濃度が試験前よりも増加しており、試料からの溶出による汚染と考えられた。そこで蒸留水を使って溶出試験を行い、底質からの溶出による汚染であるかを確かめた。表-1に示した結果は吸着試験の結果と対比させるために、溶出がある場合に負の表示とし、溶出量を吸着試験の原液の0.2mg/l

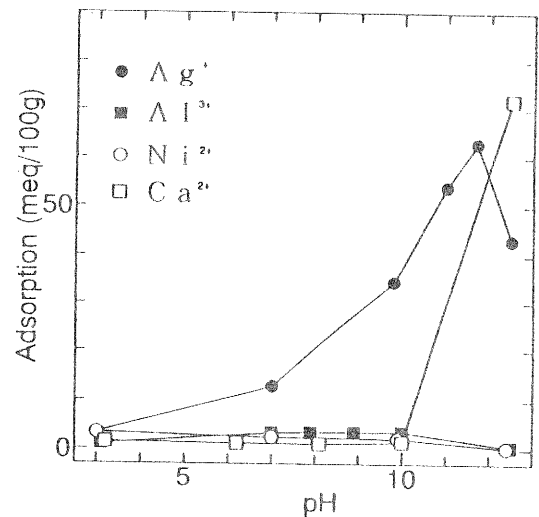


図-8. イオン交換ゼオライトのpHに対するりん酸イオンの吸着 (シャブチロルフッ石)

のりん酸イオン濃度に対する割合として表示した。この結果からりん酸イオン濃度の増加は成形体に使用している底質からの溶出と考えられた。また、焼成温度が400℃付近の溶出量が多いのは、この温度付近から有機物の燃焼が始まっており、りん酸イオン以外の有機態のりんが燃焼によりりん酸イオンに酸化されたためと考えられる。また、より高温の焼成温度では燃焼により生成したりん酸イオンが飛散したためやりん酸イオンと他の構成成分が化合したためと考えられる。

未イオン交換ゼオライトと石灰石から作製されたAZ44はりん酸イオンに吸着性能を示したが、Caイオン交換ゼオライトとアプライトから作製されたAZ46はあまり良好な吸着性能を示さなかった。

### 3-3. AZ44とCa(OH)<sub>2</sub>のりん酸イオン吸着試験時のpH変化

吸着性能のあったAZ44とその成形体を構成するゼオライトと水酸化カルシウム(石灰岩が加熱され、水中に入れられたとすれば水酸化カルシウムになると仮定した。)の吸着試験時のpH変化を測定した。測定した結果を図-9に示した。

この結果からAZ44のpH変化はゼオライトより、水酸化カルシウムに近いパターンを示した。

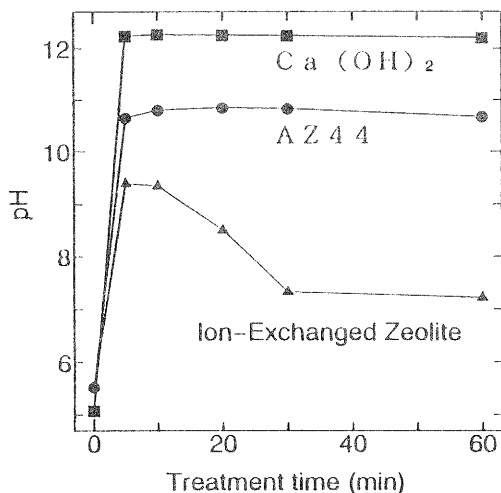


図-9. AZ44とCa(OH)<sub>2</sub>等の吸着試験時のpH変化

表-1. 各成形体等のりん酸イオンの吸着率

		吸着率 (溶出)	
焼成温度			
*1	焼成前	33.5	(-20.0)
	600℃	-133.5	(-129.0)
	1000℃	-19.0	(-45.0)
	1080℃	-16.5	(-34.0)
Caイオン交換ゼオライト		50.0	
AZ44 *2		38.0	
AZ46 *3		9.5	

単位 %

- \*1 Caイオン交換ゼオライト + 琵琶湖底質 (2:1)
- \*2 ゼオライト+石灰岩
- \*3 Caイオン交換ゼオライト+アプライト

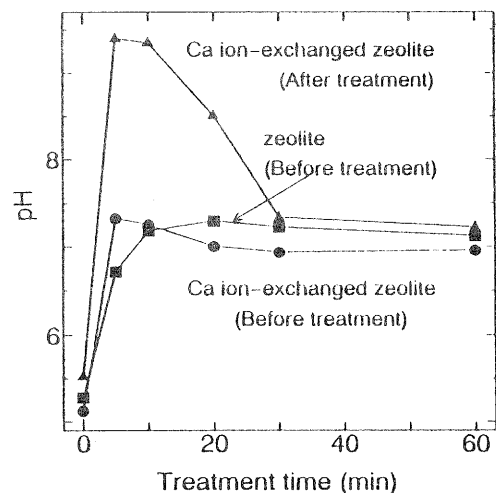


図-10. Caイオン交換ゼオライト等の吸着試験時のpH変化

### 3-4. Caイオン交換ゼオライト等のりん酸イオン吸着試験時のpH変化

Caイオン交換ゼオライトや未イオン交換ゼオライトの吸着試験時のpH変化を測定した。その結果を図-10に示した。この結果から、活性前のは即座にpH7に変化し、活性後のもののpH変化は高pH側(pH9以上)へ一度変化してから、pH7付近へ収束し活性前のもと同じパターンを示した。これらから、ゼオライトにはpHの緩衝性があるものと考えられる。

#### 4. Caイオン交換ゼオライトの熱処理温度変化によるりん酸イオン吸着率の変化

Caイオン交換ゼオライトの耐熱性を検討した。Caイオン交換ゼオライトを白金るつぼに入れ、あらかじめ所定の温度に設定した電気炉中で一時間加熱した。加熱後はデシケターで室温まで冷却した。この加熱試料を用いて吸着試験を行った。その結果を図-11に示した。この結果からCaイオン交換ゼオライトは400°Cから徐々に吸着性能が低下し、800°Cで吸着性能を示さなくなることが分かった。この結果から1000°Cで熱処理されているAZ44は、ゼオライトにより吸着性能を示すのではなく、水酸化カルシウムによる吸着性能であると考えられた。

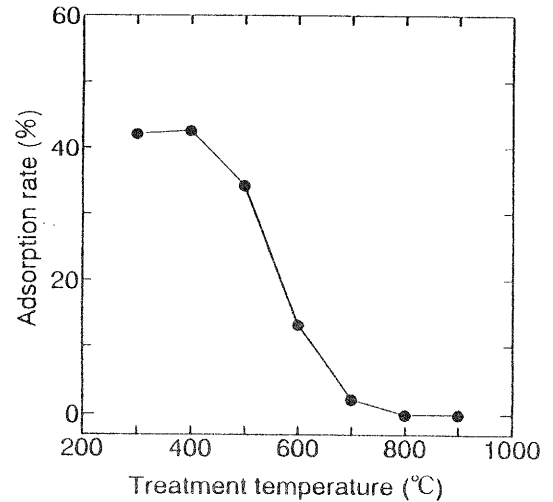


図-11. Caイオン交換ゼオライトの熱処理による吸着率の変化

#### 5. Caイオン交換ゼオライトのりん酸イオン吸着率の経時変化

Caイオン交換ゼオライトの吸着率を所定の試験時間で測定した。その結果を図-12に示した。吸着率は1時間までに立ち上がりをもみせ、その後徐々に増加する傾向を示した。

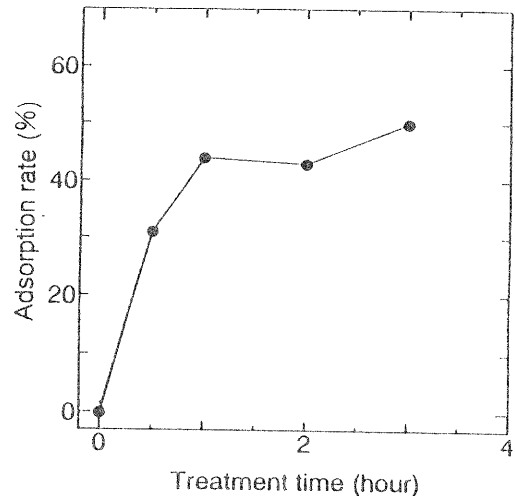


図-12. Caイオン交換ゼオライトの吸着率の経時変化

#### 6. Caイオン交換ゼオライト等の吸着試験時のpHと吸着率の変化

所定のpHに調整したりん酸イオン溶液を用いて各pHでのCaイオン交換ゼオライト、未イオン交換ゼオライト、Caイオン交換ゼオライトに10%CaCl<sub>2</sub>溶液1mlを添加したものおよび10%CaCl<sub>2</sub>溶液1mlだけを添加したものの吸着率を測定した。その結果を図-13に示した。この結果から、CaCl<sub>2</sub>溶液のみの添加ではpH10以下では効果がないのに対してCaイオン交換ゼオライトの吸着率を増加させている。また未イオン交換ゼオライトの吸着率もpH8以下で増加している。また、pH10以上ではこれらの効果は顕著に現れている。これらは、ゼオライトがCaイオンとりん酸イオンの反応を促進する触媒として働き、吸着率を増加させたと考えられる。

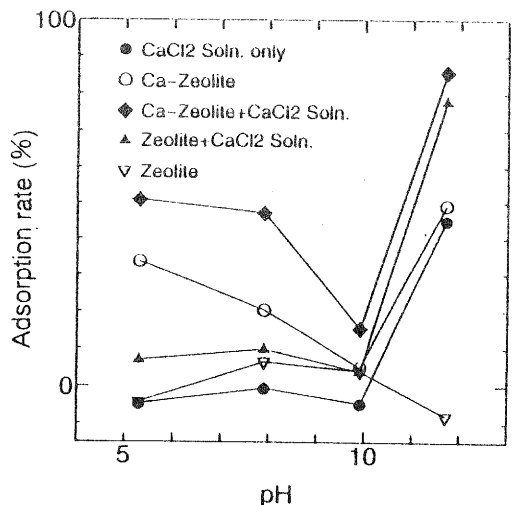


図-13. Caイオン交換ゼオライト等のpHによる吸着率の変化

#### 7. ゼオライトの環境での使用の問題点

今回研究しているこのゼオライト成形体の用途としては環境への排水の、特に従来の処理設備が適用できない小規模排水の浄化用として考えており、合併浄化槽の排水のりん酸イオンの除去を対象としている。

ゼオライトの主成分であるシャブチロルフツ石の組成式はNa<sub>6</sub>Al<sub>6</sub>Si<sub>30</sub>O<sub>72</sub>・24H<sub>2</sub>Oであり、陽イ

オンのNaのすべてをCaで置換すると $\text{Ca}_3\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ となる。そして、このなかのCaがすべて $\text{PO}_4$ と反応して $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ になると仮定し、ゼオライト中のシャブチロルフッ石の含有量が約53%であるから、このCaイオン交換ゼオライト100gでは6.03gのりん酸イオンが吸着できる。これは合併浄化槽の排水中のりん酸態りんの濃度が約3mg/lであることから約0.65tの排水中のりん酸イオンを吸着除去できるが、この量は合併浄化槽1日分の排水量1tにもおよばず、このCaイオン交換ゼオライトの成形体単独では合併浄化槽のりん酸イオンの吸着は困難で、Caイオンの添加などにより連続してりん酸イオンが除去できる方法を考慮する必要がある。

また、イオン交換ゼオライトはその吸着性能がpHに依存し、またそれ自身もpHの緩衝性を持っている。また、環境に排出される処理水のpHには制限がある。このために、成形体の副資材にはイオン交換ゼオライトのpH依存性や緩衝性を変化させるものが必要であると考えられる。

## 8. おわりに

本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、昨年度より3ヶ年計画で研究連携事業として開始した。

本年度は多孔質体の成形条件に関する検討と機能面としてりん酸イオンの吸着性能の評価を行った。来年度はこれまで得られた結果をもとに、環境への応用技術の研究を行う。

# 機能性微粒子の利用技術に関する研究（第一報）

～ 磁性微粒子の生成条件に関する基礎研究 ～

技術第二科 阿部 弘幸 Hiroyuki Abe

あらまし：感熱式ノーカーボン複写紙の開発に始まったマイクロカプセル化技術は、今日非常に広い分野で利用されている。平成5年の同技術に関する特許出願数は、月平均で約40件に上っている。本報では、カプセル化および機能性微粒子の研究対象として、フェライト系磁性微粒子を選んだ。はじめに、湿式共沈法によりスピネル型フェライト磁性粉の合成を行い、大きさが100nm以下の超微粒子を得た。次に、この磁性微粒子を界面活性剤処理することにより安定性の優れた水系磁性流体が得られた。

## 1. はじめに

マイクロカプセル化技術は、1950年代米国のNCR社が感圧式ノンカーボン複写紙を開発したことに始まり、今日では、印刷・塗料・食品・医薬・化粧品・農業・建築土木・繊維・電子等様々な分野で利用されるようになってきている。<sup>(1)~(8),(9)</sup>

マイクロカプセル化利用技術の1つに、フェライト等の磁性微粒子を利用したものがある。磁性カプセルを利用した磁性トナー<sup>(25)</sup>やドラッグデリバリー（薬物搬送）システム<sup>(26)</sup>や、完全なカプセル化ではないものの磁性インク（塗料）<sup>(13)</sup>や磁性流体<sup>(9),(21)</sup>等の開発研究も行われるようになってきた。

本報では、磁性微粒子を利用したマイクロカプセル化技術の開発を念頭に、磁性微粒子の生成条件に関する基礎実験を行ったので報告する。

## 2. 実験

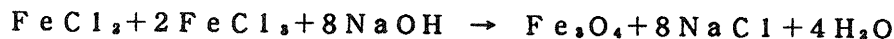
### 2-1. 磁性微粒子の調整

一般に、磁性粉を得る方法として、乾式法（混合→焼結→粉碎）と湿式法（金属塩混合溶液の沈殿→熱処理）が上げられるが、本報では、湿式共沈法<sup>(11),(14)</sup>によりスピネル型フェライト磁性粉としてマグネタイト系列のものを合成した。

なお、湿式法には以下の特徴がある。

- ①金属塩水溶液を利用するため混合・攪拌および組成比の調整が容易である。
- ②攪拌や沈殿剤（NaOH）添加を制御することで超微粒子が得られる。
- ③副生成塩が完全除去しにくい。

(1) 窒素置換しながら三ツ口フラスコで塩化第一鉄（II）水溶液と塩化第二鉄（III）水溶液を約1：2モル比相当に混合し、約3Nの水酸化ナトリウム溶液を攪拌しながら5ml/分程度で添加した。攪拌液が全体的に黒変しpHが約11になったら添加を止めた。



(2) 続いて混合液を、マントルヒーターで約85℃×1時間加熱攪拌し、その後攪拌放冷した。この時点で、懸濁粒子は既に磁性を示した。

(3) フラスコの懸濁粒子を強力磁石で強制沈殿させ、上澄み液を10回程度デカンテーションした。その後、3000rpm×15分間遠心分離し沈殿粒子（以下Fe系物と言う）を得た。

(4) 上記の塩化第一鉄（II）の代わりに、塩化マンガン（II）及び塩化バリウム（II）を使った合成

実験もそれぞれ行った（以下、各々得られた沈澱粒子をMn系物、Ba系物と呼ぶ）。この時点で、Mn系物は磁性を示したが、Ba系物は示さなかった。

## 2-2. 各合成物の熱水処理および過酸化水素処理

得られた合成物が温度や酸化によって、その形状や磁性の有無が変化しないか確認するため、以下の処理を行った。

### (1) 熱水処理

分解フラスコに各懸濁水溶液を約50ml入れ、湯浴で約95℃×3時間加熱し、その後遠心分離した。

### (2) 過酸化水素処理

100mlの試験管に各懸濁水溶液を約40ml入れ、湯浴で約50℃に保ちながら5%過酸化水素水を時間をかけて少量ずつ計20ml加えて酸化処理した。その後遠心分離した。

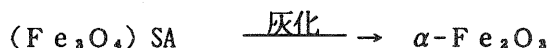
上記の試料のX線回折を測定して、生成物の確認を行った。

## 2-3. 磁性流体の調整

磁性流体は超微粒子磁性体を溶媒中に安定分散させたもので、通常の重力や磁場などによって凝集・沈澱・分離が起こらず、見かけ上、磁性を示す液体と見なすことが出来る。その磁気特性は超常磁性的な挙動を示し、磁化曲線はヒステリシスを示さない<sup>9)</sup>。現在、経済性等の理由で、本報で合成したようなマグネタイト ( $Fe_3O_4$ ) 系物質が回転軸シール材 (液体シール) として主に開発研究されている。

(1) 3-1で合成したFe系物懸濁水溶液に3gのオレイン酸ナトリウムを攪拌しながら加え、溶解させた後、約85℃×1時間加熱処理した。放冷してから、1N塩酸を攪拌しながら約pH5になるまで徐々に加え、濾過して温水で10回程度洗浄した。この試料 (以下Fe系物SAと言う) のX線回折、赤外分光分析を行った。

また、元の $Fe_3O_4$ に対する界面活性剤の吸着量を求めるために、105℃×3時間乾燥し精秤した試料を、500℃×3時間灰化処理 (酸化処理) し、その重量変化を測定した。



(2) 3gのオレイン酸ナトリウムを溶かした水溶液100mlに、上記、濾過粉末5gを加え、超音波洗浄器で約20分間分散処理した。

## 2-4. 使用機器

(1) 赤外分光分析 島津FT-IR4200

(2) X線回折装置 理学RAD-RB

## 3. 結果と考察

### 3-1. 生成物のX線回折

図1に、標準品 (いずれも片山化学工業社製) の四三酸化鉄 ( $Fe_3O_4$ )、酸化第一鉄 ( $FeO$ )、酸化第二鉄 ( $\alpha-Fe_2O_3$ : マグネタイト) のX線回折測定結果を示した。最大回折強度 ( $I_1$ ) ピーク位置はそれぞれ $2\theta$ で、 $35.4^\circ$  (面間隔 $d=2.54$ )、 $42.1^\circ$  ( $d=2.15$ )、 $33.2^\circ$  ( $d=2.70$ ) とほぼ文献値通りであった。

図2にFe系物、Mn系物、Ba系物の測定結果を示した。Fe系物とMn系物の回折パターンは、 $Fe_3O_4$  とほぼ同じで、スピネル系の結晶構造をとっているものと思われる。なお、Mn系物はFe系物に比べ $2\theta$ で約 $0.5^\circ$  低角度側にシフトしており、これは $Mn^{2+}$ と $Fe^{2+}$ のイオン半径の違いによるものと思われる。さらに、標準品の $Fe_3O_4$ 等と比べて各回折ピークにシャープさが無いのは、主に結晶粉末の微粒子化 ( $0.1\sim 0.2\mu m$ 以下) による回折X線の拡散現象によるものと思われるが<sup>(23),(24)</sup>、その他、副生成物、陽イオン格子欠陥と言ったような結晶構造の不完全さによる影響も考えられる。

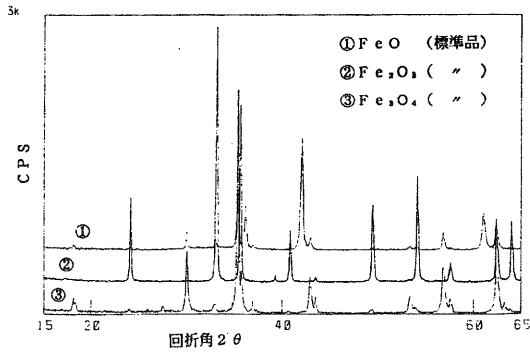


図1. 鉄酸化物（標準品）のX線回折

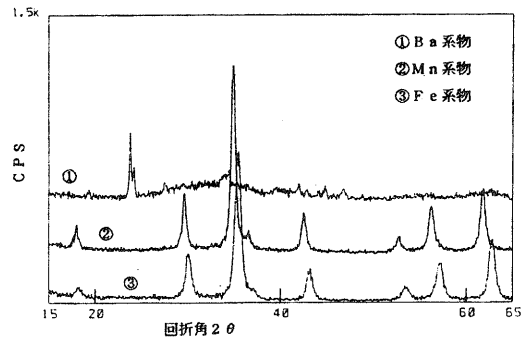


図2. 合成物のX線回折

一般に軟質磁性材料のスピネル型フェライトは立方晶系で、その化学式は $Me^{2+}O \cdot Fe_2O_3$ または $MeFe_2O_4$ で表される。1単位胞には24個の金属イオンと32個の酸素イオンが含まれ、金属イオンの入る位置は、4個の酸素が構成する四面体（Aサイト）と6個の酸素が構成する八面体（Bサイト）とがあり、Bサイトの数はAサイトの2倍である。2価の金属イオンがAサイトに入るものを正スピネル、Bサイトに入るものを逆スピネルと言う。<sup>9) 10) 11)</sup>

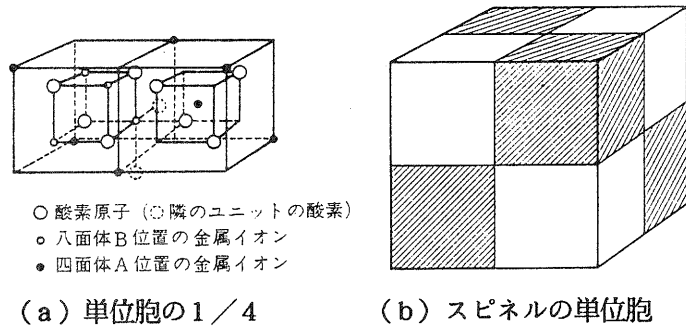
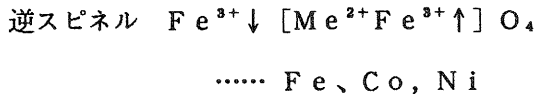
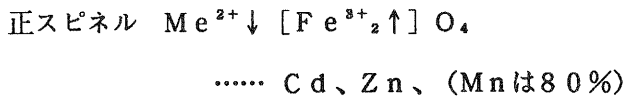
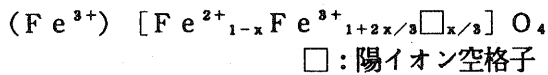


図3. スピネルの結晶構造<sup>9)</sup>



また1 μm以下の微粒子では、化学量論組成のマグネタイト ( $Fe_3O_4$ ) は得られず、



で表される複雑な構造をとるとされている。<sup>9)</sup>

一方、Ba系物は前2化合物とは、回折パターンが全く異なっており、24°付近にピークがあ

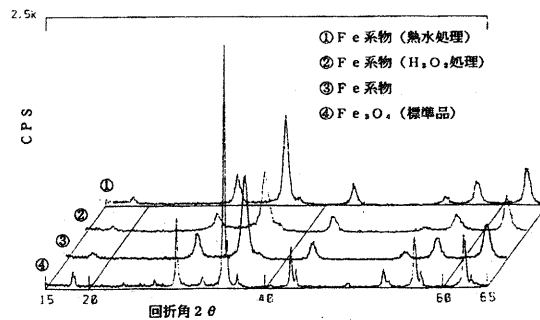


図4. Fe系物各処理後のX線回折



るだけでスピネル系の結晶構造はとっていないものと思われ、従って磁性も示さなかった。フェライトの磁性発現の原因は、鉄族元素単体のフェロ磁性とは異なり、酸素元素を介したAサイトとBサイトの磁気モーメントの差であり、そのため3d電子軌道に特徴のある鉄族遷移元素の酸化物系スピネル構造をとることが基本となる。

### 3-2. 熱水処理および過酸化水素処理物のX線回折

どの試料も熱水処理および過酸化水素処理の前後で回折パターンの変化は見られなかった(図4)。

また、磁性の有無についても変化は無かった。

### 3-3. 各合成物の走査型電子顕微鏡(SEM)による形状観察

標準品の四三酸化鉄( $Fe_3O_4$ )、酸化第一鉄( $FeO$ )および、Fe系物、Mn系物、Ba系物のSEM写真を示す(写真1~5)。 $Fe_3O_4$ と $FeO$ は、その大きさが1~数十 $\mu m$ まで様々であったが、概ね $\mu m$ オーダー以上の粉碎状粒塊であった。従って、X線回折測定の際にも、標準試料としてX線散乱の影響はほとんど無いものと思われる。

Fe系物とMn系物については、SEMではその1次粒子は明確に確認できないが、2次粒子レベルでは100nm前後ではないかと見られ、Fe系物の方がやや小さかった。Ba系物についてはさらに小さく確認出来なかった。

また、写真6に界面活性剤処理したFe系物のを示した。

### 3-4. 磁性流体の性質

調査した磁性流体(水系)は、数週間放置しても分離は起こらず、強力磁石により容器壁面を水塊自体が這い上がるように反応した。図5に示すようにFe系物SAのX線回折パターンは処理前のそれと同じであった。しかし、赤外分光分析では、Fe系物SAには、未処理物に無い $1440\text{ cm}^{-1}$ 付近にピークが見られ(図6)、オレイン酸ナトリウムが確かに吸着しているものと思われた。

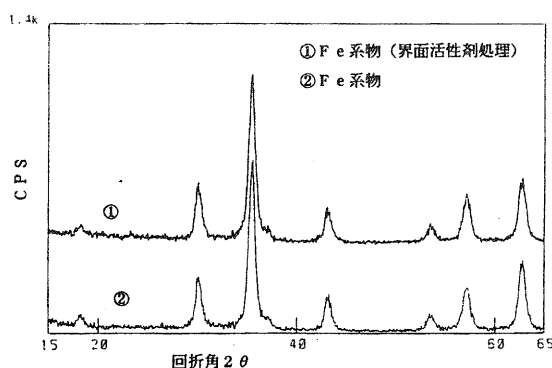


図5. 界面活性剤処理したFe系物のX線回折

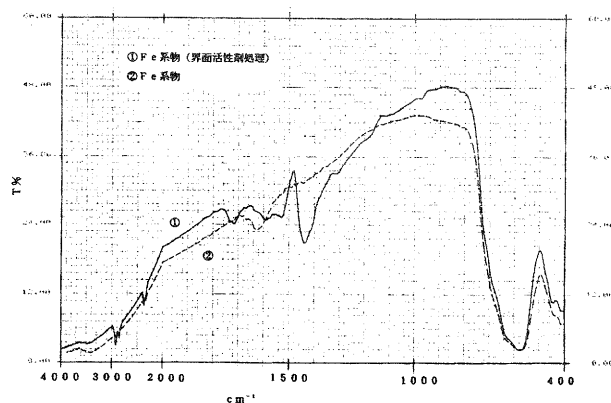


図6. 界面活性剤処理したFe系物の赤外スペクトル

一般に、酸化鉄は水に対する濡れ性が高く、その表面を界面活性剤処理した場合、界面活性剤の親水基が内側に、親油基は外側に配向吸着すると言われる。<sup>9)</sup>また、吸着層は単層とは限らず、界面活性剤を過剰に加えることにより多層吸着し、その濡れ性や分散性が大きく変化するものと思われる。<sup>8)</sup>

今回の場合、酸化鉄側に親水基が配向吸着し、これが、予め界面活性剤を添加した水系に安定分散しているものと思われる。

界面活性剤の吸着量は、 $Fe_3O_4$ に対し約20%であった。なお、この値は、別途未処理のFe系物を灰化処理し、絶乾で除去されにくい水分や狭雑物等による減量の補正(約4%)をしたものである。また、灰化処理後のFe系物SAは、X線回折測定の結果、確かに $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (赤色)に変化していた。

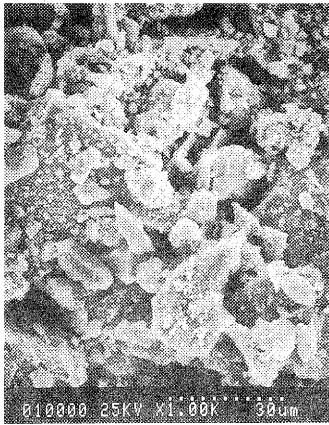


写真1.  $Fe_3O_4$  (標準品)

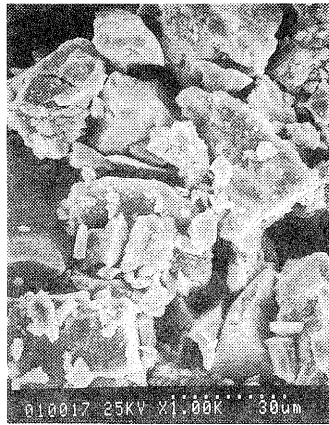


写真2.  $FeO$  (標準品)

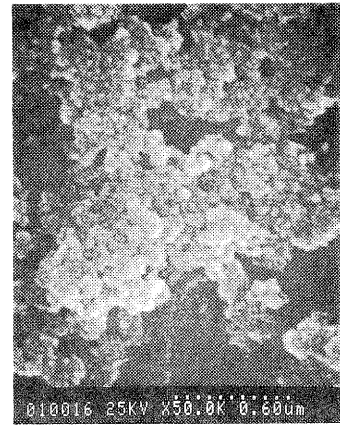


写真3. Fe系物



写真4. Mn系物



写真5. Ba系物



写真6. 界面活性剤処理

#### 写真1～6. 電子顕微鏡写真

#### 4. むすび

マイクロカプセルを高機能化させる手法の一つとして、壁材やコアに特殊な機能を付加させてやる方法が考えられる。従来のマイクロカプセルは、壁材の機械的または熱的な破壊による内容物の反応・放出がその機構の主流であった。しかし、利用分野が広がるにつれてpH、光（電磁波）、電場、磁場、特定の化学物質など外界の環境に対応して機能する、いわばセンサー機能を搭載した刺激応答性マイクロカプセル<sup>(18)</sup>が研究開発されるようになってきた。本研究では、マイクロカプセルの機能化を図るため、磁場環境に着目して、磁性粉との複合化を目的とした。

(1) スピネル型フェライト磁性微粒子を共沈法により合成し、その生成物の確認を行った。

(2) 磁性微粒子の応用例として水系磁性流体を調整した。

今後は、磁性微粒子を用いた表面改質およびカプセル化への応用技術について検討していく。

[参考文献]

- (1) 近藤保 : "マイクロカプセル その機能と応用"、日本規格協会('91)
- (2) 近藤 他: "新版マイクロカプセル その製法・性質・応用"、三共出版('89)
- (3) 近藤 監: "最新マイクロカプセル化技術"、総合技術センター(平2)
- (4) 小石眞純: "微粒子設計"、工業調査会('87)
- (5) 室井 監: "超微粒子ポリマーの最先端技術"、シーエムシー('91)
- (6) 共編 : "微粒子設計工学"、粉体と工業社(昭63)
- (7) " : "続・微粒子設計工学"、粉体と工業社(昭63)
- (8) 吉田 他: "新版界面活性剤ハンドブック"、工学図書(昭62)
- (9) 平賀 他: "フェライト"、丸善(昭63)
- (10) 加藤哲男: "技術者のための磁気・磁性材料"、日刊工業社('91)
- (11) 山口 他: "マグネットセラミックス"、技報堂出版('85)
- (12) 植松 他: "磁気材料の革命"、工業調査会('85)
- (13) 鳥羽山満: "機能性塗料"、工業調査会('90)
- (14) JIS-C-6241" NRZI方式による情報交換用磁気テープの情報記録様式" 付属書
- (15) 牧野公子: 粉体と工業、粉体と工業社('92. 4月号)
- (16) 荒川 他: "最新粉体の材料設計"、テクノシステム('88)
- (17) " Powder Diffraction File INORGANIC"、JCPDS
- (18) 浜野 編: "ファインセラミックスハンドブック"、朝倉書店('87)
- (19) 同 編集: "ファインセラミックス事典"、技報堂('87)
- (20) 佐々木達也: 工業材料、日刊工業新聞社('93. 1月号)
- (21) 釣谷泰一: 工業材料、日刊工業新聞社('93. 2月号)
- (22) 日本粉体工業技術協会編: "超微粒子応用技術"、日刊工業新聞社(昭61)
- (23) 加藤誠軌: "X線回折分析"、内田老鶴圃('90)
- (24) 大野 他: "X線分析法"、共立出版('87)
- (25) 橋本 他: 高分子、40巻、('91. 4月号)
- (26) T.Kato et al., *Artific. Organs*, 8, 111('84)

# 強化繊維と耐熱性エンブラの複合化の研究

## 含浸方法やサイジング剤が熱可塑性CFRPへ及ぼす影響について

技術第二科 那須 喜一 Nasu Yoshikazu

あらまし： 熱可塑性樹脂CFRPを工業化する際、炭素繊維と樹脂との接着性が問題となる。これに影響を与えるものとして含浸方法やサイジング剤等があげられる。その影響についてPA6、PPS、PEIをマトリックス樹脂としたCFRPを作製し、0°方向、90°方向曲げ試験とシャルピー衝撃試験を用いて評価した。含真方法としては、熔融含浸と樹脂を溶媒に溶かした溶液含浸の二つについて検討したが、接着性に大きな差はなかった。これに対し炭素繊維のサイジング剤が高温で成形される際に分解し、接着性の低下をもたらすことを確認した。

### 1. まえがき

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は優れた物性を持つものの、これまでは高価なために日本ではスポーツ用品に、また海外では航空機などに用いられているに止まっていた。しかし、CFRPの研究が進み、その特性が明らかになるとともに炭素繊維（CF）自体の価格が下がり、幅広い用途に用いられるようになってきた。その用途拡大に伴う高性能化のために、我々はエンジニアリングプラスチック（エンブラ）の中でもとくに高い耐熱性を有する熱可塑性ポリイミド系樹脂をマトリックスとするCFRPを作製し、その特性を明らかにしてきた。ここでは成形条件と得られるCFRPの物性の関係を更に明らかにするために、次の二点について検討をした。一つは樹脂の含浸方法（溶液含浸法と熔融含浸法）が樹脂とCFとの接着におよぼす影響についてであり、もう一つはCFに使用されているサイジング剤の有無が、樹脂とCFとの接着性におよぼす影響についてである。これらの影響について物性面から検討を行った。

### 2. 実験

#### 2-1. 実験材料

ナイロン6（PA6）、ポリフェニルスルフィド（PPS）、ポリエーテルイミド（PEI）の三種類のエンブラをマトリックス樹脂として用いた。表1に各樹脂の熱特性を示す。PA6とPPSは結晶性の樹脂でありPEIは非晶性の樹脂である。強化用のCFにはPAN系CF（旭化成Hi-Carbon）を用いた。また成形用のプリプレグには旭化成のWIP（Web Interlacted Prepreg）を用いた。このWIPはマトリックス樹脂を不織布状にしマット化したものを、一方向に整列した炭素繊維の表裏に重ね合わせ一体化したものである（図1）。熔融含浸は、このWIPをそのままかあるいはサイジング剤を除去した後、オートクレーブで成形した。これに対し溶液含浸は、WIPにマトリックス樹脂を溶かす溶剤を吹き付けて溶解させ、これを乾燥したものをオートクレーブで成形した。なお、サイジング剤の除去は次のようにして行なった。WIPをTHFに3時間浸漬した後、ポリエチレンの袋にいれ減圧吸引しTHFを除去する。この操作を3回繰り返しサイジング剤を取り除いた。

表1. マトリクス樹脂の熱特性

	PA6	PPS	PEI
T <sub>g</sub> (°C)	48	88	216
融解温度 (°C)	225	285	-
熱変形温度 (°C)	71	135	200
収縮率 (%)	1.0~1.3	-	0.5~0.7

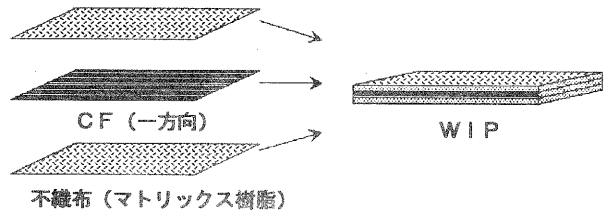


図1. WIPの構成

## 2-2. 成形方法

成形には図2に示すオートクレーブ成形法を用いた。成形条件は樹脂により異なり表2に示すとおりである。使用した装置は芦田製作所製AC-500、成形板寸法250×350mmであり、使用した成形用資材は以下に示すとおりである<sup>4)</sup>。

シーラント・・・A800 G3 (米Airtech社：使用温度107~426°C)

離型剤・・・RELEASE-ALL100 (米Airtech社：最高使用温度477°C)

バッグフィルム・・・カプトン200H (東レ・デュポン社：厚み50μm、最高使用温度400°C)

離型フィルム・・・カプトン100H (東レ・デュポン社：厚み25μm、最高使用温度400°C)

## 2-3. 試験方法および試験装置

0° 曲げ試験・・・インストロン社製 Model 4206、試験片寸法10×2×100mm  
スパン間距離80mm

90° 曲げ試験・・・インストロン社製 Model 4206、試験片寸法15×2×52mm  
スパン間距離32mm

シャルピー衝撃試験・・・東洋精機製 エッジワイズ切欠き寸法0.35×2mm

電子顕微鏡 (SEM)・・・日立製作所製 S-650

熱分析 (TG-DTA)・・・リガク製 TAS100、試料5mg、昇温速度10°C/min、N<sub>2</sub>気流中

## 3. 3. 結果および考察

### 3-1. オートクレーブ成形

熱可塑性樹脂CFRPのオートクレーブ成形については前報で報告した<sup>4)</sup>が、これに改善を加えてより密閉性や成形体の繊維の乱れ等の起こりにくいバッグ構成とした(図2)。改良点の一つは、従来シーラントが低温では十分に機能しなかったため押え板とシーラントをクリップで押さえることにより低温でのシーリング性を向上させた。もう一点はシーラントを、CFと平行にプリプレグに添えることで樹脂の流れを制御し、繊維の乱れを小さくした。以上のような改良を加えたバッグ構成を用い、オートクレーブ成形を行なった。

表2. 各CFRP成形条件

	PA6	PPS	PEI
成形温度 (°C)	250	340	380
保持時間 (min)	40	40	60
付加圧力9kgf/cm <sup>2</sup> 、昇温速度10°C/min、 降温速度5°C/min、14層積層、Vf=50%			

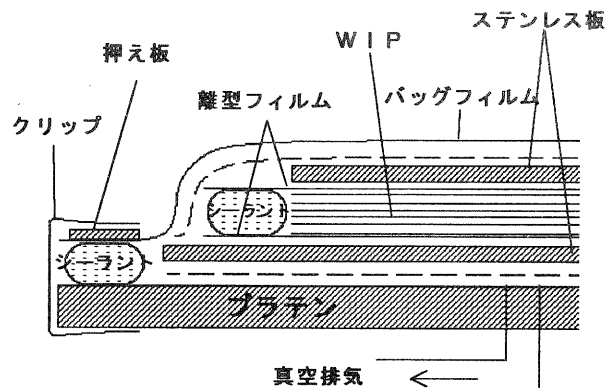


図2. オートクレーブ成形のバッグ構成

含浸方法やサイジング剤の有無にかかわらず、PA6、PEIでは良好な成形体を得られたことから、成形条件については特に問題はないと思われる。一方、PPSの場合は溶媒への溶解が難しいため熔融含浸のみの結果であるが、成形について問題が残る結果となった。それは、成形体の表面にシワ状の模様が存在することである。写真1はシワ状の部分であり、繊維に樹脂があまり付着していない。この原因としては、樹脂とCFとの接着性が悪いため樹脂の含浸が十分ではなかったことが考えられる。そのほかには、PPSは結晶性の樹脂であるため結晶化時の収縮により隙間が出来たとも考えられる。いずれにしても、その詳細については、今回用いた成形条件が最適ではない可能性もあり、現在検討中である。

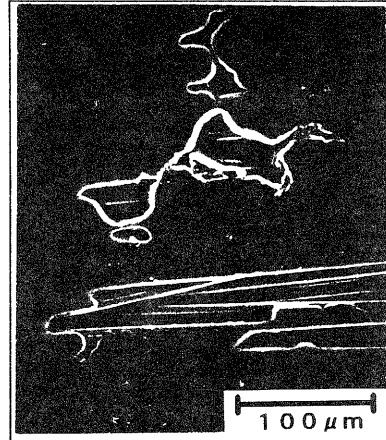


写真1. 成形時に発生するポイド

### 3-2. 樹脂の種類と0° 曲げ強度の関係

PA6、PPS、PEIの各CFRPについて曲げ強度の測定を行った結果を図3に示す。比較のためにエポキシ樹脂の値も示す（メーカー測定値）。この値ではPPSが低くなっているが、他の方法（真空プレス等）で成形したものについてはPPSが1500MPaという値も示しており、成形物の外観にも問題があったことから、成形方法あるいは成形条件の改良が必要と考えられた。次に、曲げ試験での破壊様式についてみると、いずれも圧縮側からの座屈破壊に至っている。この中でもエポキシは比較的大きな値を示しており、このことは、樹脂の弾性率の高い方が座屈破壊になりやすく、強度が高くなった可能性が考えられる。また曲げ強度についてはVfの影響が大きく、例えばVfの大きいものでは引っ張り側の破壊が見られるようになりエポキシ樹脂と強度が逆転することがある。このようにVfについても十分考慮する必要があるものと考えられる。

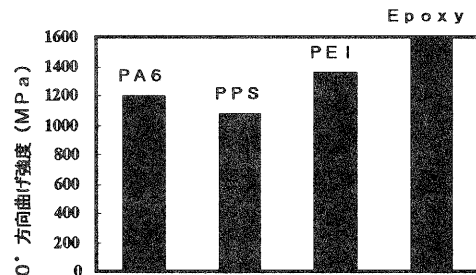


図3. マトリックス樹脂の違いによる曲げ強度の変化

### 3-3. 樹脂の種類と90° 曲げ強度

樹脂とCFとの接着性を評価するには、ILLS、単繊維引っ張り等多数の方法が提案されているが、万能な方法はないように思われる。ここでは、その中で比較的容易な評価方法として90°曲げを行なった。この方法は支店間の軸に対してCFが90°方向に配列するように試験片を作製し曲げ試験を行うものである。90°曲げ試験の場合、界面での接着強度が樹脂の破壊強度よりも弱ければ界面で破壊し、逆の場合は樹脂部で破壊が起こるため、接着性の目安と考えることができる。90°曲げ試験を各樹脂のCFRPについて行い、樹脂単独の強度と比較したものを図4に示す。PA6ではCFRP

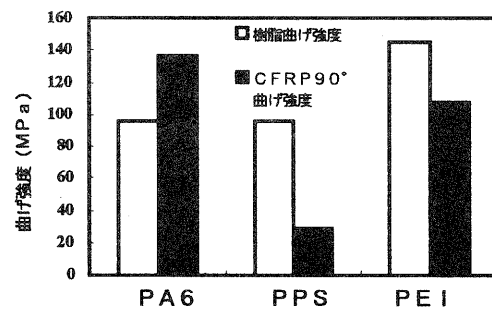


図4. 各樹脂の曲げ強度とそのCFRPの90°曲げ強度

が樹脂単体よりも高い値を示しており、PA6のCFに対する接着性が高いばかりではなく、CFによる強化作用のあることが分かる。これに対してPPS、PEIでは接着性は低く、特にPPSの場合は樹脂単独の約 $\frac{1}{3}$ の値を示していた。同様の傾向は90°引っ張り等で比較した場合でも報告されている<sup>(3)</sup>。また、90°曲げ試験後の破断面をSEMで観察したものが写真2である。PPSは明らかに繊維が露出しており、

樹脂-繊維界面で破壊をしていることが分かる。これに対して、PA6やPEIでは主として樹脂内の破壊が認められた。これらのことから接着性はPA6 > PEI > PPSの順になることが分かる。

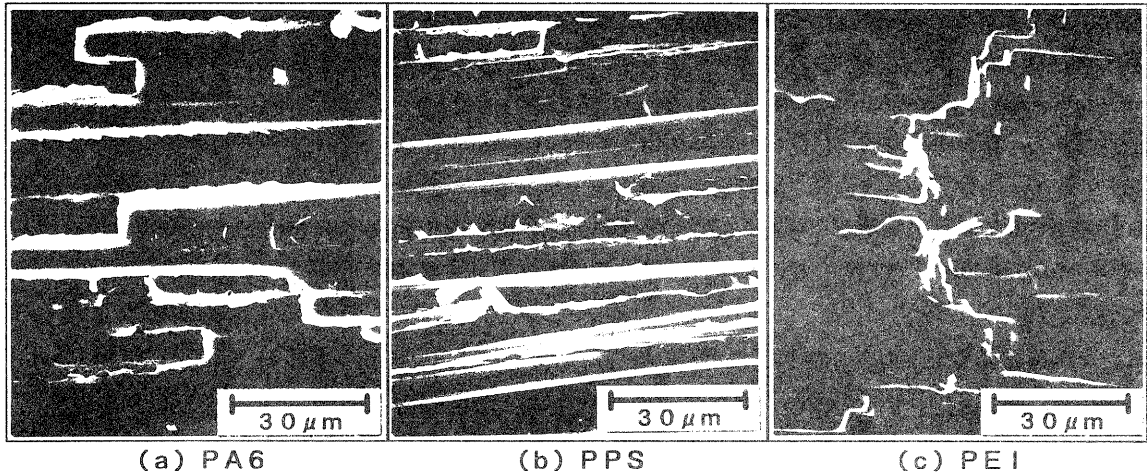


写真2. 各樹脂CFRPの90° 曲げ試験の破断面

3-4. PPSにおけるサイジング剤の有無による接着性の違い。

90° 曲げ試験でPEIやPPSの値が低かった理由の一つとして、成形温度が300°C以上と高いためCFのサイジング剤が熱分解し、界面の接着性に悪影響を与えているという可能性がある<sup>(4)</sup>。これを確かめるために、PPSを用いて以下の検討を行なった。図5に今回用いたCFに付着しているサイジング剤の熱分析結果を示す。熱天秤(TG)分析で加熱による減量を、また示差熱分析(DTA)で分解による発熱を調べた。低い温度から蒸発等が起こっており、特に300°C付近からは分解反応による減量と発熱が起こっており、このサイジング剤は300°C以上の成形では不安定であると考えられる。そこで、PPSについてサイジング剤が塗布されたものと除去したCFRPを作成し、それぞれについて0° 方向曲げ、90° 方向曲げ、シャルピー衝撃試験を行った。その結果を表3に示す。0° 曲げ、90° 曲げともにサイジング剤のない方が高い値を示した。特に90° 曲げの結果から、PPSとCFとの接着性はサイジング剤のない方がよい接着性を示すことが分かった。これに対し、シャルピー衝撃強度はサイジング剤のある方が高い値を示した。これは、ボイド等のために亀裂の進展が直線的に進みにくいため、高いのではないかと思われる。以上の結果から、分解温度の低いサイジング剤が樹脂-CF界面に悪影響を与えていることが明らかとなった。

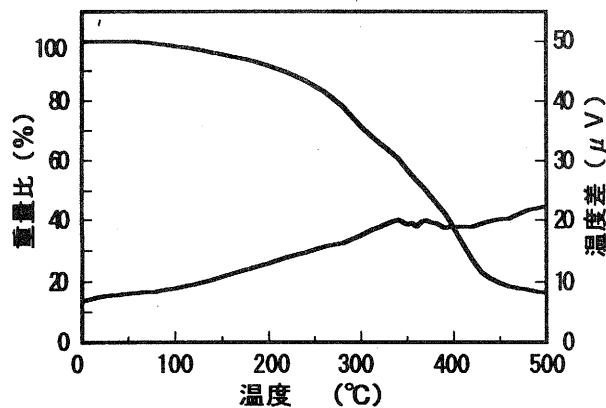


図5. サイジング剤の熱分解挙動(TG-DTA)

表3. 高温成形時におけるサイジング剤の物性への影響(PPS)

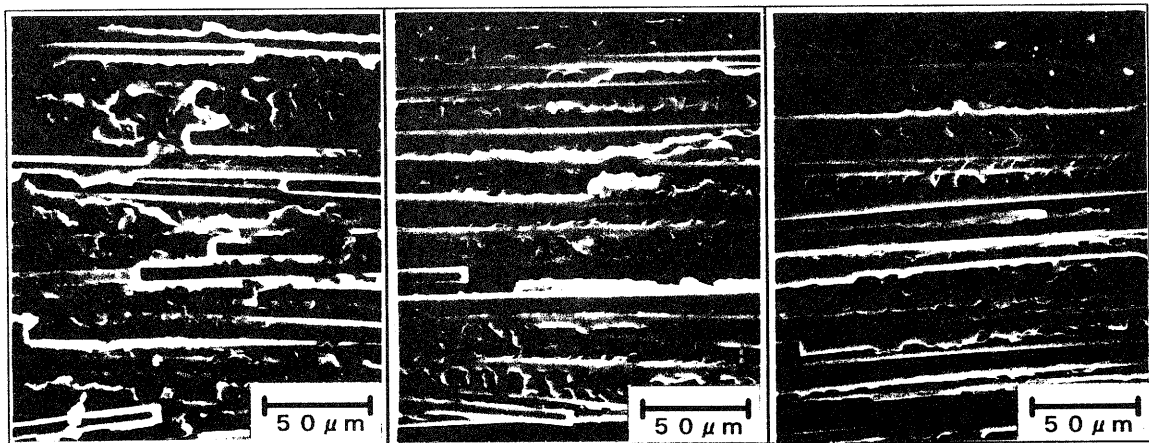
	サイジング剤あり	サイジング剤無し
0° 曲げ強度	1070	1112
90° 曲げ強度 (MPa)	28.3	37.5
シャルピー衝撃強度 (kJ)	122.0	116.4

3-4. PA6におけるサイジング剤の有無や含浸方法の接着性への影響について

PA6についてもサイジング剤の有無について比較を行なった。また、これら熔融含浸法に加えて、溶液含浸法についても検討を行なった。その結果を表4に示す。0°曲げはサイジング剤の有無でほとんど差が認められないが、溶液含浸の場合はやや低くなっている。これは、熔融した際に繊維配向が乱れたために成形物の強度が低下したものと思われる。これに対して90°曲げはサイジング<無サイジング<溶液含浸のようになっている。これらの破面を見ると(写真3)サイジング剤がある場合、表面には樹脂の付着が認められる。これは、写真1のPPSの場合CFの表面には樹脂が付着することなく露出しているのとは異なった結果になっている。以上のことから、サイジング剤があるとCF表面の樹脂強度が低下し、CFの表面近くの樹脂で破壊するものと考えられる。また、シャルピー衝撃強度はサイジング処理CFRPが特に低い値を示している。この原因は明かではないが、例えばサイジング剤の硬化により繊維の回りが脆くなったことが考えられる。写真4にハンマーで衝撃を加えたのは反対側の切り欠き側の破断面のSEM写真を示す。サイジング剤のあるものは亀裂の進展が直線的でかつCFの引き抜けが目立つのにたいして、繊維を樹脂で取り巻いた束になっており、他の二つは樹脂の接着性が良いことを示している。このように、90°曲げや衝撃強度の結果からサイジング剤の有る場合は界面付近の樹脂強度が低下することが分かった。また、サイジング剤が無い場合の加熱による熔融含浸とPA6のギ酸による溶解含浸との接着性の差は小さいと考えられる。このことから、サイジング剤の無い状態で成形したものは、熔融含浸でも十分な含浸がなされており、実用的にも適した成形条件であると言える。熔融含浸で十分な性能を得られることは、プリプレグの製造途中で樹脂の溶解のために特殊な溶剤を使用せずに済み、製造工程が少なくなる等の理由から工業的には望ましい結果であった。

表4. 含浸方法の物性への影響 (PA6)

含浸方法	熔融含浸		溶液含浸
	有り	無し	溶液含浸
サイジング処理			熔融含浸
0°曲げ強度 (MPa)	1193	1154	1089
90°曲げ強度 (MPa)	136	142	144
シャルピー衝撃強度 (kJ)	87.2	109.5	111.6



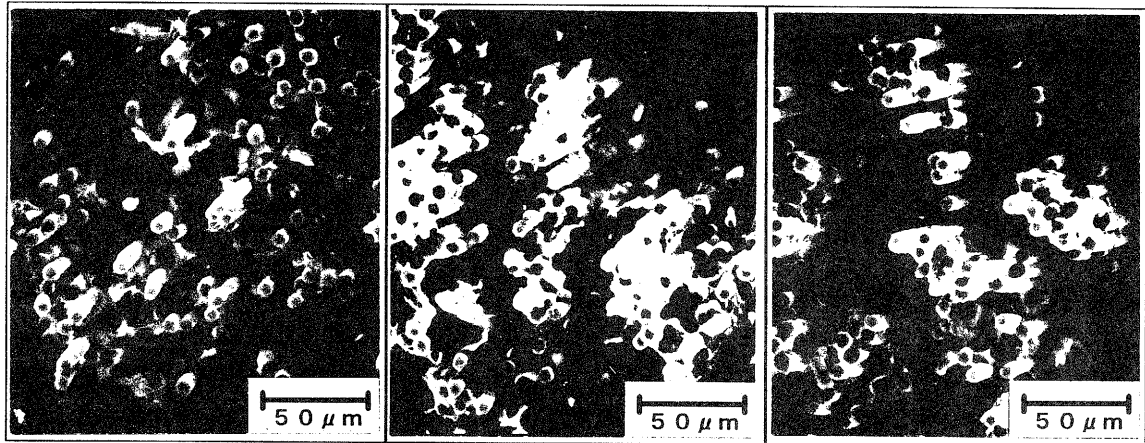
サイジング剤有り

サイジング剤無し

溶解含浸

写真3. サイジング剤の有無と含浸法の異なるCFRPの90°曲げ破断面 (PA6)





サイジング剤有り

サイジング剤無し

溶解含浸

写真4. サイジング剤の有無と含浸法の異なるCFRPの  
シャルピー衝撃試験破断面 (PA6)

#### 4. むすび

エンブラをマトリクスとしたCFRPを作成し、樹脂とCFとの接着性の面から樹脂の含浸方法やサイジング剤の影響について検討し、以下の知見を得た。

1. 樹脂とCFとの接着性は、PA6>PEI>PPSの順である。
2. 耐熱性の低いサイジング剤は、高温成形では分解等のため界面の接着性および界面付近の強度に悪影響を与える。
3. 加熱熔融含浸と溶液含浸ではあまり差は認められなかった。

謝辞 本研究を進めるにあたり、ご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）に深く感謝いたします。また、試料を提供していただいた旭化成工業株式会社に感謝します。

#### 〔参考文献〕

- (1)菅原憲明 :”副資材-Ⅲ、成形補助材料”、日本複合材料学会誌、17、1、(1991) 15~23
- (2)那須喜一、中村吉紀:”炭素繊維強化熱可塑性複合材料の開発”、滋賀県工業技術センター研究報告(1992)
- (3)南雲 隆、坂井英男:”耐熱高靱性熱可塑性複合材料の開発”、日本複合材料学会誌、15、5、(1989)
- (4)松井醇一 :”炭素繊維の展開と評価方法”、4、リアライズ社(1989)

# 自然素材製品の開発（第一報）

## クラフト製品のデザイン研究

技術第二科 山下 誠児 Seiji Yamashita

あらまし：自然環境の保護が世界的規模で問題になっている中で、本県では「クリーン条例」（ごみの散乱防止に関する条例）と「ヨシ群落保全条例」（琵琶湖のヨシ群落の保全に関する条例）を平成4年7月に施行した。近年では放置されるヨシ群が増加していたが、今後は上記の二条例によって、何らかの処理を行わなければならないようになった。また、処理を必要とするヨシは増加して行くと考えられる。これまでヨシは、簾や暗渠排水の補助材等に利用されているが、生活様式の変化により、その利用頻度は年々減少している。そこで、自然素材であるヨシに焦点をあてて、造形活動において有効な利用法を検討して行くこととした。

本年度は、まず材料の選別法を検討し、その選別法で選別されたヨシを使用した表現方法を検討した。次にそれを組み合わせることで数種類の平面を構成し、さらにこの製作結果を立体（三次元）への展開に応用しようと考えた。

### 1. まえがき

排気ガス、フロンによるオゾン層の破壊、森林の乱伐、ゴミ問題等の環境問題が取り上げられる中、それに相まって市場には自然素材を使用した製品（以下自然素材製品）が多く出まわってきている。自然素材製品の開発・利用は生態にやさしい面と、場合によっては生態に悪影響を及ぼしかねないという二面性を有している。例えば木材を使用した製品を考えてみると、製造する過程では森林の乱伐という自然破壊に関係しているとも考えられるが、ゴミとなったときには他の石油製品等と比較して自然環境にやさしいものになっている。このように自然素材製品は、それらが持っている温かみや安らぎと同時に、処理段階での環境への配慮として注目を集めている。

自然素材の一つとして、本県には琵琶湖のヨシがある。よく知られているように成長期を過ぎたヨシは、それまで水中から吸収したリンなどを反対に水中に放出すると言われている。ある時点でヨシは琵琶湖の水質環境を守るためにも、また翌年に良質のヨシを育てるためにも刈り取ることが是非とも必要である。前述したように、自然素材製品は製造の段階で自然環境を破壊するという場合もある。しかし、ヨシを使用した製品ではその恐れはほとんどないと言える。こうしたことからヨシにもっと大きな価値を見つけることが出来れば、自然環境にとっても、また人々にとっても良い”流れ”（図1）が生まれるのではないかと考えられる。

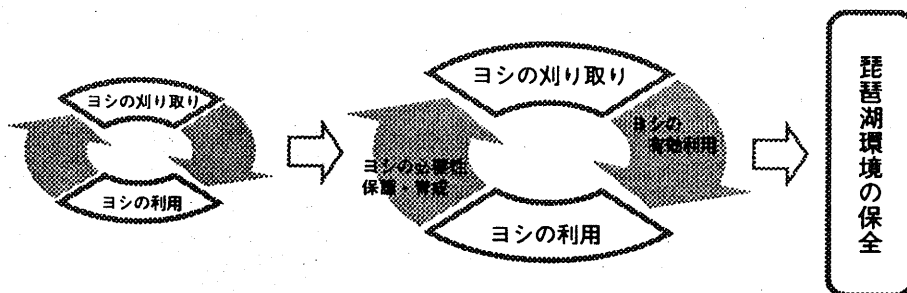


図1. 現在考えられるヨシの流れ

### 2. 選別作業

製作にあたって、まず1000mm程度のまっすぐなヨシの選別を行なったが、10本に1本程しか選び出

せなかった。その中から質の良いヨシ（虫食い、汚れの無いヨシ）を選び出したのだが、2本に1本程度であった。従来の商品として十分通用する従来の簾、間仕切りを製作するには、尚且つこの中から、大きさ、色合等が似ているものを選び出さなければならないため、ほとんどのヨシが使用出来ないことになる。という状況であった。

そこで、製作にあたってヨシを材料としてほとんど残さず使いきるため、図2のような選別方法をとった。

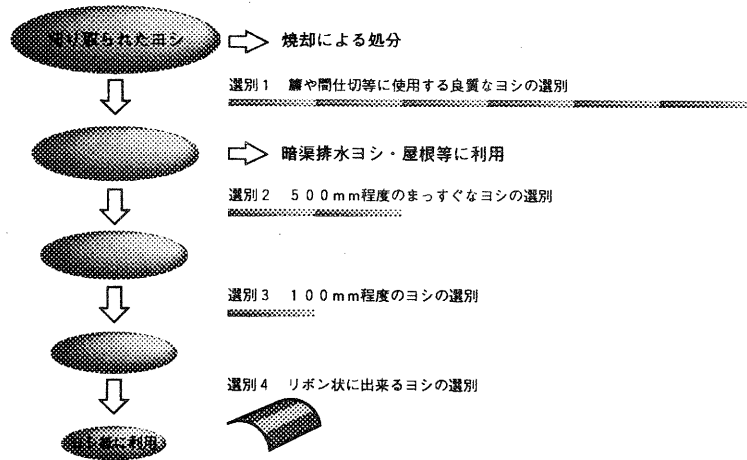


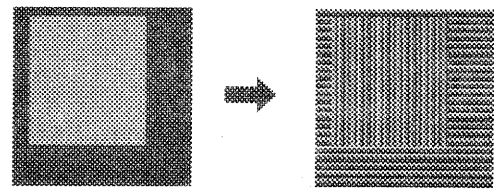
図2. ヨシの選別方法（第1案）

### 3. 構成要素（ヨシによる点、線、面の表現法）

選別作業によって分類されたヨシを使用した平面構成の方法として、下記の4パターンが考えられた。

#### パターン1

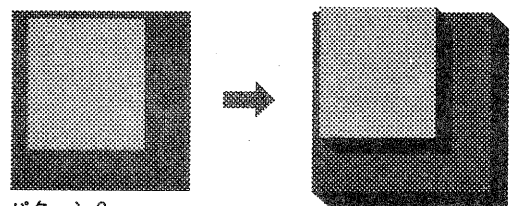
選別1、2によって得た材料を使用する。直径の違うヨシを並べ、また、並べる角度によって表現する。節を利用して描画が可能であり大きなポイントとなる。また、節の両サイドの色彩が違うため竹や藤とは違うヨシ独特の表現が出来る。面積の広いところに有効に使えることが特徴であり、グラデーションや細長いもの、線などの表現に適している。これまで簾や間仕切りなどに使用されている方法である。



パターン1

#### パターン2

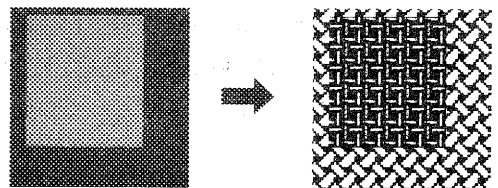
選別3によって得た材料を使用しての表現である。異なった長さのパーツを使い、それを縦に凹凸に並べて置く。右図のように明度の高い所を長いパーツで低い所を短いパーツで表現する。この方法は面積の小さな模様（特に点）の表現に適している。ストロー状にした場合、内側の薄皮の色が違い、仕上げの美しさからも取り除く必要がある。



パターン2

#### パターン3

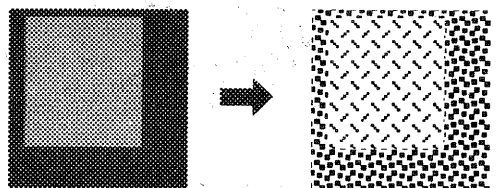
選別1によって得たヨシを割いて編む。編み方（編み目の大きさ、角度等）の違うものを組み合わせることで表現する。この方法は面積の広いところ（面）に有効であり、編み上げたものを張り付けて、天上や壁といった建築部材に使用されている。



パターン3

#### パターン4

選別4によって得た材料を使用し、色の違いや盛付ける量の違いで表現する。またリボン状、繊維状という具合にカットの方法でも違う表現が可能である。いろいろな表現（点、線、面）に使用できるが、固定の方法が問題であった。



パターン4

図3. ヨシによる表現方法

#### 4. 製作 (実験)

前記の四つのパターンを使用し、800mm四方の枠 (図4) にヨシを飾り付けた。枠内の模様は、テクノネットワークの18号から26号の表紙をもとにして展開した。

主な加工は切断 (糸のこ) と割裂がほとんどである。割裂作業は容易であるが、切断作業については細心の注意が必要である。図5のA-A'の切断では割れることはないが、B-B'の切断は割れることが多いことがわかった。

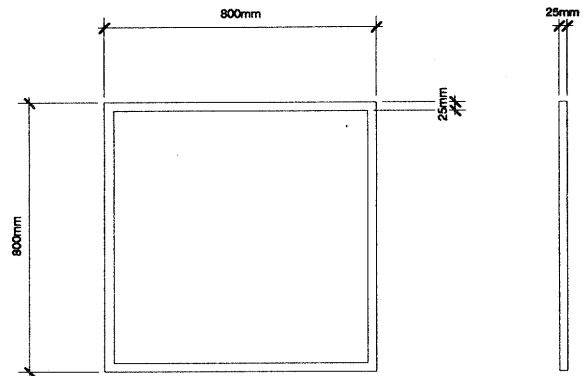


図4. 装飾枠の図面

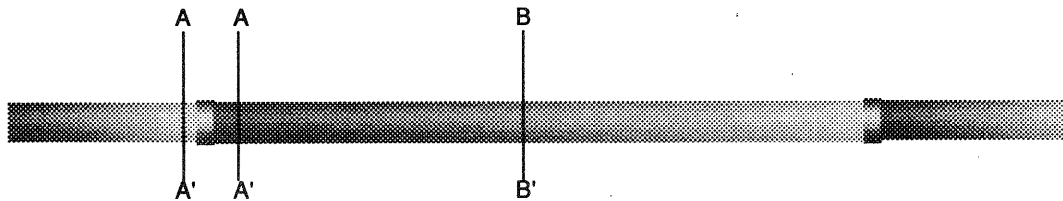


図5. 糸のこによる切断場所

##### 4-1. パターン1による表現

これは簾等に利用されている方法であるが、2つ以上の節のあるヨシを使用しての製作は、節から節までの間隔が一定でないため、その材料選びに多くの時間を費やすことになる。現在作られている簾の大半は竹ひごや樹脂が使用されていることから納得できる。

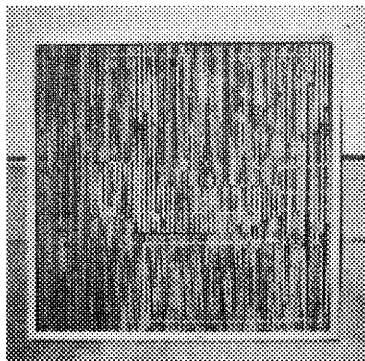
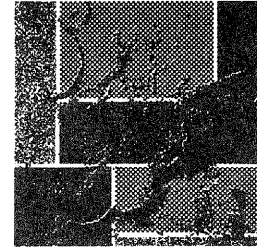
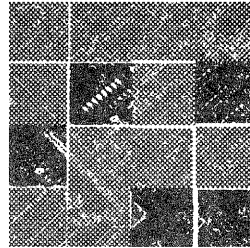
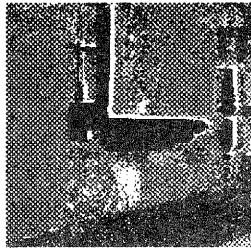


写真1

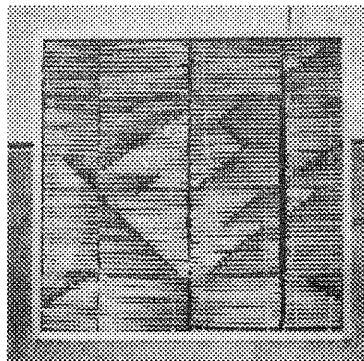


写真2

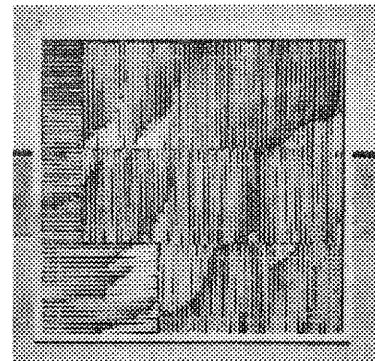


写真3

図6. 製作品

今回、内枠750mmという条件を十分に満たすパーツの使用を少なくし、数本にカットしたパーツを使用した。これにより材料選択の条件を広くした。写真1は並べる方向を同じにし、大きさの違うもので構成した。写真2は、節を利用して模様を表現した。写真3は、並べる方向の違いと節を利用した表現を行なった。ここで加工に失敗したヨシはパターン2、4の材料として使用した。

#### 4-2. パターン2による表現

20mm前後の長さにカットするため、割れることが多い。そのため、節から節まで10個ほどのパーツが取れる予定だったが、半分ほどであった。

#### 4-3. パターン3による表現

ヨシを割いてそのまま組み上げることにしたが、編み目を細かくするためには更に薄くスライスする必要がある。

#### 4-4. パターン4による表現

ヨシをストロー状に残す必要がないためパーツを作ることは容易であったが、固定するための接着剤に適当なものが見つからなかった。(ゴム系の接着剤がわりに有効であった)

選別1で加工に失敗したヨシは選別2、3、4を行うという様に、それぞれの材料をその下の選別にまわすことにした。

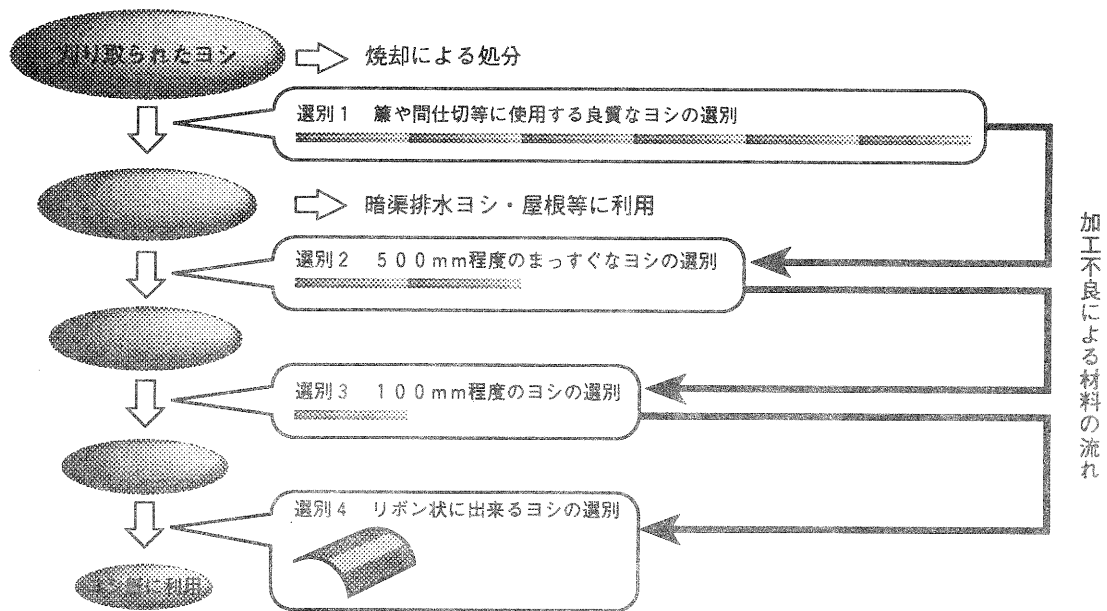


図7. ヨシの選別方法 (第2案)

## 5. むすび

ヨシを加工するにあたっては、強度が低いことからヨシのみによる製品の開発は困難であると考えられる。今後はヨシを補強する材料と組み合わせた方法を検討して行く必要がある。例として、家具等への装飾としての利用(照明器具の傘等)及び、インスタレーション(設置作品、空間演出)への利用等が考えられる。また製作以前の仮構成で、製品としての完成度が認められれば、上図のようなヨシの利用が可能であるという確信を得た。今年度はパターン1について検討した。今後はパターン2~4の作品の完成を目指す。

資 料

# 地域区別に見た本県製造業の概要

企画管理課 児島聖治 Seiji Kojima

**あらまし：**現在、本県では、21世紀を見据えた産業振興指針等を策定中である。同指針等の策定には、本県の製造業（産業）の現状を十分に把握しておくことが不可欠である。一方、本県の製造業の現状についての各種報告は、県全域という観点でなされてきたため、各施策の詳細を検討していく段階で必要となる「地域」という観点（施策の「地域との整合性」の判断材料）を提供できないままにある。

そこで、本報告では本県の製造業を地域別に把握し、地域毎の特性を浮き彫りにすることができた。その結果、上記指針等の策定において寄与できるものと考えられる。

## 1. まえがき

本調査報告の特徴は、①既存の調査結果（脚注）をもとに実施した、②地域の製造業に密接に関連する人口・産業についても触れた、である（本文中の地域・製造業・産業の区分についての説明は、本文末にある）。

また、本調査で準拠したデータは下のとおりである（本調査実施後に平成3年以降の統計が報告されており、併せて参照されたい）。以下、人口、産業、製造業の概要を地域毎に見たい。

## 2. 人口の動向

### 2-1 県全域（図1、2）

昭和63年以来、持続的増加傾向を示している。しかし、増加人口に減少傾向が見られる。

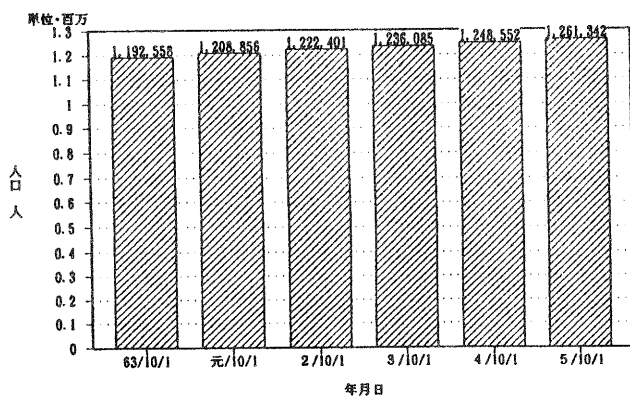


図1 県全域 人口増加の推移

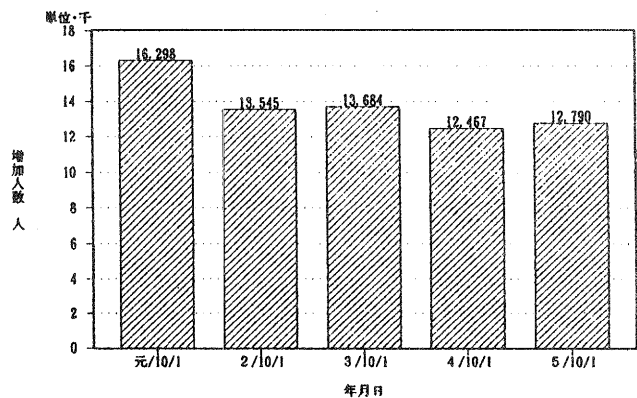


図2 県全域 前年比増加人口の推移

(脚注) 製造業・産業の事業所・従業者数は、平成3年事業所統計を、総生産については滋賀県民経済計算年報による。また、人口は、滋賀県推計人口年報による。

## 2-2 地域別 (図3、4)

人口が高いのは湖南地域で、全体の43%を占める(平成5年現在)。顕著な人口増加が見られるのは湖南地域で、甲賀・中部地域も高い。湖東は微増、湖北・湖西は若干の減少・横ばいである。

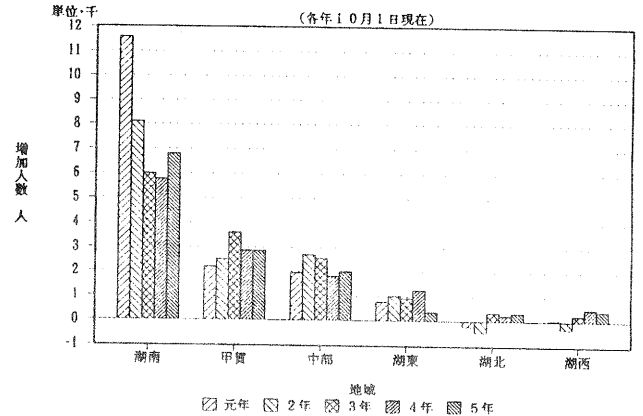
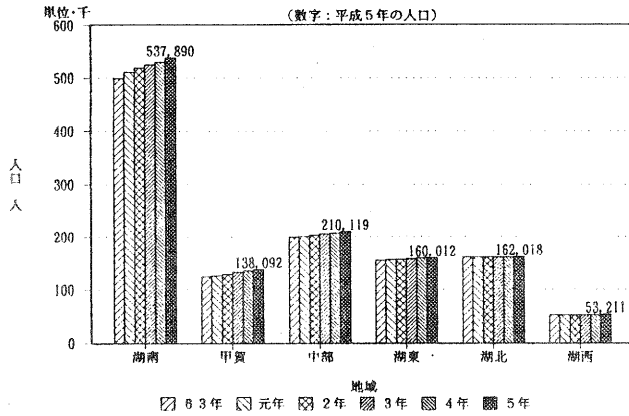


図3 地域別 人口の推移 (各年10月1日現在)

図4 地域別 前年比増加人口の推移

## 3. 産業の動向

### 3-1 事業所・従業員分布

#### ①産業区分別 (図5、6)

##### ・事業所

多いのは、卸小飲食、サービス他、製造業、建設業、の順である。

##### ・従業員

多いのは、製造業、卸小飲食、サービス他、建設業、の順である。

#### ②産業区分別 (従業員規模別)

##### ・事業所、従業員 (30人未満)

多いのは、卸小飲食、サービス他、製造業、建設業の順である。

##### ・事業所、従業員 (30人以上)

多いのは、製造業、サービス他、卸小飲食、輸送通信の順である。

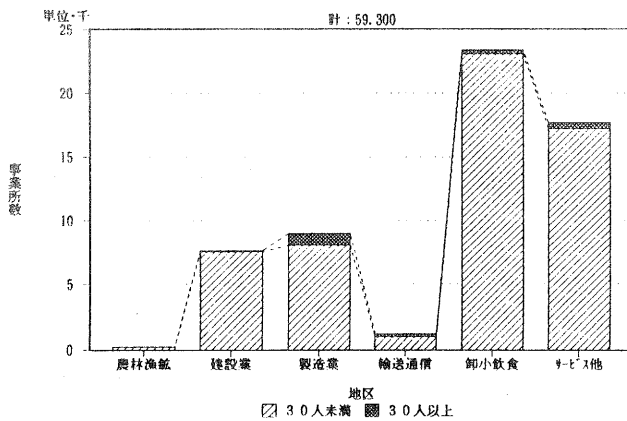


図5 産業別 事業所割合 (従業員規模別)

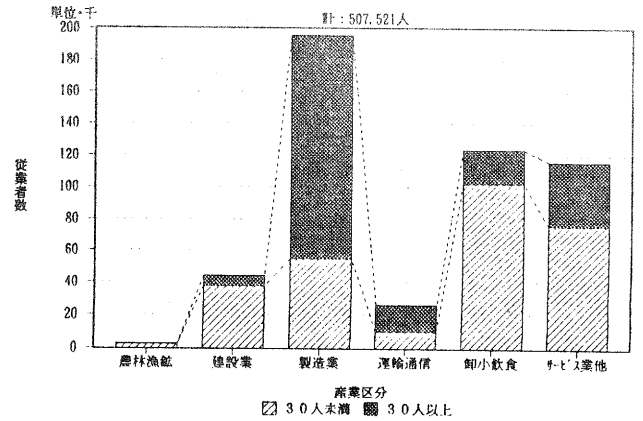


図6 産業別 従業員割合 (従業員規模別)



③産業区分別（地域区分別）（図7、8）

各産業の分布状況は、どの産業も湖南地域が非常に多く、中部・湖北・湖東地域が中程度に多い。次いで、甲賀地域が多く、湖西地域は少ない。

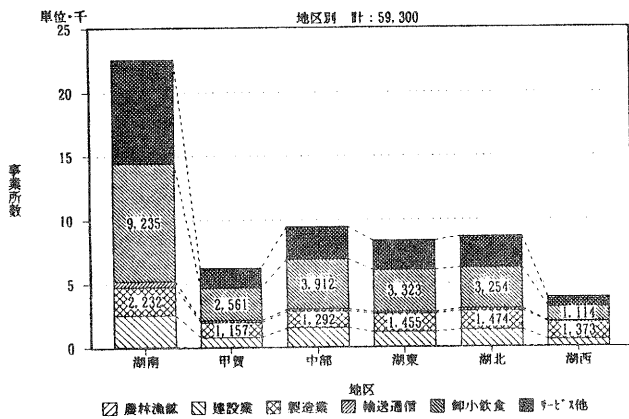


図7 産業別 事業所分布 (地域別)

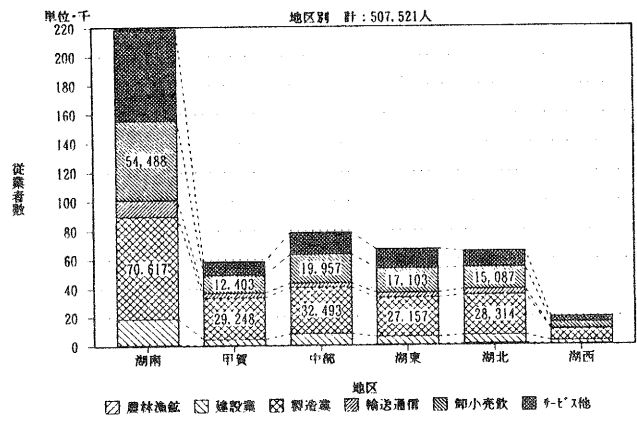


図8 産業別 従業員分布 (地域別)

④産業区分別割合（地域区分別）（図9、10）

・県全域  
事業所

多いのは、卸小飲食(39%)、サービス他(30%)、製造業(15%)、建設業(13%)である。

従業員

多いのは、製造業(39%)、卸小飲食(24%)、サービス他(23%)、建設業(9%)である。卸小飲食とサービス他の合計は、事業所数で全体の69%を占めるものの、従業員数では、47%を占めるに留まっている。製造業は、事業所数で15%を占めるものの、従業員数では39%を占める。建設業は、事業所数での13%を占めるものの、従業員数では、9%を占める。

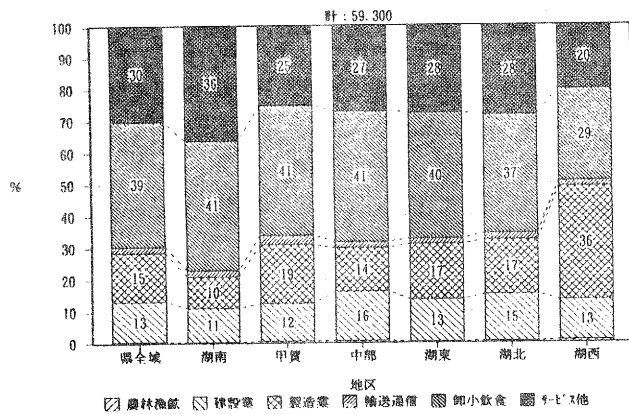


図9 地域別 産業別事業所割合

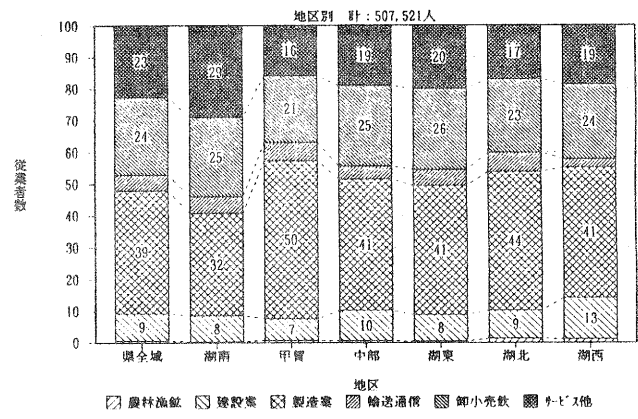


図10 地域別 産業別従業員割合

・地域区分別

湖南地域 サービス他と卸小飲食の合計は事業所数では78%と高く、従業員数も54%と高い。製造業は、事業所数では10%に留まるが、従業員数では32%を占める。

甲賀地域 サービス他と卸小飲食の合計は事業所数では66%であるが、従業員数は37%と低い。製造業は、事業所数では19%と高く、従業員数では50%と高い。

中部・湖東地域 サービス他と卸小飲食の合計・製造業のそれぞれについて、事業所数・従業員数とも平均的である。

湖北地域 サービス他と卸小飲食の合計は、事業所数では65%と比較的低く、従業者数も40%と低い。製造業は、事業所数では17%と平均的であり、従業者数では44%と比較的高い。

湖西地域 サービス他と卸小飲食の合計は、事業所数では49%と低く、従業者数も43%と低い。製造業は、事業所数では36%と高く、従業者数では41%と平均的である。

### 3-2 総生産の推移 (図11、12)

昭和61年以来、年々増加傾向を示している。産業別構成で(平成2年度現在)非常に高いのは製造業で、次いでサービス他であり、他の産業は低い。総生産の伸びの一番著しいのは、製造業、ついでサービス他である。一方、総生産が減少しているのは、農林漁鉱のみである。

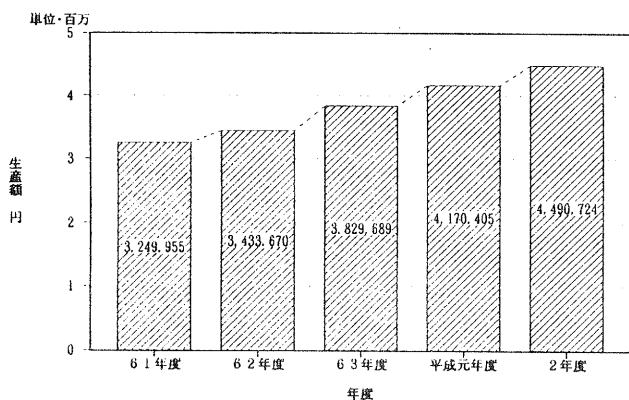


図11 総生産の推移

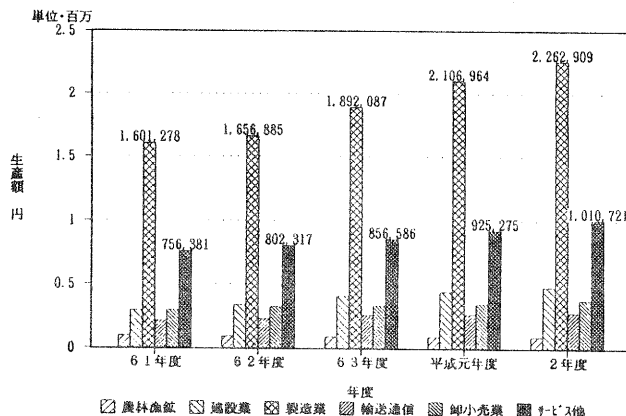


図12 産業別総生産の推移

## 4. 製造業

### 4-1 事業所・従業者数 (従業者規模別 平成3年現在)

#### ①概要 (図13、14)

- ・事業所 総数8,983あり、従業者30人未満が8,027(89.4%)、従業者30人以上が956(10.6%)ある。従業者30人未満が、大半を占めている。
- ・従業者 総数195,716人で、従業者30人未満が54,427人(27.8%)、従業者30人以上が141,289人(72.2%)である。従業者30人未満が、多くを占めている。従業者30人以上の事業所は、全事業所の1割強に過ぎないが、全従業者の7割強を占めている。

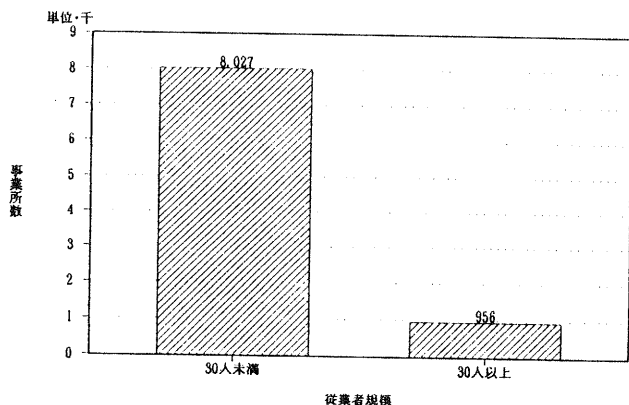


図13 事業所分布 (従業者規模別)

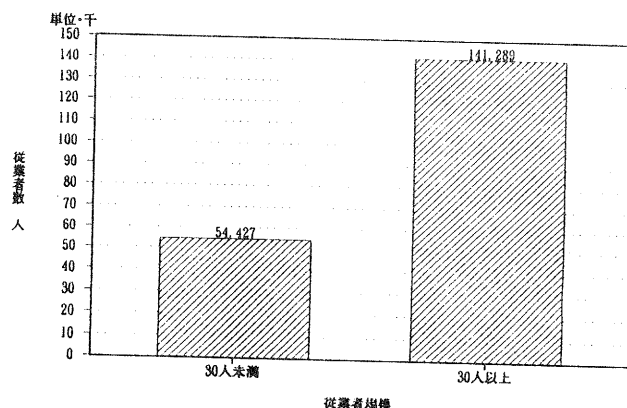


図14 従業者分布 (従業者規模別)

②地域別 (図15、16) (%:全体に占める割合)

- ・事業所 一番多いのは、湖南(2,232:29.4%)、次いで湖北、湖東、湖西、中部、甲賀地域(1,157:12.9%)の順である。従業員規模別では、30人未満が一番多いのは湖南(1,930:21.5%)、次いで、湖北、湖西、湖東、中部、甲賀(967:14.9%)の順で多い。30人以上が一番多いのは湖南(302:3.4%)、次いで甲賀、中部、湖北、湖東、湖西(33:0.4%)の順である。
- ・従業員 一番多いのは湖南(70,617:36.1%)、次いで中部、甲賀、湖北、湖東、湖西(7,887:4.0%)地域の順である。従業員規模別では、30人未満で一番多いのは湖南(15,457:7.9%)、次いで、中部、湖東、湖北、甲賀、湖西(5,118:2.6%)の順である。30人以上で一番多いのは湖南(55,160:28.2%)、次いで中部、甲賀、湖北、湖東の順で、湖西は非常に少ない(2,769:1.4%)。

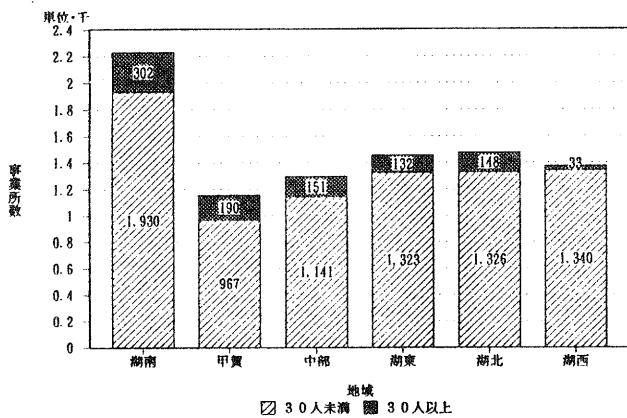


図15 地域別 事業所分布 (従業員規模別)

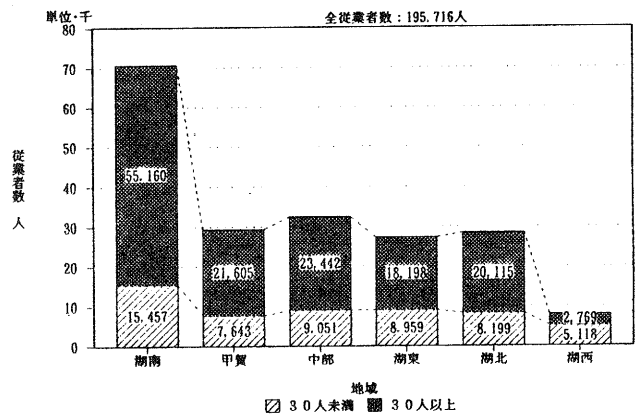


図16 地域別 従業員分布 (従業員規模別)

③業種別 (図17、18)

- ・事業所 一番多いのは、繊維(1,669:19%)で、次いで多いのは、一般、衣類、金属、窯業、電気(6%)の順である。従業員規模別では、30人未満では繊維が著しく多い。次いで、衣類、一般、金属、窯業、電気の順である。30人以上では、電気、一般、繊維、プラ、窯業、金属、化学の順で高い。
- ・従業員 一番多いのは、電気(41,376:21%)で、次いで多いのは、一般、窯業、繊維(8.6%)、プラスチックの順である。繊維、衣類は、事業所数は多いものの、従業員数は少ない。電気、一般は、事業所数はそれほど多くないものの、従業員数は非常に多い。

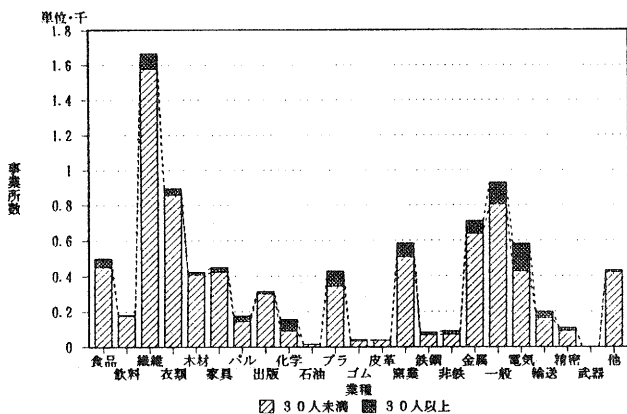


図17 業種別 事業所分布 (従業員規模別)

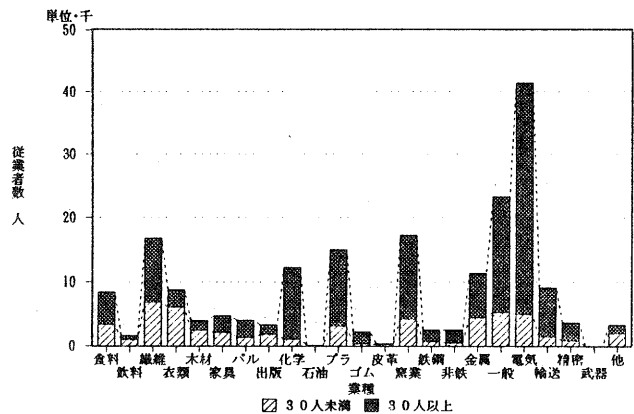


図18 業種別 従業員分布 (従業員規模別)

④業種別（地域別）（図19、20、21、22）

・事業所 従業者30人未満では、大半の業種で湖南地域が多い。特に、一般、金属、電気が多い。繊維・衣類においては、湖西、湖北、湖東、中部地域が多い。窯業においては甲賀地域が、一般においては湖東地域が多い。

従業者30人以上では、大半の業種で湖南地域が多い。特に、一般、金属、電気が多い。甲賀・中部地域も多い。繊維・衣類においては、湖北・湖東地域が多い。窯業においては甲賀地域が、一般においては湖東・湖北地域も多い。

・従業者 大半の業種で、湖南地域が多い。特に、電気、化学、一般が多い。甲賀・中部地域も多い。電気においては中部・湖東地域が、一般においては湖北地域も多い。

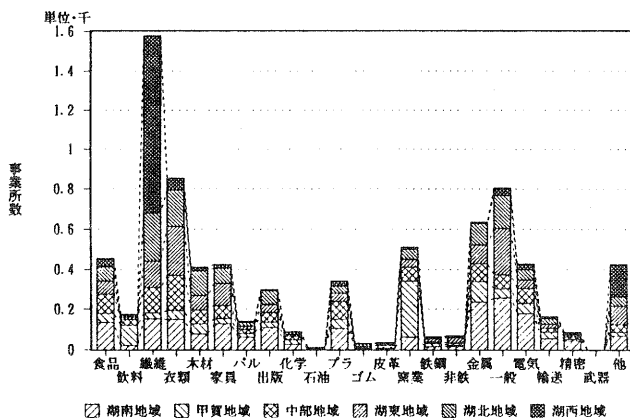


図19 業種別 事業所分布（従業者30人未満）

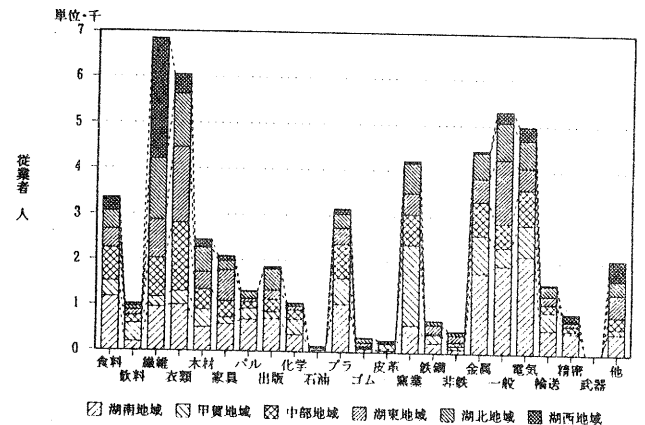


図20 業種別 従業者分布（従業者30人未満）

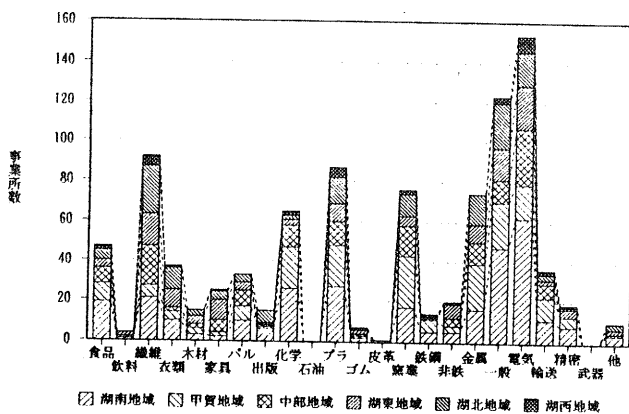


図21 業種別 事業所分布（従業者30人以上）

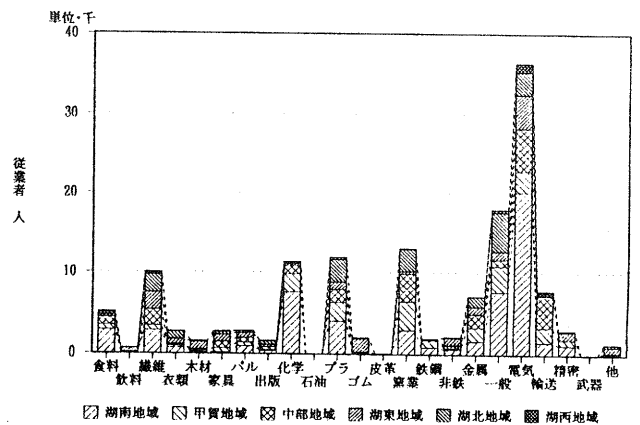


図22 業種別 従業者分布（従業者30人以上）

#### 4-2. 総生産の推移(業種別) (図23、24)

石油を除き各業種とも増加傾向を示している。その増加は持続的である。高い水準で推移しているのは、電気であり、昭和56年度(202,527百万円)から同61年度(487,458百万円)の間に急激に増加している。平成元年度は、最高水準の631,971百万円(30.0%)である。総生産自体が低く、伸びの低い業種として、パル、一金(一次金属)、精密がある。

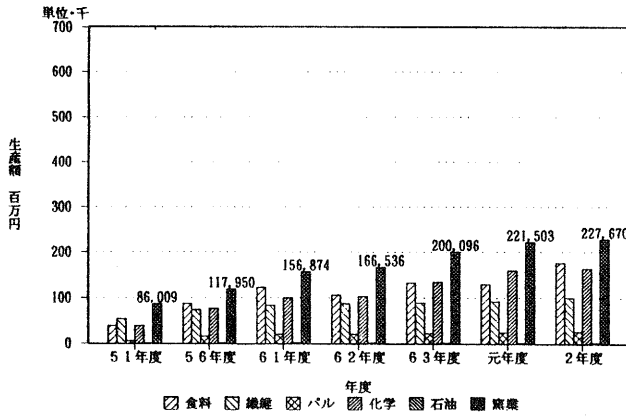


図23 業種別 総生産の推移(1)

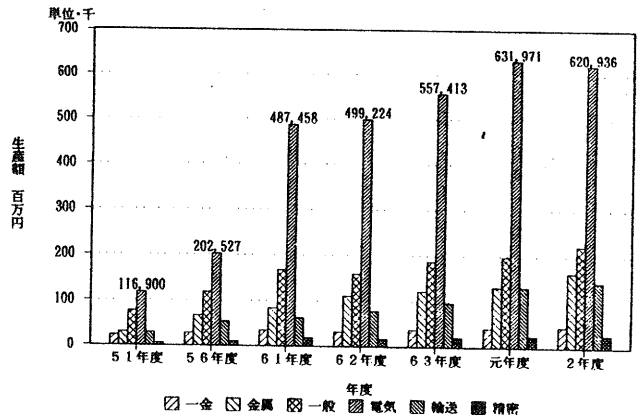


図24 業種別 総生産の推移(2)

#### 5. むすび

以上、地域別に人口・産業・製造業(業種・事業所・従業者数・規模)について見てきたが、地域毎の著しい差異の存在が分かった。

また、製造業が各地域で重要な位置を占めていることも明らかとなった。(製造業の全産業従業者数に占める割合 湖南:32%~甲賀:50%)

なお、今回の調査(地域毎に把握する手法)の実施により、本県製造業の地域的特性がある程度明らかにできた。本県の産業施策のより現実的な部分の策定においては、より一層きめ細かい地域特性の把握も重要と考えられる。

(補足) 製造業 事業所・従業者数 (地域別・業種別・従業者規模別 平成3年現在)

① 湖南地域 (図25、26)

**事業所** 多い業種は、一般(305:14%)、金属(252:11%)、電気(243:11%)である。

**従業者** 多い業種は、従業者30人以上の電気(20,171:29%)、化学(7,424:11%)、一般(7,496:11%)である。

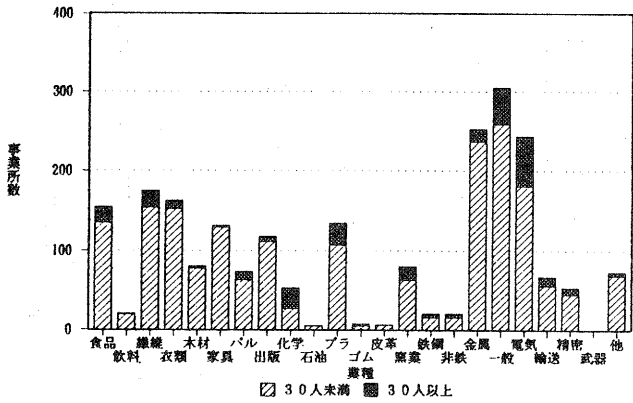


図25 湖南地域 事業所分布 (従業者規模別)

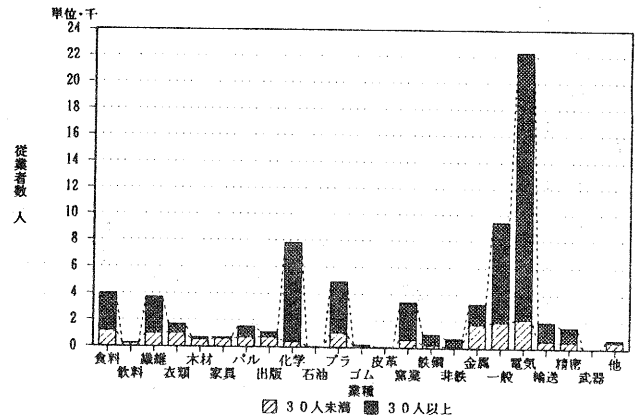


図26 湖南地域 従業者分布 (従業者規模別)

② 甲賀地域 (図27、28)

**事業所** 多い業種は、従業者30人未満の窯業(278:24%)である。

**従業者** 多い業種は、従業者30人以上の窯業(3,432:12%)、一般(3,348:12%)、電気(2,621:9%)、化学(2,302:8%)、プラスチック(2,234:8%)、輸送(1,759:6%)、金属(1,642:6%)、である。

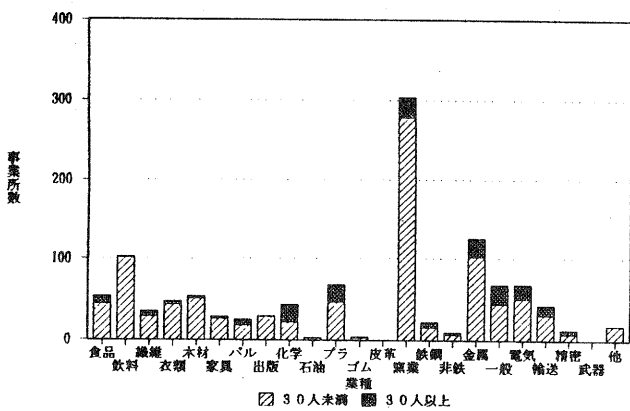


図27 甲賀地域 事業所分布 (従業者規模別)

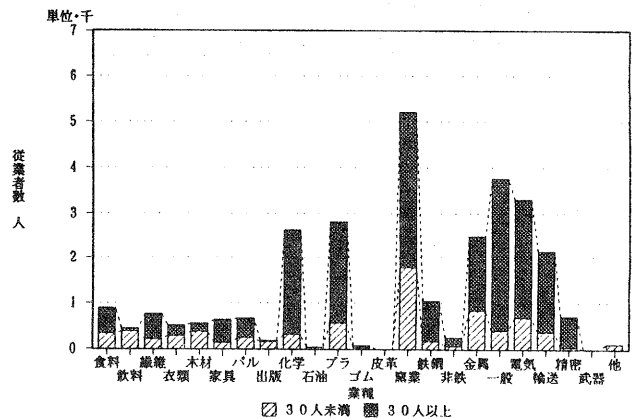


図28 甲賀地域 従業者分布 (従業者規模別)

③中部地域 (図29、30)

**事業所** 多い業種は、従業員30人未満の衣類(176:14%)、繊維(126:10%)である。  
**従業員** 多い業種は、従業員30人以上の電気(5,404:17%)、輸送(3,893:12%)、窯業(3,541:11%)、である。

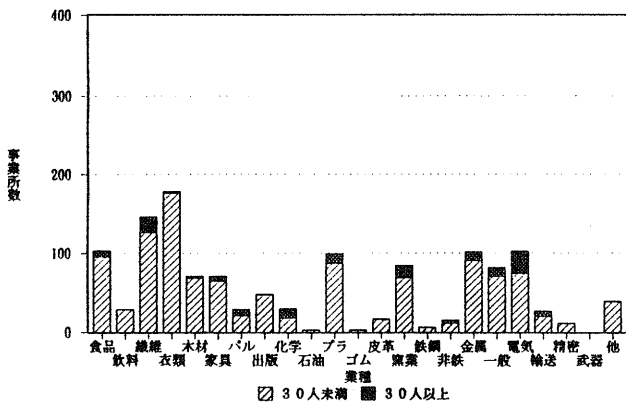


図29 中部地域 事業所分布 (従業員規模別)

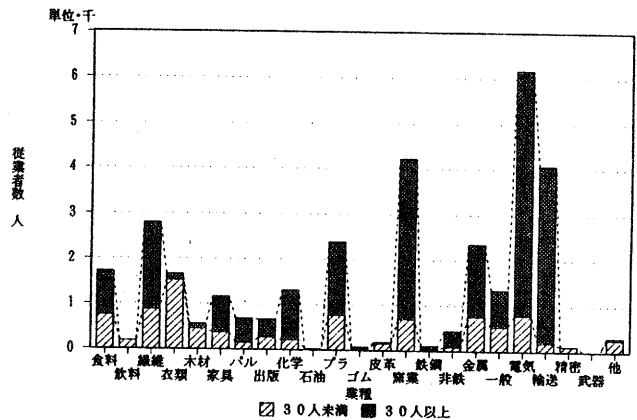


図30 中部地域 従業員分布 (従業員規模別)

④湖東地域 (図31、32)

**事業所** 多い業種は、従業員30人未満の衣類(244:17%)、繊維(131:9%)、一般(231:16%)である。  
**従業員** 多い業種は、従業員30人以上の電気(4,271:16%)、繊維(2,124:8%)、ゴム(1,567:6%)である。

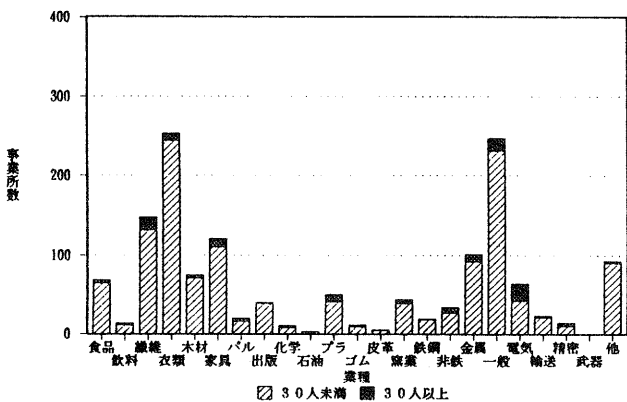


図31 湖東地域 事業所分布 (従業員規模別)

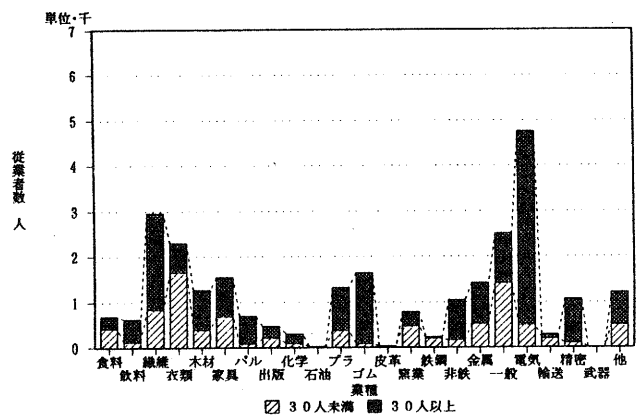


図32 湖東地域 従業員分布 (従業員規模別)

⑤湖北地域 (図33、34)

**事業所** 多い業種は、従業者30人未満の繊維(241:17%)、衣類(181:12%)、一般(165:11%)である。

**従業者** 多い業種は、従業者30人以上の一般(4,927:17%)、電気(2,848:10%)、窯業(2,880:10%)、プラスチック(2,866:10%)、繊維(2,260:8%)、である。

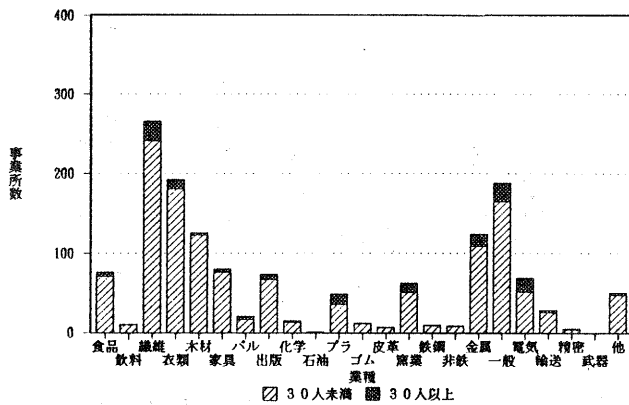


図33 湖北地域 事業所分布 (従業者規模別)

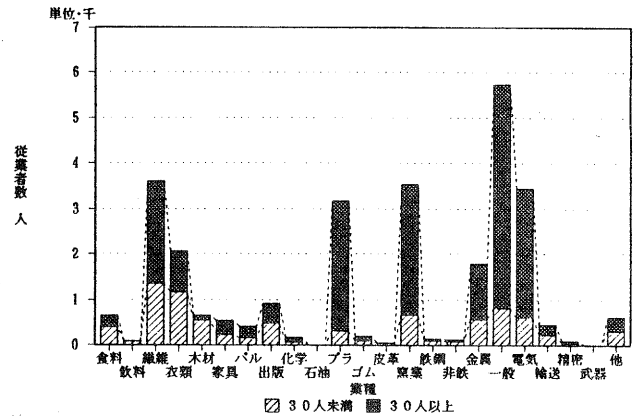


図34 湖北地域 従業者分布 (従業者規模別)

⑥湖西地域 (図35、36)

**事業所・従業者** 多い業種は、従業者30人未満の繊維で、事業所 896(65%)、従業者2,635 (33%)である。

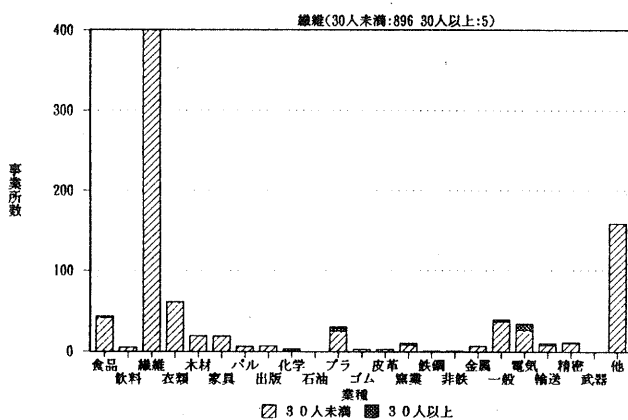


図35 湖西地域 事業所分布 (従業者規模別)

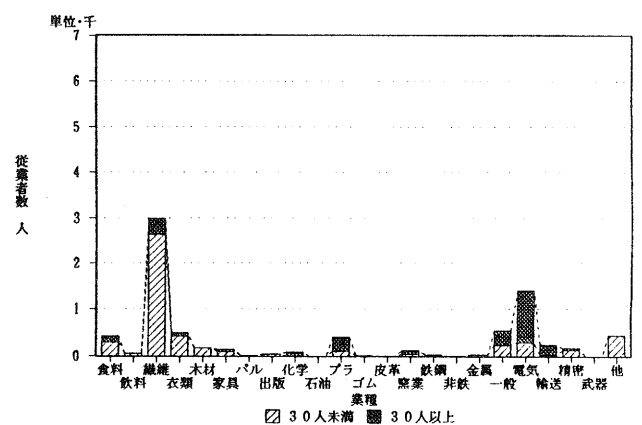


図36 湖西地域 従業者分布 (従業者規模別)



**工業技術センター研究報告**

第 8 号

平成6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