

平成 11 年度

(第 13 回)

若い研究者を育てる会研究発表会

# 研究論文集

平成 12 年 3 月 16 日(木)

於：名鉄トヤマホテル

若い研究者を育てる会

The Educational Society for Young Research Workers of Technology, in TOYAMA

本書は下記の研究機関の指導のもとに作成された。

記

富山県工業技術センター  
富山大学工学部  
富山県立大学工学部  
富山県高志リハビリテーション病院  
富山医科大学

## ご あ い さ つ

会長 田 中 一 郎

若い研究者を育てる会の発表を聞き、30年前の自分の姿を鏡で見る様でした。研究テーマについてコンセプト、目的、目標等に思い巡らし、「若き技術者としてどうすれば良いか」と悩んだ頃が非常に懐かしく思い出されました。

研究テーマとしては直接企業に関連しないものもあるかも知れませんが、テーマを通し、物の見方、考え方は共通するものです。

成果はもとより、まとめ方、発表の仕方も技術者の実力のうちです。年4回の発表で始めはどうなることかと心配したことでも事実ですが、終わりになると立派な成果とすばらしい報告が聞けることに驚いています。

毎年、何も分からぬ若い人達を受け入れ、研究のイ・ロ・ハから懇切、丁寧にご指導していただき、これを背景に企業の技術者として立派な人間へと育っている人が多くいます。これも偏に機械電子研究所の方々、大学の諸先生方や県当局、技術開発財團の支えがあるからこそと感謝しております。また、若い研究者を派遣していただいている企業の方々にも感謝する次第です。



## 研究の概要

富山県工業技術センターPJ推進担当 工学博士 谷野 克巳

本書は、『若い研究者を育てる会』に参加する企業（会員企業数19社）の研究者が8つの研究課題とグループを定め、平成11年5月から富山県工業技術センターにおいて、8グループ（8テーマ）が実施してきた研究の成果をまとめたものである。なお、8テーマの内2テーマについては、富山大学工学部および富山県立大学工学部が研究指導協力を行なった。

ここでは、まず最初に富山県工業技術センターで実施した8テーマの研究の内の6テーマの研究概要について述べ、次に富山大学工学部が研究指導協力した1テーマの研究概要、最後に富山県立大学工学部が研究指導協力した1テーマの研究概要について述べる。なお、下記の研究テーマの順番は本書の目次の順番とは異なる。



①「機能性高分子を用いたアクチュエータの開発」の研究グループ（参加企業2社）では、しなやかに外部環境に応答する新規のアクチュエータの可能性を開発する目的で、形状記憶性や導電性などの機能を持った高分子材料の諸特性に検討を加えた。

この研究から、(1)ポリノルボルネンは折り曲げたシートが数秒で元の形状に戻る大きな変位量が得られる、(2)ポリアニリンは化学的脱ドーピングでは大きな変位量が得られるが、電気化学的ドーピング、脱ドーピングでは反応速度に問題があり、大きな変位は得られない、などの成果を得た。

②「コーティング工具の密着性向上に関する研究(2)」の研究グループ（参加企業1社）では、スパッタリング法により試作した硬質膜コーティング工具の耐摩耗性を評価し、また、硬質膜と超硬材料（基材）との密着性に関する非破壊検査法に検討を加えた。

この研究から、(1)試作したコーティング工具の寿命は超硬WC工具の3/4~4/5倍、市販コーティング工具の4/3~3/2倍であった、(2)母材の表面形態とコーティング膜の表面形態とを比較することによって、コーティング工具の寿命予測をする非破壊検査法に検討を加え、検査に関する一つのガイドラインが得られた、などの成果を得た。

③「深層水および藻類を利用した太陽光発電の基礎研究」の研究グループ（参加企業2社）では、藍藻類を指定倍地および深層水を用いて培養を試み、培養した藍藻類の太陽光発電能力および持続時間などに検討を加えた。

この研究から、(1)太陽光発電用藍藻類として検討されているシネココッカスの培養では、深層水による培養は指定倍地による培養と比較して成長が著しく遅い、(2)シネココッカスによる光発電能力は、発電効率は0.07%で持続時間は7時間前後、栄養剤用藍藻のスピルリナの場合は、発電効率は0.002%であるが、持続時間は70時間以上である、などの成果を得た。

富山県工業技術センターPJ推進担当 工学博士 藤城 敏史

④「山岳遭難者探索システムの探索性能向上に関する研究」の研究グループ（参加企業1社）では、現在使用されている探査システム（ヤマタン）の位置探査性能の向上を目標として、指向性の高いアンテナの開発と、現在使用している周波数より高い周波数の利用による探査性能の評価を行なった。

この研究から、(1)発信器を4mの雪中に埋没させても電界強度はほとんど減衰しない、(2)25cmのスイス・クワッド・アンテナで高い指向性や利得が得られた、(3)一定の間隔を隔てた2つのアンテナに入射する400MHz帯の電波の位相を測定する方法により、到來電波の方位を±5度の精度で測定できた、などの成果が得られた。



⑤「プラスチックス上のハードコーティング技術の研究」の研究グループ（参加企業1社）では、耐衝撃性に優れたポリカーボネート樹脂版の表面に酸化シリコン(SiO<sub>2</sub>)を下方照射真空蒸着法で成膜することによって、軽量かつ耐摩耗性の高い複合板ガラスを試作した。

この研究から、(1)SiO<sub>2</sub>の蒸着成膜速度は75nm/secを達成した、(2)基板を搬送しながら成膜し、4μmの膜厚を得た、(3)大面積でもほぼ均一な膜が得られた、(4)素材の表面硬度をHBから4Hまで向上させることができた、(5)SiO<sub>2</sub>とCuバックングプレートのポンディング技術を確立した、(6)ITOでも下方真空蒸着ができることが確認された、などの成果が得られた。

⑥「エンジンの動弁機構における構造解析および強度評価」の研究グループ（参加企業1社）では、自動車エンジンの高出力化の際に問題となる動弁機構の最適設計を図るため、最小限の自由度を有するばね一質点系の有限要素モデルを適用し、そのシミュレーション結果と実機の性能を評価した。

この研究から、(1)ばね一質点系モデルでは、カムシャフトの回転数が約3000r.p.m.まではバルブとロッカーアームの挙動はカムシャフトに追従し、バウンス現象も適切に評価できる、(2)カムシャフトの挙動に追従しなくなる限界回転数は、実機では4500r.p.m.、シミュレーションでは3500r.p.m.であった、(3)動弁機構の部品相互の衝突により、最大26.1kNの荷重が作用する、などの成果が得られた。

富山大学工学部 工学博士 龍山 智榮

⑦「インテリジェントにおいセンサの開発」の研究グループ（参加企業2社）では、新築住宅室内に飛散するVOC（揮発性有機化合物）の中にはどのような系統のVOCが多く含まれているのかについて、推測可能か否かの検討を行った。推測方法として、集積化ガスセンサを用いて各種のVOCに対する感度及び応答特性のレーダチャートの解析を行った。

この研究から、(1)官能基ごとに高感度を示すセンサ要素が異なることを利用して、17種類のVOCを各種センサの感度を示すレーダチャートから官能基別に分類できた。(2)VOCによって各センサ要素の応



答速度が異なるため、応答速度のレーダチャートもガスの識別に有効であった。(3)加算性が成り立つ複数のガスが混合されている場合、高濃度のガスやにおいの強いガスが、ほぼレーダチャートの形状を決める。

以上のことから、室内に飛散するガス種を推定する1手法として、集積化センサを用い、その感度や応答速度のレーダチャートを活用する方法が有効であることがわかった。

富山県立大学工学部 工学博士 山本 優久

⑧「微細放電加工の研究(2)」の研究グループ(参加企業1社)では、  
近年の機械部品の微細加工への要求に応えるため、小径電極による微細  
輪郭加工における加工面あらさ低減方法について検討した。

この研究から次の結果を得た。

(1)電気条件として、加工面あらさの低減に適した電源回路を明らかにした。また、加工条件として、粉末混入加工油の影響を明らかにした。  
(2)放電点近傍に粉末混入油を送ることで、従来型の放電加工機で粉末混入油中放電が可能であった。(3)粉末混入油を噴射しながら小径電極で輪郭加工を行う方法を明らかにし、これを刻印加工に適用したところ、 $0.24 \mu\text{m Ra}$ の光沢面の加工が可能であった。



以上、本書は8つの独立した研究課題と結果から構成されているが、これらの研究は必ずしも完成されたものではなく、今後も本会もしくはそれぞれの企業などにおいて、継続して研究を進めていく必要があるものと考えている。また、過去13年間で実施した81テーマの成果はすでに関連学会で発表、もしくは今年中に発表を予定している。特許出願に関しては、本会の研究は必ずしも企業化を目的とはしていないにもかかわらず、過去に共同で10件程度出願している。

また、本研究で得られた成果の内の幾つかのものは、企業化や生産ラインの自動化などに応用されている。従って、これらの研究を遂行する過程で得られた様々な成果は、本会会員企業ならびに本県産業の科学技術力、工業技術力向上と発展などのために十分に役立つものであることを確信している。

なお、本会の研究を推進するにあたり、内外の方々より多大なご助力、ご助言を賜わったことに対しまして、深く感謝の意を表します。

(谷野記)

平成12年3月

## 研究グループの構成

## I. 山岳遭難者探索システムの探査性能向上に関する研究グループ

研究担当者 前田 智博（立山科学工業㈱）

研究指導者 ○浅田 峰夫（工業技術センター中央研究所）

塚本 吉俊（ “ ” 企画管理部）

高瀬 洋（県警察本部山岳警備隊）

☆藤城 敏史（工業技術センターPJ推進担当）

## II. インテリジェントにおいてセンサの研究グループ

研究担当者 東堂 浩次（ヨーセル株）

小森 一哉（北陸電氣工業株）

研究指導者 ○角崎 雅博（工業技術センター機械電子研）

藤城 敏史（ “ ” PJ推進担当）

谷野 克巳（　　"　　"　　）

☆龍山 智榮（富山大学工学部）

### III. 微細放電加工の研究（2）グループ

研究担当者 太田 光則（株）齊藤製作所

研究指導者 ○杉森 博（工業技術センター機械電子研）

上野 実 ( " " )

藤井 弘之 ( 1952 )

中川 章 ( 1922 - )

谷野 克巳（　　〃　　PJ推進担当）

☆山本 偷久（富山県立大学工学部）

#### IV. 機能性高分子を用いたアクチュエータの開発研究グループ

研究担当者 山田 浩美（東洋化工㈱）

小中 稔正（YKK㈱）

研究指導者 ○寺澤 孝志（工業技術センター機械電子研）

二口 友昭（ “ ” ” ” ）

松田 敏弘（富山県立大学工学部兼機電研）

☆谷野 克巳（工業技術センターPJ推進担当）

#### V. プラスチックス上へのハードコーティング技術の研究グループ

研究担当者 高橋 伸忠（㈱タカギセイコー）

研究指導者 ○高林 外広（工業技術センターPJ推進担当）

本保 栄治（ “ ” 中央研究所）

岩坪 聰（ “ ” 機械電子研）

水野 渡（ “ ” 中央研究所）

☆藤城 敏史（工業技術センターPJ推進担当）

#### VI. エンジンの動弁機構における構造解析及び強度評価グループ

研究担当者 島村 和彦（田中精密工業㈱）

研究指導者 ○佐山 利彦（工業技術センター機械電子研）

森本 英樹（ “ ” ” ” ）

☆藤城 敏史（ “ ” PJ推進担当）

#### VII. コーティング工具の密着性向上に関する研究（2）グループ

研究担当者 高田 智哉（田中精密工業㈱）

研究指導者 ○森本 英樹（工業技術センター機械電子研）

高林 外広（ “ ” PJ推進担当）

清水 俊治（ “ ” 生活工学研）

☆谷野 克巳（ “ ” PJ推進担当）

#### VII. 深層水及び藻類を利用した太陽光発電の基礎研究グループ

研究担当者 石川 勝巳 (コーセル㈱)

坂本 雅美 (㈱齊藤製作所)

研究指導者 ○牧村めぐみ (工業技術センター中央研究所)

山崎 茂一 ( " " )

角崎 雅博 ( " " 機械電子研)

長谷川益夫 (林業技術センター木材試験場)

小善 圭一 (水産試験場)

☆谷野 克巳 (工業技術センターPJ推進担当)

註：各グループ中、企業名は50音順

○印は各研究グループのチーフ

☆印は研究幹事

# 目 次

I.	山岳遭難者探索システムの探索性能向上に関する研究	-----	1
1.	緒 言	-----	1
2.	山岳遭難者探索システム	-----	1
3.	受信アンテナの検討	-----	3
4.	試作アンテナの指向性	-----	4
5.	到来波探索法の検討	-----	5
6.	結 言	-----	6
II.	インテリジェントにおいてセンサの研究	-----	7
1.	緒 言	-----	7
2.	実験方法	-----	8
3.	実験結果及び考察	-----	9
4.	結 言	-----	13
III.	微細放電加工の研究 (2)	-----	14
1.	緒 言	-----	14
2.	粉末混入油中放電加工	-----	14
3.	加工条件の検討	-----	14
4.	従来加工機への応用	-----	16
5.	加工方法の検討	-----	18
6.	結 言	-----	21
IV.	機能性高分子を用いたアクチュエータの開発研究	-----	22
1.	緒 言	-----	22
2.	P N o の形状記憶動作	-----	22
3.	P A A の形状記憶	-----	24
4.	P A n のドーピングと体積変化	-----	24
5.	結 言	-----	29
V.	プラスチックス上へのハードコーティング技術の研究	-----	30
1.	緒 言	-----	30
2.	下方照射型真空蒸着の原理	-----	31
3.	実験装置	-----	31
4.	実験結果と考察	-----	32
5.	ボルト締め以外のターゲット固定方法の検討	-----	35
6.	I T O ターゲットの検討	-----	36
7.	結 言	-----	36

<b>VI. エンジンの動弁機構における構造解析及び強度評価</b>	-----	3 7
1. 緒　　言	-----	3 7
2. エンジンの動弁機構とその解析	-----	3 7
3. 動弁機構のモデル化	-----	3 8
4. 振動特性の決定	-----	3 9
5. 動弁機構の応答解析	-----	4 1
6. 動弁部品の構造解析および強度評価	-----	4 3
7. 結　　言	-----	4 4
<b>VII. コーティング工具の密着性向上に関する研究（2）</b>	-----	4 5
1. 緒　　言	-----	4 5
2. コーティング工具の概要	-----	4 5
3. 切削試験	-----	4 7
4. 非破壊検査に関する調査・研究	-----	4 9
5. 結　　言	-----	5 1
<b>VIII. 深層水及び藻類を利用した太陽光発電の基礎研究</b>	-----	5 2
1. 緒　　言	-----	5 2
2. 光合成微生物電池の特徴	-----	5 2
3. 深　層　水	-----	5 4
4. 培　　養	-----	5 4
5. 発　電　実　験	-----	5 6
6. 結　　言	-----	5 8
○各研究グループの研究風景	-----	付- 1
○「若い研究者を育てる会」13年間の研究活動の足跡	-----	付- 9
○第6回『自作ミニチュアシン・サカゲームコンテスト』の概要	-----	付-17
○会員企業および研究幹事名簿	-----	付-18
○入会申込書	-----	付-19

# I. 山岳遭難者探索システムの探索性能向上に関する研究

## Improvement of the Mountain Victim Search System

前田 智博

MAEDA Tomohiro

高瀬 洋

TAKASE Hiroshi

浅田 峰夫

ASADA Mineo

藤城 敏史

FUJIKI Satoshi

塚本 吉俊

TSUKAMOTO Yoshitoshi

### Abstract

The mountain victims who was missing caused by the avalanches has to be suddenly found and rescued. The search system for the mountain victims use the method of finding a weak radio wave from the transmitter of which they carry every time they climb. A purpose of this study is to improve the performance of the mountain victims search system for practical use.

The results of this study are follows,

- (1)The field attenuation was not recognized even if the transmitter was buried in snow with 4m depth.
- (2)We tried to fabricate the three kinds of antennas which were helical antenna, 6 elements Yagi-Uda antenna and Swiss quad antenna. Above all, Swiss quad antenna was the most excellent in directivity and handling.
- (3)According to phase shift method using two anntennas, we obtained to find the direction of the transmitter within  $\pm 5$  degree accuracy.

### 1. 緒 言

山岳遭難者探索システムは遭難者の捜索を迅速、的確に行うため微弱電波を利用する方式である。このシステムは現在、富山県山岳警備隊により運用されており、登山者が微弱電波発信器をペンダントの要領で首から下げ、登山中に雪崩などで行方不明となつた場合、発信器からの電波を受信し、その位置を特定して遭難者の早期発見に役立てようとする方式である。しかし、現在運用されているシステムは必ずしも探索性能が十分とは言えず、性能向上が期待されている。

本研究では、この探索システムの性能向上と小型化を図るために、まず、現在使われているシステムの中で特に発信器と受信アンテナについて調査を行った。次に、アンテナの小型化を図るために使用周波数を50MHz帯から400MHz帯に移行し、小型アンテナについて検討した。さらに、試作した2基のクワッド型アンテナを用いて、位相差法などにより到來電波の方位を探索するための基礎的な実験を行ったので、その結果を報告する。

から発信される微弱電波を上空の探索用ヘリコプターで受信し、発信エリアをおおまかに特定する。次に、ヘリコプターで収集されたエリア情報を探索隊に連絡する。探索隊はアンテナおよび受信機を携帯し、発信電波を受信しながら遭難地点を探査する。

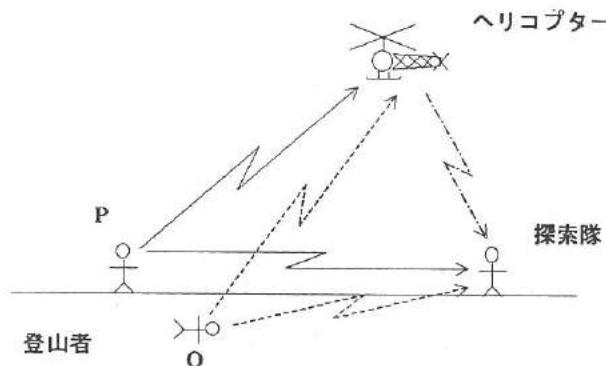


図1 山岳遭難者探索システムの概要

Fig.1. Schematic figure of mountain victim serch system.

### 2. 山岳遭難者探索システム

#### 2. 1 概 要

図1にシステムの概要を示す。発信器を携行した登山者がP点(地上)またはQ点(雪中)で遭難したとする。まず、遭難地点

#### 2. 2 発信器の特性調査

##### 2. 2. 1 概 要

図2に現在使用されている発信器の外観を示す。また、表1にその基本仕様を示す。この発信器は登山者が携帯中、常時微弱電

波を 0.8 秒間隔で間欠発信するようになっている。また、発信器のアンテナとして本体からワイヤが出ていて、緊急時には、このワイヤアンテナを延ばして出力を大きくすることができます。

表 1 現在使用中の発信器の基本仕様

Table 1. Basic specifications of the present transmitter.

1. 主な仕様	
送信周波数	50MHz帯
出力	500 $\mu$ V/m (3m法)
発信方式	間欠発信 (0.8sec間隔)
パルス幅	11msec
電源	3Vリチウム電池
電池寿命	約4ヶ月
2. 形状	
直 径	30mm
厚 さ	9mm
重 さ	13.5g
アンテナ長	通常250mm、最大600mm

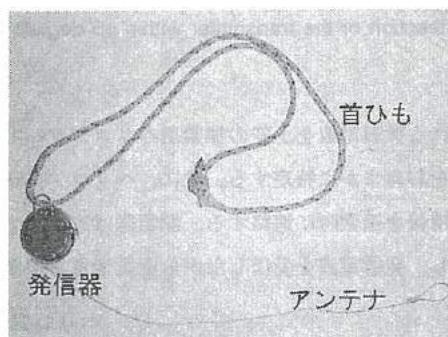


図 2 発信器の外観

Fig.2. Appearans of the transmitter.

### 2. 2. 2 発信器の指向性

現在用いられている発信器を地上 1.5m に水平に設置して、ワイヤアンテナを垂れ下がり状態とし、そこから水平距離 3m 離れた位置に半波長ダイポールアンテナを設置し、受信装置としてスペクトラムアナライザを用いて発信器の指向性を測定した。この測定方法は通常よく用いられる 3m 法に準拠している。図 3 に、試料 No.1 ~ 3 についての測定結果を示す。この結果、発信器の電界強度は測定方位によって最大約 7dB の違いがあった。また、ワイヤアンテナの長さが通常時 (250mm) と最長時 (600mm) では出力電界強度は約 15dB 異なった。このため、出力を一定にし無指向性にするためには、アンテナの形状を外部の影響を受けない構造にする必要がある。たとえば、微小ループアンテナをプリントパターンで構成するなどの方法が考えられる。

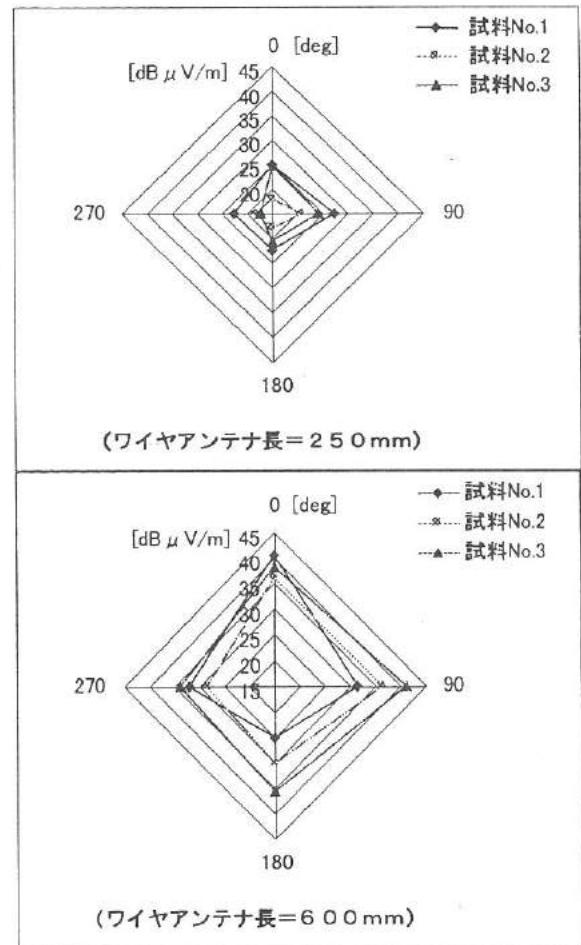


図 3 発信器の出力電界強度及び指向性

Fig.3. Electric field and directivity of the transmitter.

### 2. 2. 3 発信器の距離-出力電界強度特性

半波長ダイポールアンテナ及びスペクトラムアナライザを用い

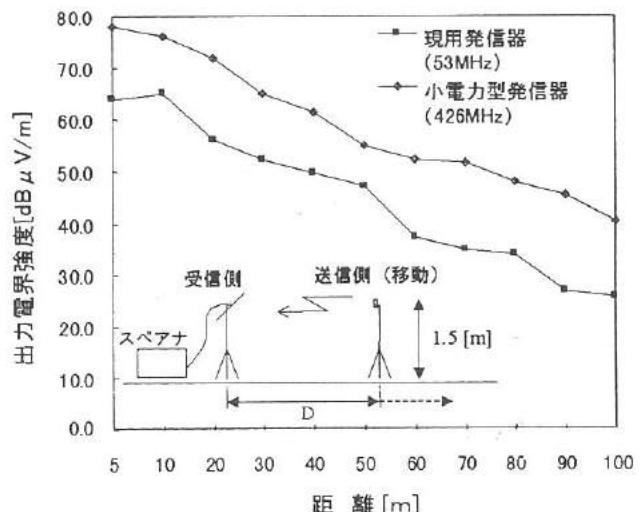


図 4 発信器の距離-出力電界強度特性

Fig.4. Relationship between the electric field and distance.

て地上における発信器の距離と出力電界強度について測定した。比較のため、400MHz 帯の小電力型発信器 (1mW) についても同時に測定した。図 4 に測定結果を示す。図より、50MHz 帯と 400MHz 帯では同じような減衰特性を示した。

#### 2. 2. 4 発信器の雪中埋没時の特性

立山室堂平で残雪を利用し雪中埋没状態にある発信器の特性を調査した。あらかじめ発信器を雪中に埋設し、深さを変化させ、その時の出力電界強度を半波長ダイポールアンテナとスペクトラムアナライザを用いて測定した。図 5 に、測定方法の概要を、図 6 に測定結果を示す。今回の実験では発信器を深さ 4 m まで埋没

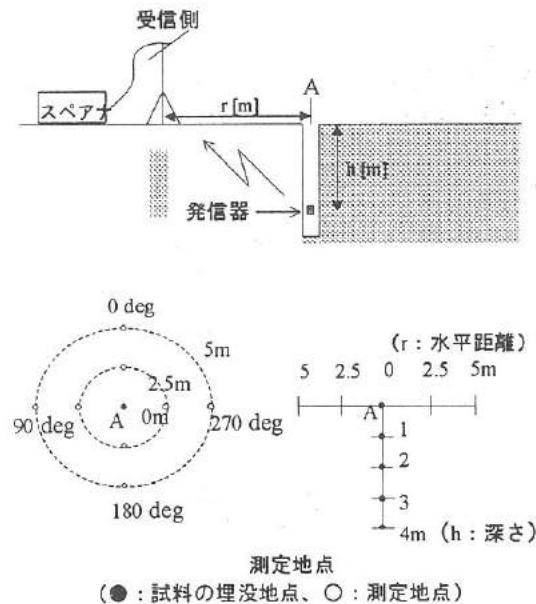


図 5 雪中における測定方法

Fig.5. Measurement method in the snow.

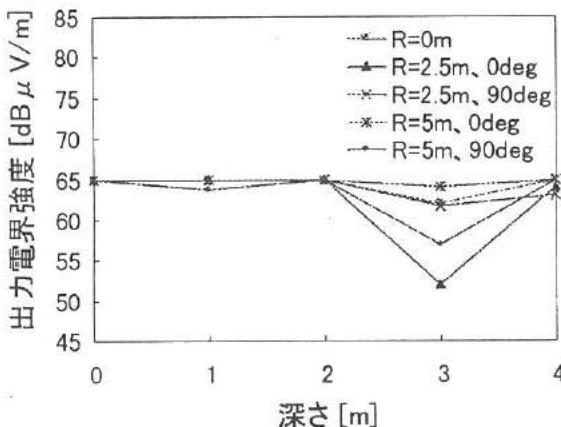


図 6 雪中埋没時の出力電界強度

Fig.6. Electric field in the snow.

させても電波の大きな減衰は認められなかった。しかし、これは状況を変えて実験回数を重ねる必要がある。また、深さ 3m 付近で測定方向によっては最大 10dB ほどの減衰がみられたが、この理由として雪中と空気中における電波伝搬速度の違いにより電波が屈折することが考えられるが、原因は明らかでない。

#### 2. 3 受信アンテナの特性調査

現在使用されている受信アンテナ（八木アンテナ）の 50MHz 帯における指向性を 3m 法にて測定した。図 7 に示す測定結果から、この受信アンテナは 50MHz 帯において指向性が良くなく、全方向から電波を受信してしまうことが分かった。この理由として、このアンテナは携帯性を考慮して小型にしたために到来電波と整合がとれず、八木アンテナ本来の鋭い指向性が発揮されていないことが考えられる。

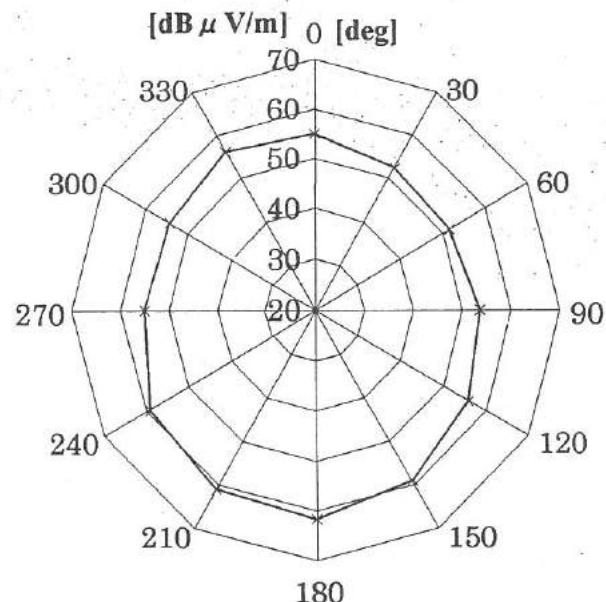


図 7 現行受信アンテナの指向性

Fig.7. Directivity of the receiving antenna now in use.

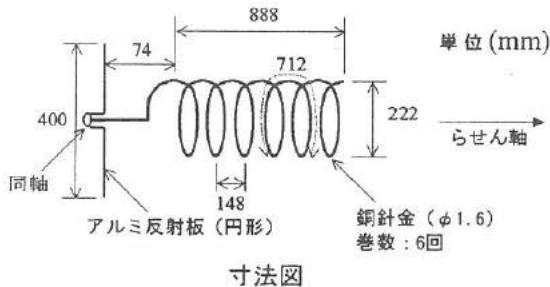
#### 3. 受信アンテナの検討

到来電波の方位測定精度を向上させるには、指向性が鋭いアンテナが必要である。また、携帯性の点からアンテナの小型化が求められ、これには、使用周波数を高くする必要がある。

このため今回は、使用周波数を 50MHz 帯から 400MHz 帯に移行し、指向性に優れた小型アンテナとして、ヘリカルアンテナ、6 エレメント八木アンテナ、スイス・クワッド・アンテナの 3 種類のアンテナを試作した。

### 3. 1 進行波アンテナ

ヘリカルアンテナは代表的な進行波アンテナであり、特に指向性に優れた特性を持っている。しかし、電波を軸方向から受信させるためには、その方向に導体コイルを長くする必要があり、アンテナ形状が大きくなる。図 8 にその概要を示す。



寸法図

図 8 ヘリカルアンテナの概要

Fig.8. Appearans of the helical antenna.

### 3. 2 共振アンテナ

6 エレメント八木アンテナ、スイス・クワッド・アンテナは、導体に定在波がのる共振アンテナである。

八木アンテナは現在最も普及しているアンテナで、導波器、給電器、反射器とで構成されているが、指向性を向上させるためにエレメントを増やすと大型になるのが欠点である。

これに対して、スイス・クワッドアンテナは 1 波長ループアンテナが 2 対で構成され、そのどちらにも給電する方式であり、400MHz 帯では他のアンテナと比較して小型にできるという利点がある。試作したスイスクワッドアンテナの外観を図 10 に示す。このアンテナの周波数整合性を調査するため、ネットワークアライザを用いて、アンテナの反射特性を測定した。測定結果を図 11 に示す。図より、420MHz 付近で反射波が急激に減少し、定在波比 (VSWR) は 1.2 以下まで下がった。したがって、このアンテナは周波数が 420MHz 付近で受信感度が最高となり、指向性が最も鋭くなることが予想できる。

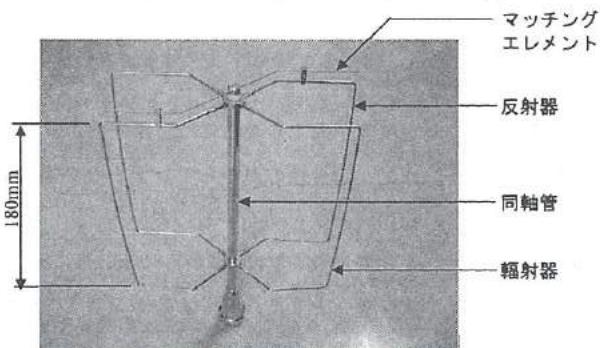


図 9 スイスクワッドアンテナの外観

Fig.9. Appearans of the Swiss quad antenna.

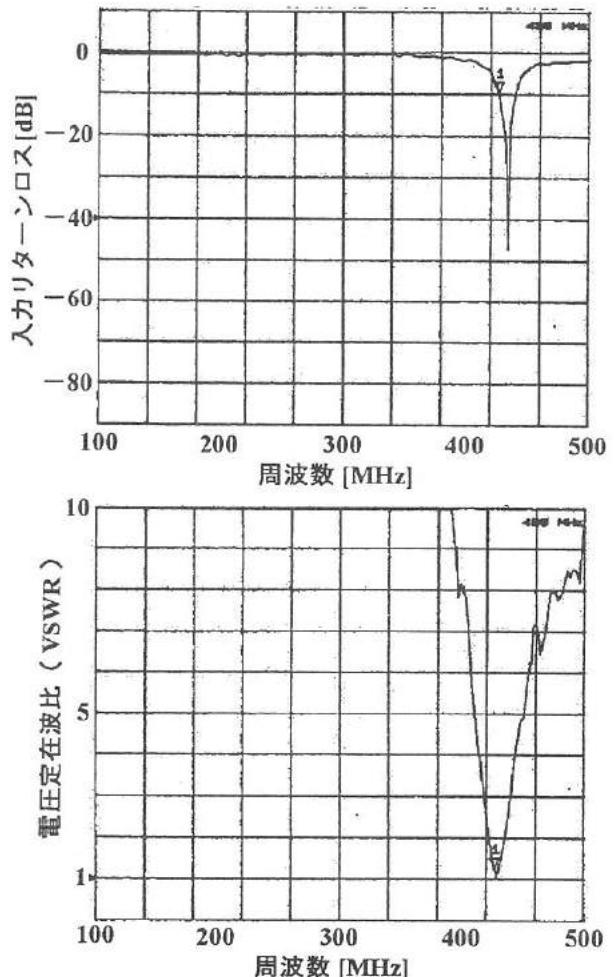


図 10 スイスクワッドアンテナの反射特性

Fig.10. Reflection loss of the Swiss quad antenna.

### 4. 試作アンテナの指向性

試作した 6 エレメント八木アンテナとスイスクワッドアンテナの 400MHz 帯における指向性を 3m 法に準拠して測定した。測定結果を図 12 に示す。どちらも現在用いられている UHF アンテナよりも指向性が良い結果となった。

ただし、ヘリカルアンテナはさらに指向性が高い結果が得られたが、直径が約 40cm、全長が約 1m の円筒形の大きさとなり、携帯性の点から除外した。これに対して、スイスクワッドアンテナは図 9 の外観に示すように全体で約 25cm × 20cm × 10cm の大きさで構成でき、小型で指向性が高く利得も高いことが確認できたので、以下の電波探索実験に採用した。

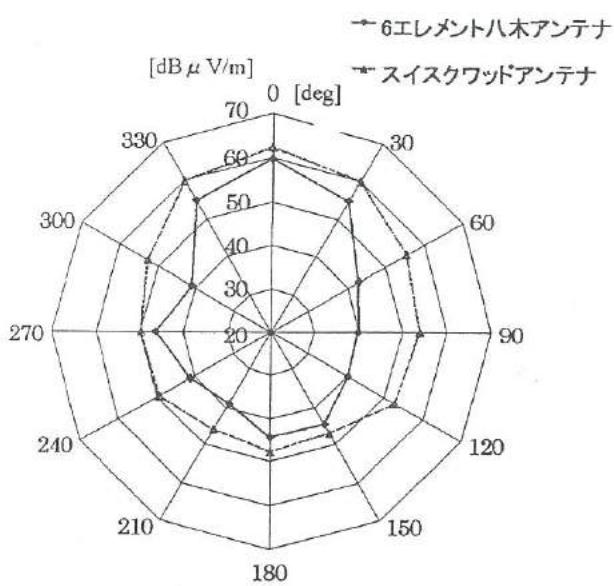


図 11 試作受信アンテナの指向性  
Fig.11. Directivity of the fabricated antennas.

## 5. 到来波探索法の検討

### 5. 1 到来電波の方位測定

電波を用いて目標物の位置を探索する方法の一つとして、一定の間隔を隔てた 2 つのアンテナに入射する電波の強度を合成したり位相差を測定する方法がある。いま、アンテナ間隔を  $D$ 、到来方向を  $\theta$  とすると図 12 から受信位相の差  $\phi$  (位相角) は

$$\phi = \frac{2\pi D \sin \theta}{\lambda} \quad (1)$$

のように与えられ、 $\phi$  の測定によって  $\theta$  が得られることになる。

この位相差方式は、アンテナ間隔  $D$  を波長  $\lambda$  に比べて大きくするほど測定精度は向上するが、 $\theta$  の変化にともなう  $\phi$  の変化が 360 度 ( $2\pi$ ) を越えてしまい、 $\theta$  が特定できなくなる。

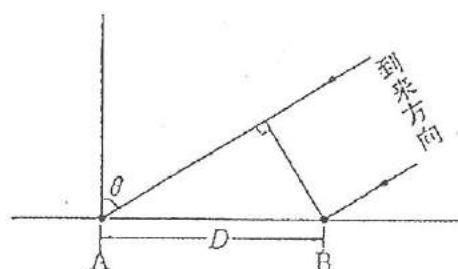


図 12 位相差法

Fig.12. Schematic figure of phase shift method .

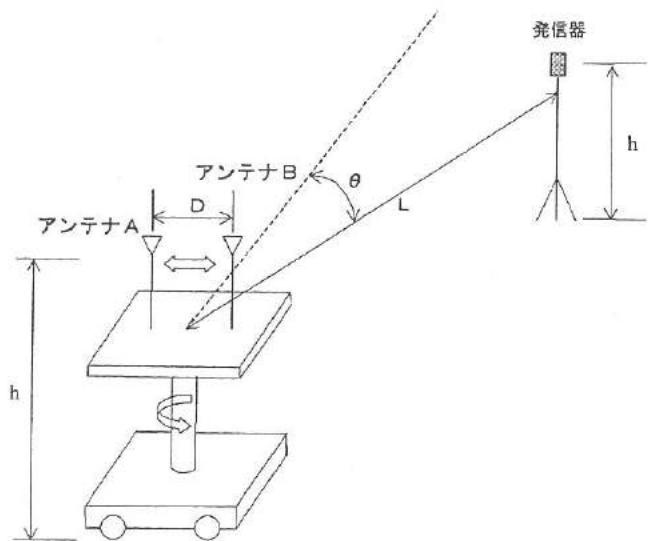


図 13 到来波探索実験の概要

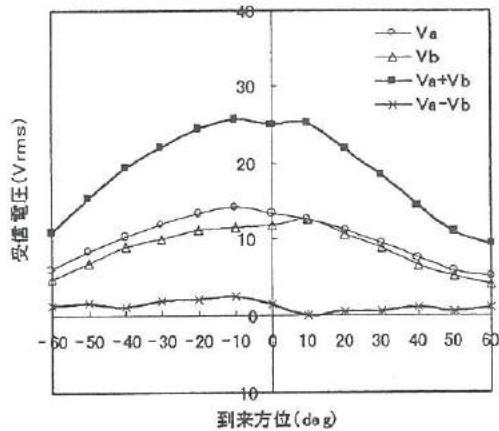
Fig.13. The method of the finding direction.

### 5. 2 到来波の方位測定結果

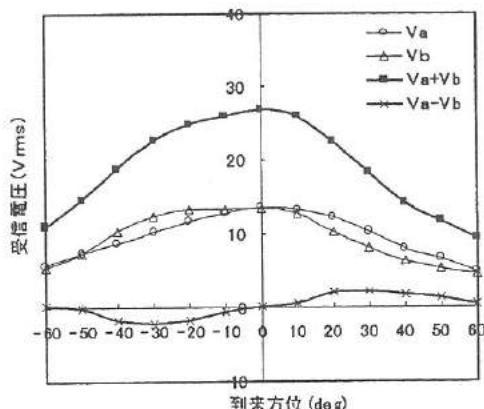
図 13 に示すように、試作したスイスクワッドアンテナ 2 基 (A、B) を一定の間隔で並べて 1.5m の高さに設置し、距離  $d$  離れた同じ高さに設置した無指向性発信器 (430MHz) からの電波を受信した。二つのアンテナ出力は同軸ケーブルで延長し、試作したプリアンプ (利得約 20dB) を介して、デジタルオシロスコープ (ch1, ch2) に接続し、受信電圧を測定した。

図 14 には、発信器とアンテナとの距離が 5m の場合について、アンテナ A, B の間隔を  $2/4 \lambda$ 、 $3/4 \lambda$ 、 $4/4 \lambda$  と変化させたとき、受信電圧  $V_a$ 、 $V_b$  並びにそれらの和と差の合成値と電波到来方位の関係を、同様に、図 15 には受信電圧  $V_a$ 、 $V_b$  の位相差と電波到来方位の関係を示す。図より、アンテナ間隔を  $\lambda/2$  から  $\lambda$  まで広げると受信電圧  $V_a$ 、 $V_b$  の合成値が大きくなる傾向を示し、さらに、受信電圧の左右対称性も良くなった。これはアンテナ間隔が狭いとアンテナ同士がお互いに干渉して、受信電圧をうち消し合い、個々のアンテナの特性が発揮できないためと考えられる。また、アンテナ間隔  $D$  が広がるにつれ受信電圧  $V_a$ 、 $V_b$  の位相差  $\phi$  の変化が大きくなつた。これは、式(1)から予想できる。

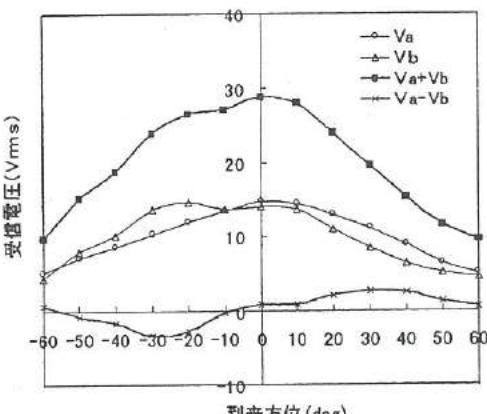
これらの結果、発信器の電波到来方位を探索する方法として、2 つのアンテナの受信電圧の合成値のピークや差の大きさを利用して概略的な方位を決め、さらに、受信電圧の位相差を用いる方法が有力な方法の一つであることが分かった。この方法により、電波方位精度が ±5 度まで向上できることが分かった。この際、アンテナ同士の間隔は  $3/4 \lambda$  以上離す必要がある。



(a)  $D = 2/4 \lambda$ ,  $L = 5m$



(b)  $D = 3/4 \lambda$ ,  $L = 5m$



(c)  $D = 4/4 \lambda$ ,  $L = 5m$

図 14 電波到来方位と受信電圧特性

Fig.14. Relationship between the direction of electromagnetic wave and received voltage.

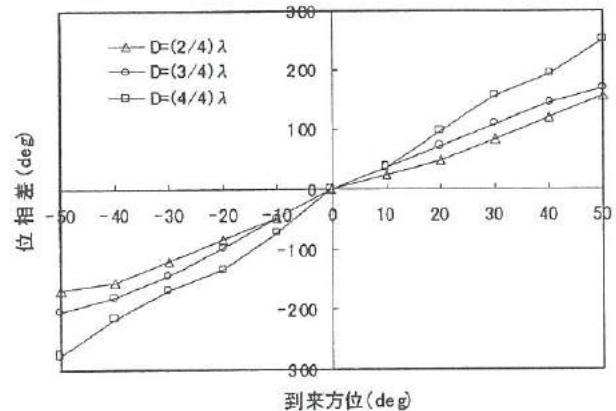


図 15 電波到来方位と位相差特性

Fig.15. Relationship between the direction of electromagnetic wave and phase shift .

今後、これまでの基礎実験に基づいて、いかに実用的な装置にまで発展させるかが課題である。また、400MHz 帯など高い周波数において山岳遭難者探索を目的とした小電力型無線機の許可申請も必要となる。

## 6. 結 言

本研究では、山岳遭難者探索システムの性能向上を目的として、まず、現在使われてシステムの中で特に発信器とアンテナについて調査した。次にアンテナの小型化を図るために使用周波数を50MHz帯から400MHz帯に移行させ、小型アンテナについて検討した。

さらに、この中で試作した2基のクワッド型アンテナを用いて、位相差法など到来電波方位を探索するための基礎的な実験を行った。これらの実験により得られた成果を以下に示す。

- (1) 発信器を雪中 4m に埋没させても電界強度の大きな減衰は認められなかった。
- (2) 現在、受信用に使用されている八木アンテナは、発信器の周波数と整合がとれていないため、本来の指向性能が十分發揮されていない。
- (3) スイス・クワッド・アンテナは約 25cm の大きさで構成でき、小型で指向性が高く利得も高いことが確認できた。
- (4) 一定の間隔を隔てた 2 つのアンテナに入射する電波の位相差を測定する方法により、到来電波の方位精度を±5度まで向上させることができた。

### <参考文献>

- (1) 角居 他 ; アンテナ・ハンドブック (CQ出版社)
- (2) 電子情報通信学会 ; アンテナ工学ハンドブック 他
- (3) 松尾 他 ; 電波・通信工学 P145~153

## II. インテリジェントにおいてセンサの研究

### Development of an Intelligent Gas Sensor for VOC

石川 勝己

ISHIKAWA Katsumi

藤城 敏史

HUJIKI Satoshi

小森 一哉

KOMORI Kazuya

谷野 克巳

TANINO Katsumi

角崎 雅博

KADOSAKI Masahiro

龍山 智榮

TATSUYAMA Chie

#### Abstract

Recently, sick-house syndrome receives public attention as a problem of indoor environment. Volatile organic compounds (VOC) such as formaldehyde (HCHO) and toluene ( $C_6H_5CH_3$ ) generated from building materials are pointed out as one of the main cause of sick-houses syndrome. In order to develop semiconductor gas sensor available to discriminate chemical species of these VOC, integrated thick-film gas sensors which are composed of  $SnO_2$ ,  $In_2O_3$ ,  $ZnO$ ,  $WO_3$ ,  $Co_3O_4$  and  $Cr_2O_3$  was fabricated on  $Al_2O_3$  substrates. The present study was focused on examining the possibility of this sensor to discriminate 15 chemical species in VOC by pattern matching method using polar plots. First, the polar plots were constructed for each chemical species. These plots were classified into 7 groups, each of which has a characteristic shape depending on the functional group of chemical species. Next, the polar plots response time of  $SnO_2$ ,  $In_2O_3$  and  $WO_3$  were also constructed for several chemical species. They were classified into three types of patterns. The polar plots obtained by the measurements of mixed VOC with known concentration were almost consistent with that of expected pattern. The combination of the polar plots of both sensitivity and response time will assist the precise discrimination of species in VOC.

#### 1. 緒 言

近年「シックハウス症候群」あるいは「化学物質過敏症」とも云われ、住宅の内装材や接着剤等から出る室内空気汚染物質が原因で身体の不調を訴える人が急増し、社会問題となっている<sup>(1)~(3)</sup>。これらの室内汚染物質は、「シックハウス症候群」の最大要因と考えられ、1997年に厚生省より基準値が定められたホルムアルデヒドや VOC（揮発性有機化合物）であることが多い。そのため、住宅室内の空気汚染状況を調査する場合の内容として、(1)基準値が設定されているホルムアルデヒド濃度の測定 (2)VOC の特定とその濃度の検出 (3)TVOC (総 VOC 濃度) の計測などが実施されている<sup>(2)~(6)</sup>。しかし、いずれの測定も測定条件によりデータが変動するなど難しく、また時間もかかるうえ、非常に高価な分析器を必要とするため費用がかさむといわれている。そこで、より安価で、有効的な計測システムの開発が望まれているのが実情である。我々はこれまでに空気汚染度を簡易的に計測するための測定器について検討をしてき

た。酸化物半導体をセンサとして用いる場合、選択性に乏しいなど幾つかの問題が考えられる。反面、ガスセンサとしての実績や多くの研究<sup>(7)</sup>もあり、また安価で高応答、そして集積化が容易という大きな利点もある。我々はこれまでに、ホルムアルデヒド、キシレン、トルエンなどの有害ガスに対して  $SnO_2$ ,  $In_2O_3$ ,  $ZnO$ ,  $WO_3$  の 4 種類の n 型酸化物半導体と  $Co_3O_4$ ,  $Cr_2O_3$  の 2 種類の p 型酸化物半導体が高感度であり<sup>(8)</sup>、また Ag などの貴金属や  $MnO_2$  などの酸化物を添加することによりホルムアルデヒドに対し大幅な感度の向上が図れることを報告してきた<sup>(9)</sup>。

ホルムアルデヒドをはじめとする室内汚染 VOC を特定することは容易なことではなく多くの経験と費用がかかる。そこで、高価な機器を用いなくても汚染ガスをある程度推定できるような方法を見出すことは大変意義深いことと考え、我々は前述の 6 種類の酸化物半導体を用いた集積化ガスセンサ<sup>(10)~(13)</sup>を作成し、室内に飛散する VOC を推定することが可能かどうかを試みた。

## 2. 実験方法

### 2.1 集積化ガスセンサの作成方法及び構造

センサは、厚さ 0.6mm のアルミナ基板上に、スクリーン印刷法により作成した。図 1 に集積化ガスセンサの作成フローを示す。まず、一方の面に Pt 電極を印刷し 100°C で 15 分乾燥後、その裏面に Pt ヒータを印刷して 100°C で 15 分乾燥後、900°C で 1 時間焼結する。その後 Pt 電極の上に、酸化物半導体粉末 ((株)高純度化学研究所製) とバインダー (田中貴金属工業 (株) 製) を調合し、ペースト化した感ガス材料を印刷して、100°C で 20 分乾燥させる。6 種の感ガス材料を一つの基板に集積化させるため、感ガス材料の印刷、乾燥を 6 回繰り返した後、600°C で 1 時間焼結する。次に、Pt リード線 (THE NILACO CORPORATION) を Pt 電極と Pt ヒータに Ag ベースト (田中貴金属工業 (株) 製) で取り付け、100°C で 30 分乾燥後、450°C で 1 時間焼結する。

図 2 は作成した集積化センサの構造である。外形寸法は約 18mm 角であり、センサ材料として用いた酸化物半導体は、 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{WO}_3$  の 6 種類である。

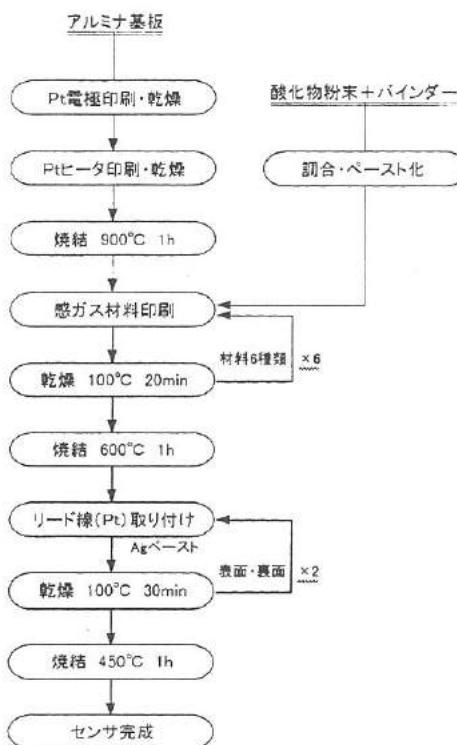


図 1 集積化ガスセンサ作成フロー  
Fig.1 Fabrication process of an integrated gas sensor

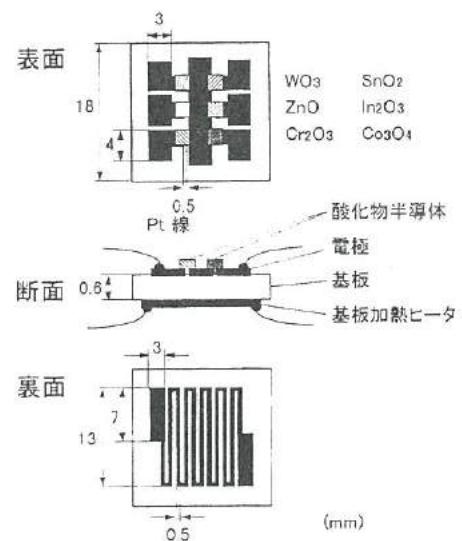


図 2 集積化ガスセンサ構造図  
Fig.2 Schematic structure of integrated gas sensor

### 2.2 実験装置

図 3 は、本研究で用いた実験装置の概要である。チャンバーは、内側が一片 400mm、内容積 64L の立方体であり集積化ガスセンサは上面中央口から取り付ける。また中央口の横に、液体試料を注入する注入口があり、その真下に気化用ヒータが設置してある。液体試料を、マイクロシリンジで必要量採取し、ヒータ上に滴下して気化させ<sup>(8)</sup>、チャンバー内が所定の均一なガス雰囲気中になるよう、内部のファンで攪拌させる。また、チャンバー側面には、排気口を設け、測定終了後にガスを排出できるようになっている。

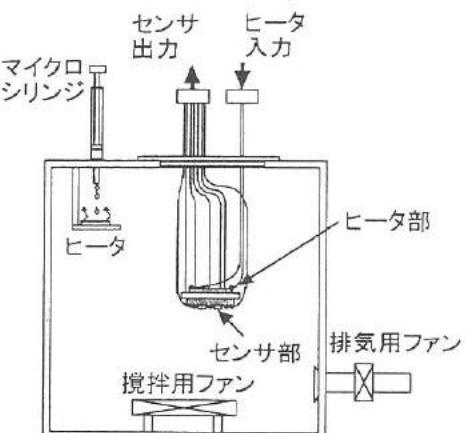


図 3 ガス感度測定用実験装置  
Fig.3 Experimental apparatus for measuring gas sensitivity

### 3. 実験結果及び考察

#### 3. 1 センサの基本特性

図 4 は作成したセンサの印加電圧に対する裏面のヒータ部の温度特性である。温度測定には  $\phi 3\text{ mm}$  の k 型熱電対を用いた。この結果を用い、センサ温度は印加電圧値で調整することとした。図 5 はセンサ温度を変化させた場合の、集積化センサの 6 個のセンサ要素それぞれの空気中の抵抗値変化を示したものである。センサごとに違いはあるが、センサ温度を上げていくと抵抗値が減少していくことがわかる。

図 6 はホルムアルデヒドの濃度 1~1000ppm に対する 6 個のセンサ要素の感度の測定結果である。センサ感度は低濃度領域での誤差を考慮すると、各々のセンサはガス濃度に対して指数的に増加していることがわかる。尚、センサ温度は約 200°C とした。図 6 の結果をレーダーチャートで示したもの図 7 に示す。また図 7 より、レーダーチャートの形状はガス濃度を変えててもほぼ同じである（相似形である）ことがわかる。尚、実験に用いたガス濃度は安定な形状が得られやすい、一律 100ppm とした。

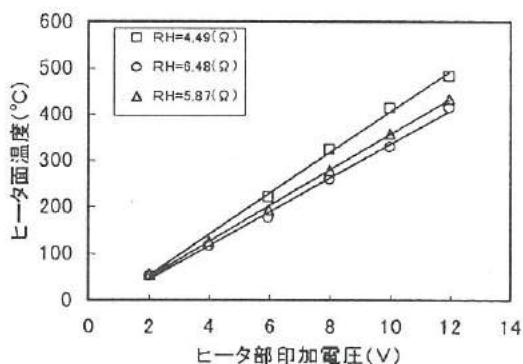


図 4 センサ温度の印加電圧依存性  
Fig.4 Applied voltage dependence of sensor temperature.

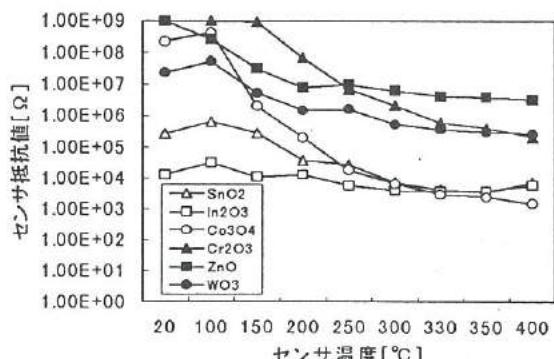


図 5 空気中におけるセンサ抵抗値の温度依存性  
Fig.5 Temperature dependence of sensor resistance value in air.

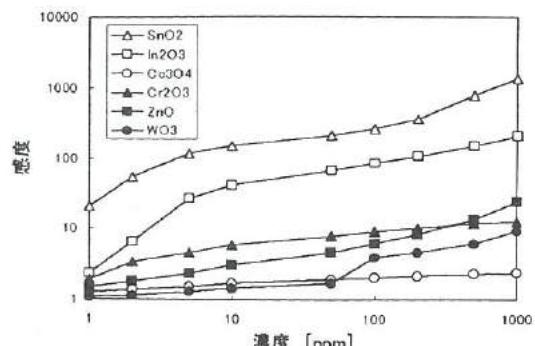


図 6 ホルムアルデヒドに対する濃度とセンサ感度の関係  
Fig.6 Relationship between the gas concentration and the gas sensitivity of 6 elements of an integrated sensor to formaldehyde

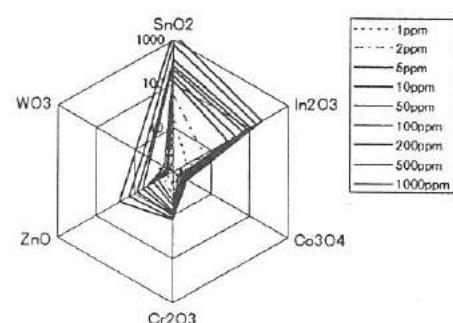


図 7 ホルムアルデヒドに対する感度の  
レーダーチャート  
Fig.7 Radar charts of the gas sensitivity to formaldehyde

#### 3. 2 単一ガスに対するセンサ感度

新築や改築住宅に入居する際、室内にホルムアルデヒドが存在しているか否か、ノンホルムアルデヒドの住宅には本当にホルムアルデヒドが存在しないのか、また室内にどのような VOC が多く残存しているのかなどを高価な測定器を用いずに、定性的な測定により推定することは意義深いことと考えられる。そこでホルムアルデヒド、キシレン、トルエン、その他代表的な VOC<sup>(1)~(6)</sup>など計 15 種類の単一ガスについて集積化ガスセンサを用いて感度の測定をおこないレーダーチャートによる識別を試みた。本研究に用いた VOC が実際にどのようなところに含まれているのかを調べたものを表 1 にまとめる。またこれらを官能基ごとに分類しまとめたものを表 2 に示す。

図 8 は測定した 15 種類の VOC の中から、ホルムアルデヒド、キシレン、イソプロピルアルコール、酢酸エチル、アセトン、デカン、ピネンの 7 種類について、ガス感度をレーダーチャートで表したものである。尚、センサ温度は約 200°C、ガス濃度は 100ppm とした。図 8 よりホルムア

ルデヒド（アルデヒド系）は  $\text{SnO}_2$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$  に高感度の鼓の形状になり、キシレン（ベンゼン系）は  $\text{WO}_3$  に高感度なペン先形、イソプロピルアルコール（アルコール系）はアルデヒド系に類似するが若干  $\text{WO}_3$  の感度が高い、酢酸エチル（エステル系）は  $\text{In}_2\text{O}_3$  に高感度なペン先形、アセトン（ケトン系）は  $\text{SnO}_2$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$ 、 $\text{WO}_3$  に感度があるものの低感度、デカン（アルカン系）は  $\text{ZnO}$ 、 $\text{WO}_3$  に若干感度がある、ピネン（アルケン系）は非常に高感度で特に  $\text{WO}_3$  に高感度なペン先形というようにそれぞれの單一ガスに対して特長的な形状が得られた。図 9 は、単一ガスのレーダーチャートを官能基別に模式化したものである。レーダーチャートは官能基の違いから 7 系統に分類することができた。これより、レーダーチャートを用いることで单一ガスの識別はある程度可能であると考えられる。

表 1 室内に存在する VOC  
Table.1 VOC existing in indoor environment

材料	成分
不材	ロービニン、リモキン
ペイント	トルエン、キシレン、ベンゼン
ニス(水性)	アセトン、イソプロピルアルコール
ラッカー	トルエン、キシレン、酢酸エチル、酢酸ブチル
接着剤	ホルムアルデヒド、トルエン、キシレン、エタノール、アセトアルデヒド
防腐剤	ノナン、デカン

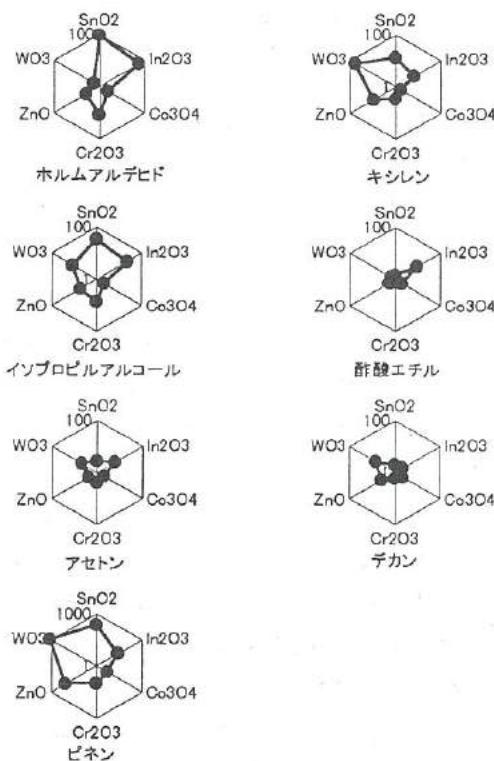


図 8 7 種類の VOC に対する集積化ガスセンサの感度  
レーダーチャート  
Fig.8 Sensitivity of an integrated gas sensor to seven kinds of 100ppm VOC

表 2 VOC の官能基による分類  
Table.2 Classification of VOC according to functional groups of chemical species

官能基	物質	化学式
アルデヒド系 	ホルムアルデヒド	$\text{HCHO}$
	アセトアルデヒド	$\text{CH}_3\text{CHO}$
ベンゼン系 	ベンゼン	$\text{C}_6\text{H}_6$
	トルエン	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$
	キシレン	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$
アルコール系 	メタノール	$\text{CH}_3\text{OH}$
	エタノール	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
	イソプロピルアルコール	$(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$
エステル系 	酢酸エチル	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$
	酢酸ブチル	$\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$
ケトン系 	アセトン	$\text{CH}_3\text{COCH}_3$
	ノナン	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3$
アルカン系 	デカン	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{CH}_3$
	リモネン	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$
$\text{C}_n\text{H}_{2n}$	ピネン	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$

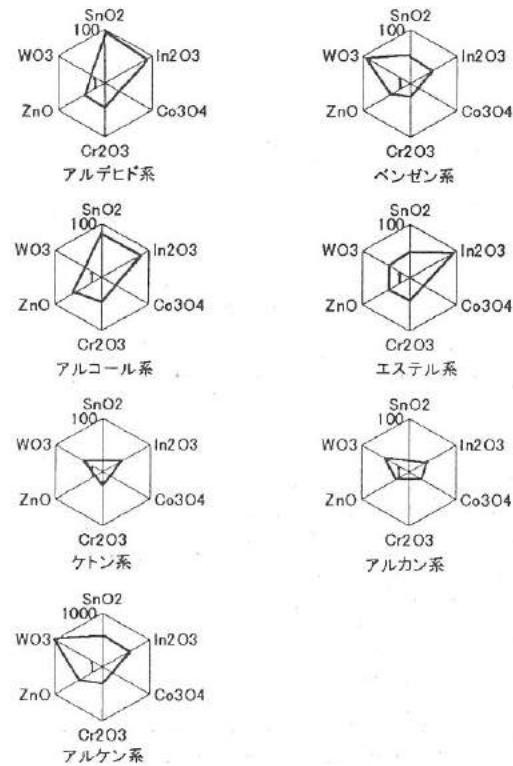


図 9 官能基によるレーダーチャートの分類  
Fig.9 Classification of the radar chart according to functional groups of chemical species

### 3. 3 単一ガスに対するセンサ応答速度

図 10、11 は 3. 2 で用いた様々な VOC の応答波形の代表例であり、それぞれ、ホルムアルデヒド 100ppm における各センサの応答波形、キシレン 100ppm における各センサの応答波形である。これは、空気中とガス雰囲気中でのセンサ抵抗変化を検出抵抗を用いて電圧値に置き換え、レコーダーで書かせたものである。検出抵抗は、 $\text{SnO}_2$  : 100k $\Omega$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$  : 6.8k $\Omega$ 、 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{WO}_3$  : 1M $\Omega$ とした。ホルムアルデヒドにおいては、 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$  の応答速度が速く、キシレンにおいては、6 種類全てのセンサがホルムアルデヒドと比較し、ゆっくりと応答している。また、応答速度と、感度を比較すると、ホルムアルデヒドにおける  $\text{SnO}_2$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$  と同様に、高感度を示すセンサが、応答速度が速いことがわかる。

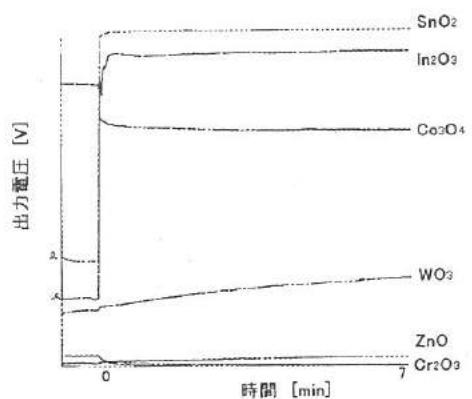


図 10. センサ要素のホルムアルデヒドに対する応答特性  
Fig10 Response curves of each elements of an integrated sensor to 100ppm formaldehyde

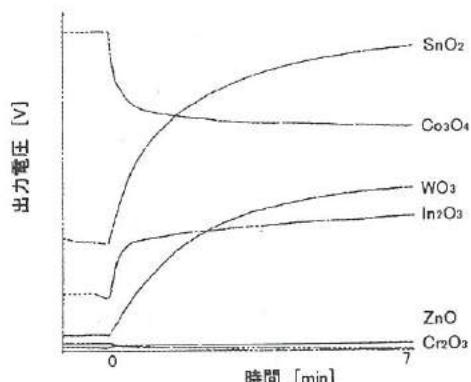


図 11. センサ要素のキシレンに対する応答特性  
Fig11 Response curves of each elements an integrated sensor to 100ppm xylene

図 12 は各ガス 100ppm における  $\text{SnO}_2$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$ 、 $\text{WO}_3$  の応答速度（時間）を比較したものである。ここで応答時間は、ガス注入後、センサの出力電圧が飽和する値の 90%に達するまでの時間とした。ガスによって、センサの応答時間に違いがあり、感度の良いセンサは、応答時間も速い。ガスによって、各センサの応答時間が異なることから、応答時間をガス識別に用いるのも、有効な手段であると考えられる。

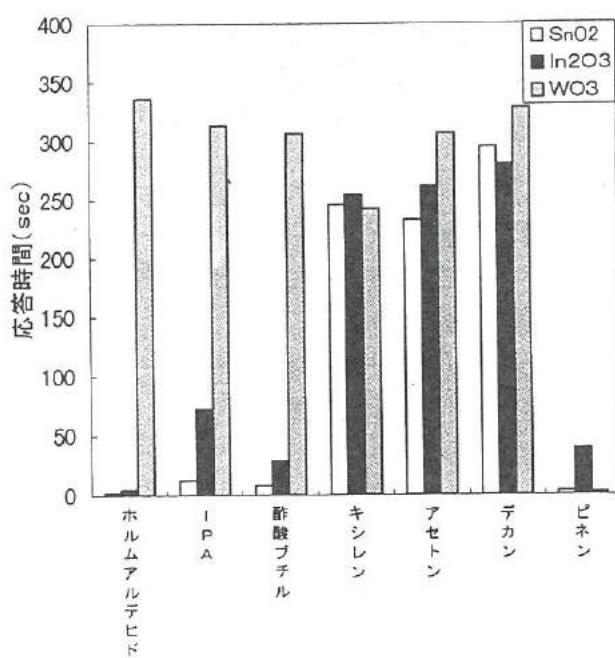


図 12. 各ガスにおける応答時間比較  
Fig12 Comparison of the pattern for response time obtained from an integrated sensor to typical 100ppm VOC

### 3. 4 複合ガスに関するセンサ感度

前項で单一ガスの感度のレーダーチャートがそれぞれ特徴的な形状を示すことを述べた。次に、これらの单一ガスを混合した場合どのようになるかを調べた。図 13 はホルムアルデヒド、キシレン、トルエンの 3 種類のガスを各々 100ppm ずつ混合したときの実験値と各々の単一ガス感度の単純和におけるレーダーチャートを比較したものであり、相似形を示している。このことより、これらのガスは感度に加算性があると考えられる<sup>(14)</sup>。

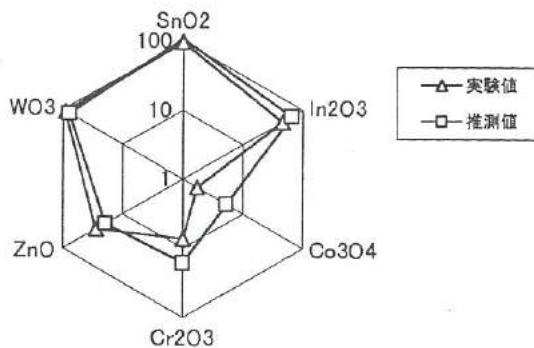


図 13 ホルムアルデヒドとキシレンそれぞれ 100ppm の複合ガスに対するレーダーチャート  
Fig.13 Radar chart to compound gas consisting of formaldehyde and xylene with each 100ppm

図 14 はホルムアルデヒドとキシレンを 100ppm ずつ混合した場合と、それらにイソプロピルアルコール、酢酸エチル、アセトン、デカンを各々 10ppm ずつ混合した場合を比較したものである。この結果より、低濃度の VOC に左右されることなく高濃度の VOC がレーダーチャートの形状を優先して決めることがわかる。

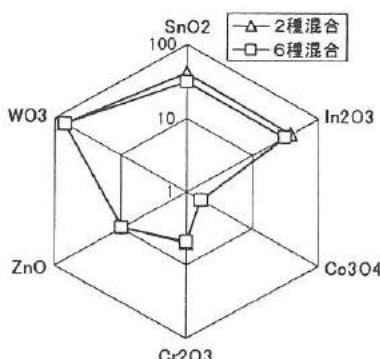


図 14 複合ガスに対するレーダーチャート  
Fig.14 Radar charts of an integrated sensor to compound gases

ガス感度に加算性がある場合でも、実際には単純和ではなく、特に低濃度領域では測定値と誤差があることがわかった。そこで、文献<sup>(12)</sup>より次式を引用することにした。

$$\alpha = A(C + B)^n \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  はセンサの感度、 $C$  はガス濃度、 $A$ 、 $B$ 、 $n$  はそれぞれセンサ種類及び特定ガスによって決まる定数である。図 15、16 よりホルムアルデヒドとキシレンについてのガス

感度の濃度依存性である。この測定データを式(1)にあてはめホルムアルデヒド及びキシレンに対する各定数を求めた。式(1)を複合ガスの場合に拡張すると式(2)のようになる。

$$\alpha = \frac{C_1}{C_{mix}} A_1 (C_{mix} + B_1)^{n_1} + \frac{C_2}{C_{mix}} A_2 (C_{mix} + B_2)^{n_2} \quad (2)$$

ここで、 $C_1$ 、 $C_2$  はガス 1 及び 2 の濃度、 $C_{mix} = C_1 + C_2$ 、 $A_1$ 、 $B_1$ 、 $n_1$ 、 $A_2$ 、 $B_2$ 、 $n_2$  はそれぞれセンサ種類及び特定ガスによって決まる定数。この式に求めた定数を代入し、ホルムアルデヒドとキシレンを 100ppm ずつ混合した場合のガス感度のレーダーチャートを推測した結果を図 17 に示す。図に示すように実験値と計算値がほぼ一致する。したがって、ガス感度の加算性は単純和ではなく式(2)のような計算式で与えられることがわかる。単一ガスの感度測定データと式(2)を用い、複合ガスの感度を推測可能である。

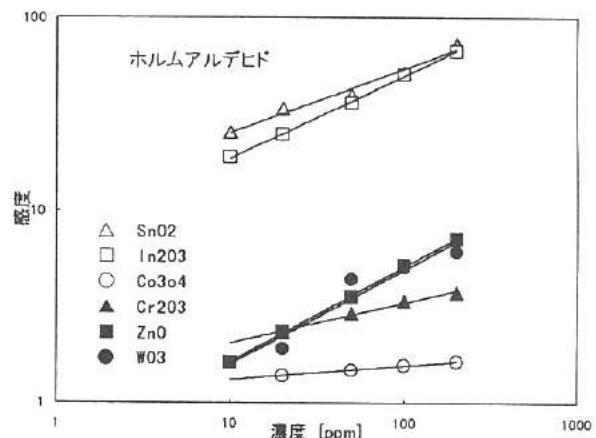


図 15 ホルムアルデヒドに対する感度の濃度依存性  
Fig.15 Concentration dependence of a gas sensitivity to formaldehyde

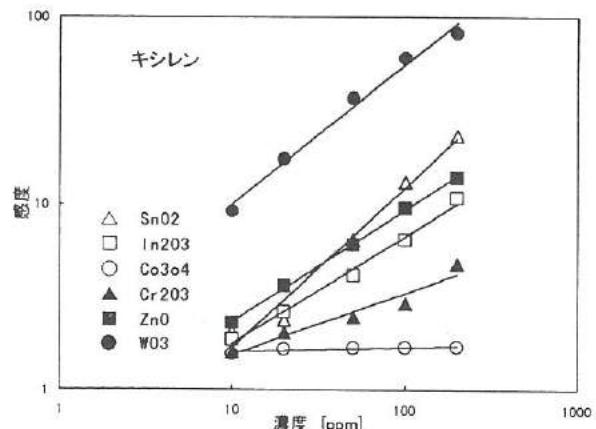


図 16 キシレンに対する感度の濃度依存性  
Fig.16 Concentration dependence of a gas sensitivity to xylene

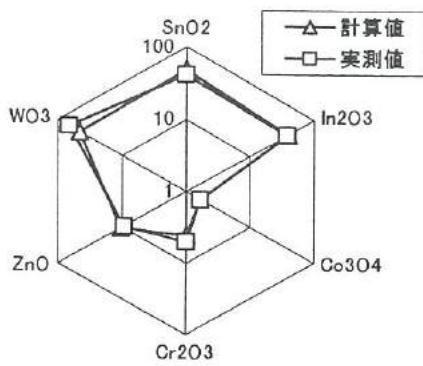


図 17 混合ガスの実測値と計算値の比較  
Fig.17 Comparison of the experimental and calculated radar charts of sensitivity to compound gas

#### 4. 結 言

室内に存在する代表的なVOCから、特定ガスの検出が可能か調べた。センサには、6種の酸化物半導体を集積化したセンサを用い、15種のVOCにおいて単一ガス、混合ガスの感度(レーダーチャート)、応答特性を調べた結果は以下の通りである。

- (1) ホルムアルデヒド(アルデヒド系)には、SnO<sub>2</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、キシレン(ベンゼン系)には、WO<sub>3</sub>、IPA(アルコール系)は、SnO<sub>2</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、WO<sub>3</sub>、酢酸エチル(エステル系)には、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、アセトン(ケトン系)には、SnO<sub>2</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、WO<sub>3</sub>、デカン(アルカン系)には、ZnO、WO<sub>3</sub>、が高感度であり、ピネン(アルケン系)においては、全てのセンサ要素が高感度である。
- (2) 官能基ごとに、高感度を示すセンサ要素が異なり、感度レーダーチャートより官能基ごとに分類可能である。
- (3) 高感度なセンサ要素は、応答速度が速い。また、ガスによって各センサ要素の応答速度が異なり、応答速度の違いから、ガスの識別がある程度可能である。
- (4) ガスを混合した場合、高濃度のガスが、感度レーダーチャートの形を決定する。
- (5) 感度には、加算性があり、単一ガスの濃度-感度特性から混合ガスでの感度を推測可能である。

#### 参考文献

- (1) 岡屋武幸、井上雅雄、国吉恵梨子、星野五六、佐野孝雄、池田耕一：「特集 シックハウス症候群にどう取り組むか」、工業材料、45,8,102-123 (1997)
- (2) 井上雅雄：「シックハウス症候群の脅威」、日刊工業新聞 (1998)
- (3) 池田耕一：「室内空気汚染の原因と対策」、日刊工業新聞 (1998)
- (4) 小峰裕己：「住宅における室内空気質に起因する健康影響」、住宅総合研究財團研究年報、No.23,5-17 (1996)
- (5) 松村俊郎：「VOCによる室内空気汚染の実態と防止策」、ビルメンテナンス、32,2,40-46 (1997)
- (6) 山口一、岡田博、富岡一之、布施幸則、成富隆昭：「住宅におけるホルムアルデヒドおよび揮発性有機物質(VOC)による室内空気汚染とその測定法」、環境と測定技術、26,7,63-75 (1999)
- (7) 三浦則雄他：「特集解説 環境ガスセンサ」、電学論E,118,2,59-79 (1998)
- (8) 角崎雅博、寺澤孝志、谷野克巳、龍山智榮：「室内空気汚染に対して高感度な酸化物半導体の探索」、電学論、119,7,383-389 (1999)
- (9) 角崎雅博、山崎茂一、藤城敏史、寺澤孝志、星野昌則、南政克、山田浩美、龍山智榮：「酸化物半導体を用いたVOC測定センサの開発」、Proceedings of the 29th Chemical Sensor Symposium、15,Supplement B,103-105 (1999)
- (10) 村山英久、小倉剛、原和裕：「シリコン基板に作製した集積化ガスセンサ」、電学論E,118,12,602-607 (1998)
- (11) 池上昭、有馬英生、兼安昌美、野呂隆信：「厚膜ハイブリッドガスセンサ」、電子材料、22,5,39-44 (1983)
- (12) 兼安昌美：「集積化センサとパターン認識による臭気の識別定量」、計装、30,13,36-39(1987)
- (13) 大石知司、兼安昌美、池上昭：「集積センサによる化学物質および官能基識別」、電信論、C,J71-C,3,385-390 (1988)
- (14) 小森一哉、石川勝己、角崎雅博、藤城敏史、谷野克巳、龍山智榮：「酸化物半導体を用いた集積化ガスセンサによるVOCの測定」、Proceedings of the Joint Conference of Hokuriku Chapters of Institutes of Electrical Engineers, Japan D-26,231 (1999)

### III. 微細放電加工の研究（2）

Study of submilli electrical discharge machining (2)

太田 光則 <i>OHTA Mitsunori</i>	杉森 博 <i>SUGIMORI Hiroshi</i>	上野 実 <i>UENO Minoru</i>	二口 友昭 <i>FUTAKUCHI Tomoaki</i>
藤井 弘之 <i>FUJII Hiroyuki</i>	中川 章 <i>NAKAGAWA Akira</i>	谷野 克巳 <i>TANINO Katsumi</i>	山本 倫久 <i>YAMAMOTO Tomohisa</i>

#### Abstract

The electrical discharge machining (EDM) has been applied to hard or difficult-to-machine conductive material machining in many fields, mainly for various kinds of mold producing process. As EDM process does not cause any cutting forces in the workpiece, it is possible to produce very delicate and small work. The conventional die sinking machining uses shaped electrodes as tools. In the case of contour EDM, the electrode is cylindrical and its path is automatically controlled by the numerical control to create the cavity. The main advantages of this process are a simplified manufacturing process, a shorter production time of the tools and no necessity to machine mechanically shaped electrodes. This method was suitable for submilli machining. But generally surface finishes should be necessary after submilli EDM process. Recently it was possible for EDM with silicon powder mixed dielectric oil to generate the mirror-like surface and surface finish process was reduced. In this study, contour EDM was applied to submilli machining and the mirror-like surface with  $0.18 \mu\text{m Ra}$  was achieved by EDM with flushing the powder mixed dielectrical oil.

#### 1. 緒 言

近年、携帯電話、ビデオカメラなど家電製品は小型化、軽量化の傾向にあり、これら構成部品のダウンサイジング化もすすみ微細加工への要求が高まっている。これらの部品における微細加工は切削や研削などの機械加工では工具の剛性の問題から高硬度材料や高精度、高アスペクト比の加工への対応が困難である。

一方、高硬度材料の除去加工方法として従来から金型加工で多用されている放電加工は、難削材料の加工が容易であり、非接触加工であるため、工具の剛性の問題がなく、微細加工に適していると考えられる。最近、小径の単純形状電極を用いた微細創成放電加工<sup>(1)</sup>が注目されており、すでに実用化されている。著者らも、この加工方法で重要な電極消耗補正方法について種々の検討を行い、微細で高アスペクト比の加工が可能であることを確認した。

一般に放電加工後の加工面は梨地状となり、金型等に用いる場合、加工後、研磨等の仕上げ工程が必要だといわれている。現在、放電加工において実用化されている粉末混入油中放電加工<sup>(2)</sup>は加工面が鏡面となり、仕上げ工程での磨き作業の軽減に寄与している。しかし、この加工方法は加工槽の汚濁、加工液の管理等の問題がある上、専用の加工機を用いる必要がある。そこで本研究では、放電加工後の面あらさを低減するため、

従来の放電加工機で粉末混入油中放電加工を実現する方策について検討し、これを単純形状電極による NC 微細輪郭加工に適用した。

#### 2. 粉末混入油中放電加工

粉末混入油中放電加工とは、加工槽全体に金属または半導体の微粉末を拡散させた加工液中で放電加工を行うと加工面が鏡面になる加工方法である。これは拡散している微粉末によって加工面全体に放電が分散し、極間距離が増大して加工屑が容易に排出されるため異常放電が発生にくいためだといわれている。この加工方法を実現するには、加工液タンクに油用と粉末混入油用の2つのタンクが必要で、さらに粉末が沈殿しないよう加工槽に粉末の攪拌装置をもった特殊な加工機が必要となる。また、メンテナンスの面でも、粉末による加工槽の汚濁、粉末濃度の管理などがあげられ、一般に普及している放電加工機による対応は困難である。

#### 3. 加工条件の検討

放電加工で加工面あらさに影響を及ぼす条件のうち電気条件、電極材料、加工液について検討した。まず放電回路による影響について電極材料を変えて検討した後、加工液に粉末混入油を用いた放電加工について検討した。

### 3. 1 電極材料および電気条件の検討

実験に用いた加工機には、トランジスタ放電回路 (TP)、コンデンサ放電回路 (SF)、トランジスタ制御付きコンデンサ放電回路 (GM) が用意されている。各放電回路による影響について電極材料を変えて検討した。電極材には  $\phi 5.0\text{mm}$  の銅、アルミ、チタンと  $\square 5.0\text{mm}$  のシリコン電極 (比抵抗  $0.018\Omega\text{cm}$ ) を用いた。加工条件を表 1 に示す。

表 1 加工条件

Table 1. Machining condition

試料材料	SKS93
電極	Cu Al $\phi 5.0\text{mm}$ Ti Si $\square 5.0\text{mm}$
放電回路	トランジスタ放電回路 (TP) コンデンサ放電回路 (SF) トランジスタ制御付きコンデンサ放電回路 (GM)
電極拘束	+ / -
加工方法	穴加工(指含加工深さ $0.3\text{mm}$ )
加工液	油

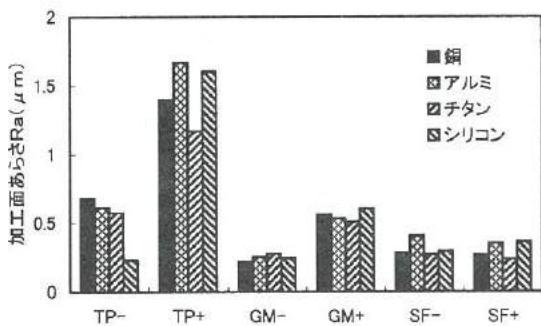


図 1 電極材料および放電回路による加工面あらさへの影響

Fig.1. Influence of EDM circuit on surface roughness for various electrode materials

図 1 に各電極ごとに放電回路を変えたときの加工面あらさへの影響について示す。加工面あらさは GM-、SF-、SF+が良い結果となっており、TP-、GM+がそれらに続き、TP+は最も加工面あらさの改善に適していないことがわかった。また用意した電極材料による加工面あらさへの影響はほとんど差

異が認められなかった。ただしシリコン電極を用いて TP- の電気条件で加工すると  $0.2\mu\text{m Ra}$  と GM- や SF に匹敵するほどの改善が認められた。つぎに各電極ごとに放電回路を変えたときの加工時間への影響について検討した。

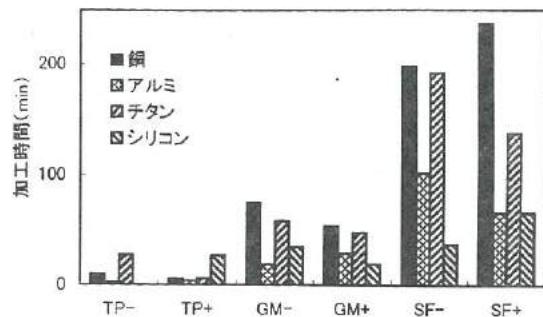


図 2 電極材料および放電回路による加工時間への影響

Fig.2. Influence of EDM circuit on consumed time for various electrode materials

図 2 に示すとおり TP、GM、SF の順に加工時間が長くなる傾向にあった。また電極材についてはアルミとシリコンを用いたものが他の電極より短時間となった。加工された面を目視で観察したところ、チタンとシリコンを電極に用い TP-、GM- の電気条件で加工したもののは光沢のある面となった。加工面を EDS で分析した結果、いずれも電極材成分の移行が確認されており、これが電極材料による外観の違いに影響を及ぼしたものと思われる。

仕上げ加工の要件として、短時間で加工面あらさを低減させることが望まれ、このことから電気条件には TP-、GM- を採用することとした。また TP- の電気条件でシリコン電極を用いた場合、仕上げ加工の条件を満足するが電極の消耗が激しく、ほとんど加工されていないことから、電極には一般的な銅電極を中心に考えることとした。

### 3. 2 加工液および電気条件の検討

実験に用いた加工機にはシリコン粉末混入油中放電機能が備えられているので、微細輪郭加工において電気条件を変えながら加工面あらさと加工時間に及ぼす影響について検討した。表 2 に加工条件を示す。図 3、4 に TP-、GM- の放電回路を用いて放電エネルギーを変えたときの油中と粉末混入油中放電の加工面あらさ、加工時間への影響について示す。いずれもシリコン粉末混入油中放電加工は、油中の加工に比べて加工時間の

短縮が図れた。また TP では粉末を混入することで加工面あらさがかなり改善されることがわかる。油中と粉末混入油中放電加工の電流波形を観察すると、粉末混入油中放電は放電中の電流が油中に比べて低減され、放電の制御も設定条件に近く放電の頻度も高くなっていることがわかった。また加工後の溝巾を測定すると粉末混入油中放電は油中に比べて広く、粉末混入により電極と試料間の放電ギャップが広がることがわかった。さらに電極長さ消耗率を比較すると粉末混入によって電極の消耗が多くなることもわかった。

以上の結果から、粉末混入油中放電加工は微細輪郭加工においても効果が認められた。

表2 加工条件

Table 2. Machining condition

試料材料	SKS93			
電極	Cu $\phi 0.5\text{mm}$			
加工方法	溝加工(溝長さ 10mm、深さ方向送り 0.5mm)			
加工液	油 / Si 粉末混入油			
放電回路 (電極形状)	トランジスタ放電回路 (TP-1) トランジスタ制御付きコンデンサ放電回路 (GM-1)			
ピーク電流 (A)	TP-1 TP-2 TP-3 TP-4	2.5 3.4 4.4 5.2	GM-1 GM-2 GM-3 GM-4	2.5 3.4 4.4 5.2

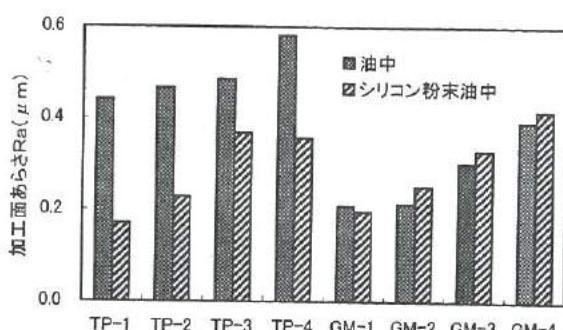


図3 電気条件による加工面あらさへの影響

Fig.3. Influence of EDM energy on surface roughness

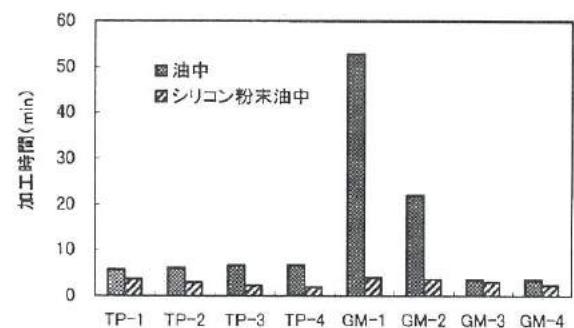


図4 電気条件による加工時間への影響

Fig.4. Influence of EDM energy on consumed time

#### 4. 従来加工機への応用

粉末混入油中放電加工は、電極と試料間で生じている放電点に粉末を供給することで加工面あらさの低減と加工時間の短縮が可能であることがわかった。そこで、一般の型彫り放電加工機に簡易的なユニットを設置して、これと同等の効果を生む方法を検討した。

##### 4. 1 粉末充てんパイプ電極による加工

図5は、この加工方法の概略図である。

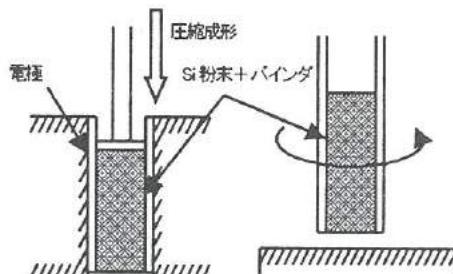


図5 粉末充てんパイプ電極

Fig.5. EDM with pipe electrode filled with powder

図に示すようにパイプ電極内部にシリコン粉末を充てんした電極を作成し、これを用いて放電加工を行った。この方法はパイプ電極が放電によって徐々に消耗することでパイプ内部に充てんされている粉末が極間に漂い、放電点近傍が粉末混入油と同じ状態になることを狙った。実験には、パイプ内部に粉末が充てんしやすく電極が消耗しやすいように外径  $\phi 1.0\text{mm}$  (内径 0.8mm) の銅のパイプ電極を用いた。パイプ内部には 2wt% のエチルセルロースをバインダにしてシリコン粉末をこれと混合した後、600MPa で圧縮成形して電極を作製した。表3に加工条件を示す。図6、7に各加工方法による加工面あらさお

より加工時間への影響について示す。GM-では加工面あらさ、加工時間ともに若干の効果が認められたが実用化されている粉末混入油中放電加工には及ばなかった。

表3 加工条件

Table 3. Machining condition

試験材料	SKS93	
電極	粉末充てんCu/パイプ $\phi 1.0\text{mm}$ (内径 $\phi 0.8\text{mm}$ )	
	Cu/パイプ $\phi 0.5\text{mm}$ (内径 $\phi 0.2\text{mm}$ )	
加工方法	溝加工(溝長さ 10mm、深さ方向送り 0.5mm)	
加工液	油 (噴出液 : Si 粉末混入油)	
放電回路 (電極活性)	トランジスタ放電回路 (TP-)	
	トランジスタ制御付きコンデンサ放電回路 (GM-)	
ピーク電流 (A)	TP- GM-	2.5 2.5

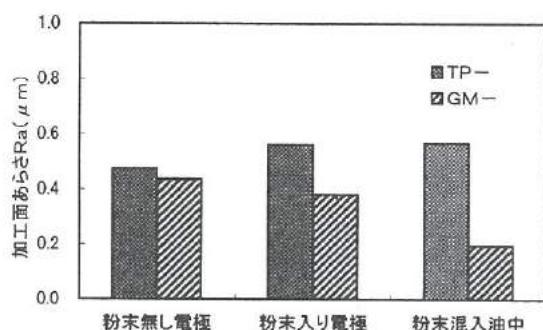


図6 粉末充てんパイプ電極による加工面あらさへの影響

Fig.6. Influence of EDM method on surface roughness

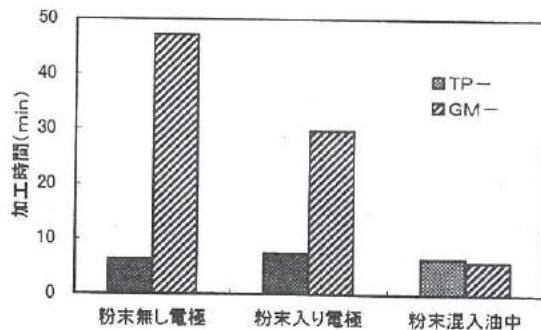


図7 粉末充てんパイプ電極による加工時間への影響

#### 4. 2 パイプ内粉末混入油噴射による加工

##### および放電点近傍への粉末混入油噴射による加工

図8にパイプ内部より粉末混入油を噴射する方法についての概略を示す。これは図のように、パイプ電極内部から粉末混入油を噴出することで先ほどと同様に、放電点近傍で粉末混入油と同じ状態になることを狙った。また、図9は放電点近傍への粉末混入油噴射による加工方法の概略図である。この加工方法も同様に、電極ガイドの横方向から放電点へ粉末混入油を噴射することで粉末混入油中放電加工と同等な効果を狙った。いずれもシリコン粉末 20g/L を加工油と混合、攪拌しながら 10cc/min の割合で供給した。電極には外径  $\phi 0.5\text{mm}$  (内径  $\phi 0.2\text{mm}$ ) の銅のパイプ電極を用いた。加工条件は前節と同様とした。

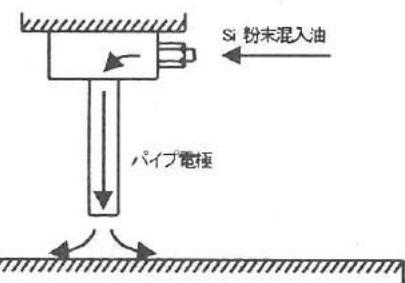


図8 パイプ内粉末混入油噴射による加工

Fig.8. EDM with flushing powder mixed oil from inside of electrode

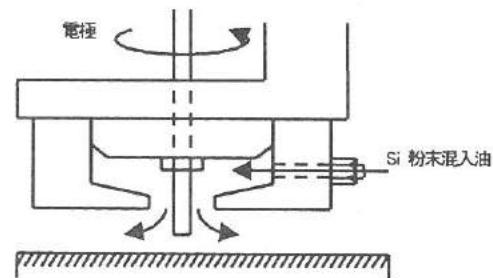


図9 放電点近傍への粉末混入油噴射による加工

Fig.9. EDM with flushing powder mixed oil

図10、11に各加工方法による加工面あらさおよび加工時間への影響について示す。いずれの方法も TP-においては影響が認められなかった。しかし GM-ではいずれの方法も加工面あらさ、加工時間ともに粉末混入油中放電加工とほぼ同等の効果が認められた。放電回路による違いが現れたのは放電のエネ

ルギー量に対して効果を示す粉末濃度の不足が原因であると考えられる。これら3種類の加工方法のうち容易に実現可能な放電点近傍への粉末混入油噴射による加工方法を採用することとした。

つぎに、この加工方法を用いて混入する粉末を変化させたときの影響について検討した。検討した粉末はカーボン、チタンおよび炭化けい素である。図12に粉末による加工面あらさおよび加工時間への影響について示す。カーボン粉末は効果が認められたが、その他の粉末では効果が認められなかった。これは比重の重いチタンと炭化けい素は沈殿しやすく、粉末混入油の攪はん槽から噴射口にいたる途中で沈降してしまい、噴射口における加工液の粉末濃度が薄くなつたためと思われる。

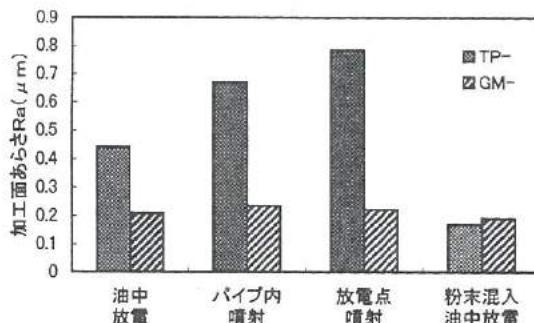


図10 各加工方法による加工面あらさへの影響

Fig.10. Influence of various EDM method on surface roughness

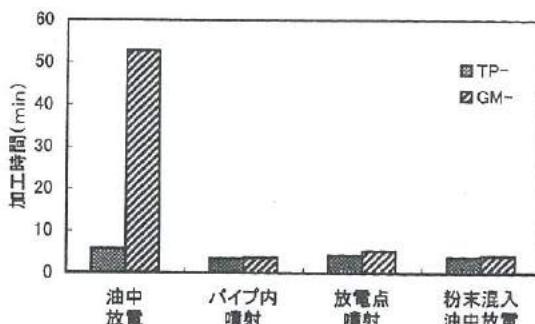


図11 各加工方法による加工時間への影響

Fig.11. Influence of various EDM method on consumed time

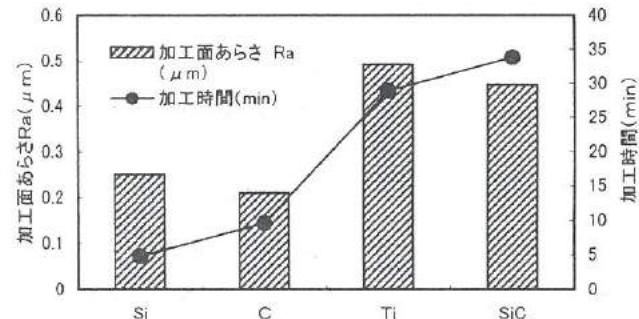


図12 粉末による加工面あらさと加工時間への影響

Fig.12. Influence of various powder on surface roughness and consumed time

## 5. 加工方法の検討

粉末混入加工液で電極を囲むように噴射しながら輪郭加工を行う仕上げ加工方法について検討した。仕上げ加工は、あら加工で形状を生成した後、少ない加工量で加工面あらさの良好な光沢面を生成することとした。

### 5. 1 電極消耗を補正しながらの加工

電極消耗量を補正するため水平方向に電極を送りながら深さ方法にも送りを加える方法について検討した。図13に加工方法を示す。加工経路は、外径  $\phi 0.2\text{mm}$  (内径  $\phi 0.12\text{mm}$ ) の銅のパイプ電極を使用して図14に示すとおりX方向に一定量送った後、Y方向に送り再び戻る動作を4回繰り返した。電気条件は前章と同様とし、深さ方向に  $0.19\text{mm}/5\text{mm}$  の割合で送った。図15に、加工後のY方向の断面形状を示す。工具経路がはっきりと表れており、深さも一定していないことがわかる。1本の溝に注目すると、溝底面の中央が凸形状になっており、これが工具経路を明確にしているものと思われる。これは電極にパイプを使用したことが原因であると思われ、加工面あらさが低減したため顕著になったものと思われる。また、深さが一定しないのは、各列の溝加工を行う際のオーバラップが加工深さの違いとなって表れたものと思われる。すなわち、図16に示すように最初の列の加工終了後2列目を加工する際、電極は既に加工された溝の1部を通るため電極の消耗が前の列よりも若干少なくなるにも関わらず、最初の列と深さ方向への送り量が同じであるため、加工深さが深くなるものと思われる。

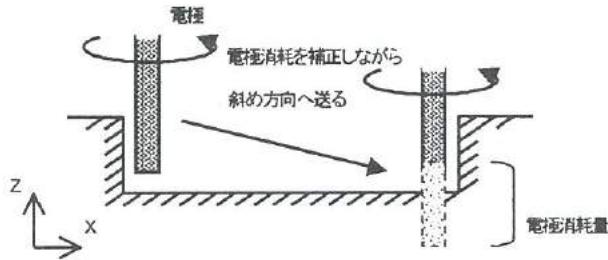


図 13 電極消耗補正加工

Fig.13. EDM with electrode wear compensation method

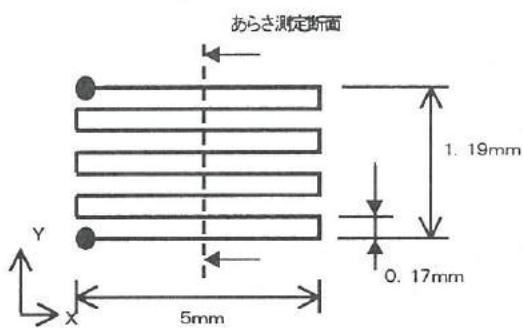


図 14 加工経路

Fig.14. electrode path

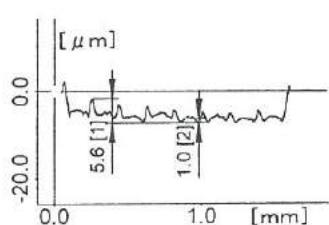


図 15 Y 方向の断面形状

Fig.15. Profile of EDMed surface

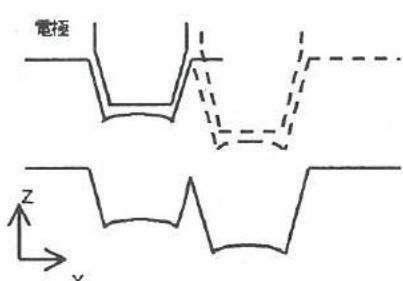


図 16 オーバーラップによる溝加工状態

Fig.16. Scheme of EDM process

## 5. 2 水平移動による繰り返し加工

つぎに、電極を一定深さに固定して水平方向だけ繰り返し送る仕上げ加工方法について検討した。図 17 に加工方法を示す。この方法は、同じ経路を順方向と逆方向から繰り返し加工するもので 1 回加工ごとに電極消耗長さを測定し、これが所望の量を下回ったところで終了する方法である。この方法は溝を横方向に徐々に加工するため経路に関係なく加工深さが一定となり、溝側面のエッジがシャープに仕上がる特徴がある。加工は先ほどと同様の経路とし、電気条件は前節と同様とし、加工深さを  $4 \mu\text{m}$  として、順方向と逆方向に繰り返し加工した。図 18 に、加工後の Y 方向の断面形状を示す。

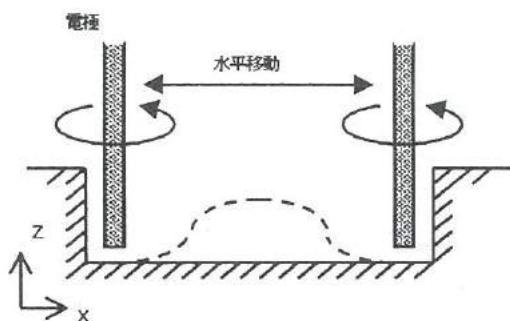


図 17 繰り返し加工

Fig.17. Repeated EDM method

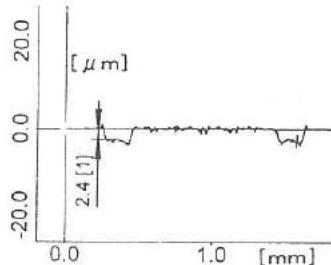


図 18 Y 方向の断面形状

Fig.18. Profile of EDMed surface

いずれも最初の 1 列のみ加工されており、その他の部分は加工量が少ないことがわかる。この原因は、加工深さが浅いため電極消耗長さの測定が正確にされないこと、粉末混入油中放電は電極の消耗が多いため加工が全域に及ばないこと、粉末の粒度のばらつきが原因で既に加工が終了している場所で再び放電が発生し加工されること等が考えられる。

## 5-3. UWM (Uniform Wear Method)<sup>(3)</sup> による加工

前節の問題の対策として電極に消耗の少ない  $\phi 0.2\text{mm}$  のタ

ングステンの無垢電極を用い、加工方法にUWMを適用した。すなわち、1度の加工深さを浅くして1往復で加工可能な水平方向の距離を予め計測しておき、水平方向の加工経路をその距離ごとに小領域に分割して深さ方向に階層状に加工することとした。図19に加工方法の概要を示す。具体的には、同じ加工深さ(1 μm)で水平移動距離10mmを1ブロックとしてこれを1往復させる。この1ブロックをY方向に4ブロック加工した後、深さ方向にまた1 μm下降するというプロセスを5回繰り返した。図20にこの方法で同じ深さを2回繰り返し加工したときのY方向の溝断面形状を示す。

電極送りマークが消えてほぼ良好な結果となった。このときの加工面あらさは、X方向で0.18 μm Ra (1.5 μm Ry)、Y方向で0.2 μm Ra (1.5 μm Ry)であった。また、加工時間は21分12秒で電極消耗長さは80 μmであった。

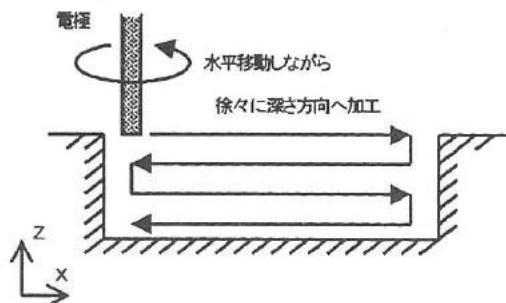


図19 UWM加工

Fig.19. EDM with UWM

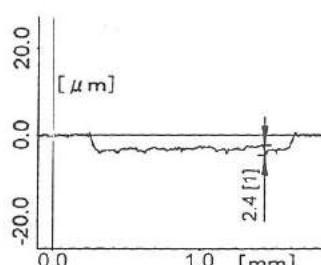


図20 Y方向の断面形状

Fig.20. Profile of EDMed surface

そこで、この加工方法を刻印加工に適用した。表4に加工条件を示す。図21に、あら加工と仕上げ加工まで行った後の外観と1断面の形状を示す。あら加工時の細かいうねりが除去され、あらさも低減されているのがわかる。表5に加工結果を示す。

表4 加工条件

Table 4. Machining condition

試料材料		SKS93
主軸回転数 (rpm)		1,000
電極	あら加工	Cu φ0.2mm
	仕上げ加工	W φ0.2mm
放電回路 (電極選択)		コンデンサ放電回路 (SF-)
仕上げ加工	トランジスタ制御付き コンデンサ放電回路 (GM-)	
ピーク電流 (A)	あら加工	3.3
	仕上げ加工	2.0
加工液	あら加工	油
	仕上げ加工	油 + 粉末混入油噴射 噴射量 10cc/min 粉末濃度 20g/l 粉末 : Si (平均粒径 : 6 μm)

表5 加工結果

Table 5. Result of Machining

加工時間	総加工時間	2 h 10m 45 s
	あら加工	1 h 31m 47 s
	仕上げ加工	38m 58 s
電極消耗長さ (mm)	あら加工	2.18
	仕上げ加工	0.14
加工面あらさRa (μm)	あら加工	0.88
	仕上げ加工	Si 粉末: 0.24 (C 粉末: 0.29)

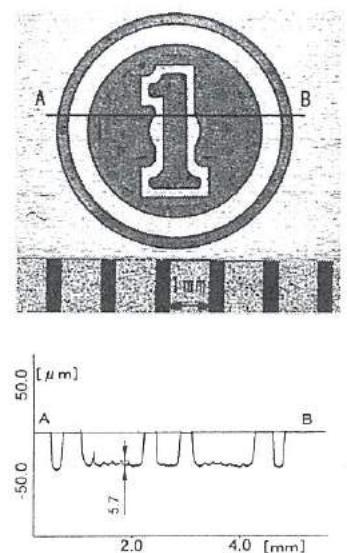
## 6. 結 言

本研究では、加工面あらさ低減方法として粉末混入油中放電加工について検討を行い、以下の結果を得た。

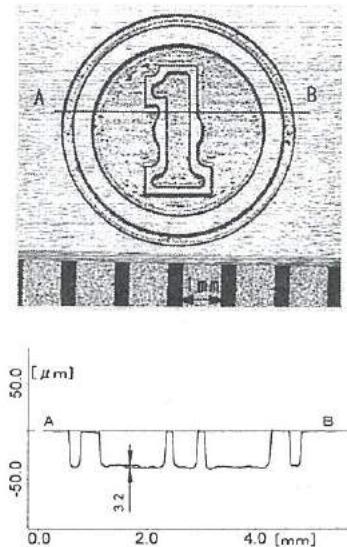
- (1) 加工面あらさを低減させる加工条件について検討したところ、放電回路には電極極性一極のトランジスタ制御付きコンデンサ放電回路が適していることが判明した。また、粉末混入油中放電加工について検討したところ、加工時間の短縮が図られ、加工面は光沢のある面となった。
- (2) 従来加工機で粉末混入油中放電を実現する方法について検討したところ、放電点近傍へ粉末混入油を噴射することで加工面あらさ、加工時間とともに、ほぼ同等の効果が得られた。
- (3) 粉末混入油を噴射しながら小径の単純形状電極によつて輪郭加工を行う方法について検討したところ、1回の加工深さを極力浅くし、電極の消耗に見合う水平移動距離ごとに加工し、これを階層的に繰り返し加工する方法が適していた。また、この加工方法を用いて刻印加工を行ったところ、 $0.24 \mu\text{m}$  Ra の光沢面が得られた。

## 参考文献

- (1) 富本・真柄・湯沢・渡辺、微細創成放電加工、精密工学会誌、64-12 (1998)
- (2) 斎藤・毛利、大面積放電加工における仕上げ面粗さの向上、精密工学会誌、57 - 6 (1991)
- (3) Z. Y. Yu, T. Masuzawa and M. Fujino : Micro - EDM for Three - Dimensional Cavities , Annals of CIRP, 47 (1998)



(a) あら加工



(b) 仕上げ加工

図 21 刻印加工

Fig.21. Micrograph and surface profile of stamp

# IV. 機能性高分子を用いたアクチュエータの開発

## Development of Actuators Built from Functional Polymers

小中 稔正

*KONAKA Toshimasa*

松田 敏弘

*MATSUDA Toshihiro*

山田 浩美

*YAMADA Hiromi*

二口 友昭

*FUTAKUCHI Tomoaki*

寺澤 孝志

*TERASAWA Takashi*

谷野 克巳

*TANINO Katsumi*

### Abstract

Up to now, actuators have been developed in the points of constructing smaller and lighter than ones ever developed, and moving more accurate them. Now, in other to let actuators work efficiently, however, examine autonomic dispersion systems including sensors and so on, which understand external environment accurately. On the other hand, materials of functional polymer spread of various uses in the industrial branches, making use of characteristics of light weight, corrosion resistance, and easy processing.

In this study, we investigated the properties of shape memory polymers and conductive polymers. And aimed to develop the actuator utilizing those functions.

- (1) PNo showed the shape memory function in folded sheet. Although it is hard to move reciprocally, textile can be a potential application.
- (2) The volume of PAn powder changed by 14% in the chemical doping and undoping process.
- (3) The actuator film was formed with the mixture of PAn, EPO, AB and DMcT. Chemical doping and electro-chemical process, however, did not produce distinct volume change.
- (4) Since electro-chemical method can control the doping process accurately, the increase of reaction speed will improve the actuator motion.

### 1. 緒 言

これからのアクチュエータには、外部環境（温度、pH、電界など）を正確に把握するためのセンサなど、自律分散性が付与されたものが必要とされ、様々な材料、機構のものが検討されている。一方、機能性高分子材料は、新しい概念の素子の可能性を秘めている<sup>④</sup>ため、大きな期待が寄せられている。

本研究では、形状記憶性や導電性を持つ機能性高分子材料の諸特性を検討し、しなやかに外部環境（刺激）に応答する新規のアクチュエータの可能性について検討した。使用した機能性高分子は、形状記憶性高分子のポリノルボルネン（以下、PNo）、高分子ゲルのポリアクリル酸（以下、PAA）、導電性高分子のポリアニリン（以下、PAn）である。動作原理は、PNo ではガラス転移温度での相変化、PAA では温度、pH、電界での収縮、膨潤、および PAn ではイオンの出入りによる体積変化をそれぞれ利用するものである。

### 2. PNoの形状記憶動作

#### 2. 1 動作原理と実験方法

PNo は C=C の二重結合と五員環が結合した構造であり、規則正しい立体配列構造をとるわけではなく、分子量が 300 万以上と極めて長い非晶系の高分子であるため、熱加工は容易ではない。また、分子内に極性官能基や通常のゴムに見られるような架橋部を持たない。PNo は、ガラス転移温度で相変化を起こし、これにより高分子鎖間相互に復元力が働き記憶性を示す。二次成形したものをおもに一次成形時の形に復元することができる<sup>④</sup>。

図1は無定型高分子の転移と分子運動の関係を示す。ガラス転移点以下の温度では分子運動が凍結され、温度を上昇させると分子間の運動が活発になり、ガラス転移点を越えるとゴム状となる。さらに融点を越えると主鎖のすべりが始まり流動状態になる。

図2はPNoの形状記憶プロセスの概要を示す。粉末を融点以上の温度で圧縮成形し、冷却固化して高分子シートを得る。このシートをガラス転移温度(Tg)以上で変形し、Tg以下でひずみを固定化し、再びTg以上の温度にすると元の形状に戻る。

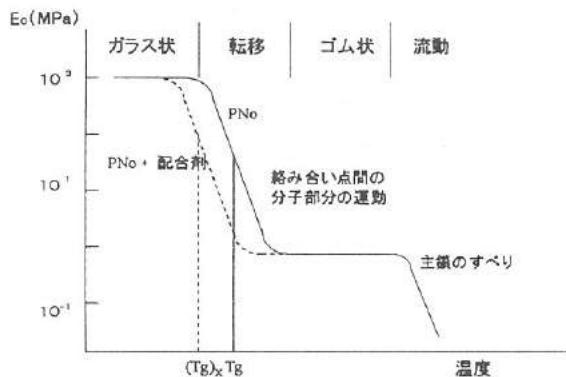


図1 無定型高分子の転移と分子運動

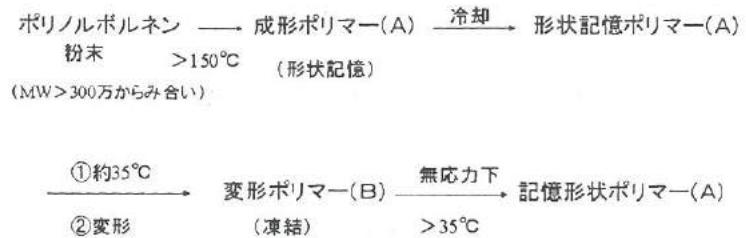


図2 形状記憶プロセス

Fig.1. Transition and molecular kinetic of amorphous polymer.

Fig.2. Shape memory process of PNo.

## 2. 2 実験結果と考察

PNoには日本ゼオン㈱製のものを用いた。図3はPNoの熱分析の結果を示す。図4は形状記憶動作の一例を示す。ガラス転移点Tgは39.2℃、融点は132℃、分解温度は195℃であった。そこでPNo粉末試料(密度0.96g/cm<sup>3</sup>)は150℃、19.6N/cm<sup>2</sup>で圧縮成形した。これをTg以上の60℃で変形、そのまま冷却して形状を記憶させた。そして再びTg以上に加熱したところ、記憶した形状に回復することを確認した。

粉末成形では成形性が悪いので、PNoがナフテン系油との親和性が良いことを利用して分散を試みた。ナフテン系油(C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>; シクロヘキサン C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>、シクロヘキサン C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>、シクロヘプタン CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>CH<sub>3</sub>およびシクロオクタン CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>8</sub>CH<sub>3</sub>)を溶媒として超音波洗浄機で15分間分散させた。この溶液を165℃、3時間で成形した。得られたフィルム状の成形品も形状記憶性を示した。なお、分子量が大きいナフテン系油ほど良好な分散性が得られた。形状記憶動作は1回限りであるが、濃度、成形条件の調整により繊維製品等への応用の可能性がある。

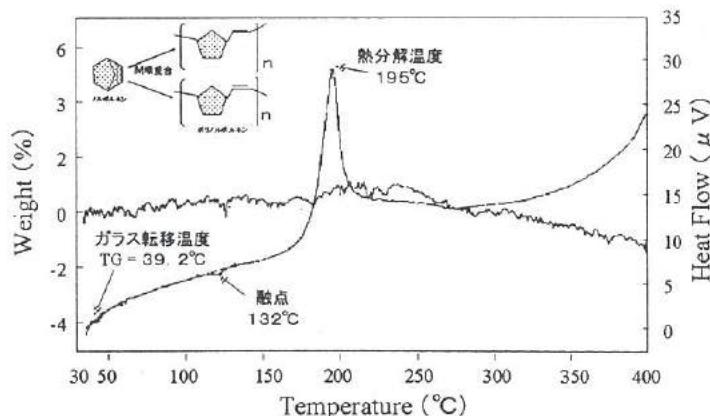


図3 PNoのTg、DTA測定

Fig.3. Result of thermal analysis.

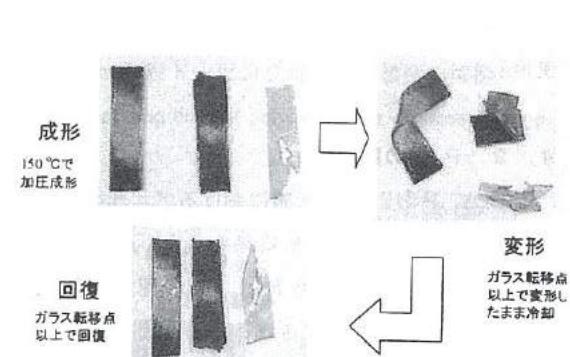


図4 形状記憶動作

Fig.4. Shape memory movements of PNo.

### 3. PAA の形状記憶

#### 3. 1 動作原理と実験方法

PAA は高分子ゲルであり、温度、pH、電界によって収縮、膨潤する。pH を変化させた場合、強アルカリ下では電荷が解離し、電荷反発により高分子主鎖は伸びきっているが、強酸下では解離していないために高分子主鎖は収縮し、体積変化が現れる<sup>⑨</sup>。

#### 3. 2 実験結果と考察

PAA ゲルは アクリル酸ステアリル 4.86g、アクリル酸メチル 3.88g、メチレンビスアクリルアミド 0.09g およびアゾビスイソブチロニトリル 0.10g をエタノール 20ml 中に溶解し、50 °Cで 24 時間攪拌して反応させた。その後、多量のエタノール溶液で反応物を洗浄し、真空乾燥して記憶材料とした。この高分子ゲルを用いて、pH2 ~ 13 の領域で体積を変化させることを試みた。その結果、どの pH 領域においても大きな体積変化は見られず、形状記憶動作を利用するアクチュエータには利用できないものと推察された。

### 4. PAn のドーピングと体積変化

#### 4. 1 試料と測定方法

PAn は導電性高分子であり、ドーパントの出入りにより体積、導電率などが変化する。PAn の基本構造はアニリンがパラ位で結合したイミノ-1,4-フェニレン [(-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>NH-)<sub>n</sub>] であり、直鎖状高分子であるが、実際には窒素原子の状態変化や、プロトンの付加、脱離が伴うため反応は複雑である。PAn が酸化されると、π電子共役系の電子が奪われ正に帯電するが、この電荷を補うためにアニオン（陰イオン）がドーパントとして窒素原子近傍に取り込まれて電気的中性を保つ。この結果、一次元的な高分子鎖内の正孔とアニオンの導入による空間的歪み（または高分子鎖の原子間距離の変化）とが結合し、ポーラロンやバイポーラロンが生成され、これが電気伝導を担う<sup>⑩</sup>と考えられている。

図 5 は PAn の代表的な 4 つの構造を示す。すなわち、酸化ドープ状態（以下、A 状態）、酸化脱ドープ状態（以下、B 状態）、還元プロトン化状態（以下、C 状態）および還元脱ドープ状態（以下、D 状態）である。本研究ではドーパントの出入りによる体積変化を利用したアクチュエータを試作するが、まず各状態での諸特性について検討した。使用した PAn は、日東電工製の A 状態 PAn、B 状態 PAn、D 状態 PAn である。C 状態 PAn は入手できなかった。

測定には元素分析として SEM、赤外分光分析として FT-IR を使用した。

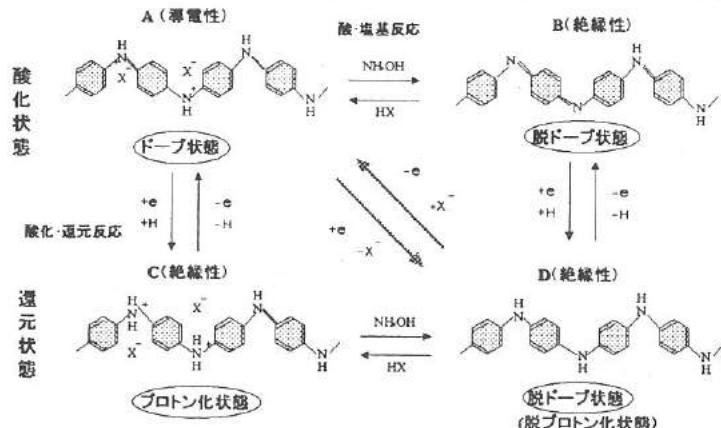


図 5 PAn の代表的な 4 つの構造

Fig.5. Representative four structures of polyaniline.

#### 4. 2 PAn の諸特性

PAn の A、B および D 状態におけるアニオンの有無に着目して、以下の解析を行った。図 6 は A 状態 PAn と、B 状態 PAn および D 状態 PAn の元素分析結果を示す。A 状態 PAn ではアニオン (HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>、または SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) の存在を示す硫黄と酸素の存在が確認され、B 状態 PAn、D 状態 PAn では確認されなかった。A 状態 PAn では、3 個のイミノ-1,4-フェニレン [(-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>NH-)<sub>n</sub>] あたり 1 個のアニオンがドーピングされることが判った。

図 7 は A 状態、B 状態および D 状態 PAn の FT-IR 分析の結果を示す。フェニレン部位に関係する 1590、1500cm<sup>-1</sup> 付近の吸収ピークは、ドーパントを含まない B 状態 PAn、D 状態 PAn で一致しているが、A 状態 PAn ではこれらのピークが低波数側にそれぞれ 15、20cm<sup>-1</sup> シフトした。A 状態（ドープ状態）では 815、880、1302、3758cm<sup>-1</sup> にイミンまたはアミンに関係する吸収ピークが見られ、窒素部位での複雑な構造が推察され、これに伴うフェニレンの変化がシフトの原因と考えられる。上記の結果、A 状態で

はアニオンが存在し、B、D では存在しないことが確認された。導電率は室温においては、A 状態 PAn で  $2.4 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ 、B 状態 PAn では  $4.4 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$  であり、ドーピントの有無で 8 衍も変化する。

PAn 膜の成形を行う前に、アニオニンの出入りに起因する PAn 単体の体積変化を化学的脱ドーピングによって調べた。図 8 は A 状態 PAn の脱ドーピング時間と重量変化の関係、図 9 は脱ドーピング時間と体積変化の関係をそれぞれ示す。24 時間の脱ドーピングの後、A 状態 PAn → B 状態 PAn では 20.4 % の重量減が見られた。120 時間後では 23.8 % であり、時間の経過とともに一定値に飽和する傾向がみられた。A 状態 PAn ではドーピント 26 ~ 24 % 程度含むと考えられる。PAn<sub>min</sub> では 3.3 個のイミノ-1,4-フェニレン [(-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>NH-)<sub>n</sub>] あたり 1 個のアニオニンを含むことが判った。元素分析の結果と良好な一致を見た。

一方、体積の変化は、24 時間の脱ドーピングの後、A 状態 PAn → B 状態 PAn で 14 % の体積が減少し、PAn 膜によるアクチュエータが可能であると考えられる。

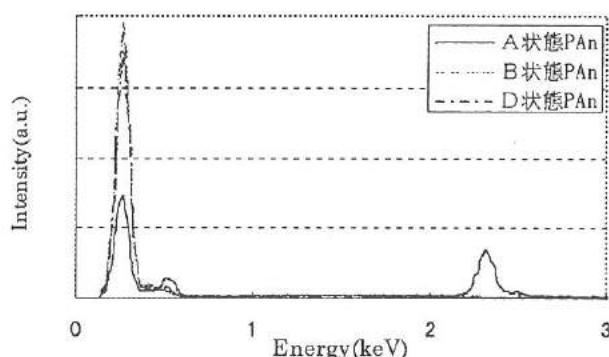


図 6 ポリアニリンのX線EDSスペクトル

Fig.6. X-ray energy dispersive spectroscopy of polyaniline.

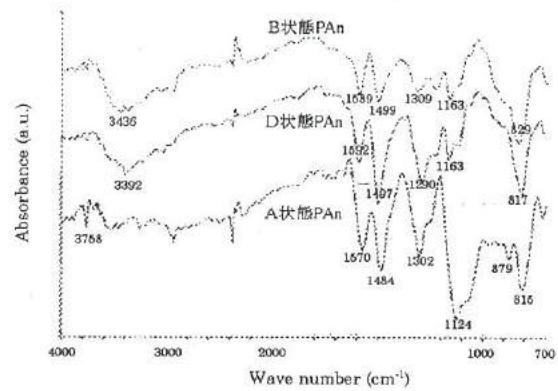


図 7 ポリアニリンの赤外吸収スペクトル

Fig.7. Infrared absorption spectroscopy of polyaniline.

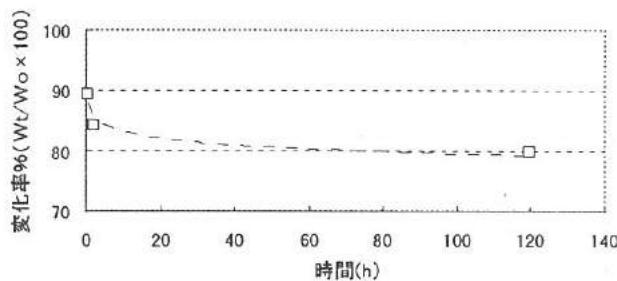


図 8 PAn の脱ドーピング時間と重量変化の関係

Fig.8. Undoping time of polyaniline vs. weight change.

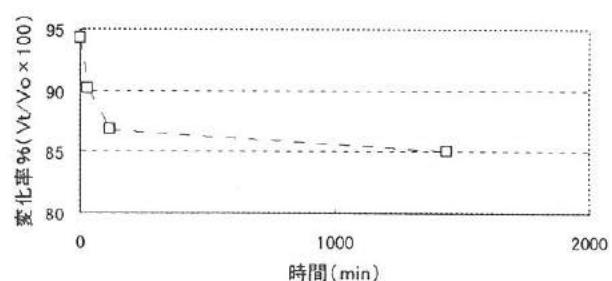


図 9 PAn の脱ドーピング時間と体積変化の関係

Fig.9. Undoping time of polyaniline vs. volume change.

#### 4. 3 PAn によるアクチュエータの試作

##### 4. 3. 1 アクチュエータの構成と動作原理

PAn 単体では成形が困難なので、各種機能性材料との複合化によりアクチュエータを試作した。PAn 複合膜は、PAn、エポキシ樹脂（以下、EPO）、アセチレンブラック（以下、AB）および 2-5-ジメルカブト-1,3,4-チアジアゾール（以下、DMcT）で作製した。PAn はドーピング-脱ドーピングに伴うアニオニンの出し入れによる体積変化のために、EPO は形態支持のために、AB は導電助剤として均

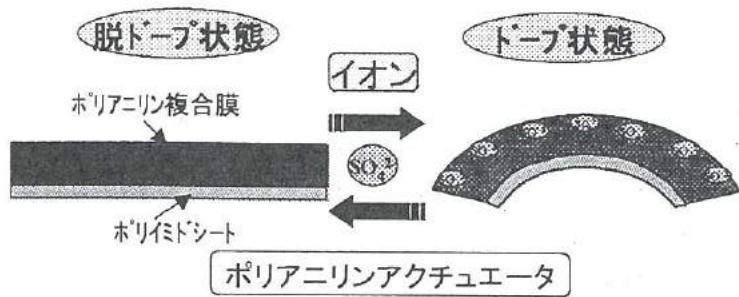


図 10 アクチュエーターの動作原理

Fig.10. Moving principle of polyaniline composite actuator.

一な電界を印加するために、また DMcT は PAn の架橋剤および PAn へのスムーズな電荷供給<sup>(9)</sup>のためにそれぞれ用いた。上記の材料を N-メチルピロリドンで溶解調整後、ポリイミドシート上に成形、120 °Cで2時間乾燥して PAn 複合膜を作製した。図 10 は PAn 複合膜アクチュエータの動作原理を示す。脱ドープ状態の PAn 複合膜にアニオンをドーピングすると体積が増加し、ポリイミドシート側に湾曲する。この状態からアニオンを脱ドーピングすると平たんな形状に戻る。ドーピングと脱ドーピングを繰り返すことによってアクチュエータとして動作する。ドーピングー脱ドーピングは、図 5 に示したように化学的方法と電気化学的方法によって行うことができる。

#### 4. 3. 2 PAn 複合膜の評価

アクチュエータに使用可能な PAn 複合膜を得るために下記材料の配合を検討した。表 1 は各材料の配合割合と複合膜の成形状態を示す。

表 1 ポリアニリン 複合膜の配合割合と特性

Table 1. Characteristics of combination ratio of polyaniline composite.

sample No.	配合割合 (wt%)				形状	収縮	硬さ	特性	その他
	PAn	AB	Epo	DMcT					
0	100				φ40	均一フィルム	柔らかい	強い、黒紫色	
1	88	14			φ40	収縮		背面に A B 偏析	
2	78	12	12		φ40	収縮	柔らかい	背面に A B 偏析	
3	67	11	22		φ40	収縮		背面に A B 偏析	
4	75	25			φ40	丸まる	硬い		
5	67	22	11		φ40	丸まる > 4	硬い		
6	60	20	20		φ40	丸まる > 5	硬い		
7	60	10		30	φ40	湾曲	柔らかい		
8	55	9	9	27	φ40	平	柔らかい		
9	50	8	17	25	φ40	平	柔らかい		
10	54	18		27	φ40	湾曲	柔らかい	硬い > 7	
11	50	17	8	25	φ40	平	柔らかい	硬い > 8	
12	46	16	16	23	φ40	平	柔らかい	硬い > 9	

図 11 は各試料の導電率を示す。表 1 および図 11 より収縮率が小さく比較的柔軟で導電率も良好であった PAn : DMcT : AB : EPO = 55 : 27 : 9 : 9 の複合膜をアクチュエータ材料として用いることにした。

#### 4. 4 PAn複合膜の化学的(脱)ドーピング

##### 4. 4. 1 化学的ドーピング

B 状態 PAn を用いて PAn 複合膜を試作し、5mol/l の硫酸を用い化学的ドーピングを行った。図 12 は PAn 複合膜の硫酸への浸漬時間と重量変化率の関係を示す。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>のドーピングによる重量増加を期待したが、逆に重量は減少した。これは硫酸中に DMcT が溶出したことによるものと推察できたため、DMcT を配合しない PAn 複合膜 (PAn : DMcT : AB : EPO = 80 : 0 : 10 : 10) を作製した。図 13 は硫酸への浸漬時間と重量変化率の関係を示す。この結果、1 %程度の重量増加が見られ、化学的にドーピングされたものと考えられる。また、DMcT を用いたものでは DMcT が硫酸中に溶出し重量が減少したものと推測できる。図 14、図 15 は DMcT を添加した試料としない試料の硫酸への浸漬時間と導電率の関係を示す。DMcT を添加したものでは、導電率が僅かに減少した。DMcT 無添加のものでは導電率は上昇し、化学的にドーピングされたことを示している。

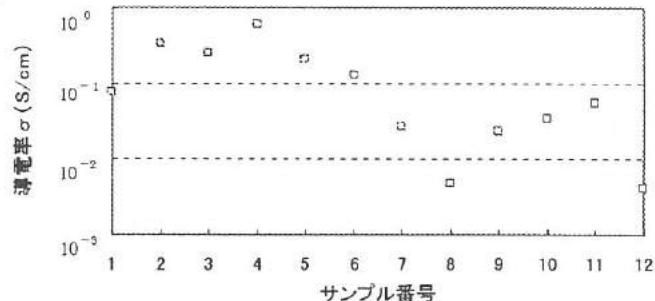


図 11 PAn複合膜の導電率

Fig.11. Conductivity of polyaniline composite.

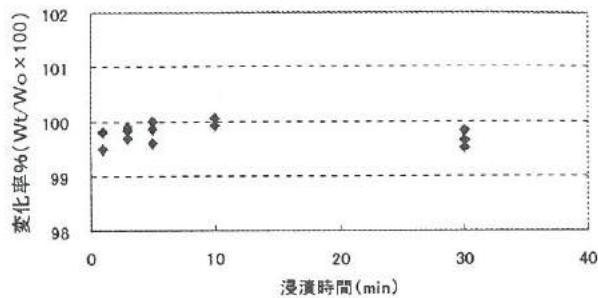


図 12 硫酸浸漬時間と重量変化率の関係(DMcT有り)

Fig.12. Doping time in sulfuric acid vs. weight change(including DMcT).

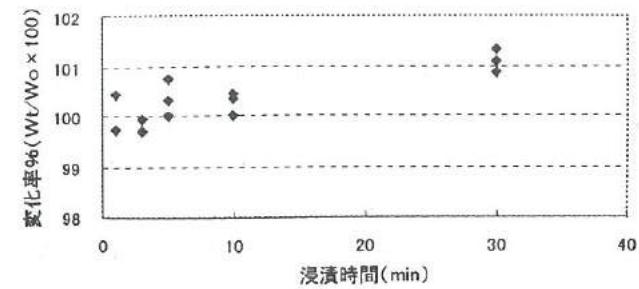


図 13 硫酸浸漬時間と重量変化率の関係(DMcT無し)

Fig.13. Doping time in sulfuric acid vs. volume change.

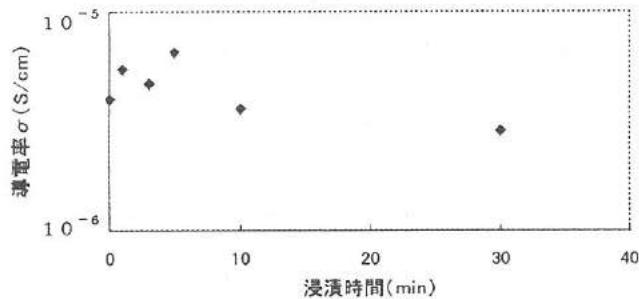


図 14 硫酸浸漬時間と導電率の関係(DMcT有り)

Fig.14. Doping time in sulfuric acid vs. conductivity(including DMcT).

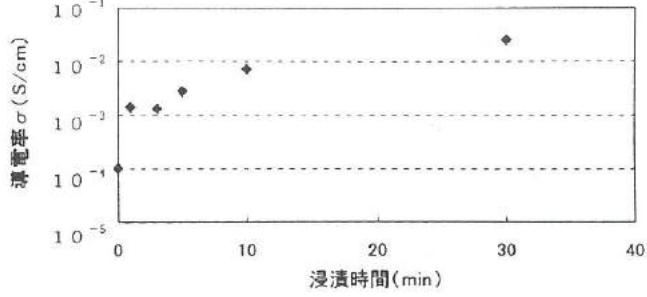


図 15 硫酸浸漬時間と導電率の関係(DMcT無し)

Fig.15. Doping time in sulfuric acid vs. conductivity.

#### 4. 4. 2 化学的脱ドーピング

A 状態 PAn 用いて PAn 複合膜を試作し、0.5mol/l のアンモニア水溶液を用いて化学的脱ドーピングを試みた。図16は浸漬時間と屈曲の様子を示す。体積変化によって PAn 複合膜は PAn 側に湾曲した。図17にアンモニア浸漬時間と重量変化率の関係を示す。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が脱ドーピングされ重量が0.6%程度減少した。次にこの変位量を調べるために曲率半径を測定した。図18にアンモニア浸漬時間と曲率半径の関係を示す。浸漬時間が長いほど曲率半径が小さくなり、重量変化率も大きくなっている。以上のことから脱ドーピングとドーピングにより、体積を変化させることができればアクチュエータとして動作する。

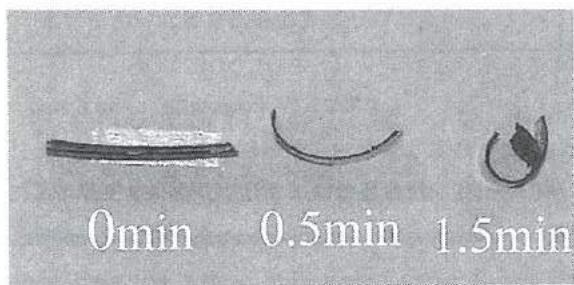


図 16 アンモニア浸漬による様子

Fig.16. Undoping time in ammonia solution vs. action of actuator.

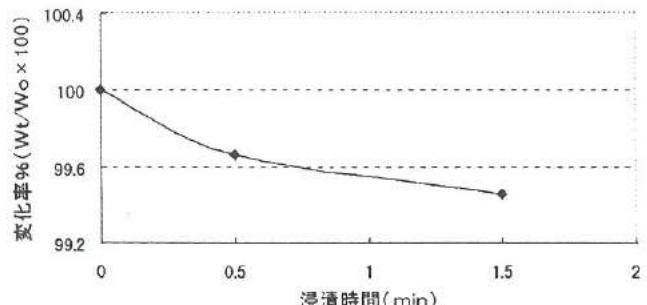


図 17 アンモニア浸漬時間と曲率半径の関係

Fig.17. Undoping time in ammonia solution vs. bending radius.

#### 4. 5 PAn複合膜の電気化学的脱ドーピングードーピング

##### 4. 5. 1 PAn複合膜の酸化と還元

還元脱ドープ状態(D状態) ⇌ 酸化ドープ状態(A状態)の変化を電気化学的に行うためには、ドーパントの出入りに対応する電位を知る必要がある。D状態 → A状態の変化では、PAnから電子が奪われて酸化体が増え、その結果、ドーパントが取り込まれる。この時の酸化ピーク電流を示す電位が酸化ピーク電位  $E_{p,a}$  である。また、A状態 → D状態の変化では、PAnに電源から電子が供給されて還元体が増加え、その結果、ドーパントが放出される。この時、還元ピーク電流を示す電位が還元ピーク電位  $E_{p,c}$  である。酸化還元電位  $E^\circ$  は次式で与えられる。

$$E^\circ = (E_{p,c} + E_{p,a})$$

そこで、サイクリックボルタモグラムにより、PAn複合膜を电解液に浸漬して酸化還元電位を調べた。複合膜はA状態PAnとD状態PAn、电解液には硫酸を0.5mol/lの割合でプロピレンカーボネートに溶かした溶液、参照電極にはAg/AgCl(sat.KCl) および集電体は400メッシュのSUS304の用いて測定を行った。図19と図20はそれぞれA状態とD状態PAnのサイクリックボルタモグラム(以下、C-V)を示す。D状態PAnのC-Vは、可逆系における典型的な酸化還元曲線を示し、 $E_{p,a}$ は0.96Vvs.Ag/AgCl、 $E_{p,c}$ は0.33Vvs.Ag/AgClであり、 $E^\circ$ は0.65であった。A状態PAnのC-Vは、酸化および還元のピークが小さく、 $E_{p,a}$ は0.89Vvs.Ag/AgCl、 $E_{p,c}$ は0.46Vvs.Ag/AgClであり、 $E^\circ$ は0.67であった。これらのことから、A状態は、D状態に比べ、 $E_{p,a}$ は電位の負の側へ0.07Vシフトし、 $E_{p,c}$ は電位の正の側へ0.13Vシフトし、 $E^\circ$ はほとんど変化しないことが判った。 $E_{p,a}$ 、 $E_{p,c}$ のシフトは、初期状態でのドーパントの有無から起因すると考えられる。 $E^\circ$ は材料自身の持つ値だから一定である。

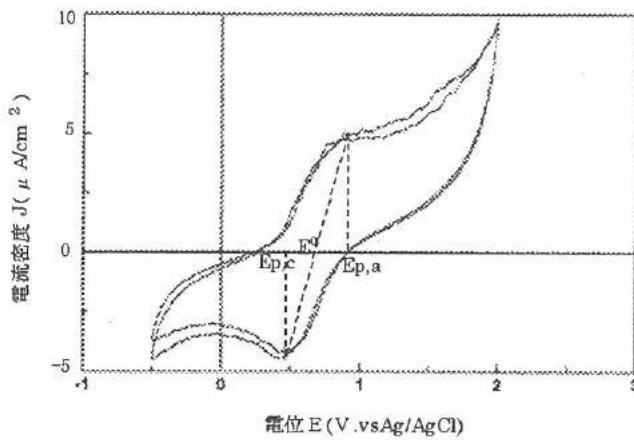


図19 脱ドープPAn複合膜のサイクリックボルタモグラム

Fig.19. Cyclic voltammogram of undoped-polyaniline composite.

##### 4. 5. 2 電気化学脱ドーピングードーピング

A状態PAn複合膜の電気化学脱ドーピングを行った。還元電位を0.33Vvs.Ag/AgClに固定して2時間行った。その結果、PAn複合膜からのSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の脱ドーピングによる重量の減少が確認された。重量の減少は4.4%であった。

更に、PAn複合膜の電気化学ドーピングを行った。酸化電位を0.96Vvs.Ag/AgClに固定して2時間行った。その結果、PAn複

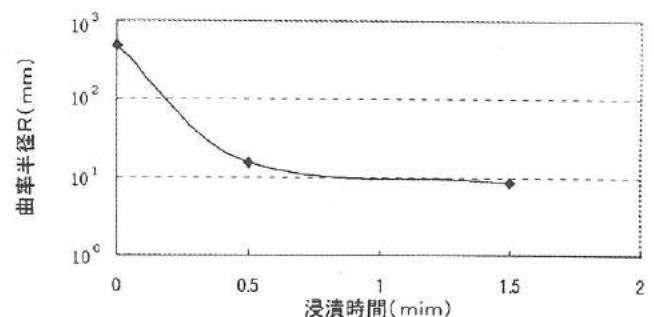


図18 アンモニア浸漬時間と重量変化率の関係

Fig.18. Undoping time in ammonia solution vs. weight change.

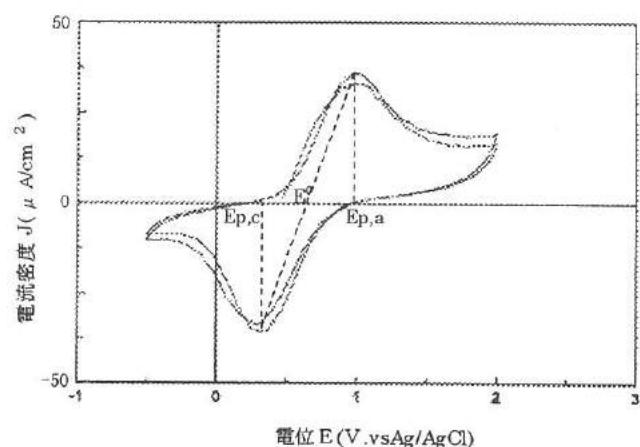


図20 脱ドープPAn複合膜のサイクリックボルタモグラム

Fig.20. Cyclic voltammogram of undoped-polyaniline composite.

合膜への  $\text{SO}_3^{\cdot-}$  のドーピングによる重量の増加が確認された。重量の増加は 1.1 % であった。PAn 自身に含まれているドーパント量から考えると変化量が少ない。この理由として、複合化による効率の低下、脱ドーピングやドーピング時間が短いことなどが考えられる。

以上のように、還元電位、酸化電位により、ドーパントの出し入れが制御でき、それに伴い重量変化が起こることが確認できた。しかし、大きな変位は見られなかった。

#### 4. 5. 3 PAn 複合膜の通電量と重量変化

D 状態 PAn 複合膜へのドーピング時の全通電量がドーパントの電荷移動によるもの（少量の成分の溶出などを無視）とした場合、通電量の測定により、移動したドーパントの量が判る。D 状態 PAn 複合膜を 150 時間ドーピングしたときの重量変化は、9.0 % であった。D 状態 PAn 複合膜はアクチュエータとして大きな動きは示さなかった。これは 4.2 で示した化学的脱ドーピングの実験から得たドーパント量の 1/3 と少ないことや、PAn 複合膜は内部にドーパントが入りにくい構造をしていることによると考えられる。

### 5. 結 言

本研究では機能性高分子材料を用いて、しなやかに外部環境（刺激）に応答する新しい概念のアクチュエータの可能性を探った。その結果は、以下のとおりである。

- (1) PNo では、折り曲げたシートが数秒で元に戻る大きな変位量が得られた。成形性の改善にはナフテン系油への分散が有効であり、他の材料との複合化が可能である。PNo は繰り返し形状記憶動作は難しいが、濃度、成形条件などの調整によって繊維製品等への応用の可能性がある。
- (2) PAA では、pH 変化による収縮・膨潤を試みたが、大きな形状記憶動作は確認できず、ある程度の変位量を必要とするアクチュエータに利用できないものと考える。
- (3) PAn は、一次元的な高分子鎖内の正孔とアニオンによる空間的歪みとが結合し、これが電気伝導を担う特異な系である。重合後はドーパントを含んだ状態であり、3 個のイミノ-1,4-フェニレンに対してアニオンが 1 個程度であった。
- (4) ドーピング-脱ドーピング状態の PAn での窒素部位の複雑な構造が確認できた。
- (5) 単体の PAn 化学的脱ドーピングでは、14 % の体積変化を示した。
- (6) ドーピング状態の PAn の成形は困難なため、EPO、AB および DMcT との複合化によりアクチュエータを試作し、化学的方法と電気化学的方法から性能を評価した。PAn 複合膜の化学的ドーピングでは、DMcT が同時に溶出するため大きな変位量は得られなかつたが、化学的脱ドーピングでは大きな変位量を得た。PAn 複合膜の電気化学的脱ドーピング-ドーピングを連続に行い、重量の減少と増加を確認したが、反応速度の問題で大きな変位量の変化は得られなかつた。
- (7) 電気化学的手法はドーピング反応を的確に制御できるので、反応速度、つまり電子移動の速度と拡散による物質移動を向上を図れば、変位量を改善できるものと考える。

### 参考文献

- (1) 吉野勝美, 清水剛夫:『分子機能材料と素子開発』, NTS (1994)
- (2) 杉本克己:形状記憶樹脂, Polyfile, Vol.2 (1994)
- (3) Y.Osada, J.P.Gong and N.Isozaki, J.J.Appl.Phys., 34, 511 (1995)
- (4) J.C.Scott, P.Pflunger, M.Krounbi and G.B.Street, Phys.Rev., B28 (1983) 2140
- (5) S.J.Visco, M.Liu and L.C.De Jonghe, J.Electrochem.Soc. 137 (1990) 1191

# V. プラスチックス上のハードコーティング技術の研究

## Development of Hard-Coated Plastics Using Electron Beam Deposition

高橋 伸忠

TAKAHASHI Nobutada

高林 外広

TAKABAYASHI Sotohiro

岩坪 聰

IWATSUBO Satoshi

水野 渡

MIZUNO Wataru

藤城 敏史

FUJIKI Satoshi

### Abstract

Recently, lightening, durability and safety are requested on the plate glasses which are used for the vehicles, the houses, the shops and daily miscellaneous goods.

The purpose of this study is the development of plastics which have good properties such as lightweight, low price, high heat resistance and transparency by using electron beam deposition method.

The results of this study are as follows:

- (1) The SiO<sub>2</sub> deposition rate of 75nm/sec was achieved. (German Inc. top data: 100nm/sec)
- (2) The film thickness of 4 μm was achieved with substrate conveying.
- (3) The thickness uniformity of large area was obtained
- (4) The surface hardness of SiO<sub>2</sub>-coated plastics was improved from HB to 4 H.
- (5) It was established to bond SiO<sub>2</sub> target with Cu backing plate.
- (6) It was confirmed that ITO film was deposited to use this vacuum deposition method.

### 1. 緒 言

世界のガラス工場には横型搬送ラインの大型ガラス用真空蒸着装置が200基以上有り、1基数億～数10億円といわれている。そして近年のニーズの多様化により、高速かつ大面積コーティングを行うために、蒸着源を上方から放射する真空蒸着技術の開発が望まれている。

真空蒸着法は金属や非金属を真空中で加熱蒸発させ、ガラス、金属やプラスチック表面上に薄膜を作製する技術で、レンズの反射防止、光学フィルターから電子デバイスなどの分野で広く用いられている。そして、車両用・住宅用・店舗用・日用雑貨などに多く用いられている板ガラスにおいては、軽量化や耐久性、安全性などが求められてきている。

そこで本研究では、耐衝撃強度に優れたポリカーボネート樹脂板の表面に酸化シリコンを下方照射真空蒸着によってコーティングし、熱・音響・光学的な特性を付加した、省エネ効果の高い複合板ガラスの開発を行ったので報告する。

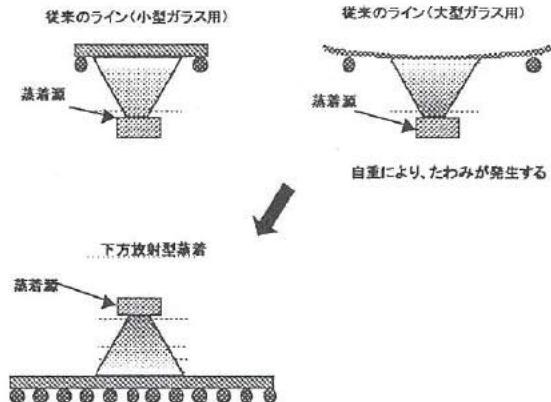


図1 真空蒸着の概要

Fig.1. Schematic process of vacuum deposition

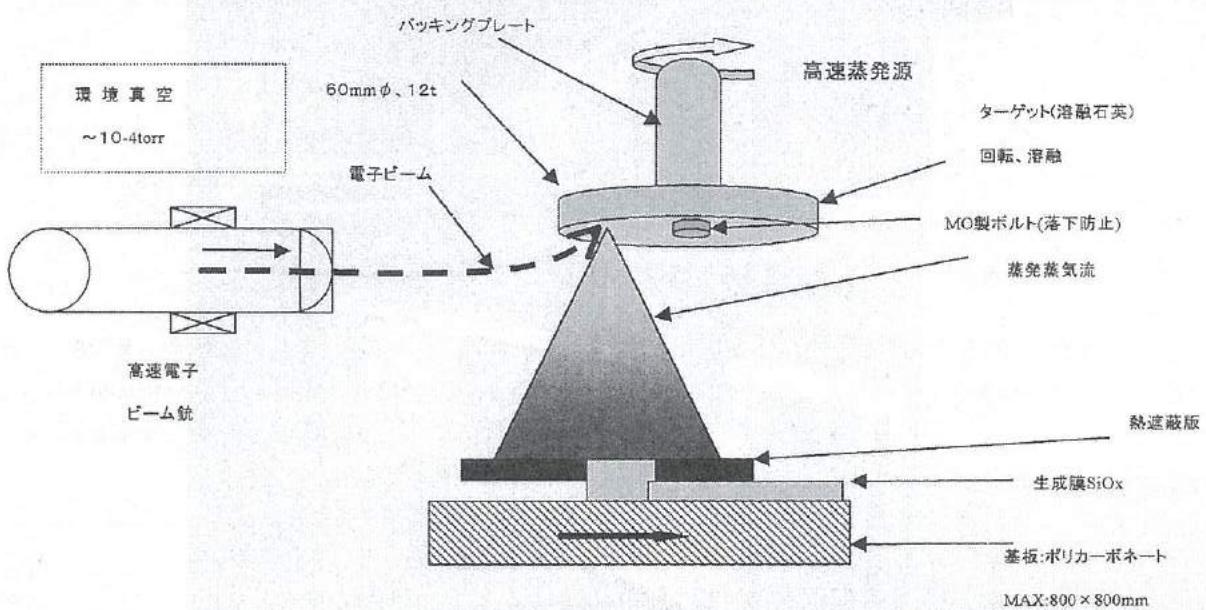


図2 真空蒸着の概要（下方照射）

Fig.2. Downward irradiating process of vacuum deposition

## 2. 下方照射型真空蒸着の原理

従来の小型ガラス用のラインは図1のように蒸着源が下で、下から上への蒸着である。一方、大型ガラス用のラインになると自重によりたわみが発生するおそれがある懸念される。そこで下方照射方式で、ロールの支えでたわみが生じない構造にすると、大型基板に対応できると考えられる。しかし下方放射方式では、溶けた蒸着源が滴下するおそれがあるので、蒸着源を昇華物質とするか、回転その他の機構により滴下、落下を防止する必要がある。

図2に下方照射真空蒸着の概要を示す。蒸着源のターゲットは銅製のパッキングプレートに落下防止としてモリブデン製のボルトで固定をして冷却しながら回転させる。ディスク状の蒸着源に高速電子ビーム銃により電子ビームを照射し、蒸発蒸気流を発生させる。そして蒸着させる基板をロールによって搬送し、ターゲットの下を通過するときに蒸着を行う。

## 3. 実験装置

### 3. 1 真空蒸着装置の概要

本研究で使用した真空蒸着装置の外観を図3に示す。本装置は、既存のプロトコーターのプロセスチャンバーの上部に蒸発源開発のための新規チャンバーを取り付けた平流ライン型成膜装置で、入口エレベーター、ローディングチャンバー(LL室)、ヒーティングチャンバー(H室)、プロセスチャンバー(P室)、アンローディングチャンバー(UL室)及び出口エレベーターの6ステージで構成されている。改造部分としては、プロセスチャンバーの上部プレート及び上部プレートの開閉機構を撤去し、新規上部プレート及び新規チャンバーを取り付け、新規チャンバーに日本電子(株)製の電子ビーム蒸発源を2基装着した。また装置の大きさは全長10.5m、高さ2.45m、幅1.8mである。

### 3. 2 電子ビーム蒸発源

本研究で用いた電子ビームは真空蒸着用に設計されたもので、主な仕様は、方式は陰極直熱式自己加速型、最大出力は10kW (10kV 1A)、電子ビーム偏向は180度電磁偏向、電子ビーム走査は最大振幅±10mm (X,Y共) 走査速さはX:50Hz (三角波) Y:500Hz (三角波)、電子ビーム位置調整量は±5mm (X,Y共)、冷却水量は2L/min以上である。

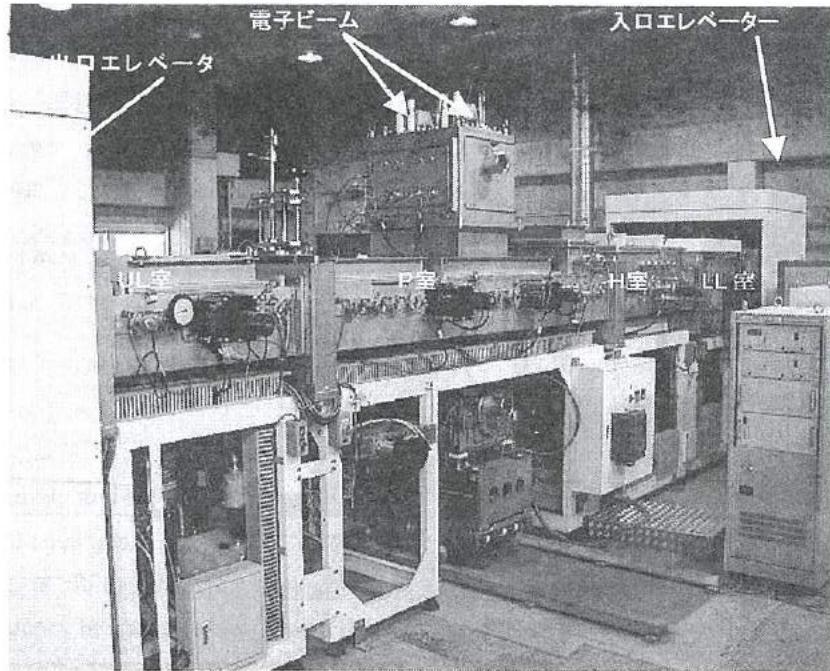


図3 真空蒸着装置の概要

Fig.3. Appearance of vacuum deposition equipment

電子ビーム銃は、電子ビーム発生部と電子ビーム偏向部及び電ビーム走査部により構成される。電子ビーム発生部（電子銃）は2極管型で負の高電位（10kV）にあるフィラメントウエルネストとアース電位にあるアノードにより所定の電子ビームを発生させる。電子ビーム偏向部はこの電子ビームを180度偏向し、計画された電子ビーム形状をもって蒸発試料に照射させるための電磁石とホールピースがある。電子ビーム走査部は蒸発試料に照射する電子ビームをスキャンさせる電磁型で、50Hz、500Hzで蒸発試料上を走査する。またこれらの各部分は温度上昇を抑えるために水で冷却されている。

### 3. 3 ターゲット

ターゲットは、下方照射蒸着方式に対応できるよう、昇華型物質のSiO<sub>2</sub>及びITOで実験を行った。SiO<sub>2</sub>は市販(Φ60mm, t=12mm)のものにボルトで止めるための穴加工を施した。また、ITOは粉末カーボン型に入れ、真空中でホットプレスした。ITO作製の詳細については後章で説明する。

### 3. 4 基板及び前処理

蒸着膜の作製実験に用いた基板は100mm□のPC（帝人化成パンライト PC-1111 t:5mm、）の板で、アルコールで超音波洗浄をしてから蒸着を行った（真空度:3×10<sup>-3</sup>Pa）。また膜厚の測定には工業技術センターの表面粗さ計（Form talysurf series/Taylor Hobson 製）を使用した。

## 4. 実験結果と考察

### 4. 1 蒸着膜の作製条件

基板を固定して蒸着を行ったときの電流値と時間による膜厚との関係を図4に、電流値と蒸着速度との関係を図5に示す。各電流値とも時間に対して膜厚は比例して増加していることが分かった。そして電流値の増大に伴い蒸着速度も大きくなることが分かった。次に、基板を搬送時の搬送速度と膜厚の関係を図6に示す。搬送速度を遅くすることにより膜厚は増加し、600mAの電流値、525mm/minの搬送速度で蒸着を行うと約4μmの膜厚が得られた。またその時の膜厚の均一特性を図7に、測定場所を図8

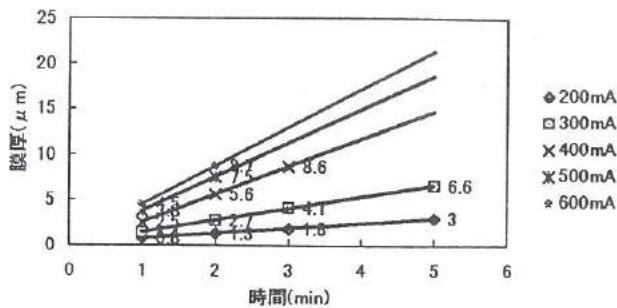


図4 電流値と時間による膜厚との関係

Fig.4. The relationship between the film thickness and the depositing time on the each electric current value

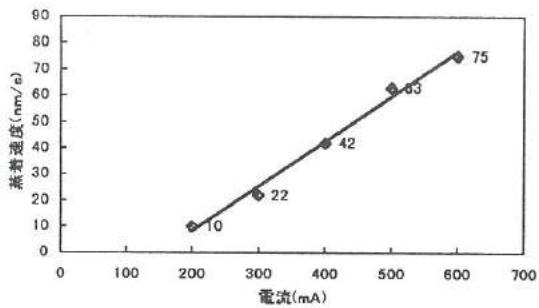


図5 電流値と蒸着速度との関係

Fig.5. The relationship between the electric current value and the deposition rate

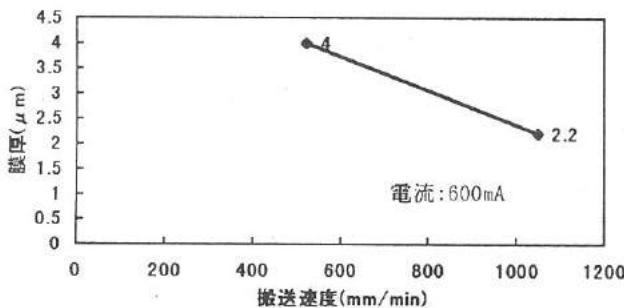


図6 搬送速度と膜厚の関係

Fig.6. The relationship between the conveyance speed and the film thickness

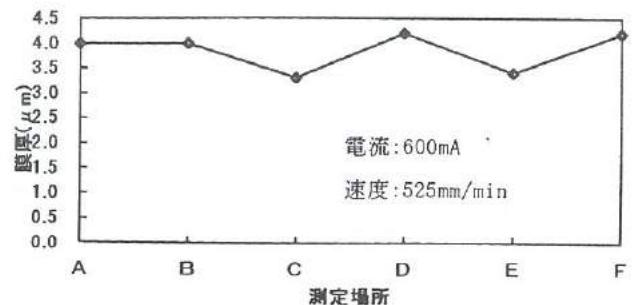


図7 膜厚の均一特性

Fig.7. The uniform characteristic of the film thickness

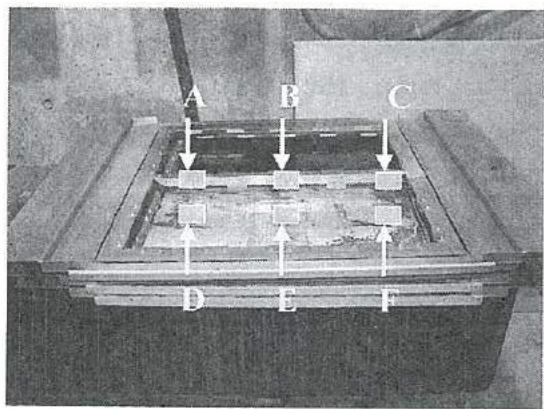


図8 測定場所

Fig.8. Measured points for the film

に示す。800×400mm の基板面積範囲の中では、ほぼ均一な膜厚特性が得られた

#### 4. 2 蒸着膜の評価

##### 4. 2. 1 鉛筆硬度試験

素材とコーティング面の表面硬度の比較を鉛筆硬度試験機（安田精機製作所 JIS K-5400）にて行った、その結果を表1に示す。素材のPCの表面硬度はHBであったがSiO<sub>2</sub>をコーティングすることにより表面硬度は4Hまで向上した。これは一般的な携帯電話筐体と携帯電話レンズと比較すると、それ以上または同等の表面硬度まで向上していることがわかる。また参考として、携帯電話筐体はPC/ABSの成形品にUV塗料を塗ってからUV照射で硬化させているのに対し、携帯電話レンズはUV塗料の半乾きのフィルムシートをインモールド成形後UV照射で硬化させているという違いがある。

表 1 表面硬度測定結果

Table 1 Surface hardness measurement result

	素材 (PC-1111)	素材+蒸着 (SiO <sub>2</sub> : 7.5 μm)	携帯電話筐体 (PC/ABS+UV)	携帯電話レンズ (PMMA+UV)
鉛筆硬度	HB	4H	2H	4H

※UV 塗料 : M-50 (オリジン電気)、主成分 : PMMA

#### 4. 2. 2 スクラッチ試験

スクラッチ試験は、球または針状の圧子に荷重をかけ膜面に引っかき傷を付ける方法である。定性的な評価方法としては、目視、光学顕微鏡または SEM により傷の付き具合を見るか、また触針計により傷の深さを測定する。スクラッチ法では引き剥がし方におけるデータのばらつきが少ない。しかし、スクラッチ荷重の値は本来の意味における付着力のみによって支配されているのではなく、膜の硬さや膜面の摩擦係数によって左右される。従って、データの解釈によっては注意を要する。

基板の予備加熱なしの時の膜厚とスクラッチ荷重の関係を図 9 に、基板加熱設定温度とスクラッチ荷重の関係を図 10 に示す。予備加熱なしの場合、膜厚の増加に伴いスクラッチ荷重は増加した。これは膜厚が増えたためと思われる。また、前処理として基板を予備加熱させた場合は、加熱温度が高くなるにつれてスクラッチ荷重は減少した (成膜条件 : 500mA × 2min < 7.5 μm >)。これは、基板の熱処理の影響で、膜組織の結晶状態が変化し硬度が変化したのではないかと推測される。

#### 4. 2. 3 ヒートショック試験

ヒートショック試験 (-40°C → 80°C 100 サイクル) 後の表面状態を金属顕微鏡で観察した結果を図 11 に示す。この時の成膜条件は電流値と時間は 500mA × 2min < 7.5 μ m > で一定とし、基板加熱設定温度を 100°C と 250°C と変化させた。

基板加熱温度が低い方が表面に大きな亀裂が見られたが、これは表面に残留応力が残っていたためであり、高い温度で成膜したことによってアニーリングされ残留応力が抜け、基板加熱温度が 250°C のときは亀裂が小さかったのではないかと考えられる。

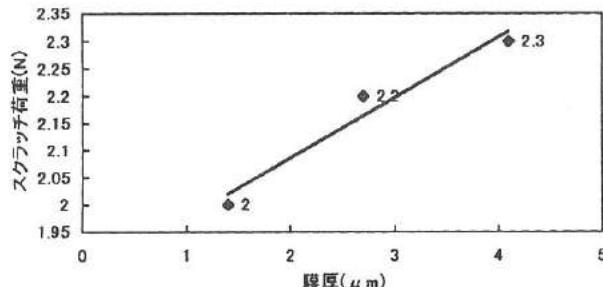


図 9 膜厚とスクラッチ荷重の関係

Fig.9. The relationship between the film thickness and the scratch load

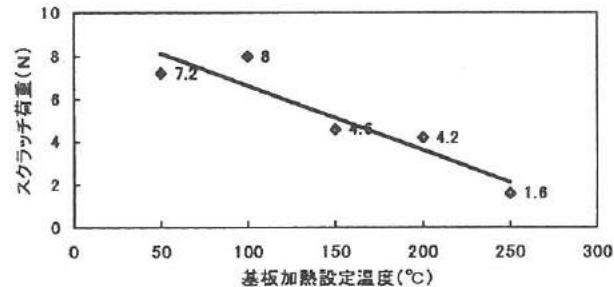
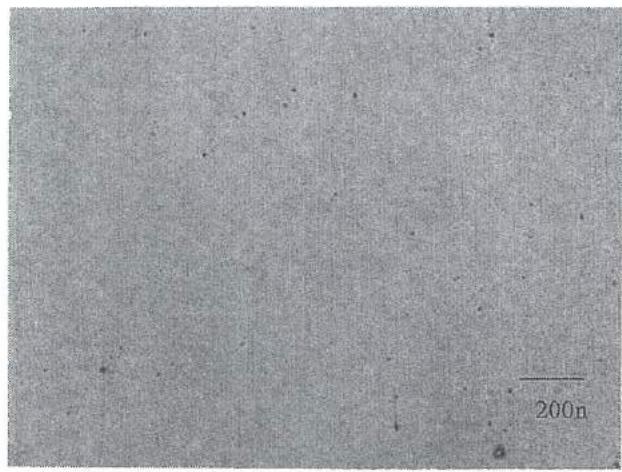


図 10 基板加熱設定温度とスクラッチ荷重の関係

Fig.10 The relationship between the setting temperature of substrate and the scratch load



基板加熱温度 100°C



基板加熱温度 250°C

図 11 ヒートショック試験後の表面観察

Fig.11. Surface observation after heat shock examination

## 5. ポルト締め以外のターゲット固定方法の検討

現在、ターゲットは落下防止のために Mo 製のボルトでターゲットをバッキングプレートに固定しているが、これにより図 12 のようにボルト部はスキャニングができず、ターゲットの使用効率が悪く、また、冷却効率もバッキングプレートと密接していないためあまり良くないという問題があった。そこで、 $\text{SiO}_2$  と Cu (バッキングプレート) とのボンディング技術を確立して、ボルトレスターゲットの作製を行った。

ボルトレスターゲット作製の概要を図 13 に示す。まず、 $\text{SiO}_2$  ターゲットの表面に、マグネットロンスパッタリングにより Cr、Cu、Pt の順に着膜を行う。ここで Cr は  $\text{SiO}_2$  と Cu の密着性を上げるために、Pt は Cu の酸化防止のためである。

作製方法は、まず熱プレス機にバッキングプレートをのせて 180°C で 5 分間予備加熱する。そこにインジウム箔をのせピンセットで均一にして、その上にターゲットをのせてプレスする。そのまま加熱して、はみ出たインジウムが解けるまで待ち、熱プレス機のヒーターを切り、圧力をかけたまま自然冷却をおこなう。

上記の方法により、蒸着ができる程度の密着力を持ったボルトレスターゲットの作製に成功した。

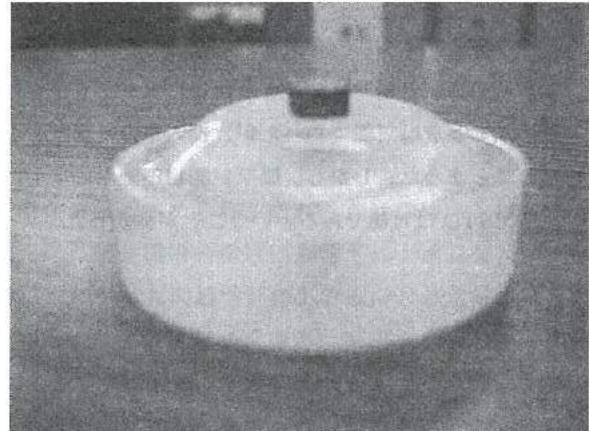


図 12  $\text{SiO}_2$  ターゲット

Fig.12. Appearance of silicon dioxide target

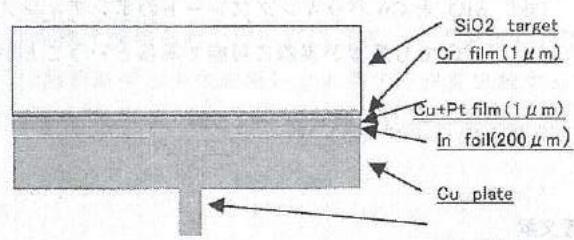


図 13 ボルトレスターゲットの概要

Fig.13 Structure of bolt less target

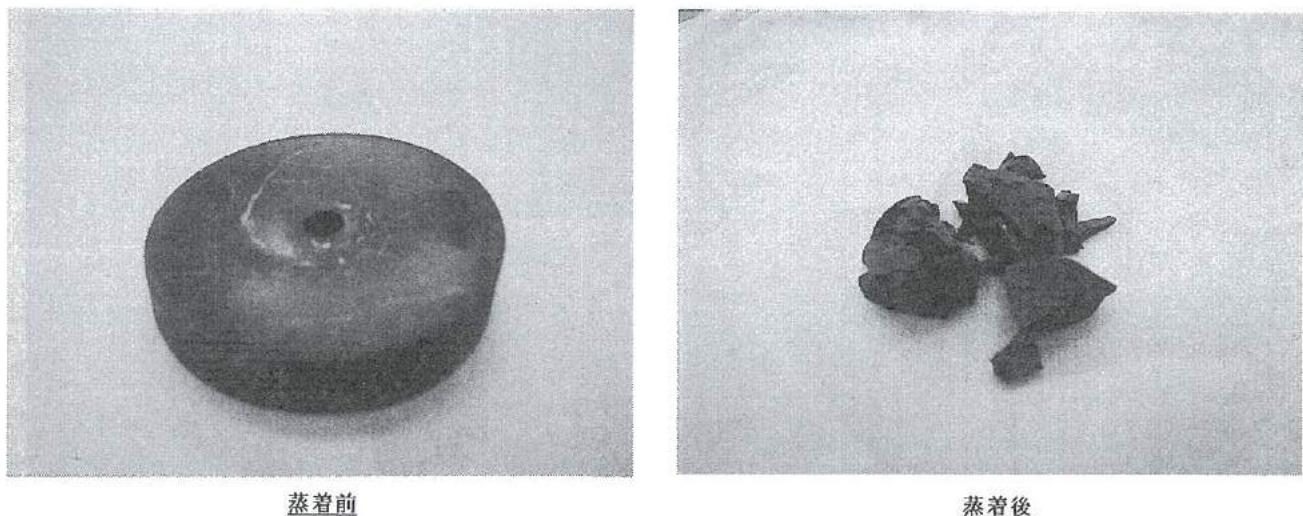


図 14 ITO ターゲット

Fig.14. Appearance of ITO target before the deposition and after the deposition

## 6. ITO ターゲットの検討

次に他材料のターゲットでの蒸着の検討を行った。 $\text{SiO}_2$ と同じ昇華型の物質として、透明導電材料の ITO がある。そこで、市販の ITO の粉末を購入し、ホットプレス法にてターゲットを作製した。作製条件は、加熱温度  $1100^\circ\text{C} \times 1\text{ h}$ 、圧力  $1.7\text{ MPa}$  である。この時の作製したサンプルと蒸着後のターゲットを図 14 に示す。

昇華型のため蒸着は可能であったが、投入電力の調整や ITO の焼結密度不足等の理由から図のように ITO ターゲットは割れて粉々になってしまった。しかし、膜厚が測定不能な程度ではあるが着膜が目視で確認できるサンプルを作製することができ、下方照射の蒸着で ITO は可能であるということが分かった。

## 7. 結 言

本研究では、下方照射型電子ビーム銃を用いた真空蒸着方法による、プラスチック上のハードコーティング技術について研究を行い、以下の成果を得た。

- (1)  $\text{SiO}_2$ の蒸着成膜速度  $75\text{nm/sec}$  を達成した。(ドイツ社トップデータ :  $100\text{nm/sec}$ )
- (2) 基板を搬送しながら成膜し、 $4\mu\text{m}$  の膜厚を得ることができた。
- (3) 大面積でもほぼ均一の膜厚性を得ることができた。
- (4) 素材の表面硬度を HB から 4 H まで向上させることができた。
- (5)  $\text{SiO}_2$ と Cu バッキングプレートのボンディング技術を確立した。
- (6) ITO でも蒸着が実際に可能であるということが確認できた。

## 参考文献

- (1) 早川 茂 他 ; 「薄膜化技術」、共立出版株式会社 (1988 年)

# VI. エンジンの動弁機構における構造解析および強度評価

## Dynamic Structural Analysis and Strength Evaluation for Valve Train System in Automobile Engine

島村 和孝

佐山 利彦

森本 英樹

藤城 敏史

SHIMAMURA Kazutaka

SAYAMA Toshihiko

MORIMOTO Hideki

FUJIKI Satoshi

### Abstract

Valve train system is one of the most influential factors for output power of automobile engine. However, development of high power engine is accompanied by unstable phenomena such as bounce of valve or surging of valve spring. This increases trial fabrication process in number and period. In order to reduce the process, a series of finite element analyses will be carried out to evaluate the motion of the valve train system and dynamic stress distribution in each part. Consequently, a simple mass-spring model, which is constructed by mass, spring, damper, gap and beam elements, reproduces detailed motion of the system including the bounce of valve. And bounce height of valve strongly depends on the engine speed. Both calculated and experimental data show the tendency that sharp increase of bounce level appears over a certain rotation speed of cam shaft. Additionally, it is clarified that huge stress is yielded dynamically in each part because of the frequent collision with each other. Further modification of finite element model and more precise measurement of vibration properties will lead us practical simulation of the system.

### 1. 緒 言

近年、自動車エンジンには高出力、低燃費、長寿命などの高性能化が強く求められ、これらの性能はエンジン内への吸気、排気を行う動弁機構によって大きく左右される。特に、高出力化は動弁機構の構成に影響され、エンジンが高速で回転すると、構成部品の破損や機構自体の異常な挙動など、低速時にはなかった問題<sup>(1)</sup>が発生する。このため、試作、テスト回数が増加し、開発コスト、開発期間が増加するという問題を抱えている。そこで、開発コスト、開発期間を短縮する一つの手段として CAE (Computer Aided Engineering) が機器の設計に広く用いられている。CAE とは、部品、機構などをコンピュータ上で数値モデル化し、その挙動を解析、評価する技術<sup>(2)</sup>である。問題箇所の発見と解決をすべてコンピュータ上のシミュレーションで行う方法で、余分な試作、テスト回数を削減することを目的とする。最終的には、CAE による設計案に対して実機での確認を行う必要があるが、試作、テストを何度も繰返す従来の手法よりはるかに効率的である。

そこで本研究では、自動車エンジンの動弁機構を対象として、その挙動を推定し、構成部品の強度を評価するためのモデル化を含む CAE 関連技術の開発を目的とした。最初に、エンジンの動弁機構を最小限の有限要素でモデル化し、ばね、減衰、質量などの動的特性を実験モード解析により決定する。次に、解析結果と実機を用いた計測データを比較することによりモデルの問題点を明確にし、実用に耐えうる動弁系モデルの可能性を示す。最後に、動弁機構の解析結果を用いて、エンジンの構成部品内に発生する応力を評価する。

### 2. エンジンの動弁機構とその解析

#### 2. 1 動弁機構

エンジンの吸気、排気バルブを開閉させる機構を総称して動弁機構と呼ぶ。図 1 は、エンジンの動弁機構を模式的に表す。カムシャフトの回転によって、カムシャフト突起部の形状がロッカーアーム、バルブへと伝わり、燃焼室のバルブが開く。しかし、バルブにはバルブスプリングから上向きの荷重が常に作用しているため、カムシャフトの突起部の形状

に追従してバルブと共にロッカーアームが初期位置へ戻り、燃焼室のバルブが閉じる。

## 2. 2 バウンス現象

動弁機構は前記の挙動を繰返し、吸気、排気を周期的に行う。エンジンの回転数が低速であれば、バルブの動きはカムシャフトの形状に追従するので問題は生じない。しかし、回転数が高くなるにつれて、動弁系の慣性力がバルブスプリングのばね力を上回るようになるため、バルブやロッカーアーム等がカムシャフトから浮き上がる。設計値より大きくなりリフトしたバルブは、初期位置へ戻るまでに余分に加速されるため、ロッカーアームやシリンダヘッドと互いに激しく衝突し跳ね返るようになる。これがバウンス現象である。バウンスが発生することにより、閉弁時期が大幅に狂ってエンジンの出力低下と騒音増加を招く。また、構成部品間に発生する応力が許容応力を超え、部品の破損に至ることもある。したがって、動弁機構の挙動を解析する際には、カムシャフトの高速回転時でのバウンス現象を適切に再現しなければならない。

## 3. 動弁機構のモデル化

### 3. 1 ばね-ソリッドモデル

動弁機構の挙動を有限要素法によりモデル化する際に問題となるのが解析時間である。有限要素解析では、解析時間はモデルの総自由度（節点数）により大きく左右されるため、作成前に十分検討する必要がある。解析の対象となる動弁機構をすべて3次元ソリッド要素でモデル化するのは、総自由度が極端に増えるため現実的ではない。したがって、構成部品の強度評価に必要な部品のみを3次元ソリッドでモデル化し、他を質点、バネ、および減衰からなる1次元コンビネーション要素で置き換えたほうが解析時間を短縮できる。図3は、ばね-ソリッドモデルの作成例である。ロッカーアームをソリッドモデルとし、それ以外の構成部品は1次元コンビネーション要素で表現している。それぞれの構成部品が接触する部分では、接触剛性とギャップを有する1次元コンビネーション要素を用いている。

それでも、ロッカーアームは複雑な形状をしているため、ソリッド要素に分割する際にモデル全体の要素数の増加を招き、解析時間が膨大なものになる。そのため、本研究ではばね-ソリッドモデルは使用しないこととした。

### 3. 2 ばね-質点モデル

前述のばね-ソリッドモデルによる解析を行う段階では、系全体の挙動が明確になっていることが前提である。そこで、まず系全体の挙動が実際の動弁系の挙動と一致するように各部をモデル化しなければならない。しかし、系全体の挙動を合わせ込む過程では、構成部品に発生する応力を計算する必要はないので、解析時間を短縮するため構成部品を簡略に表

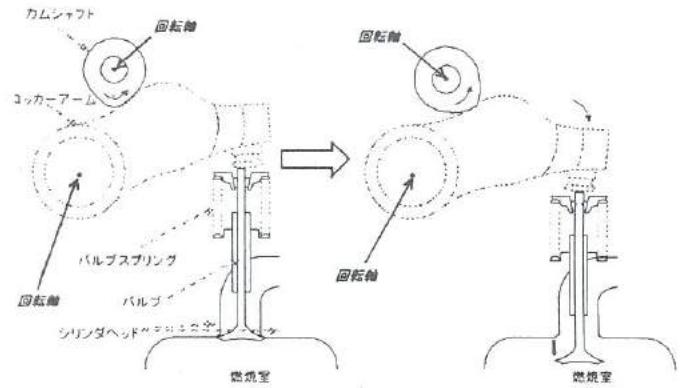


図1 エンジンの動弁機構の模式図  
Fig. 1 Configuration of valve train system

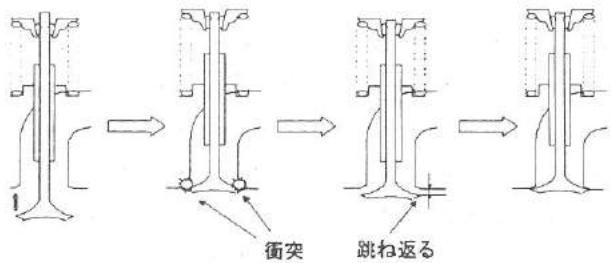


図2 バウンス現象  
Fig. 2 Bounce phenomenon in valve motion

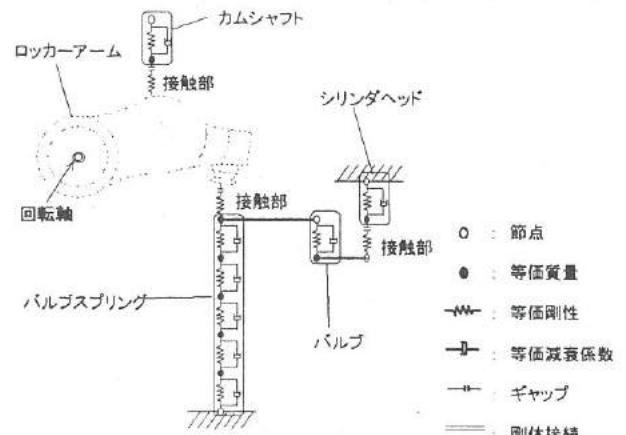


図3 ばね-ソリッドモデル  
Fig. 3 Solid-spring model of valve train system

現したばね-質点モデルを用いる。図4は、ばね-質点モデルを示す。構成部品の質量は、図4の●の節点へ適用する。カムシャフト、バルブ、シリンダヘッドは、1次元コンビネーション要素を用い剛性、減衰をそれぞれの箇所へ適用する。ロッカーアームの部分は、1次元の弾性体はり要素で近似した。ロッカーアームは複雑な形状をしているため、複数個の要素を一列に並べ、要素ごとに断面積、断面2次モーメントを定めた。構成部品の接触部分へは、ばね-ソリッドモデルと同じく接触剛性とギャップの機能を有する1次元コンビネーション要素を用いた。なお、1次元要素で置き換えた構成部品は実際の構成部品と同じ挙動を示すよう各要素の質量、剛性及び減衰を決定する。

#### 4. 振動特性の決定

##### 4. 1 実験モード解析

動弁系の挙動解析で、ばね-質点モデルを使用する際には、実際の構成部品と力学的に等価なモデルとする必要がある。そのため、各部の固有振動モードを再現できるばね-質点モデルとなるように振動特性を実験モード解析によって定めた。実験モード解析は、物体の加振による応答を計測してその振動特性を求める方法である。以下にその手順を示す。

###### (1) 実験方法

図5に実験の概要を示す。ここでは打撃試験による実験モード解析を行った。インパルスハンマーにより物体のある一点を加振し、加速度ピックアップでその振動応答を計測する。加振力および振動応答をFFTによって変換し、周波数伝達関数を求めて、ボード線図上に表示する。伝達関数のピークが共振点を表し、このピークを用いて以下の方法で振動特性を決定する。

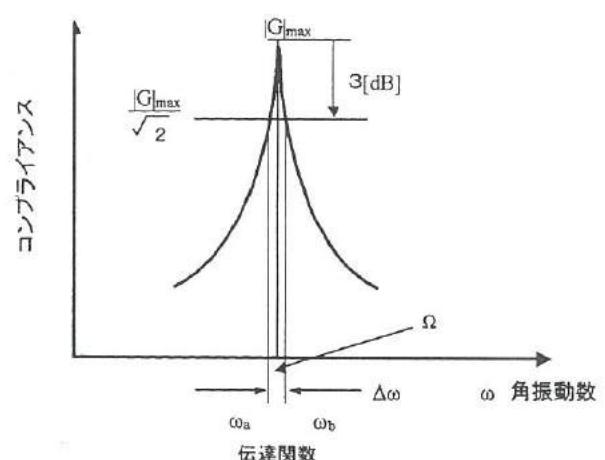
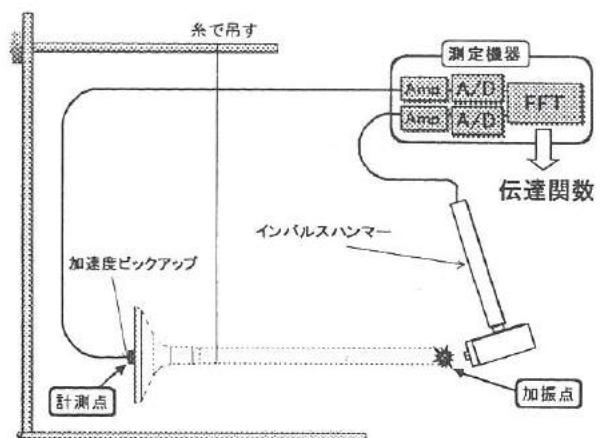
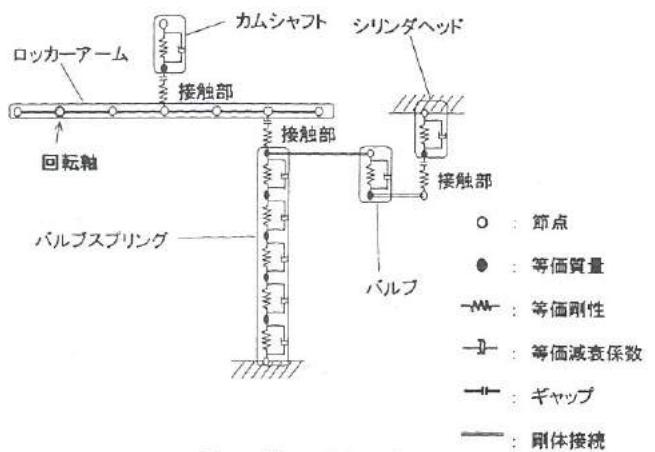
a. 図6に示す共振ピークにおけるコンプライアンスを $|G|_{max}$ 、角振動数を $\Omega$ とする。また、 $|G|_{max}/\sqrt{2}$ における角振動数を $\omega_a, \omega_b$ とし、 $\Delta\omega = \omega_a - \omega_b$ を求める。

b. 固有振動数における減衰比 $\xi$ は次の式で与えられる。

$$\text{減衰比} : \xi = \frac{\Delta\omega}{2\Omega} \quad (1)$$

c. さらに、3次元物体の固有振動モードに対応する等価な1次元の振動特性は次の式で与えられる。

$$\text{等価剛性} : k = \frac{1}{2\xi|G|_{max}} \quad (2)$$



$$\text{等価質量} : m = \frac{k}{\Omega^2} \quad (3)$$

$$\text{等価減衰} : c = 2 \xi \sqrt{km} \quad (4)$$

構成部品ごとに実験モード解析を実施し、等価な振動特性を算出する。

図7、図8は打撃試験より得られる周波数伝達関数の例を示す。図7はバルブスプリングの伝達関数、図8はバルブとシリンダヘッドの接触による伝達関数である。各図において、横軸は角振動数、縦軸はコンプライアンスを表す。共振ピークは、コンプライアンス値が周辺の値より著しく高い部分であり、角振動数の低い方から1次、2次、3次の振動モードを表す。各振動モードにおける共振周波数は100Hzよりもはるかに高く、これに対してカムシャフトの回転による周波数は100Hzより小さいことから、1次モードのみの影響を考慮することとした。表1は、実験モード解析により得られたばね一質点モデルの振動特性をまとめたものである。表中の記号は図9に示す各要素に対応する。

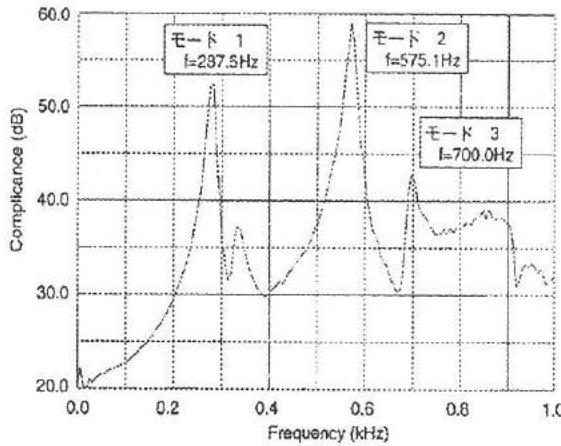


図7 周波数応答(バルブスプリング)  
Fig. 7 Frequency response function of valve spring

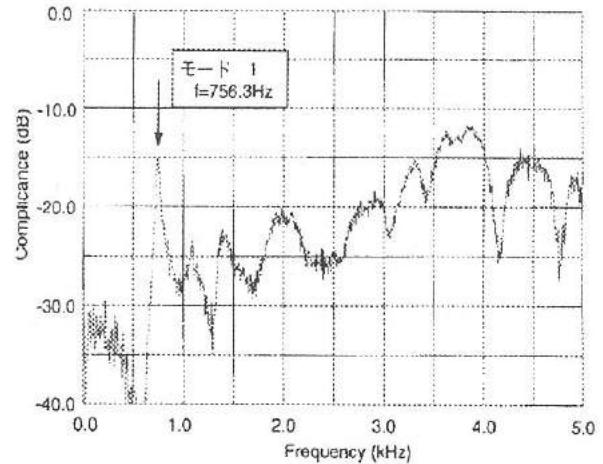


図8 周波数応答(バルブとシリンダヘッドの接触)  
Fig. 8 Frequency response function of contact region with valve in cylinder head

表1 ばね一質点モデルの振動特性  
Table 1 Measured vibration properties in mass-spring model of the valve train system

構成部品名	記号	要素タイプ	パラメータ					材料特性			
			断面積 (mm <sup>2</sup> )	断面2次モーメント (mm <sup>4</sup> )	等価質量m (kg)	等価剛性k (N/m)	等価減衰係数 (N·s/m)	ギャップL (mm)	ヤング率 (GPa)	密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	
ロッカーアーム	r1	1次元 弹性はり 要素	1.17E+02	1.50E+03					2.06E+08	7.80E-06	0.3
	r2		1.17E+02	1.73E+03							
	r3		5.82E+03	1.11E+07							
	r4		1.68E+02	1.04E+04							
	r5		1.76E+02	1.36E+04							
	r6		1.32E+02	8.87E+03							
バルブ	v	1次元 コンビネーション 要素			1.36	1.08E+08	1104.613				
	e1					1.08E+10		0.115			
	e2					5.56E+09		0.115			
	e3					4.02E-02	5.56E+07	37.675			
	e4					1.06E-02	1.96714.296	17.255			
	e5					6.91E-03	229500	20.13			
	e6					6.85E-03	229500	20.13			
	e7					2.33E-03	186081.081	18.913			
	e8					1.02E-02	208636.384	18.302			
	e9					9.63E+09		0.01			
シリンダヘッド	g3					4.26	9.63E+07	891.191			

#### 4. 2 ばね特性のモデル化

動弁機構のばね一質点系モデルにおいて、ロッカーアーム以外の部分は、実験モード解析により等価な一つのばね要素で置き換える。しかし、バルブスプリングには巻数の粗密があるので、全体を複数個のばね要素によってモデル化する。すなわち、図10に示すようにバルブスプリング全体と同じ長さに分割し、各部分を等価なばね要素によって置き換えた。分割した*i*番目の部分について、要素のばね特性を次のように定めた。まず、バルブスプリングを3次

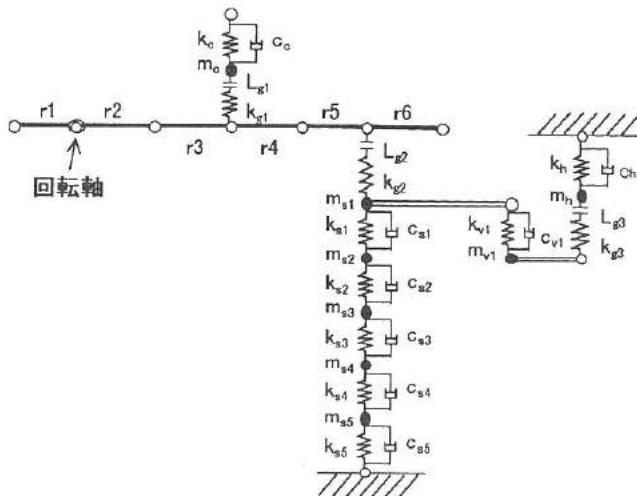


図9 ばね-質点モデル  
Fig. 9 Mass-spring model of valve train system

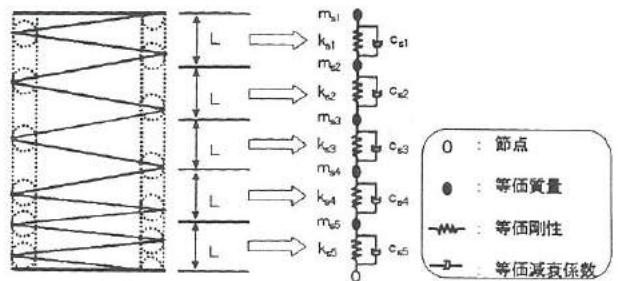


図10 ばねのモデル化  
Fig. 10 Modeling of valve spring

元 CAD によりソリッドモデル化し、質量  $m_{si}$  をその体積計算により求めた。次に、バルブスプリングの 3 次元有限要素解析を実施し、バルブスプリングを圧縮負荷した場合の各部の変位量を用いて、剛性  $k_{si}$  を求めた。当然、バルブスプリングの全体の剛性  $k_s$  と各部の剛性  $k_{si}$  の間には、次式の関係が成り立つ。

$$\frac{1}{k_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_{si}} \quad (5)$$

さらに、減衰係数については比例減衰を想定し、各部の減衰係数  $c_{si}$  が剛性  $k_{si}$  に比例するものとして、次式により  $c_{si}$  を定めた。

$$c_{si} = \frac{k_{si}}{k_s} c_s \quad (6)$$

ここに、 $c_s$  は実験モード解析により求めたバルブスプリングの 1 次モードの減衰係数である。

## 5. 動弁機構の応答解析

### 5. 1 回転数によるバウンス量の変化

ばね-質点モデルを用いてバウンス現象が発生するバルブの挙動について解析を行った。なお、バルブのバウンス量は図 11 に示すようにバルブのシリンダヘッドからのリフト量によって定義する。図 12 は、カムシャフトの回転数 2000rpm ~ 4000rpm の範囲におけるバルブリフト曲線を示す。横軸は時間、縦軸はバルブ設計における最大リフト量に対する割合を表す。カムシャフトの回転数が 2000rpm ~ 3000rpm の範囲では、バウンス量は 1 ~ 2 % とごくわずかである。バルブリフト曲線の終わりの部分における小さな山はカムシャフト、ロッカーアーム、バルブが一体となった状態での振動に起因するものである。回転数が 3500rpm 付近まで増加すると、リフト量が 100% を超えバルブがロッカーアームから実際に離れる状態が出現する。同時にバウンス量が急激に増加し始める。さらに、4000rpm での解析結果においてはバウンス量が 10% を越えるまでになる。

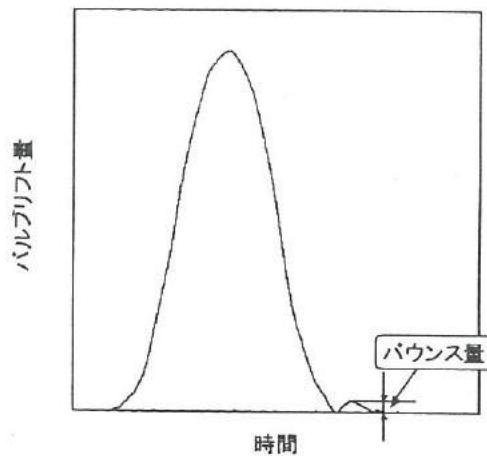


図11 バルブリフト量の時間的変化の概要とバウンス量の定義  
Fig. 11 Configuration of valve lift change and definition of bounce height

## 5. 2 バウンス量の実機との比較

計算で求めたカムシャフトの回転数ごとのバウンス量を実機を用いた計測値と比較した。図 13 は、バウンス量の解析値と実測値の比較を示す。横軸は時間、縦軸はバルブの設計における最大リフト量に対するバウンス量の割合を表す。カムシャフトの回転数が 3500rpm 以下の範囲において、解析値と実測値はよい一致を見た。また、解析値、実測値ともに 3000rpm~3500rpm 付近でバウンス量が減少している。この原因として、カムシャフト、ロッカーアームおよびバルブ間で衝突、分離が頻繁に繰り返される

ことに大きな原因があると考えられる。

さらに、バウンス量がある回転数以上で急増することについては、解析結果、実測結果ともによく似た傾向を示しているが、その限界の回転数には多少の違いが見られる。解析では 3500rpm であるのに対し、実測では約 4500rpm である。この違いの原因として次のいくつかの事柄が挙げられる。

① 実験モード解析による振動特性の測定に誤差があること。

実験モード解析によって得られた振動特性には誤差が含まれる。特に、カムシャフトとロッカーアームの接触部についての振動特性の計測が困難であり、レーザドップラー振動計等の非接触による計測方法を用いて正確な振動計測を行う必要がある。

② ロッカーアームをはり要素で近似していること。

解析時間の短縮のためにモデル全体の

自由度を極力小さくしているが、ソリッド要素でロッカーアーム全体をモデル化する必要があるかもしれない。

③ バルブスプリングを線形のばね要素でモデル化していること。

バルブスプリングはコイルばねであり、圧縮した場合にコイル相互の接触によって剛性が非線形に変化する。バルブスプリングのより正確な 1 次元モデルとして、非線形ばね要素を用いる必要がある。

以上のことを考慮してモデルを修正すれば、動弁機構を解析するための十分に実用的なモデルになりうると考える。

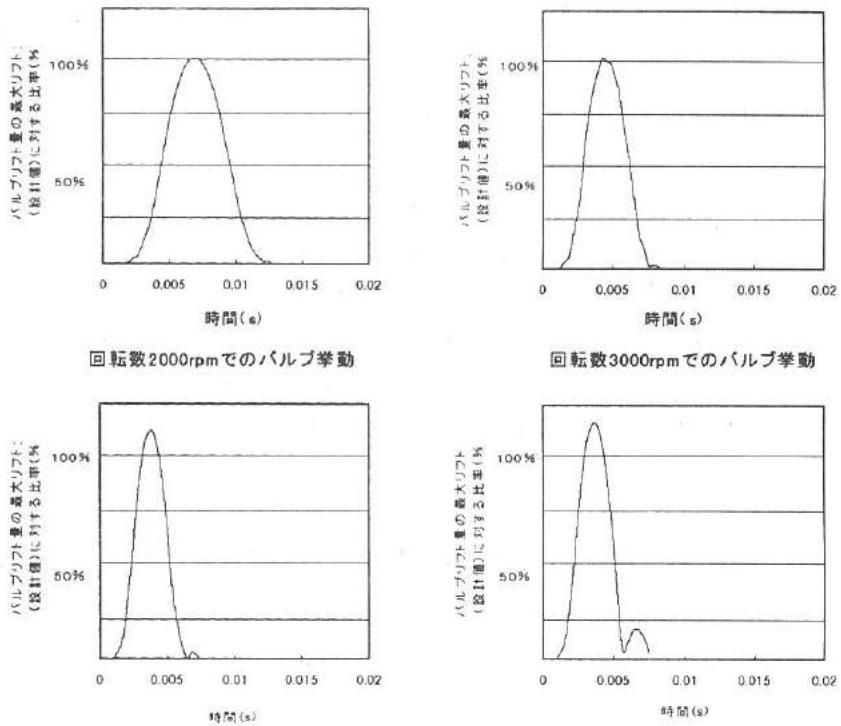


図 12 回転数によるバルブ挙動の違い  
Fig. 12 Valve lift diagrams in different rotation speed of cam shaft

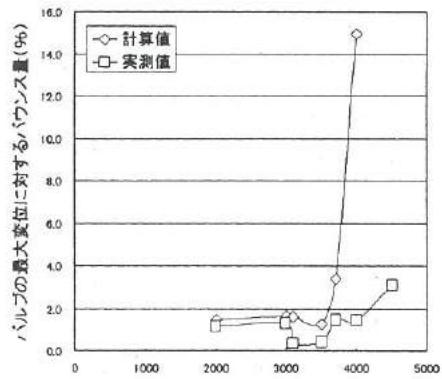


図 13 カムシャフトの回転数に対するバウンス量の変化(解析と実機の比較)  
Fig. 13 Change of bounce height in different rotation speed of cam shaft

## 6. 動弁部品の構造解析および強度評価

動弁機構の解析結果を用いて、動弁部品であるロッカーアームの構造解析を行った。まず、カムシャフトからロッカーアームへ動的に負荷される最大荷重を調べた。図14は、回転数3000rpm時のカムシャフトにおいてロッカーアームへ負荷される動的荷重の時間変化を示す。横軸は時間、縦軸は荷重である。解析時間0.0038sにおいて最大荷重26.1kNが発生している。これはカムシャフトとロッカーアームが接触を開始する比較的初期の段階においてね上がったロッカーアームが、カムシャフトの最大リフト部の付近において再びカムシャフトと衝突して発生したものである。動的荷重によって発生する応力は、波として物体内を伝搬し減衰する。正確な応力評価を行うためには、ロッカーアームをソリッド要素でモデル化する必要がある。しかし、解析時間およびデータ容量の増加によりコンピュータの処理能力限界を超えるため解析は実施できなかった。そこで、ごく荒い近似として、動的荷重の最大値を用いて静的構造解析を行い、ロッカーアーム内に発生する最大応力を推定してみた。図15は、回転数3000rpmにおいてロッカーアームに発生した最大主応力の分布を示す。比較的肉厚の薄い部分に応力が集中しておりその値は1380MPaであった。しかし、実際は動的加重の作用時間が極めて短ければロッカーアームに大きな応力は分布していないと考えられる。また、実験モード解析で得られたカムシャフトとロッカーアームの接触部分の振動特性が正確でないことも大きな応力値が得られた原因と考えられる。

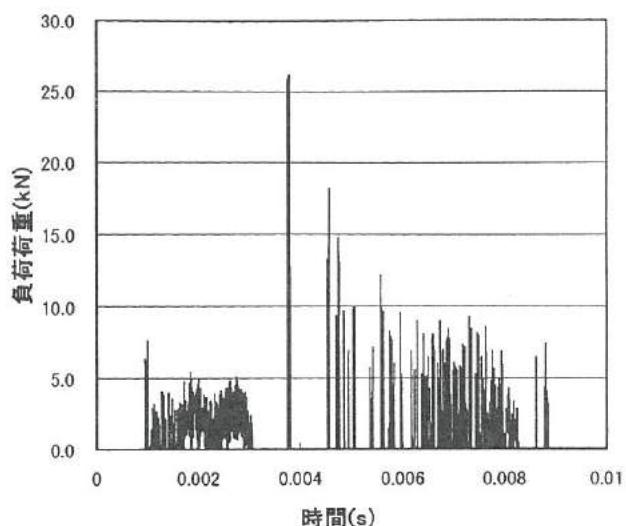


図14 ロッカーアームにかかる動的荷重の変化

Fig. 14 A diagram of applied dynamic force to rocker arm by cam shaft

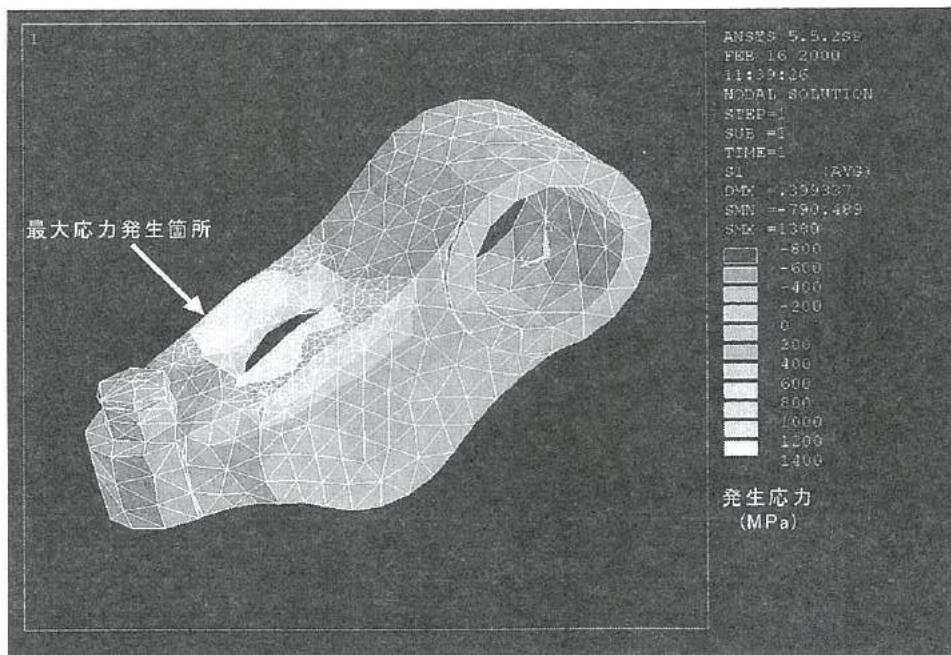


図15 ロッカーアームの応力分布例

Fig. 15 An analyzed example of stress distribution in rocker arm

本研究では、このように、ばね-質点モデルにおいて解決すべき問題点が存在するため、ここでは最大発生荷重を用いた静的構造解析を行うにとどめ、構成部品の強度評価は実施しなかった。さらに、実際の問題としては、部品の疲労強度評価が最も重要である。そのためには強度評価の基準となる S-N 曲線を疲労強度試験によって得ることが大前提となるので、ばね-質点モデルの修正とあわせて今後の課題とする。

## 7. 結 言

本研究では、エンジンの動弁系の挙動を再現するために、最小限の自由度を有するばね-質点系の有限要素モデルを適用して、以下に示す結果を得た。

- (1) ばね-質点モデルでは、カムシャフトの回転数が約 3000rpm まではバルブとロッカーアームの挙動はカムシャフトの形状に追従していることが分かった。この範囲では、バウンス現象もほぼ適切に評価できる。
- (2) バルブとロッカーアームの挙動がカムシャフトの形状に追従しなくなる限界の回転数は、実機の計測値は 4500rpm であるのに対して解析値では 3500rpm となり、回転数に違いを生じた。しかし、ばね-質点モデルを修正することで十分に対応が可能である。
- (3) 動弁機構の構成部品相互の頻繁な衝突により非常に大きな動的荷重が発生する。部品内の応力を正確に評価するためにはソリッドモデルを用いた解析が必要である。

## 参考文献

- (1) 栗栖, 大森, 畑村, 野村 : 「動弁機構のジャンプ、バウンスに関する一考察」, 第 8 回内燃機関合同シンポジウム講演論文集 (1990), 441-447.
- (2) 渡辺 : 「機械工学系の実用シミュレーション入門」 (1987), 山海堂.

# VII. コーティング工具の密着性向上に関する研究（2）

Improvement of Adhesion between the Coating Layer and Cemented Carbide for Tool (2)

高田 智哉 高林 外広 森本 英樹 清水 俊治 谷野 克巳

Takata Tomoya Takabayashi Sotohiro Morimoto Hideki Shimizu Toshiharu Tanino Katumi

## Abstract

With high efficiency of machining, it is necessary to cut at high speed and fast-forwarding. Generally used cutting tools such as cemented carbide and cermet can not used to cut at these conditions because of reaction with machinable materials. TiN or TiC coating tools deposited by physical vapor deposition have some advantages such as the resistance to peeling, high density and long life. In last studies, the adhesion between the coating layer deposited by sputtering and cemented carbides for tool was discussed.

In this study, wear resistance of self manufactured coated tools were tested by cutting test and was compared to commercialized coated tool, after turning FC15 and A359, wear widths were measured. Non-destructive test about the adhesion between the TiN layer and the cemented carbide was suggested.

The results were as follows:

- (1) In condition of 2500 meter cutting of A359, wear width of manufactured coated tool was 0.20mm, that was 4/5 times as large as that of WC tool and 4/3 times as large as commercial coated tool. In same condition of FC15, wear widths of manufactured coated tool was 0.32mm, that was 3/4 times as large as that of WC tool and 3/2 times as large as commercial coated tool.
- (2) Non-destructive testing of coating layer proposed by comparing the base surface form to coated surface form.

## 1. 緒 言

切削加工の高効率化を目的とした工作機械の高速回転・高速送りが進むにつれて、超硬合金やサーメット工具には、耐熱性・耐摩耗性の更なる向上が求められている。これら工具はバインダとして Fe、Ni、Co などの金属を利用するため、被削材との反応による溶着や塑性変形などの工具欠損が生じ、使用不能となる。このため、工具表面に耐熱性・耐摩耗性に優れるセラミックをコーティングすることで工具の性能向上が図られている。現在、コーティング工具は機械加工に不可欠な工具となっているが、コーティング技術は工具メーカーのノウハウとして明らかにされていない。一方、工具を使うユーザ側においては、使用済み工具を再研磨・コーティングして利用することは生産コストの点から望まれている。以上の観点から、本研究では超硬合金への硬質膜のコーティング技術について検討してきた。昨年度<sup>1)</sup>は超硬合金に密着性のよい硬質膜を作製する条件を明らかにし、さらに膜組成を傾斜させた多層化膜を作製することで膜破壊靭性の向上を達成した。今年度は、試作した工具の連続切削試験を行って工具性能を評価し、また市販のコーティング工具と性能を比較した。さらに、工具の品質管理はユーザ側にとっても重要となることから、工具の品質検査方法についても検討を加えた。

## 2. コーティング工具の概要

### 2. 1 コーティング方法

コーティング方法には大きく分けて、高温下で水素還元または熱分解などの化学反応を利用して生成・析出させるCVD法（化学蒸着法）と物理的に付着（堆積）させるPVD法（物理蒸着法）がある。表1はそれぞれの特徴を示す。CVD法は、高温下で処理するため、膜に大きな引張応力が発生して欠損しやすいが、PVD法は、処理温度が低いため、圧縮応力となり耐欠損性に優れている。以上のことから、本研究ではPVD法を採用し、さらに膜の多層化・傾斜化が容易に行えるスパッタリング法を採用了。

## 2. 2 試作コーティング工具

試作したコーティング工具は、図1に示すように硬さが硬く耐摩耗性に優れているTiCと、TiCに比べ韌性が高く超硬合金との密着性に優れているTiNからなる。尚、TiC膜とTiN膜を単に積層化すると、それぞれ膜の熱膨張係数および機械的性質が異なるため、膜界面においてクラックが発生したり層間で剥離する可能性がある。そこで、TiN膜をコーティングした後、TiNの割合を徐々に減らしTiCの割合を徐々に増やすことで膜組成の傾斜化を行い、膜特性差を緩和させて異種膜の結合性の向上を図った。また、超硬合金表面に活性金属であるTiをコーティングすることで超硬合金とTiN膜との密着性の向上を図った。

表1. コーティング超硬合金工具の特徴

Table 1. Characteristics of the coating layer and cemented carbide for tool.

	PVDコーティング	CVDコーティング
処理温度	100~560°C	800~1100°C
変形、歪み	無し	発生する
後処理	無し	必要 (真空焼入れ焼戻し、ラッピング等)
コーティング後の合金強度	◎	△
脆化層(η層)	生じない	生じやすい
表面部の残留応力(使用時)	圧縮応力	引張応力
耐欠損性	◎	△
耐衝撃性	◎	△
耐磨耗性	○	◎
疲労強度	○	×
密着性	◎	◎



図1. コーティング工具

Fig. 1. Coating tool.

## 2. 3 試作コーティング工具の作製工程

コーティング工具の試作は、昨年度の傾斜スパッタリング条件<sup>1)</sup>によった。まず、アルコール洗浄した超硬工具上に中間層であるTiをコーティングする(膜厚: 0.1 μm以下)。次に、TiN膜をコーティングする(膜厚: 約 1.0 μm)。そしてこの後、2元同時スパッタリング法によって、TiNターゲットへの投入電力を徐々に減らしながらTiCターゲットへの投入電力を徐々に増やすことで、組成の傾斜化を行う(膜厚: 約 0.4 μm)。最後に、TiC膜をコーティングし(膜厚: 約 0.2 μm)工具が完成する。なお、スパッタリングは2元同時可能な高周波ハイレートスパッタリング装置を使用している。

## 2. 4 切削試験に用いた工具の概要

表2は切削試験に使用する工具の一覧である。工具はすべて市販の工具を基準に作製した。工具aは市販の超硬工具にコーティングしたものであり、試作したコーティング工具の性能が確認できる。工具b, cはそれぞれ市販の超硬工具、コーティング工具であり、市販品の性能評価に用いた。工具d, eは市販のコーティング工具上にコーティングしたものであり、市販のコーティング工具の更なる性能向上を目的としている。尚、工具d, eではそれぞれコーティング条件が異なる。これは、傾斜化膜は多層化膜より膜特性が優れていた昨年度の研究(引抜き試験による膜密着性の評価)との整合性を確認するためである。

表2. 切削試験用工具

Table 2. Tools for cutting test.

工具名	母材(基材)	コーティング	膜厚
a. 試作工具(組成の傾斜化仕様)	超硬	TiN膜(100W, 30min) → 組成傾斜化 → TiC膜(100W, 600min)	約 1.6 μm
b. WC工具	超硬	なし	-
c. 市販工具	超硬	TiCNO系	3.0 μm
d. 試作工具(多層化仕様)	TiCNO系	TiN膜(100W, 30min) → TiC膜(100W, 600min)	約 0.6 μm
e. 試作工具(組成の傾斜化仕様)	TiCNO系	TiN膜(100W, 30min) → 組成傾斜化 → TiC膜(100W, 600min)	約 0.8 μm

### 3. 切削試験

#### 3. 1 切削試験条件の選定

連続切削試験は工具の逃げ面摩耗幅の推移で評価した。逃げ面は切削時に常に被削材に接触しているため、摩耗の推移を調査する上で適している。切削試験は、N C 旋盤を用いて連続旋削加工を行った。

#### 3. 2 被削材

被削材には、工具の用途を考慮して鉄鉱（F C 1 5）と高 S i アルミニウム合金（A C 9 A）を使用した。F C 1 5では炭素が、A C 9 AではS i が析出しており、共に工具を摩耗させる粒子として働く。

#### 3. 3 切削試験条件の選定

切削試験に先立ち、工具摩耗評価に適切な切削条件を選定した。これは、切削条件が工具にとって過負荷な場合、刃先に被削材の一部が凝着し、正確な摩耗状況を把握できなくなること、また、工具にとって切削条件が甘くても評価に時間を使い、試験効率が悪くなるためである。さらに、工具の摩耗幅の評価基準を設けた。評価基準は、摩耗幅の進行上限を仕上切削用工具の上限とされている 0.2mm (JIS B 4011; 超硬バイト切削試験方法) に設定した。実験では、切り込み量と切削速度を変化させた条件で、被削材の外周を長手方向に一回旋削する毎に（加工距離 約 500m）、工具の観察・摩耗幅の測定を行った。以上により、明確な工具摩耗を効率よく把握し、かつ評価基準までの工具摩耗の推移が把握できる切削条件の選定を行った。尚、選定には、工具数量に余裕のある市販の超硬工具と市販のコーティング工具を用いた。図 2、図 3 は切削試験条件選定のための試験結果を示す。

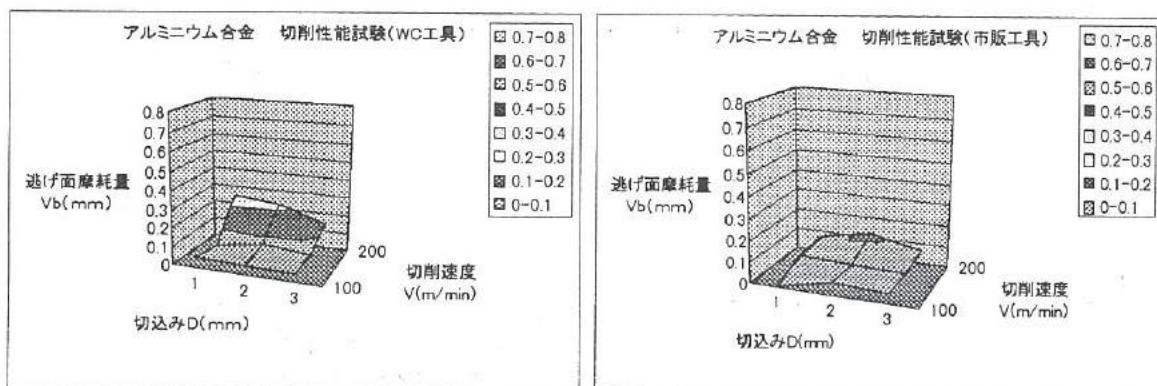


図 2. 逃げ面摩耗量に及ぼす切削条件の影響① (被削材 : アルミニウム合金)

Fig. 2. Effect of cutting conditions on amount of flank wear I. (Aluminum alloy)

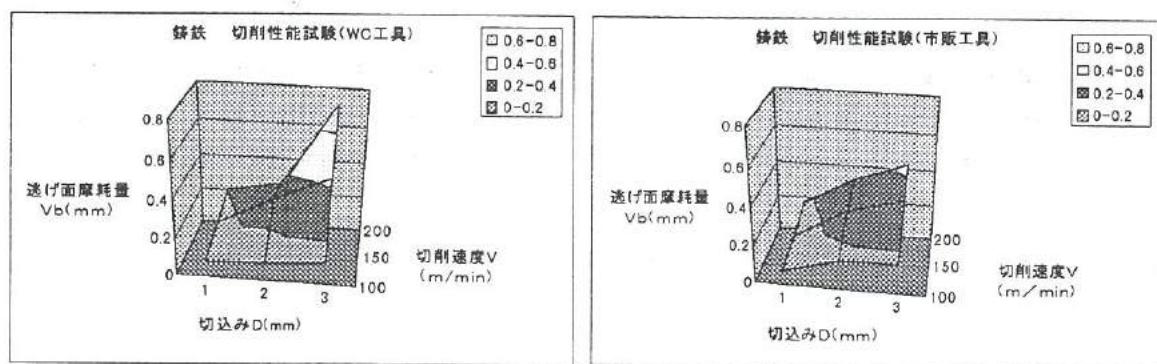


図 3. 切削試験条件選定の試験結果② (被削材 : 鉄鉱)

Fig. 3. Effect of cutting conditions on amount of flank wear II. (Cast iron)

図2に示すように、アルミニウム合金(AC9A)における工具摩耗特性では、切込み条件よりも切削速度の影響が大きいことが分かる。これは、工具摩耗に及ぼす影響が応力よりも熱の影響をより大きく受けていることを示している。このため、切削速度の選定によって工具摩耗を評価することにした。図3に示すように、鋳鉄(FC15)では切込み、切削速度ともに工具摩耗に均等に影響していること、そして、アルミニウム合金に比べ摩耗がより大きいことが分かる。以上の試験結果より、逃げ面摩耗幅0.2mmを摩耗評価基準とした場合、被削材がアルミニウム合金では切込み1mm、切削速度150m/min、鋳鉄では切込み1mm、切削速度100m/minが切削試験条件として最適であるとした。

### 3.4 切削試験の結果および考察

図4、図5は各工具の切削試験結果を示す。図で、白抜き記号で示したものが試作工具であり、黒塗り記号は市販工具である。超硬工具(工具b)は、各被削材において最も摩耗幅が進行した。アルミニウム合金の切削試験では、切削距離1500mで摩耗幅約0.2mmに達する。一方、市販のコーティング工具(工具c)では、同様の切削距離で約0.1mmと半分程度の摩耗幅の進行に留まった。試作した成膜工具(工具a, d, e)ではほぼ中間の0.15mm前後の摩耗幅であった。鋳鉄の切削試験では、市販の成膜工具を除き、切削距離1000mで精密切削の上限値0.2mmを超えており、特に超硬工具(工具b)では0.3mmに達した。さらに、両被削材において、試作工具(工具d, e)が市販のコーティング工具(工具c)より摩耗が進む結果となった。また、鋳鉄においてはさらに摩耗幅が進行することが分かった。特に鋳鉄で摩耗が進む理由として、被削材との反応性、つまり膜の最表面のTiCと鉄との反応が、TiNと比べ進むことが指摘<sup>2)</sup>されており、図5の結果はこのことと一致するものと考えられる。尚、このことはアルミニウム合金についても同じことが考えられる。また、同基材の多層化した試作工具(工具d)と傾斜化した試作工具(工具e)の摩耗推移を比較すると、両被削材の場合において、多層化した試作工具の方が進行しており、膜の密着性と切削能力の関係が確認されたと考えられる。図6、図7は切削試験時(切削距離2000m時)の工具摩耗形態を示す。表層がTiCである試作工具では、いずれも欠損タイプの工具摩耗損傷であり、これは前述した被削材との反応を示唆するものと考えられる。

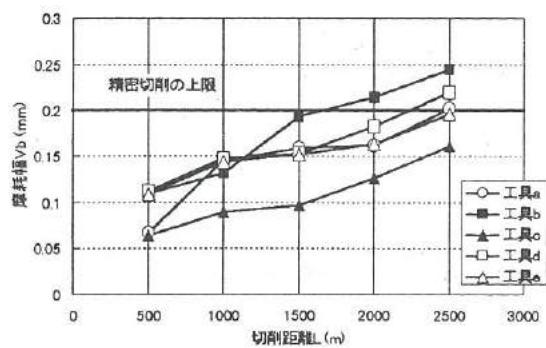


図4. 逃げ面摩耗幅の推移(アルミニウム合金)

Fig. 4. Relationship between cutting length and flank wear. (Alminium alloy)

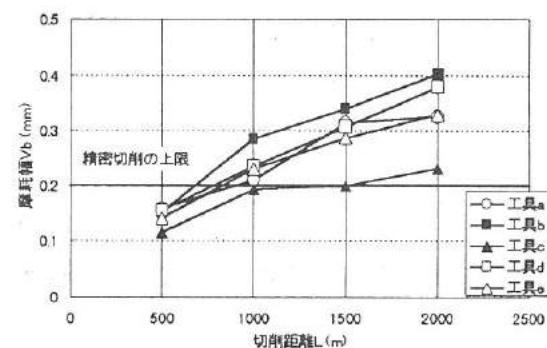


図5. 逃げ面摩耗幅の推移(鋳鉄)

Fig. 5. Relationship between cutting length and flank wear. (Cast iron)



a. 試作工具

b. 超硬工具

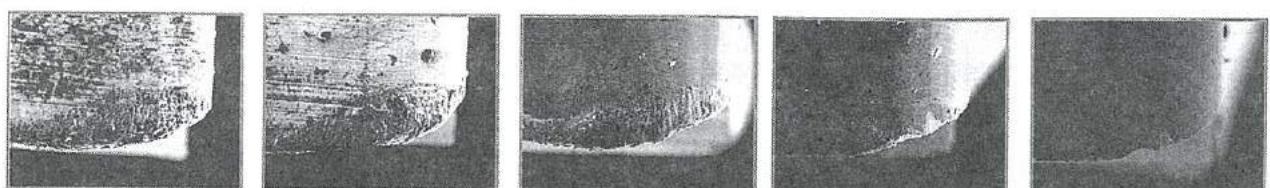
c. 市販工具

d. 試作工具

e. 試作工具

図 6. 工具摩耗形態（アルミニウム合金の切削試験時）

Fig. 6. Condition of tool wear (cutting test of alminum alloy)



a. 試作工具

b. 超硬工具

c. 市販工具

d. 試作工具

e. 試作工具

図 7. 工具摩耗形態（鋳鉄の切削試験時）

Fig. 7. Condition of tool wear (cutting test of cast iron)

#### 4. 非破壊検査に関する調査・研究

##### 4. 1. 非破壊検査の概要

これまでの工具摩耗評価から、超硬工具へ硬質皮膜をコーティングすることによって工具寿命が延びることが分かった。しかし、生産現場では同じ種類のコーティング工具でも工具寿命が変動することが知られている。工具寿命は、被削材、工作物形状、工作機械の状態など複数の要因が絡み合い、一概に工具の寿命は膜の品質に依存すると断定できない。しかし、膜の品質管理は重要である。そこで、工具の膜の評価について考察した。硬質膜の評価<sup>2)</sup>には、主としてスクラッチ試験や硬さ試験があり、確実な評価方法として定着している。一方、非破壊で迅速に評価したいとの要求もある。非破壊検査には、成膜材表面にレーザパルス波を照射し、表面の熱膨張収縮時の弾性波を検出して膜品質を評価する方法<sup>3)</sup>がある。本研究では成膜前後の表面形態の比較によって膜内部構造の推定を試みた。その理由は、ある表面形態をもつ母材に均等に膜分子が堆積した場合、成膜表面の形態は母材の表面形態と大きく変化しないだろうと考えたことによる。図8は以上の考察を簡単にモデル化したものである。また、図9は市販のコーティング工具の走査電子顕微鏡（反射電子像）による表面断面の観察例を示す。

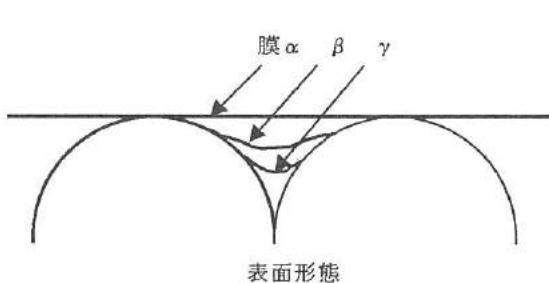


図 8. 薄膜表面形態と膜密着性との関係モデル

Fig. 8. Relationship between surface geometry and adhesion of film.

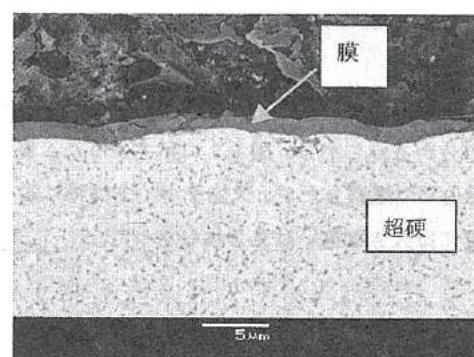


図 9. 工具表面の断面（反射電子像）

Fig. 9. Section of tool surface. (SEM)

図8において、薄膜表面形態と膜密着性との関係は次のように説明できる。すなわち、工具表面上に堆積した膜 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ を考えるとき、密着性は $\gamma > \beta > \alpha$ の順に優れているものと考えられる。このとき密着性に優れていると考えた膜 $\gamma$ では、膜形態と工具表面形態とは類似している。ここで隙間が内部欠陥とみなせる。図9は市販成膜工具のすくい面の断面形態を示したものである。基材工具表面と相似的に成膜される様子が観察される。ただし、表面凹凸の凹の部分では形態変化が見られる。従って、図8に示すモデルで評価することができる。具体的な評価は、成膜前後の表面粗さを比較し、不整合性度として定量化した。この不整合性の評価方法は、工具の評価に限らず、半導体分野など成膜関連技術への応用が考えられる。実際、半導体製造分野での成膜で付き回り性が問題となることがあり、成膜条件が悪い場合、膜が表面に完全に密着せず、架橋現象を起こして内部欠陥として残留する場合<sup>4)</sup>がある。このとき、成膜の進展によって表面形態は異なってくることは明らかである。以上は、膜品質評価の基本として押さえておくべきことであると思われる。

#### 4. 2. 成膜前後における膜表面形態と工具摩耗の関係

膜表面形態からモデル化した不整合性評価の検証として、表面粗さを変えた母材に成膜した成膜材料の曲げ試験や引張り剥離試験が考えられるが、本研究では以下のように切削工具で評価した。市販工具の表面粗さを調査した結果、購入時期によって粗さ特性が異なることが分かった。母材工具の表面粗さは購入時期の古いもの（工具Aとする）では $R_a$ （中心線平均粗さ）が $0.11\mu m$ であり、新しく購入したもの（工具Bとする）では $R_a$ で $0.07\mu m$ であった。ところが、同時期に購入した成膜工具では、それぞれ $0.05\mu m$ と $0.06\mu m$ であった。以上のことから、成膜前後における表面粗さの変化から不整合性を推定し、膜密着性能を評価する目的には、購入時期を変えた工具で比較することが適していると思われた。従って、整合性評価方法として、成膜前後における粗さ $R_a$ の変化率を取り上げ、これを不整合性度として次のように定義した。

$$\text{不整合性度 } F = (R_a - R_a') / R_a$$

$R_a$  : 母材工具の逃げ面中央部における中心線平均粗さ

$R_a'$  : 成膜後工具の逃げ面中央部における中心線平均粗さ

検証実験として、切削試験による工具逃げ面摩耗量の比較を行った。切削試験に先立ち、工具の逃げ面側（側面）のほぼ中央部の表面粗さを測定した。粗さ測定は、母材工具および成膜工具で行った。測定長さは $0.56\text{ mm}$ とし、中央部一ヶ所を測定して側面の代表粗さとした。工具Aおよび工具Bをそれぞれ2個ずつ準備し、工具1個につき4面を測定した。不整合性度は、工具A、Bそれぞれ成膜前後の $R_a$ の平均値から計算した。被削材には工具摩耗がより明確に現れる鋳鉄を用いた。また、微小な工具摩耗を評価するために切込みを小さくした。以上のように切削速度 $100\text{ m/m in}$ 、切りこみ $0.2\text{ mm}$ 、送り量 $0.2\text{ mm/re v.}$ 、切削液なしとした。約 $700\text{ m}$ 旋削した後、工具逃げ面の摩耗幅を光学式測定機（スマートスコープ）で測定した。

実験結果を図10に示す。図に見られるように、整合性に優れると評価した工具Bにおいては、逃げ面摩耗量が小さくなっていることが分かる。しかし、図11に示すように、整合性に劣ると評価した工具A（すくい面）の膜と母材との界面を走査電子顕微鏡（2万倍）で観察したが、欠陥やボイドは特に認められなかった。また、元素分析（マッピング）も行ったが、元素成分（Ti, N）濃度には大きな違いは見られなかった。

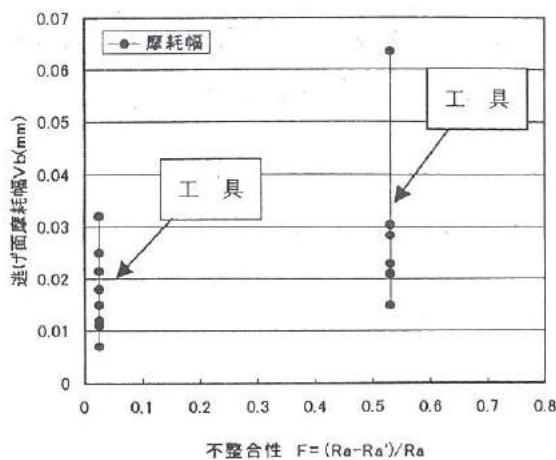


図 10. 工具逃げ面摩耗に及ぼす不整合性の影響

Fig.10. Effect of non-matching on flank wear.

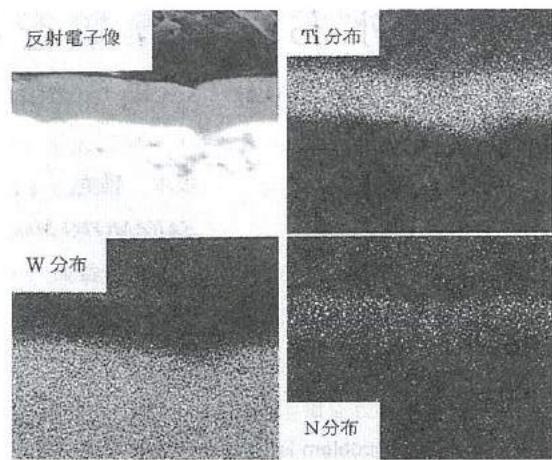


図 11. 膜表面域の面分析 (工具 A すくい面)

Fig.11. Mapping of tool surface area(Tool A)

## 5. 結 言

本研究では、昨年行った傾斜組成による成膜工具の切削時の摩耗特性を評価した。また、成膜前後の工具の表面形態の変化に着目し、膜評価方法を検討した。その結果、次のような成果が得られた。

- (1) 試作工具は、超硬工具に比べ約 1.3 倍 (2000m 切削時) の耐摩耗性能の向上が認められた。
- (2) 成膜前後の表面粗さの変化率を膜の不整合性度として定義した。不整合性と工具摩耗との関係を調べ、膜品質評価としての可能性を示した。

## 参考文献

- 1) 平成 10 年度 若い研究者を育てる会研究発表会 研究論文集「コーティング工具の密着性向上に関する研究」野上ほか
- 2) PVD・CVD 皮膜の基礎と応用 社団法人表面技術協会編(1998. 7. 25)P129 佐々木：表面技術, 41, 61 (1990)
- 3) D. Schneider, H. Ollendorf, and Th. Schwarz: Non-destructive evaluation of the mechanical behavior of TiN-coated steels by laser-induced surface waves, Appl. Phys. A61 (1995) 277-284
- 4) 精密工学会誌 vol. 60. No. 11. 1994 P1575 宮崎：プラズマ CVD における表面反応制御

# VIII. 深層水および藻類を利用した太陽光発電の基礎研究

## Study of Solar Power Generation Using Deep-sea Water and Algae

東堂 浩次

TODO Koji

角崎 雅博

KADOSAKI Masahiro

坂本 雅美

SAKAMOTO Masami

長谷川 益夫

HASEGAWA Masuo

牧村 めぐみ

MAKIMURA Megumi

谷野 克巳

TANINO Katumi

山崎 茂一

YAMAZAKI Shigekazu

### Abstract

The environmental problem is getting serious year after year. The world depends on fossil resources has to been looked over again. We thought there needs the clean and unlimited energy, and so paid attention to photosynthesis efficiently converts solar energy into electric energy.

The purpose in this study was to clear the characteristic of biofuel cells using algae-photosynthesis microorganism and deep-sea water. Firstly, we had to cultivate some after that examined the efficiency of the biofuel cells using them.

The results were as follows;

- (1) The culture of *Synechococcus* sp. and *Spirulina* plantensis of some cyanobacteria succeeded.
- (2) The effect of the intensity of incident light and the concentrations of *Synechococcus* sp. that was conversion efficiency of light energy to electric energy was 0.07%. In the case of *Spirulina* plantensis, the examination resulted in failure

### 1. 緒 言

近年、酸性雨や地球温暖化等の環境問題が深刻になっている。その原因の一つに、化石資源に依存し過ぎる社会がある。現在もなおエネルギー需要は増加し続けているため、そのような社会の早急な見直しが求められている。その中で、クリーンかつ無尽蔵なエネルギーとして注目されているものに太陽エネルギーがある。しかし、太陽エネルギーはエネルギー密度が小さいため、高効率な太陽エネルギー変換システムの開発が必要とされている。

自然界において植物などが行っている光合成は、太陽エネルギーを効率よく化学エネルギーに変換するシステムである。すでに、ある種の藻類は太陽光発電に利用できることが知られている。また、深層水は藻類の繁殖に適すると言われている。そこで、本研究では深層水および藻類を利用した太陽光発電の基礎研究を行い、深層水および太陽光発電に適した藻類の特定、藻類の培養方法の確立、太陽光発電の効率向上等について検討した。

### 2. 光合成微生物電池の特徴

#### 2. 1 光合成微生物電池の原理と現状

光合成とは、光のエネルギーにより二酸化炭素を同化して、有機化合物を合成する生体反応である。光合成のエネルギー源は太陽エネルギーであるため、光合成は一種の太陽エネルギー変換システムといえる。

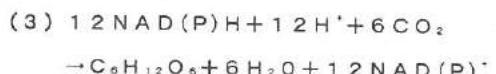
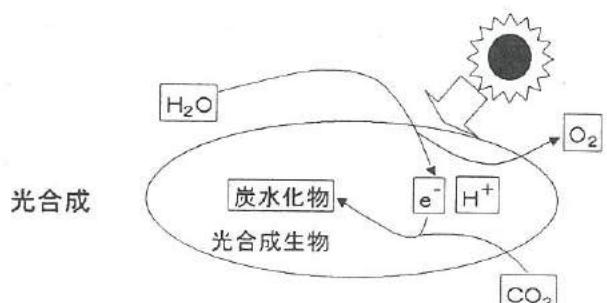


図1 光合成の模式図と反応式

Fig.1. Schematic diagram photosynthesis

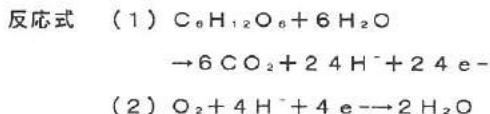
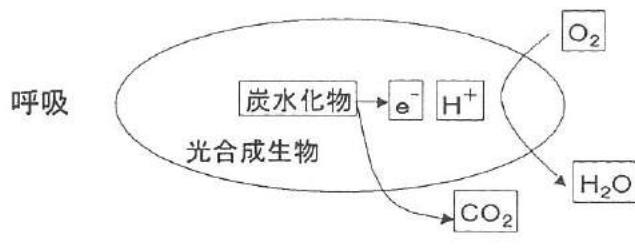


図2 呼吸の模式図と反応式

Fig.2. Schematic diagram respiration

図1、図2はそれぞれ光合成、呼吸の模式図と反応式を示す。光合成反応は、光の水分解によって生じる励起された電子が、生体内で電子、水素の受け渡しの中間体として働くニコチンアミドアデニジヌクレオチドリン酸(NADP)を介して二酸化炭素を還元する。一方、呼吸は光合成によって生成された有機化合物をエネルギー源として光合成植物自身が必要なエネルギーを取り出している。このように光合成、呼吸の反応において、電子はエネルギーを伝達する因子として働き、また同時に生物が生きていくために必要なエネルギー形態へ変化させる役割もある。

光合成植物から電気エネルギーを取り出すには、光合成植物内でエネルギーの伝達因子として働いている電子を生体外に取り出すことができれば可能である。

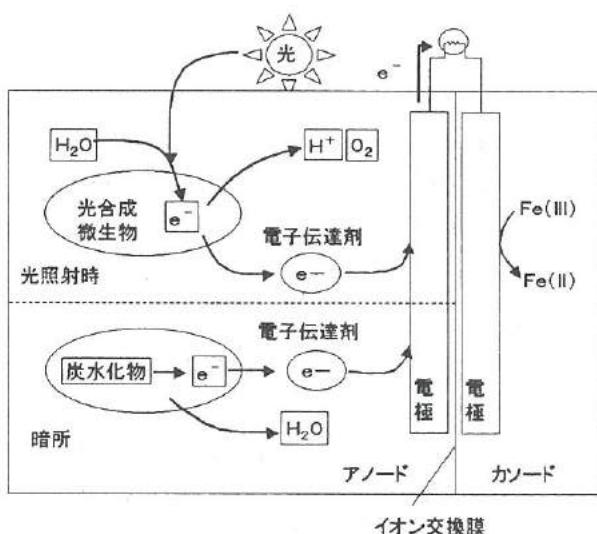


図3 光合成微生物電池

Fig.3. Schematic diagram of a photosynthetic electrochemical cell

図3は光合成微生物電池の一例を示す（光合成生物として微生物を利用した電池を光合成微生物電池と称す）。光合成、呼吸で発生した電子は、アノード溶液中の電子伝達剤（メディエータ）を媒体とし、電極まで移動する。電子が外部回路を通り対極まで移動し、カソード溶液中に含まれる陽イオンを還元することで電流が流れる。

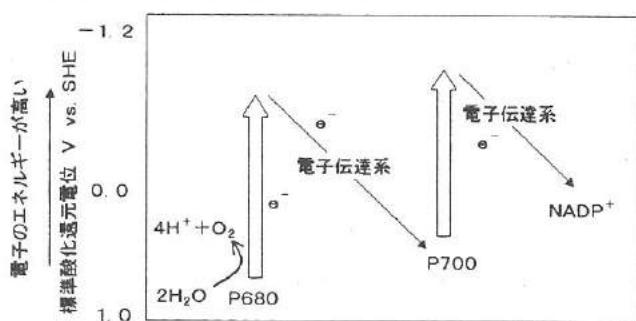
微生物内部からより大きいエネルギーを得るために、電子伝達剤には次のような条件が必要と考えられている。

- (1) 細胞壁を通り抜けやすいこと
- (2) 生体内的電子供与体から電子を受け取りやすいこと
- (3) 生物にできるだけ有害でないこと
- (4) 溶解度、安定性が優れていること

これまでの光合成微生物電池に関する研究報告では上記条件を満たす電子伝達剤として、2-ヒドロキシ-1,4-ナフトキノン(HNQ)が使用されており、光合成微生物に藍藻の一種であるシネココッカスを使用した場合で光電変換効率3.3%と報告されている<sup>(1)</sup>。

## 2.2 光合成微生物電池の発電効率

光合成の電子伝達系を図4に示す。



P680···680 nmの光を吸収するタンパク質

光合成系II ( $\Delta V = 1.82 V$ )

P700···700 nmの光を吸収するタンパク質

光合成系I ( $\Delta V = 1.77 V$ )

図4 電子エネルギーの変化

Fig.4. photosynthetic electron transfer chain

2段階の光励起は、それぞれ光合成系I、光合成系IIと呼ばれる。それによって水の酸化で発生した電子のエネルギーを押し上げ、電子伝達系を通過し、最終的にNADP<sup>+</sup>を還元してNADPHを生成する。

この一連の流れで得られた電子1個のエネルギーは、(NADP<sup>+</sup>の還元エネルギー) - (水の酸化エネルギー) で表され、( $-0.3\text{eV}$ ) - ( $0.82\text{eV}$ ) =  $-1.12\text{ eV}$ となり、 $1.12\text{eV}$ である。これに対し、光によって励起されたエネルギーは ( $1.77\text{eV} + 1.82\text{ eV}$ ) =  $3.59\text{eV}$ であるため、エネルギー変換効率は ( $1.12\text{eV}/3.59\text{eV}$ ) =  $31\%$ となる。また、光合成では太陽光の $400\sim700\text{nm}$ の波長の光しか利用することができないため、光合成が利用できる太陽エネルギーの割合は約 $32\%$ である。したがって、光合成の理論上のエネルギー変換効率は ( $31\% \times 32\%$ ) =  $10\%$ となる。

### 3. 深層水

深層水とは、太陽光の届かない $300\text{m}$ 以深の海水のことである。深層水の主成分を表に示す。この深層水の特性には、年間を通じて低温(日本海固有水で $1\sim2^\circ\text{C}$ )で水温変動がほとんどなく、塩分も安定していること(低温安定性)、表層水と比較して栄養塩が著しく豊富に含まれていること(富栄養性)、有機物、細菌類が非常に少ないと清浄性)、があげられる。こうしたことから、深層水は海洋性藻類の培地に適していると考えられ、この無尽蔵な深層水を用いて藻類の培養が可能となれば、より環境にやさしいエネルギーとなりえる。そこで本研究では、藻類の培養を指定培地の他に深層水でも行ってみることにした。深層水の主成分を表1に示す。

表1 深層水の主成分

Table 1. Principal ingredient of deep-sea water

成 分	成分量(g/kg)
Cl	20.1951
SO <sub>4</sub>	3.2263
Br	0.0587
H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>	0.0221
Na	11.5121
Mg	1.1707
Ca	0.3414
K	0.4692
Sr	0.0049

### 4. 培 養

#### 4. 1 藻類の選定

本研究は、藻類が光合成反応および呼吸反応で作り出した電子を酸化還元物質により直接取り出すことで、電気エネルギーを得ようとするため、酸化還元物質が細胞壁を通り抜けやすくなければならない。そこで、次のような条件が必要となる。

- ・細胞壁が硬くないこと
- ・浮遊性がないこと
- ・付着性がないこと

これらの条件を最もよく満たす藻類について検討した結果、藍藻(原核生物)を用いることにした。そして、表2に示す藍藻をテキサス大学および東京大学から取り寄せた。スピルリナに関しては大日本インキ化学工業株式会社より提供していただいだ。

表2 藍藻

Table 2. Cyanobacteria

#### テキサス大学

- |                 |           |
|-----------------|-----------|
| • Lyngbya       | UTEX 1930 |
| • Synechococcus | UTEX 2380 |
| • Agmenellum    | UTEX 2268 |

#### 東京大学

- |                              |       |
|------------------------------|-------|
| • Plectonema boryanum        | M-129 |
| • Synechococcus leopoliensis | M-6   |
| • Synechocystis sp.          | M-224 |

#### 大日本インキ化学工業株式会社

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| • Spirulina platensis |  |
|-----------------------|--|

#### 4. 2 培養方法

まず、各藍藻の培地を作製した。培地は、各藍藻を取り寄せた機関から指定された培地、海洋性藍藻シネココッカスについては指定培地の他に、深層水および種々の微量元素を加えた深層水を準備した。但し、深層水は滅菌したものを使用した。指定培地の一例としてシネココッカスの培地を表3に示す。また、深層水を用いた培地を表4に示す。藍藻は培地50ml中に $0.5\text{ml}$ 入れて培養した。なお、藍藻は繁殖期を経て、1~2週間で安定期を迎えるその後、死滅期となる。本研究では、安定期の藍藻を培養および発電実験に使用した。

表3 シネココッカスの培地

Table 3. Medium of Synechococcus

成分	成分量 (g/L)
NaCl	25.0
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	3.5
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.5
MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	2.0
Culture solution I * <sup>1</sup>	0.5ml
Culture solution II * <sup>2</sup>	10ml
Culture solution III * <sup>3</sup>	1ml
A6 solution * <sup>4</sup>	1ml
TES - KOH buffer (pH8.0, 1M)	10ml
Distiller	0.89L

\*<sup>1</sup> Culture solution I

成分	成分量 (g/100ml)
Citric acid	0.6
Ferric ammonium citrate	0.6
EDTA(disodium magnesium salt)	0.1

\*<sup>2</sup> Culture solution II

成分	成分量 (g/500ml)
NaNO <sub>3</sub>	37.5
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O	1.0
KCl	25

\*<sup>3</sup> Culture solution III

成分	成分量 (g/100ml)
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2.0

\*<sup>4</sup> A6 solution

成分	成分量 (g/L)
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86
MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	1.81
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.222
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.390
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.079
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.0494

表4 深層水を用いた培地

Table 4. Medium using deep-sea water

(1) 深層水
(2) 深層水 + TES-KOH buffer
(3) 深層水 + TES-KOH buffer + Culture solution I
(4) 深層水 + TES-KOH buffer + Culture solution II
(5) 深層水 + TES-KOH buffer + A6 solution

## 4. 2 培養装置

培養装置を図5および図6に示す。水槽内は、恒温装置を用いて25°Cに設定し、培養管には、常に1500luxの光を照射して培養を行った。また、培養液は3%CO<sub>2</sub>を含む空気で通気（流量25ml/min）を行った。3%CO<sub>2</sub>を含む空気は、ゴミや雑菌等を取り除くため青梅綿を通して供給した。

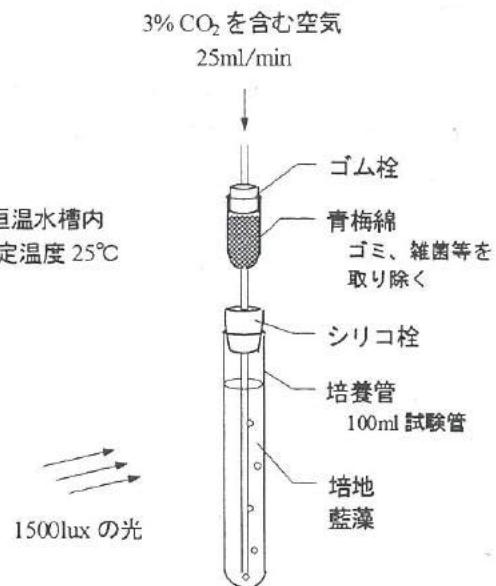


図5 培養装置模式図

Fig.5. Apparatus to culture

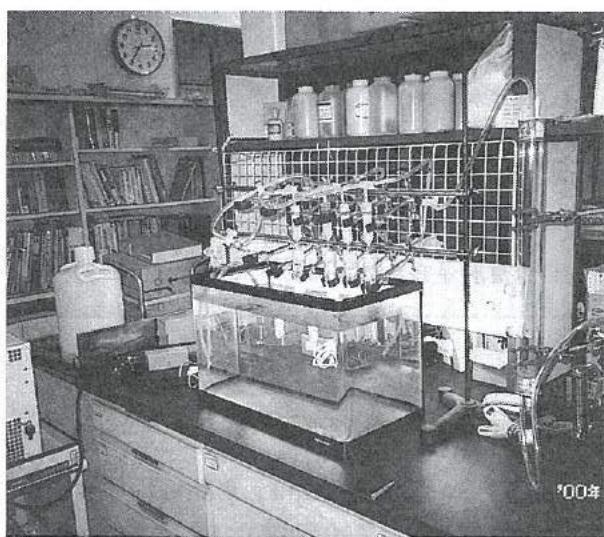


図 6 培養装置

Fig.6. Apparatus to culture

#### 4. 3 クロロフィル量の測定

培養した藍藻の濃度は、藍藻内のクロロフィル量を測定し、決定した。

培養液を3000r. p. mの遠心分離器に10分かけて集菌し、pH8.0の50mMリン酸緩衝液40ml中に懸濁させた（海産性の場合は25g／1のNaClを含んだリン酸緩衝液）。そして、その懸濁液0.5mlを10mlのメタノールと混合し、3000r. p. m.で遠心分離を行った後上澄みをとて分光光度計で666nmの吸光度を測定してクロロフィル量決定した。

クロロフィルの分子吸光係数 $\epsilon$ は $6.6 \times 10^4$ である。吸光度が1Absの時、藍藻懸濁液内のクロロフィル量は、 $298.2 \mu\text{g Chl.} / \text{ml}$ である。

#### 4. 4 指定培地による培養結果

表2に示した藍藻を、それぞれの指定培地を用いて図5に示す培養条件下で培養した。

シネコッカス、スピルリナについては、約2週間で培養溶液が濃緑色になり、クロロフィル量はシネコッカスが50~60 $\mu\text{g Chl.} / \text{ml}$ 程度、スピルリナは約50 $\mu\text{g Chl.} / \text{ml}$ 程度で安定した培養が可能であった。しかし、その他のものについては、液が透明なままであり、十分に増殖できなかった。

#### 4. 5 深層水による培養結果

シネコッカスを表4に示す深層水を用いて図5に示す培養条件下で培養した。

表4(4)の培地では培養液が薄い緑になり、指定培地には及ばないものの増殖していることが確認できた。しかし、その他の培地は、液がやや白く濁った程度で培養はできなかった。

顕微鏡による観察では、純粋な深層水で培養した場合、藍藻を確認することができたが、指定培地による培養に比べ、数は少なかった。

#### 4. 6 考 察

指定培地で培養できなかった藍藻があった理由として考えられるのは、株菌に微量の雑菌が混入したことや、培養温度などに問題があったことが挙げられる。

シネコッカスおよびスピルリナは、繁殖力が強かったことや、培養温度、バブリング条件が適していたので、安定した培養ができたものと考える。

シネコッカスの深層水による培養では、顕微鏡では藍藻が観察されているので、死滅したのではなく濃度が低い状態で正常状態にあるのものと考えられる。このように指定培地と大きな違いが現れたのは、微量元素の含有量の違いによるものであり、藍藻の培養には、微量元素の含有量が大きく影響を及ぼしているものと推察する。

#### 5. 発電実験

##### 5. 1 電池セルの構成

図7は電池セルの構成を示す。アノード溶液は、 $24 \mu\text{g Chl.} / \text{ml}$ の藍藻と1mMのHNQを含んだ40mlのリン酸緩衝液、カソード溶液は、0.1Mフェリシアン化カリウムを含んだ10mlのリン酸緩衝液である。アノード溶液とカソード溶液はイオン交換膜によって隔てられている。電極は両極とも炭素繊維電極であり、電極面積は、アノードが $8\text{cm}^2$ 、カソードが $16\text{cm}^2$ である。アノード溶液はN<sub>2</sub>ガスで攪拌した。

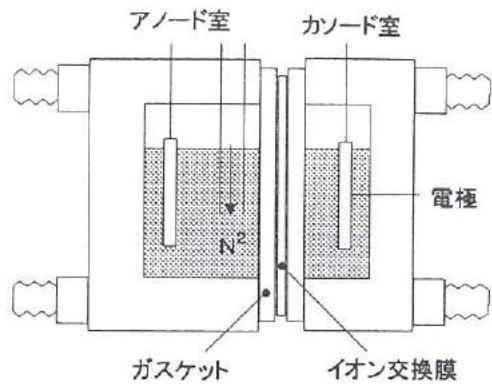


図7 電池セルの構造

Fig.7. Electrochemical solar cell

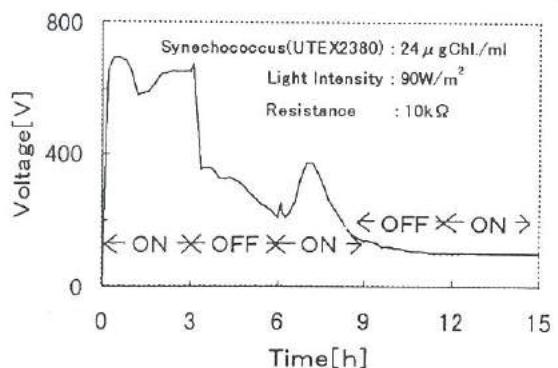


図10 光合成微生物電池の時間一電圧特性

Fig.10. Voltage vs. time curve of photosynthetic electrochemical solar

## 5. 2 測定装置

図8は測定装置の構成を示す。光源には疑似太陽光ランプを用い、照射光強度は $90\text{W}/\text{m}^2$ とした。出力電圧、出力電力の測定は、任意の抵抗値に設定できる抵抗負荷およびデジタルボルトメータによって測定した。

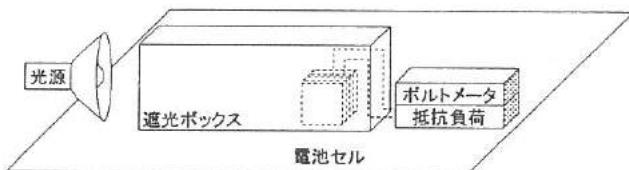


図8 測定装置の構造

Fig.8. Experimental device

## 5. 3 シネコッカスによる発電

図9は光照射下で負荷抵抗を変化させた場合のシネコッカスの電圧-電流特性の一例を示す。測定値は任意の抵抗値に設定した後、電圧がほぼ安定する10分後の値である。

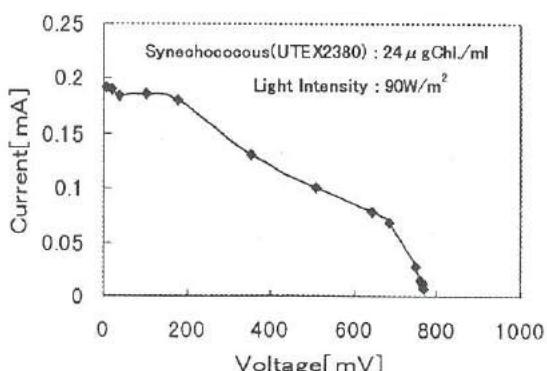


図9 光合成微生物電池の電圧-電流特性

Fig.9. V-A curve of photosynthetic electrochemical solar

図より、無負荷状態での電圧値は778mVであった。また、負荷の抵抗値が $5.1\text{k}\Omega$ の時に最大電力 $0.051\text{mW}$ であった。そのときの光電変換効率は、光照射面積が $8\text{cm}^2$ であるから、 $\eta = 0.05\text{mW}/(90\text{W}/\text{m}^2 \times 8 \times 10^{-4}\text{m}^2) = 0.07\%$ である。

負荷抵抗値 $10\text{k}\Omega$ で、光照射を3時間毎に断続的に行った場合の電圧の変化を図10に示す。光照射開始直後は約700mVまで上昇し、ほぼ安定している。光遮断直後は約350 mVまで急激に低下する。しかし、再び光照射をしても一時的に380mV付近まで上昇するが、その後100mVに低下し、再び電圧が上昇することはなかった。なお、電圧の微妙な変化は、 $\text{N}_2$ ガスによる攪拌のばらつきによって、溶液内の電極付近のHNQに濃度の差が発生したことによるものと推察される。出力低下の原因としては、 $\text{N}_2$ ガスによるバブルリングの影響で溶液中の二酸化炭素が不足すること、光合成で発生した酸素によるHNQの再酸化、そして、電気エネルギーを取り出したことによるシネコッカス内のグリコーゲンの減少が考えられる。

## 5. 4 スピルリナによる発電

図11は光照射下で抵抗値を変化させた場合のスピルリナの電圧-電流特性を示す。前記のように測定値は抵抗値を任意の抵抗値に設定した後、電圧がほぼ安定する10分後の値である。図より、無負荷状態での電圧値は545mVであった。また、負荷の抵抗値が $100\text{k}\Omega$ の時に最大電力 $0.0015\text{mW}$ であった。

負荷抵抗 $100\text{k}\Omega$ で、光照射を断続的に行った場合の電圧の変化を図12に示す。光照射開始直後は約400mVまで上昇し、ほぼ安定している。光遮断直後は約740mVまで上昇した。その後、再び光照射すると220mVに低下し、安定した動きを見せた。

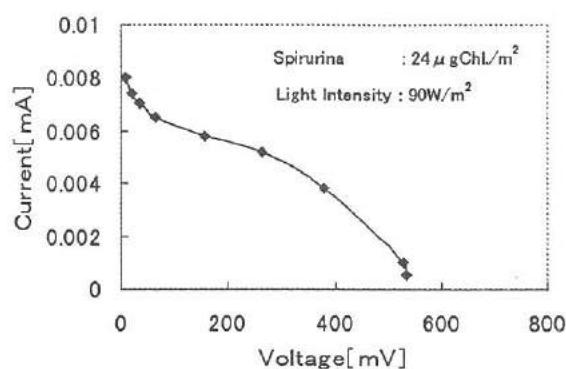


図11 光合成微生物電池の電流－電圧特性

Fig.11. V-A curve of photosynthetic electrochemical solar

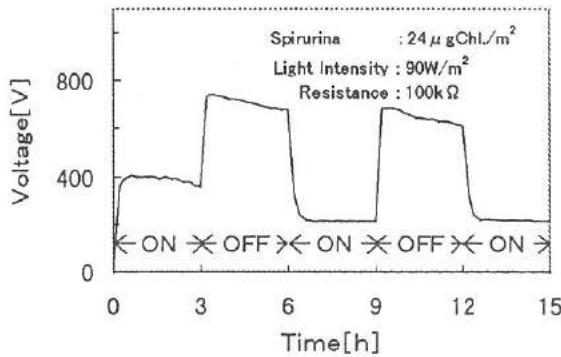


図12 光合成微生物電池の時間－電圧特性

Fig.12. Voltage vs. time curve of photosynthetic electrochemical solar

図には示していないが、70時間後でも同様な特性を示した。

シネココッカスに比べ発電効率が低かった理由としては、HNQの藍藻内部への浸透のしやすさの違いと、光合成によって発生したO<sub>2</sub>によるHNQの再酸化の量の違いが考えられる。

光照射時に電圧が低くなる逆転の現象については、今のところはつきりとした原因は把握していないが、光照射時に光合成過程からはほとんど電子は取り出せず、グリコーゲンの減少は抑えられているものと考えている。そして、光遮断時には何らかの理由でグリコーゲンの分解が活発になり、電圧が上昇したものと考える。またグリコーゲンの減少が抑えられていると仮定すると、シネココッカスに比べ長時間安定した発電ができる可能性がある。

## 5. 5 考察

シネココッカスとスピルリナを比較した場合、シネココッカスは発電効率が良い。この違いはHNQの藍藻内部への浸透のしやすさの違いと、HNQの再酸化の量の違いによるものと考えられ、藍藻の種類によって大きく違うことがわかった。

今後は、藍藻の選択、HNQの濃度や光の強度などの影響を調べ、発電量、継続性の向上をはかる予定である。

## 6. 結 言

本研究では、深層水および藻類を利用した太陽光発電を目的として、藻類の培養および発電実験を実施した。その結果、次のようなことが得られた。

(1) 藻類の指定培地による培養結果では、シネココッカスとスピルリナの培養に成功した。他のものは、指定培地にもかかわらず培養することができなかった。

また、深層水によるシネココッカスの培養では、指定培地による培養に比べ成長が著しく劣る結果となった。深層水は、通常の海水よりも無機栄養素が豊富であるが、指定培地との金属元素の濃度の違いによってこのような結果になったと思われる。今後は、藍藻の成長に関与する金属元素の種類を絞り込むことが重要であると考える。深層水をベースとして藻類を培養する場合、有用な金属元素成分を添加することによって、深層水での培養が可能になると推察された。

(2) シネココッカスによる発電実験では、発電効率は0.07%で、持続時間は約7時間程度であった。スピルリナにおいては、持続時間は70時間以上あるが、発電効率は0.002%と極めて小さい結果となった。

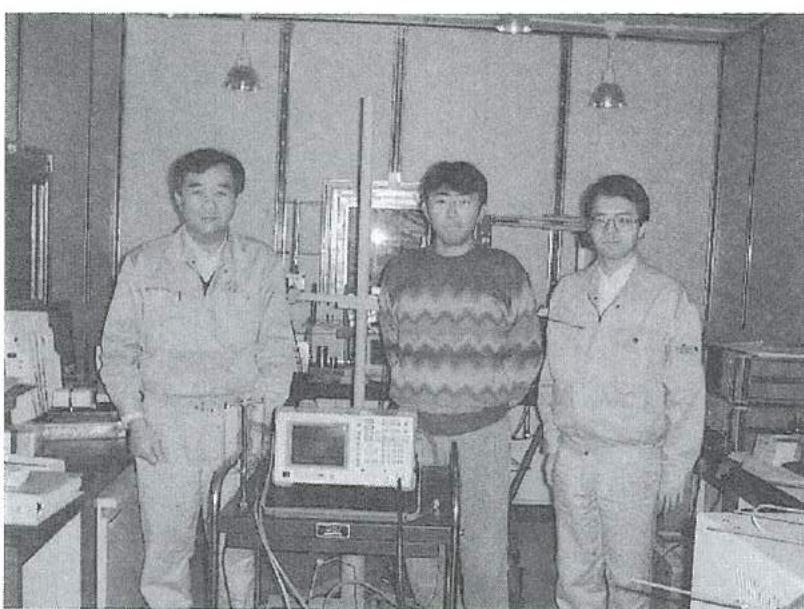
発電効率、持続寿命を向上させるためには5.5でも述べたように各パラメータの最適条件の設定実験が必要である。

本研究では深層水による培養が実現できなかったために、研究の大きな二つのテーマである、「深層水による培養」「光合成微生物による太陽光発電」を結びつけて実験することができなかった。今後は、深層水による培養が大きな課題であり、これを実現させることが重要である。

## 参考文献

- (1) TATSUO YAGISHITA et al., Solar Energy Vol.61, No.5, 347-353, (1997)

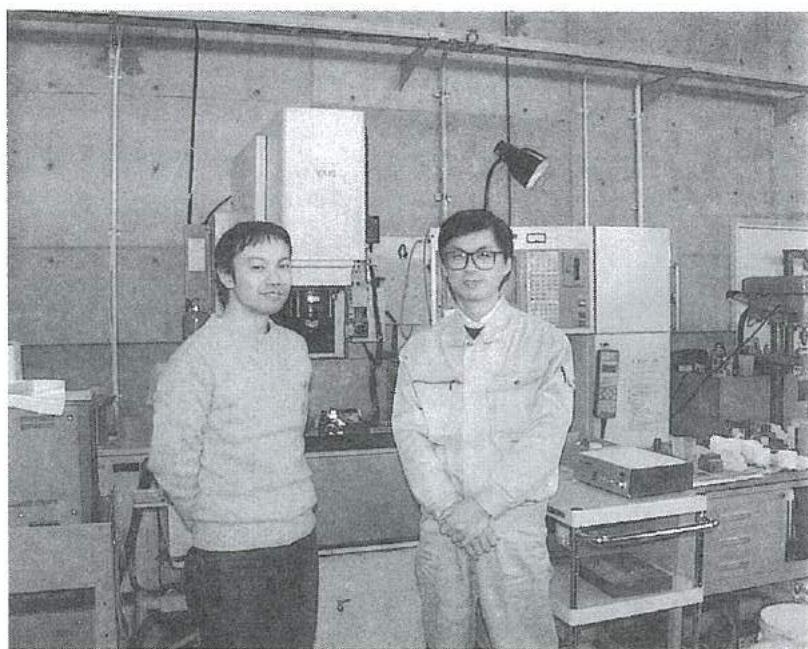
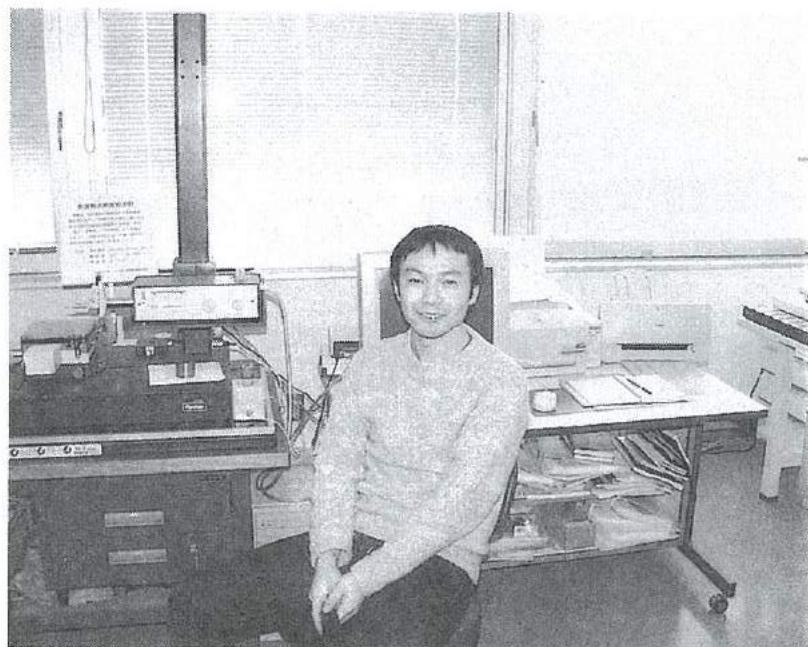
## 「山岳遭難者探索システム」グループの研究活動風景



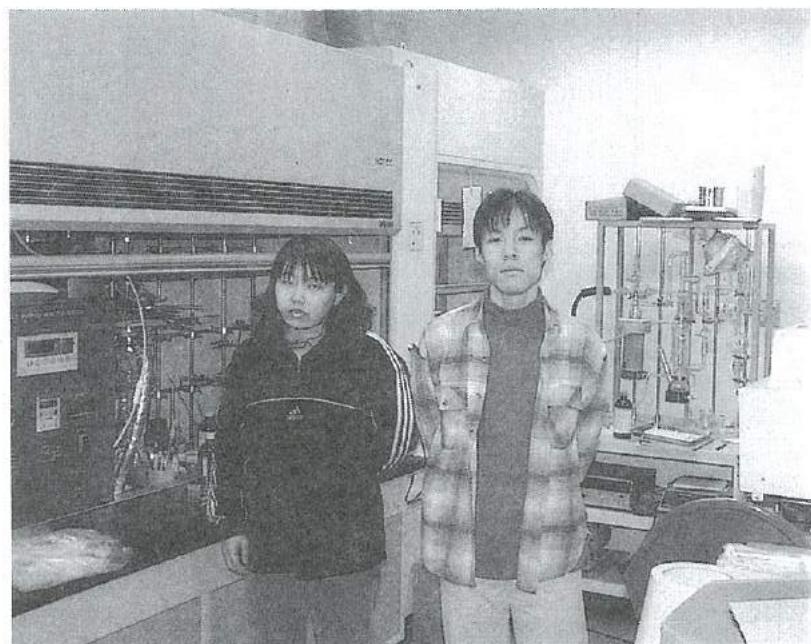
## 「インテリジェントにおいセンサ」グループの研究活動風景



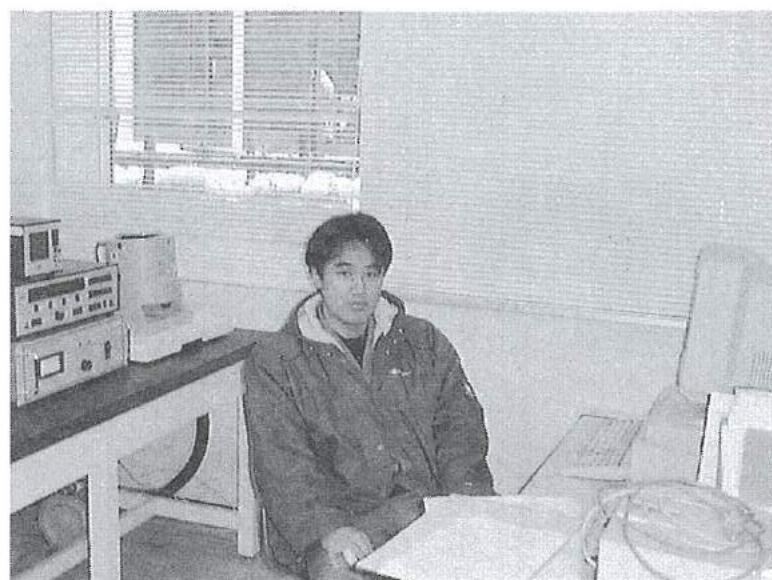
## 「微細放電加工の研究」グループの研究活動風景



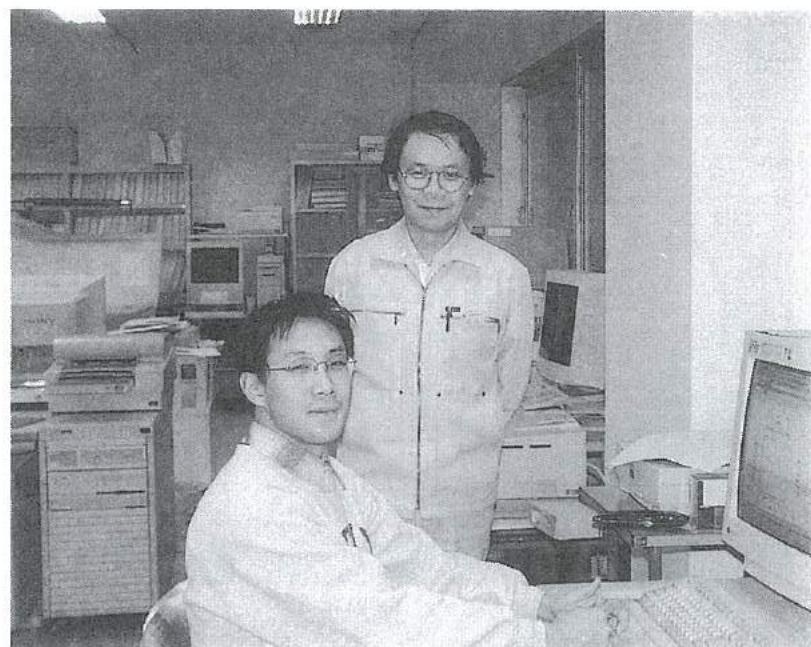
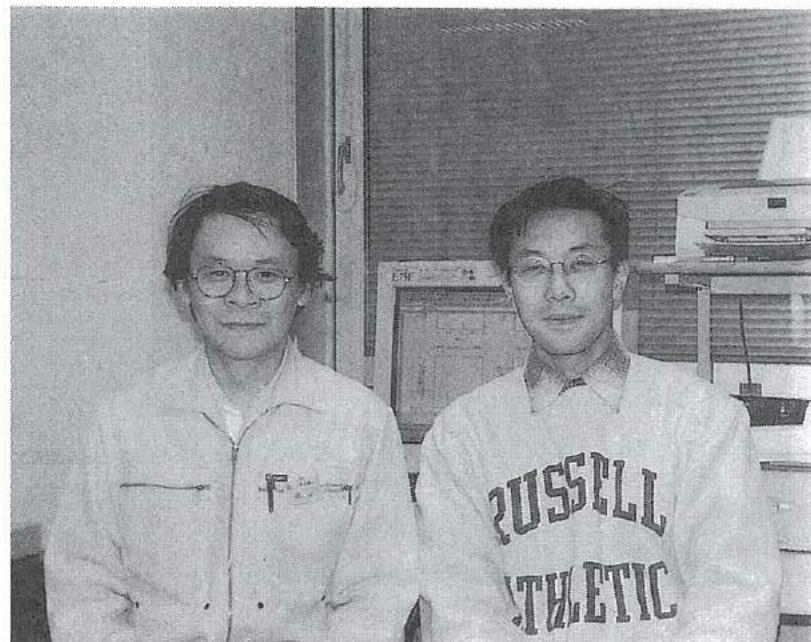
## 「高分子アクチュエータの開発」グループの研究活動風景



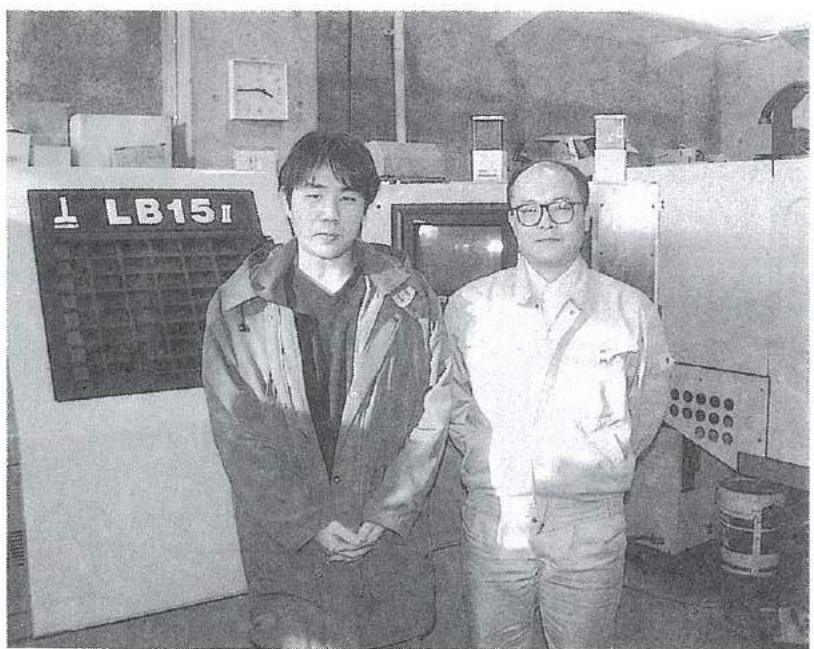
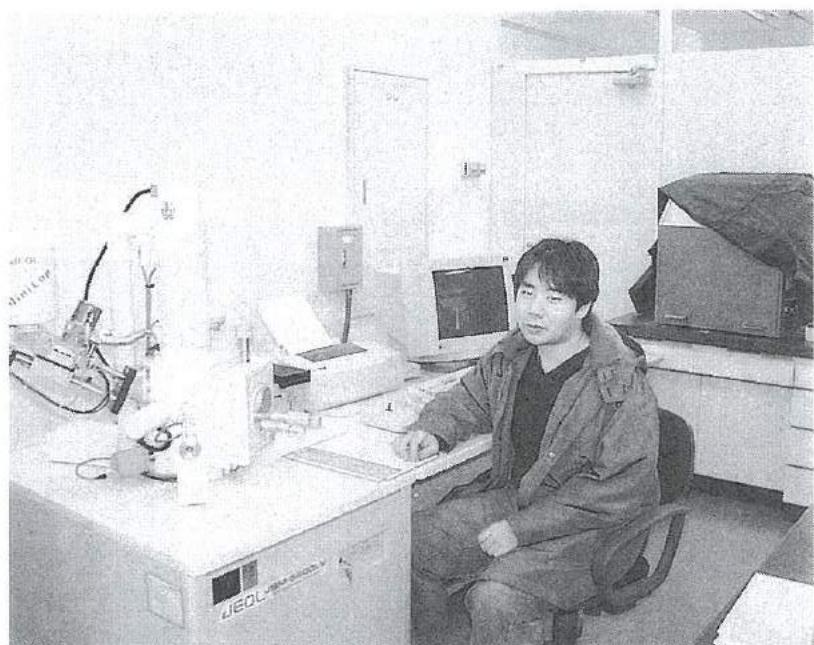
## 「ハードコーティング技術」グループの研究活動風景



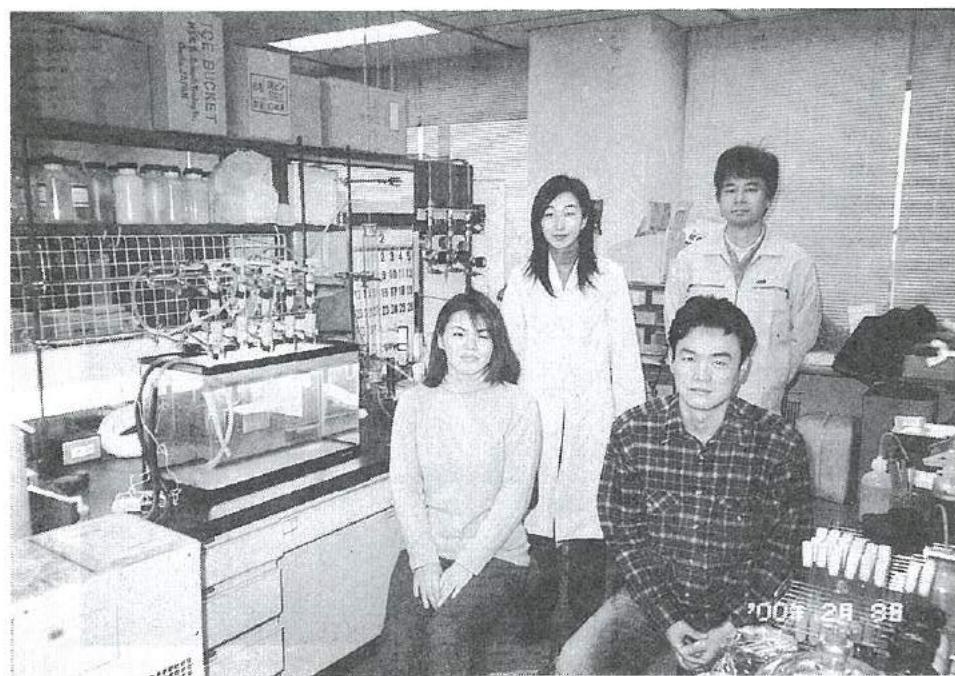
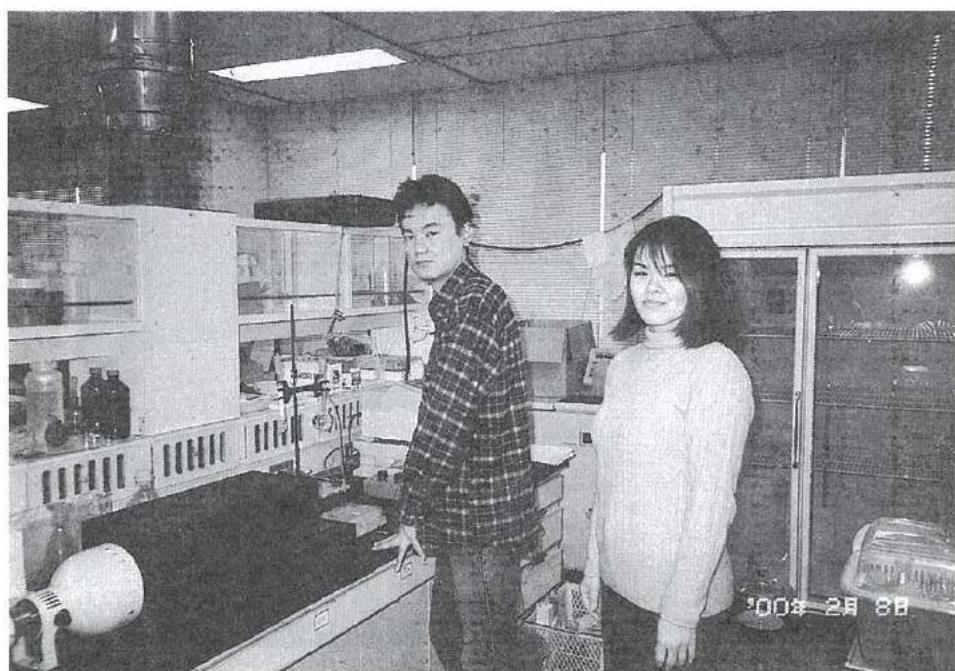
## 「エンジン動弁機構の構造解析」グループの研究活動風景



## 「コーティング工具の密着性向上」グループの研究活動風景



## 「藻類を利用した太陽光発電」グループの研究活動風景



# 「若い研究者を育てる会」の研究活動の足跡

○13年間の研究テーマ数：81テーマ（昭和62年度～平成11年度）

○参加研究員延べ人数：195名（指導機関の研究員を除く）

☆昭和62年度（第1回）研究テーマと研究参加者（3テーマ、12名）

1. 複合材料の開発—金属粉末・樹脂複合材料による射出成形用簡易金型材料の開発

竹本要一（株タカギセイコー）・田上輝次（東洋化工株）・長柄 勝（長柄鉄工株）

◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）

2. 金属酸化物単結晶の作製とその応用開発—中高温用サーミスタの開発

岡崎誠一（北陸電気工業株）・加藤昌憲（日本钢管株）・滝川義弘（鱗化学工業株）

堀田 孝章（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）

3. フレキシブルハンドの開発—介護ロボット用アームの試作

石崎 浩・滝森幸浩（タカノギケン株）・茨木正則（北日本電子株）

・西田信孝（株タカギセイコー）・山田俊一（エルコー株、現コーチセル株）

◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）

☆昭和63年度（第2回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、21名）

1. フレキシブルハンドに関する研究—ロボット用アームの試作（II）

石崎 浩・滝森幸浩（タカノギケン株）・茨木正則（北日本電子株）

窪池義文（エルコー株、現コーチセル株）・滝脇優治（株タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）

2. ZnO系セラミックス薄膜に関する研究—圧電音響素子の開発

小西孝浩（タカノギケン株）・小町秀彦（株タカギセイコー）・滝川義弘（鱗化学工業株）

平能 司（株和泉電気富山製作所）

◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）

3. Co-Metal系アモルファス軟磁性薄膜に関する研究

越浜哲夫（株不二越東富山製鋼所）

◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）

4. 樹脂・ファイバー複合材バネに関する研究

池田秀男（株タカギセイコー）・上段一徳（東洋化工株）・長柄 勝（長柄鉄工株）

柳原 潔（株黒田精型）

◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）

5. Pb系セラミックス薄膜に関する研究—光シャッター及び赤外線センサの開発

中溝佳幸（北陸電気工業株）・水谷里志（立山電化工業株）

宮沢進一（吉田工業株、現YKK（株）黒部工場）

山田義昭（東洋化工株）・山本直樹（NKK（日本钢管株）富山製造所）

◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）

6. 障害者のための学習機能を有するマンマシンシステムの研究－機能的電気刺激のための上肢機能シミュレータの研究開発

古瀬正浩（㈱インテック）・堀井 孝（エルコー㈱、現コーセル㈱）

④指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成1年度（第3回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、19名）

1. 樹脂・ファイバー複合材に関する研究

池田秀男・高柳敏信（タカギセイコー）・上段一徳（東洋化工㈱）・長柄 勝（長柄鉄工㈱）  
柳原 潔（黒田精型）

④指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. ZnO系セラミックス薄膜に関する研究－圧電薄膜音響光学素子の開発

小西孝浩（タカノギケン㈱）・滝川義弘・煙田不二男（鱗化学工業㈱）  
平能 司（和泉電気富山製作所）

④指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 焦電型赤外線センサに関する研究－RFマグネットロンスパッタ法によるチタン酸鉛薄膜の作製

山田義昭（東洋化工㈱）・吉田孝一（タカギセイコー）・吉野正浩（吉田工業㈱、現YKK㈱）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. Co-Nb-Zrアモルファス軟磁性薄膜に関する研究

越浜哲夫（不二越）・西田達也（北陸電気工業㈱）・前坂昌春（エルコー㈱、現コーセル㈱）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 障害者のための学習機能を有するマンマシンシステムの研究－機能的電気刺激のための上肢機能シミュレータの研究開発

古瀬正浩（㈱インテック）・堀井 孝（エルコー㈱、現コーセル㈱）

④指導機関：高志リハビリテーション病院

6. 超音波メガネの研究

中村 亮（北日本電子㈱）・中山正明（和泉電気富山製作所）

④指導機関：富山大学工学部

☆平成2年度（第4回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、16名）

1. 磁性薄膜の応用に関する研究－倍周波型磁気センサの開発

越浜哲夫（不二越）・高島 誠（エルコー㈱、現コーセル㈱）

④指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 仕上げ面粗さ自動測定装置の開発に関する研究

高柳敏信（タカギセイコー）・田村正行（吉田工業㈱、現YKK㈱）・柳原 潔（黒田精型）

④指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

3. 圧電シートを用いた簡易超音波診断装置の開発に関する研究

尾畠哲史（和泉電気富山製作所）・山田義昭（東洋化工㈱）

④指導機関：工業技術センター機械電子研究所

#### 4. 拡散型光導波路を用いた音響光学素子に関する研究

煙田不二男（㈱化学工業）・若林成喜（北陸電気工業）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

#### 5. 画像による寸法計測に関する研究

石黒哲也（㈱タナカエンジニアリング）・窪池義文（エルコー、現コーセル）

西浦慎一・村井哲雄（㈱タカノギケン）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

#### 6. 超音波杖の開発

中村 亮（北日本電子）・堀登紀男（㈱和泉電気富山製作所）

◎指導機関：富山大学工学部

#### 7. 障害者のための学習性を有するマンマシンシステムの研究－完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究

土田隆一（立山科学工業）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

### ☆平成3年度（第5回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、14名）

#### 1. 強誘電体薄膜の応用に関する研究－光書き込み型メモリの開発

玉川 勤（北陸電気工業）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

#### 2. 仕上げ面粗さ自動測定装置の開発に関する研究

桜栄和則（㈱タカギセイコー）・田村正行（吉田工業、現YKK）・柳原 潔（㈱黒田精型）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

#### 3. 画像による円筒内面検査装置の開発に関する研究

荒木満男（㈱タナカエンジニアリング）・西浦慎一（㈱タカノギケン）

山本達生（エルコー、現コーセル）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

#### 4. 圧電シートを用いた簡易超音波診断装置の開発に関する研究

尾畠哲史（㈱和泉電気富山製作所）・山田義昭（東洋化工）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

#### 5. 薄膜微細加工技術の研究

鈴井俊裕（エルコー、現コーセル）・竹端精己（㈱不二越）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

#### 6. 視覚障害者のための音声点字変換装置に関する研究

岩田雅明（北日本電子）・島野英明（㈱インテック）

◎指導機関：富山大学工学部

#### 7. 障害者のための学習性を有するマンマシンシステムの研究－完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究

土田隆一（立山科学工業）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成4年度（第6回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、12名）

1. マイクロマシンに関する研究

白石信幸（コーチセル株）・新谷哲也（北陸電気工業株）・吉井靖岳（株タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 薄膜微細加工技術の研究トランジスタの試作

伊勢寿夫（コーチセル株）・戸田雅規（株不二越）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 形状測定装置の開発に関する研究

野末昌朗（立山アルミニウム工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. 透明プラスチックス製品の欠陥検査装置の開発

大岩秀徳（三協アルミニウム工業株）・長峰浩幸（株タカギセイコー）・本堂 裕（株斎藤製作所）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 短音節認識による音声一点字変換装置に関する研究

北喜靖規（北日本電子株）・島野英明（株インテックシステム研究所）

◎指導機関：富山大学工学部

6. 完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究

土田隆一（立山科学工業株）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成5年度（第7回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、12名）

1. 機能性膜の微細加工に関する研究—磁気式回転センサおよび温度抵抗素子の試作

伊東 守（コーチセル株）・森田智之（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. マイクロマシンに関する研究

川西和昭（三協アルミニウム工業株）・後藤 肇（コーチセル株）

佐々木啓充（株タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 有機電子材料に関する研究

雨野孝信（株タカギセイコー）・堀田正人（東洋化工株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. リン酸塩系セラミックス固体電解質に関する研究

黒川寛幸（北陸電気工業株）・山口 瞳（燐化学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. R I M の C A E に関する研究

杉田孝嗣（三協アルミニウム工業株）・中村和禎（株タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

## 6. 障害者のための屋内環境制御装置の開発に関する研究（I）

五十嵐隆治（立山アルミニウム工業株）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成6年度（第8回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、16名）

### 1. 視覚システムを持つ移動ロボットの開発

小山直人（タカギセイコー）・寺本正夫・杉谷 健（コーセル株）

中村厚平（エヌアイシ・オートテック株）

松田英雄（タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 2. 機能性薄膜と半導体の複合素子の開発

高柳 殻（コーセル株）・田村雅英（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 3. リン酸エッティング液の基礎研究

山口 瞳（燐化学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 4. 傾斜機能膜素子の開発

市川良雄（富山軽金属工業株）・福本 滋（北陸電気工業株）・三松克次（タカギセイコー）

山下慎也（タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 5. 3次元入力デバイスの開発－（バーチャルリアリティ用）

細木文夫（三協アルミニウム工業株）・横山 大（長岡技術科学大学）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

## 6. 障害者のための屋内環境制御装置の開発に関する研究（2）

五十嵐隆治（立山アルミニウム工業株）・米谷庄一（三協アルミニウム工業株）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成7年度（第9回）研究テーマと研究参加者（8テーマ、15名）

### 1. 視覚システムを持つ移動ロボットの開発（2）

大浦真司（三協アルミニウム工業株）・高田謙一（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 2. 金属製品の鍛造成形シミュレーションに関する研究

永森和久（タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 3. 電子回路用ウエットエッティング液の開発

山口 瞳（燐化学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

- 4. 形状記憶合金薄膜を用いたマイクロアクチュエータの開発**  
高橋伸忠（㈱タカギセイコー）・能村輝一（北陸電気工業㈱）  
山下慎也（㈱タナカエンジニアリング）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所
- 5. 微動機構による機械の高度化の研究**  
佐野仁一（東洋化工㈱）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所
- 6. 薄膜超磁歪素子の研究**  
酒井隆正（コーチル㈱）・谷上英樹（北陸電気工業㈱）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所
- 7. レドックス型太陽発電システムの開発**  
市川良雄・大橋伸一（富山軽金属工業㈱）・三井清隆（㈱タナカエンジニアリング）  
長谷川益夫（富山県林業技術センター・木材試験場）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所
- 8. 障害者のための屋内環境制御装置の開発に関する研究（3）**  
五十嵐隆治（立山アルミニウム工業㈱）  
④指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成8年度（第10回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、15名）

- 1. 機能性薄膜を用いたマイクロポンプの研究**  
三松克次・笛島和明（㈱タカギセイコー）・田島正康（㈱タナカエンジニアリング）  
田中 篤（北陸電気工業㈱）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所
- 2. 鍛造成形の簡易シミュレーションに関する研究**  
松井裕昭（㈱タナカエンジニアリング）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所
- 3. レドックス型太陽発電システムの開発（2）**  
市川良雄（富山軽金属工業㈱）・田畠裕信（中越合金鋳工㈱）  
三井清隆（㈱タナカエンジニアリング）  
長谷川益夫（富山県林業技術センター・木材試験場）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所
- 4. 複数のロボットによる協調制御の研究**  
金田淳也（コーチル㈱）・森田裕之（立山アルミニウム工業㈱）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
- 5. 多孔質シリコンの形成に関する研究**  
石川秀人（北陸電気工業㈱）・安田純子（コーチル㈱）  
④指導機関：工業技術センター機械電子研究所

## 6. 蓄光性螢光膜の開発

佐野仁一（東洋化工㈱）・二見泰雄（三協アルミニウム工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

☆平成9年度（第11回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、18名）

### 1. レドックス型太陽発電システムの開発（3）

市川良雄（富山軽金属工業㈱）・田畠裕信（中越合金鋳工㈱）

野中義夫（㈲トヤマ技術開発研究所）・長谷川益夫（富山県林業技術センター・木材試験場）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 2. 複数のロボットによる協調制御の研究（2）

森田裕之（立山アルミニウム工業㈱）・渡辺暁信（㈱タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

### 3. 生活環境用臭センサの開発

垣内由美子（コーチセル㈱）・角谷哲哉（北陸電気工業㈱）・小島理敬（三協アルミニウム工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

### 4. 電力変換用圧電セラミックストラnsの開発

堀井一宏（コーチセル㈱）・柳川 新（立山科学工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 5. 局部的レーザー処理による形状記憶合金膜アクチュエータの開発

丹保哲也（北陸電気工業㈱）・野上拓也（㈱タナカエンジニアリング）・山田浩美（東洋化工㈱）

滝川健太郎（金沢大学工学部）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 6. 電気自動車の開発

坂本雅美（㈲斎藤製作所）・高橋 聰（㈱タナカエンジニアリング）

藤木和幸（㈱タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成10年度（第12回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、11名）

### 1. 圧電素子を用いた制振機構の研究

稲垣 聰（北陸電気工業㈱）・渡辺暁信（田中精密工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 2. コーティング工具の密着性向上に関する研究

野上拓也（田中精密工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

### 3. 生活環境用においセンサの開発（2）

星野昌則（コーチセル㈱）・南 政克（北陸電気工業㈱）・山田浩美（東洋化工㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

4. 電気自動車の開発（2）  
坂本雅美（株）齊藤製作所  
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
5. 微細放電加工の研究  
太田光則（株）齊藤製作所・橋本 明（田中精密工業株）  
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
6. 電磁シールド材の基礎研究  
高橋伸忠（株）タカギセイコー・福田隆之（コーセル株）  
◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成11年度（第13回）研究テーマと研究参加者（8テーマ、14名）

1. エンジンの動弁機構における構造解析及び強度評価  
島村和彦（田中精密工業株）  
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. コーティング工具の密着性向上に関する研究（2）  
高田智哉（田中精密工業株）  
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
3. 深層水及び藻類を利用した太陽光発電の基礎研究  
石川勝巳（コーセル株）・坂本雅美（株）齊藤製作所  
長谷川益夫（県林業技術センター木材試験場）・小善圭一（県水産試験場）  
◎指導機関：工業技術センター中央研究所、木材試験場、水産試験場
4. 山岳遭難者探索システムの探索性能向上に関する研究  
前田智博（立山科学工業株）  
高瀬 洋（県警察本部山岳警備隊）  
◎指導機関：工業技術センター中央研究所、県警察本部山岳警備隊
5. インテリジェントにおいてセンサの開発  
小森一哉（北陸電気工業株）・東堂浩次（コーセル株）  
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部
6. 微細放電加工の研究（2）  
太田光則（株）齊藤製作所  
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
7. 機能性高分子を用いたアクチュエータの開発研究  
小中稔正（YKK株）・山田浩美（東洋化工株）  
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
8. プラスチックス上のハードコーティング技術の研究  
高橋伸忠（株）タカギセイコー  
◎指導機関：工業技術センター中央研究所

## 第6回『自作ミニチュアマシン・サッカーゲームコンテスト』

1. 競技日：平成11年10月3日（日）午前10時～午後4時
2. 会場：テクノホール（富山産業展示館）・エントランスホール
3. 主催：若い研究者を育てる会
4. 共催：とやまテクノフェア実行委員会、（社）富山県機械工業会  
富山技術開発財団、富山県工業技術センター機械電子研究所
5. 参加チーム：7チーム、15名
6. ゲーム結果（全チームに賞状、トロフィ、メダル、副賞授与）

テクノ大賞	木原 達哉・橋 久仁雄：富山県立富山工業高等学校 自作マシンの愛称：We i β
優勝	辻川 孝次・寺崎 慎也：富山県立水産高等学校 坂井 敏敦 自作マシンの愛称：ケリー&守君
次勝	山内 誠・麦谷 康貴：富山県立二上工業高等学校 自作マシンの愛称：M Y's
技術賞	中谷 陽介・慶伊 拓也：富山県立富山工業高等学校 自作マシンの愛称：J K & L B
努力賞	廣野 裕貴・吉岡 慧：富山県立富山工業高等学校 自作マシンの愛称：H & Y
努力賞	藤尾 玄太・前田 翼：富山県立富山工業高等学校 自作マシンの愛称：D r i v e r s
努力賞	大和 駿平・沢田 大輝：富山県立二上工業高等学校 自作マシンの愛称：コカ&ペプシ
7. 試合方式
  - 1チーム2台（攻撃マシンとキーパーマシン）による1試合2チームの対戦方式
  - サッカーコート寸法：90×120cm
  - マシンの寸法：10×10×10cm以内・有線リモートコントロール方式
  - 試合方式：予選リーグ（A、Bの2リーグ）戦およびリーグ優勝、次勝チームによる決勝トーナメント戦方式。試合時間は5分ハーフの計10分

# 会員企業

平成12年3月16日現在（50音順）

	企 業 名	代表者名	運営委員	電 話
1	株)インテック	中尾 哲雄	河崎 哲男	076-444-8088
2	エヌアイシ・オートテック株	西川 浩司	西尾 謙夫	076-422-2578
3	北日本電子株	橋田 栄耕	広野 照二	076-451-2155
4	コーチル株	飴 久晴	織田 誠二	076-432-8151
5	株)齊藤製作所	齊藤 恵三	森本 政典	076-468-2727
6	三協アルミニウム工業株	竹平 和男	吉岡 茂喜	0766-20-2366
7	株)タカギセイコー	高木 正明	柳本 曜雄	0766-84-9261
8	タカノギケン株	高野 啓良	滝森 幸浩	076-455-2525
9	武内プレス工業株	武内 繁和	浅井 吉夫	076-441-1856
10	立山アルミニウム工業株	竹平栄太郎	伊藤 房男	0766-64-4419
11	立山科学工業株	水口昭一郎	土井 喜一	076-429-2128
12	田中精密工業株	田中 一郎	高木 善昭	076-451-5600
13	中越合金鋳工株	本多 秀治	石金 良一	076-463-1211
14	東洋化工株	中田 守人	村井 文雄	076-475-2125
15	富山軽金属工業株	荒井 久夫	政 誠一	0766-84-9082
16	長柄鉄工株	長柄 勝	長柄 勝	0766-22-3170
17	北陸電気工業株	野村 正也	若林 守光	076-467-1111
18	燐化学工業株	鶴田 幸靖	滝川 義弘	0766-86-2511
19	YKK株黒部事業所	吉田 隆久	大宮 一男	0765-54-8030

事務局：(財)富山技術開発財団内 〒930-0866富山市高田529 TEL: 076-433-6402

運営アドバイザー：東保喜八郎 工業技術センター次長（兼機械電子研究所長） TEL: 076-433-5466

## 研究会員（研究幹事）

氏 名	所 属 ・ 役 職 ・ 学 位 ・ 電 話
植 松 哲太郎	富山県立大学工学部・教 授・工学博士 0766-56-2495
龍 山 智 葵	富山大学工学部・教 授・工学博士 076-441-1271
谷 野 克 巳	工業技術センタープロジェクト推進担当参事 工学博士 0766-21-2121
藤 城 敏 史	工業技術センター企画管理部・副主幹研究員 工学博士 0766-21-2121
古 田 熊	富山医科薬科大学医学部・教 授・歯学博士 076-434-2281
山 本 敏 泰	高志リハビリテーション病院研究開発部・リハビリテーション工学科長 理学博士 076-438-2233
山 本 優 久	富山県立大学工学部・教 授・工学博士 0766-56-7500

○歴代会長（会長人事は会員企業内持ち回り、2代目からは任期2年）

- 初代会長 飴 久晴（昭和62年度～平成4年度）
- 2代会長 高木 正明（平成5年度～平成6年度）
- 3代会長 中田 守人（平成7年度～平成8年度）
- 4代会長 野村 正也（平成9年度～平成10年度）
- 5代会長 田中 一郎（平成11年度～）

## ○顧問（50音順）

- 石坂 誠一（富山国際大学学長）
- 南日 康夫（工業技術センター所長・RSP研究会会長・新技術コーディネーター）
- 本郷 茂（富山技術開発財団常務理事）
- 宮下 尚（富山大学工学部長）

(様式 1)

## 「若い研究者を育てる会」入会申込書

企 業 名

(事業所名)

代 表 者 名

住所、電話番号及びファクシミリ番号

〒

T E L :

F A X :

連絡担当者所属、役職及び氏名

上記のとおり貴会へ入会を申し込みます。

平成 年 月 日

企 業 名

印

(事業所名)

「若い研究者を育てる会」殿

◎「若い研究者を育てる会」では会員企業を随時募集しています。

- ・申し込みは郵送またはファクシミリにてお願いします。
- ・申し込み用紙は本票をコピーしてご利用ください。
- ・その他不明な点は事務局へお問合せください。

☆申し込み先

〒930-0866 富山市高田529

(財)富山技術開発財団内

「若い研究者を育てる会」事務局

T E L 0764-33-6402

F A X 0764-33-6170

発 行 者	若い研究者を育てる会
発行者住所	〒930-0866 富山市高田529 (財)富山技術開発財団 富山技術交流センター内
編集責任者	富山県工業技術センター プロジェクト推進担当 谷野克巳・藤城敏史
発行年月日	平成12年3月16日
印 刷 所	富山スガキ株式会社

\* 無断転載を禁ずる。非売品。