

平成 24 年 度

(第 26 回)

若い研究者を育てる会研究発表会

研究論文集

平成 25 年 3 月 14 日 (木)

於：ホテルグランテラス富山

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

富山大学大学院理工学研究部

富山大学芸術文化学部

富山県立大学工学部

ごあいさつ

会長 津田 信治

「若い研究者を育てる会」の第26回研究論文集発行を迎えるにあたり、一言ごあいさつを申し上げます。

「若い研究者を育てる会」（以下「若研」）は、昭和62年に発足して以来26年間に延べ166のテーマに324名に達する技術者が取り組まれました。その方たちは現在指導者として、開発のリーダーとしてその経験を活かしてご活躍のことと存じます。その間「若研」指導、運営にご尽力頂きました関係各位には地域のモノづくり産業に携わる者として心より感謝申し上げます。



ところで、昨年秋には日本経済はいわゆる6重苦の上に、更に尖閣問題に端を発した中国国内の反日感情が加わり7重苦と言われた大変苦しい状況となりました。その後昨年末からは円相場は適正水準に戻りつつあり、それに伴い株価も上がって来ましたが、日本が得意とする他国に優位性を示せる“すり合わせ型”のモノづくりが“モジュール型”へ、またデジタル商品化へ転換してきており、それほどの技術が無くても、新興国が参入できる状態が生まれて来ています。また新興国の大きな市場では、ほどほどの性能であれば日本国内での製造では太刀打ちできない低価格品が市場を席卷している現状があります。

そのようなモノづくりの構造的な変化にあって日本国内で製造しても利益が出せるモノづくりを実現しなかったら、あるいは海外展開を進めざるを得ない場合でも開発力を日本に残さなければ日本のモノづくりの力は低下し続けるでしょう。

さて、創造性で商品展開してきた故スティーブ・ジョブズの率いたアップルがiPhoneやiPadなど革新的な商品でユーザーに新しいライフスタイルを提供していますが、たとえ製造を社外に委託していてもアップルの設計部門はかなりモノづくりの現場を熟知していたことがその設計に表れており、商品コンセプト上必要なら外注先の製造工程の装置までもアップル内で設計しています。企画を実現するためにモノづくり力の裏付けを重要視したジョブズの考えの一例です。以上のことに鑑みて「日本の明日のモノづくり」を富山の地で担う若い技術者の方には、是非「若研」に参加され広く、深い視野を持たれるよう、また「若研」卒業生の方には「若研」での縁を期に益々工業技術センターを活用し、また共同研究仲間とは互いに技術者としての志を高めあうように交流を継続され、積極的に自分の技術を世界に問う気概を持って邁進されることを祈念します。

研究の概要

本論文集は、『若い研究者を育てる会』に参加する企業（会員企業数14社）と会員企業研究者が7つの研究テーマとグループを定め、平成24年5月から富山県工業技術センターにおいて、7グループ（7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、7テーマの内1テーマについては、富山大学大学院理工学研究部の研究指導・協力のもとで実施した。ここでは、今年度実施した7テーマの研究概要を研究発表順に述べる。

富山県工業技術センター機械電子研究所 博士(工学) 石黒 智明

①「MDF 木屑からのバイオエタノール抽出技術の開発」

の研究グループ（参加企業1社）では、バイオマス原料から抽出されるバイオエタノールが、持続可能な発展に貢献できる重要なエネルギー資源として期待されていることから、未利用木質バイオマスとして Medium Density Fiberboard (MDF) 木屑に着目し、前処理や糖化方法、発酵阻害物質の除去方法等について検討することで、MDF 木屑からの効率よいバイオエタノール抽出技術の開発を目指した。その結果、微粉碎処理→オートクレーブ処理→洗浄処理した MDF 木屑を、5wt%の混合酵素による糖化処理後、酵母発酵させることで、MDF 木屑から効率良くエタノールを抽出できることを明らかにした。(MDF 木屑 1kg から、約 100ml のエタノールが得られる。) 本研究は、接着剤等阻害物質を含む廃棄木質バイオマスもエタノール源として有効活用できることを示唆したもので、意義は大きい。



富山県工業技術センター 博士(工学) 二口 友昭

②「マグネシウムイオン2次電池に関する研究」の研究グループ（参加企業1社）では、マグネシウムイオン2次電池の開発を目標に研究を行った。その結果、得られた容量は小さいが数10回充放電特性を示すマグネシウム2次電池が作製できた。また、以下の知見が得られた。

①正極活物質として純度の高いコバルト酸マグネシウム系材料を作製することは困難であった。得られた活物質の放電特性は、0.2mAh/gであった。②カーボンシートに酸化バナジウムを塗布した正極、カーボンシートにバナジウム酸マグネシウムを塗布した負極（酸化バナジウムにマグネシウムを導入したもの）、プロピレンカーボネート系の電解液の構造において2次電池特性が得られることを確認した。その放電容量は25mAh/gであった。③カーボンシートに酸化バナジウム系ガラスを塗布した正極とそれにマグネシウムを導入した負極を用いて、電池特性を測定した結果、放電容量は10mAh/gであった。特性向上のためには、さらに粒径等の影響を検討する必要がある。



③「ナノインプリントを応用した微細電極パターンの形成に関する研究」の研究グループ（参加企業1社）では、Agナノ粒子に対して直接ナノインプリントを行い、ミクロン以下の電極パターン形成を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

①Agナノインク膜の焼成温度を増加させていくと、Agバルクの体積抵抗率($1.59 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)に近づいていくことを確認した。②Agナノインクに直接ナノインプリントを行うことにより、Agナノパターンを形成できることを明らかとした。③スピコート回転速度を増加させることで、ナノインプリント後のパターン溝及び残膜の高さは共に低くなるのが分かった。④焼成温度が 250°C のとき、モールドのパターンに対して線幅が28%、溝の高さが60%減少するが、精密なパターンが形成されることを明らかとした。⑤Agナノインクパターンの結晶性は、焼成温度の増加にともない、改善された。⑥Agを混合液（硝酸、リン酸、酢酸、純水）でエッチングしたときのエッチングレートは $0.0246 \mu\text{m}/\text{min}$ であり、薄膜からナノドットが形成されることが分かった。

富山県工業技術センター企画管理部 博士(工学) 佐山 利彦

④「小水力発電システムの研究」の研究グループ（参加企業3社）では、極低容量の水力発電システム全体の最適化を目的とし、その発電効率および流量変動に対する出力電力特性について、動特性シミュレータを活用した基礎的な検討を行った。具体的には、屋根の雨樋から落下する雨水の活用を想定した開放型ホイール水車と直流発電機を用いた50W規模の発電システムを、最適化の検討対象として選定した。この発電システムにおける流路部、水車部、変速機部、発電機部の各要素に対して運動状態等を数理モデル化し、これらを動特性シミュレータ上で発電システム全体



のシミュレータとして再構成した。また、各要素の物理係数は、試験装置を製作して同定した。本シミュレータを用いて検討した結果、(1) 定常状態における発電効率については、変速機のギヤ比と発電機のコイル巻き数との最適な組合せを選定することが可能となったこと、(2) 流入流量の変動に対する出力電力の変動については、開放型ホイール水車の慣性モーメントがその抑制に役立つこと、などの知見が得られた。今後、生活に身近な極低容量の水力発電システムの開発への適用が期待される。

富山県工業技術センター中央研究所 博士(工学) 杉森 博

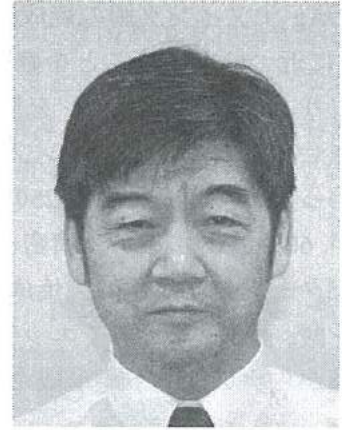
⑤「受動的歩行ロボットの開発」の研究グループ（参加企業2社）では、モータやセンサ等をいっさい使わず、重力のみで歩行可能な受動歩行ロボットを試作し、歩行可能な条件等の検討をおこなった。さらに、この原理を応用して、後ろから押すだけで足を振り出して前進する受動的2足歩行ロボットを開発した。試作したロボットは、膝関節を有した構造で、両足の間に荷物運搬用の籠を備えた構造としており、さらに車輪機構も併せ持つことで、様々な環境下で荷物運搬が可能なものを目指した。試作にあたっては、機構解析ソフトで構造検討を行ったうえで作製した。開発した受動的2足歩行ロ



ボットは、操作に多少の慣れが必要であるものの、荷物を運搬できるものどできた。

富山大学大学院理工学研究部 工学博士 丹保 豊和

⑥「積層鋼板の磁気特性に関する研究(2)」の研究グループ(参加企業1社)では、従来、変圧器やモータのコア材に使われている電磁鋼(Si鋼)板に替わる、コストパフォーマンスに優れた、積層電磁鋼板の構成について検討している。本研究では、当初Si鋼とSPCC材、Si鋼とSUY材、Si鋼とSK材を組み合わせて、交互に積層したコアを作成し、その磁気特性を調査する計画であった。SK材単体の調査を進める中で、鉄損と最大磁束密度の両面で積層コア材料に用いるのは不適切であることがわかった。ここでは、Si鋼とSPCC材、Si鋼とSUY材を用いた2種類の積層コアを中心にそれらの磁気特性(鉄損の周波数依存、鉄損の最大磁束密度依存、渦電流損とヒステリシス損、温度依存、励磁電源波形依存など)を調査したので、その結果を報告する。



富山県工業技術センター中央研究所 博士(工学) 岩坪 聡

⑦「SW電源の電磁ノイズのシミュレーション」の研究グループ(参加企業1社)では、電磁界解析のシミュレーション技術を用いることで、スイッチング電源などの開発に有効な電磁ノイズ対策が、迅速に実施できるかを検討した。回路をモデル化するときの計算量を考慮して、時間領域を扱うマクスウェルの方程式を差分法で電磁界をシミュレートするFDTD法(Finite Difference Time Domain method)と3次関数を補間関数として使用したCIP法(Constrained Interpolation Profile Scheme)の特徴について調べた。複雑な多層プリント基板の解析には計算量が少ないFDTD法の方が適していた。実回路を簡易モデル化したシミュレーションの市販シミュレータとの比較では、ノイズの電界強度や分布などで誤差は数dBであった。さらなる精度向上のためには境界条件の最適化が必要であるとの課題も残ったが、本シミュレーション手法の可能性を示すなどの結果を得た。



以上、本論文集は7つの独立した研究テーマと成果から構成されているが、今年度は昨年度と比較して2テーマ増の研究を実施した。

一昨年3月の東日本大震災で引き起こされた原発事故によって再び日本のエネルギー危機がクローズアップされ、各方面では再生可能エネルギーを含めてさまざまなエネルギーの開発が活発に検討されているが、今年度は本会でもエネルギー関連技術の研究を3テーマ実施した。

過去26年間で166テーマの研究を実施したが、これらの研究成果は関連学会ですでに発表、もしくは今年中に開催される関係学会で研究発表を予定している。

また、過去26年間の研究で得られた成果を発展させた幾つかの自動化技術や材料技術、

例えば、自律型ロボット技術などは生産ラインの自動化などに応用され、材料技術などは建材関連製品や自動車などに応用され企業化している。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っているものと確信している。

なお、本会の目的は学術的な研究をすることではなく、企業現場で戦力となる**企業技術者・研究者の育成**と**リカレント教育**の実施、そして、企業の枠を越えた若手技術者・研究者同士の**連携の「輪」**を広げることであり、本会はこのような研究活動を通じて富山県産業全体の発展を願う**県内企業オーナー有志**によって設立された会である。異業種が交流して共同研究を実施することは、座学では得られない貴重かつ重要な**実学**であると考えている。

最後に、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、ご助言を賜わっていることに対しまして、深く感謝の意を表します。

平成25年3月（顧問・運営アドバイザー 工学博士 谷野克巳）

研究グループの構成

I. MDF木屑からのバイオエタノール抽出技術の開発の研究グループ

研究担当者 **羽根 新太郎 (三協立山㈱)**

- 高田 耕児 (工業技術センター機械電子研)
- 横山 義之 (工業技術センター機械電子研)
- ☆石黒 智明 (工業技術センター機械電子研)

II. マグネシウムイオン2次電池に関する研究の研究グループ

研究担当者 **作道 千枝 (磷化学工業㈱)**

- 角田 龍則 (工業技術センター機械電子研)
- 本保 栄治 (工業技術センター機械電子研)
- 高田 耕児 (工業技術センター機械電子研)
- ☆二口 友昭 (工業技術センター)

III. ナノインプリントを応用した微細電極パターンの形成に関する研究

の研究グループ

研究担当者 **大門 貴史 (北陸電気工業㈱)**

- 丹保 浩行 (工業技術センター機械電子研)
- 角田 龍則 (工業技術センター機械電子研)
- 横山 義之 (工業技術センター機械電子研)
- 坂井 雄一 (工業技術センター企画管理部)
- ☆二口 友昭 (工業技術センター)

IV. 小水力発電システムの研究の研究グループ

研究担当者 **中瀬 典章 (コーセル㈱)**

荒井 勇人 (立山科学工業㈱)

熊澤 周士 (㈱タカギセイコー)

- 金森 直希 (工業技術センター機械電子研)
- 羽柴 利直 (工業技術センター機械電子研)
- 浅田 峯夫 (工業技術センター機械電子研)
- 石黒 智明 (工業技術センター機械電子研)
- ☆佐山 利彦 (工業技術センター企画管理部)

V. 受動的歩行ロボットの開発の研究グループ

研究担当者 **水上慎太郎 (コーセル㈱)**

若崎 祥人 (立山マシン㈱)

○上野 実 (工業技術センター機械電子研)

釣谷 浩之 (工業技術センター機械電子研)

金森 直希 (工業技術センター機械電子研)

☆杉森 博 (工業技術センター中央研究所)

VI. 積層鋼板の磁気特性に関する研究 (2) の研究グループ

研究担当者 **藤岡 英示 (田中精密工業㈱)**

○浅田 峯夫 (工業技術センター機械電子研)

上野 実 (工業技術センター機械電子研)

丹保 浩行 (工業技術センター機械電子研)

横山 義之 (工業技術センター機械電子研)

◇谷野 克巳 (谷野技術士事務所)

☆丹保 豊和 (富山大学大学院理工学研究部)

VII. SW電源の電磁ノイズのシミュレーションの研究グループ

研究担当者 **野口 拡 (コーセル㈱)**

○宮田 直幸 (工業技術センター中央研究所)

佐々木克浩 (工業技術センター中央研究所)

塚本 吉俊 (工業技術センター中央研究所)

浅田 峯夫 (工業技術センター機械電子研)

☆岩坪 聡 (工業技術センター中央研究所)

註：○印は各研究グループのチーフ

◇印は研究アドバイザー

☆印は研究幹事

目 次

I. MDF木屑からのバイオエタノール抽出技術の開発	1
1. 緒 言	1
2. バイオエタノールの抽出	1
3. 実験方法	2
4. 結果及び考察	4
5. 結 言	7
II. マグネシウムイオン2次電池に関する研究	9
1. 緒 言	9
2. 正極材料の検討	10
3. 負極、電解液の検討	11
4. 電池評価	13
5. 結 言	14
III. ナノインプリントを応用した微細電極パターンの形成に関する研究	15
1. 緒 言	15
2. 表面弾性波フィルタ	15
3. 金属ナノ粒子	16
4. ナノインプリント	18
5. Ag 薄膜のウェットエッチング	20
6. 結 言	20
IV. 小水力発電システムの研究	21
1. 緒 言	21
2. 対象とする発電システム	21
3. 研究の流れ	21
4. 発電システムの動特性のモデル化	22
5. 動特性シミュレータによる発電システムの特性調査	24
6. 流量変動に対する出力電力特性	25
7. 結 言	26
V. 受動的歩行ロボットの開発	27
1. 緒 言	27
2. 受動歩行の概要	27
3. コンセプトと検討事項	27
4. 受動歩行動作の解析	28

5. 受動的歩行ロボットの製作と動作の確認	30
6. 結 言	34
VI. 積層鋼板の磁気特性に関する研究(2)	35
1. 結 言	35
2. 実験方法	35
3. 結果と考察	37
4. 結 言	40
VII. SW電源の電磁ノイズのシミュレーション	41
1. 結 言	41
2. 数値計算法	41
3. FDTD法プログラミングの妥当性の検証	42
4. 電子回路基板とその近傍電界解析	43
5. 遠方電界	45
6. 結 言	46
○各研究グループの研究風景	付-1
○「若い研究者を育てる会」26年間の研究活動の足跡	付-8
○会員企業および研究幹事名簿	付-22
○入会申込書	付-23

I. MDF 木屑からのバイオエタノール抽出技術の開発

Development of Bioethanol Production Methods from MDF Sawdust

羽根 新太郎

HANE Shintaro

高田 耕児

横山 義之

石黒 智明

TAKATA Koji

YOKOYAMA Yoshiyuki

ISHIKURO Tomoaki

Abstract

Bioethanol is a renewable fuel which will contribute to global sustainable development. Currently, bioethanol produced from food crops have already been commercialized, but there is concern that too much production of such bioethanol can lead to food shortage and deforestation. Therefore, the use of underutilized biomass, such as wood waste, becomes important.

In this study, we developed a method to produce bioethanol from sawdust of medium density fiberboard (MDF). MDF is a engineered wood product made from wood fibers, which are mixed with synthetic adhesive and heat-pressed into flat panels. Since wood fibers in MDF might be covered with adhesive and harmful ingredients inhibiting fermentation might exist in MDF, the ethanol production efficiency was expected to decline, and we tried to optimize conditions for hydrothermal treatment, enzymatic hydrolysis, fermentation, etc. We discovered that the saccharification rate became maximum when MDF sawdust was processed by fine grinding mill for 72 hours and digested by the cellulase cocktail which weight was five percent of MDF. And the fermentation rate became maximum by washing the fine-grinded sawdust after the autoclave process.

1. 緒言

バイオマス原料から抽出されるバイオエタノールは、持続可能な発展に貢献できる重要なエネルギー資源として期待されている。2011年における世界のバイオエタノール生産量は8610万klであり、2009年からの2年間で10%以上の高い伸びを見せている⁽¹⁾。しかし、現在商業化されているバイオエタノールは、トウモロコシやサトウキビ等の食用作物から生産されているため⁽²⁾、食料や飼料の不足⁽³⁾、農地開発に伴う森林破壊等⁽⁴⁾につながるという懸念がある。そのため、間伐材や木材屑、稲わら等の未利用の木質バイオマスを原料とするバイオエタノール生産技術が重要になると言われている⁽⁵⁾。

この未利用木質バイオマスとして、Medium Density Fiberboard (MDF)木屑に着目した。MDFとは、木の繊維を合成樹脂で固め板状に成型したものであり、建材材料などに広く用いられるが、製品製造時に大量の木屑廃棄物が発生するため、有効な利用方法が求められていた。しかし、MDF中の木質繊維は接着剤に覆われており、また、発酵を阻害する有害成分を含んでいる可能性があるため、エタノール生産効率の低下が懸念される。

そこで本研究では、前処理や糖化方法、発酵を阻害する有害物質の除去方法等を検討し、MDF木屑から効率よくバイオエタノールを抽出する技術の開発を目指した。

2. バイオエタノールの抽出

< 2. 1 > 木質バイオマスからのバイオエタノール抽出

一般的な木質バイオマスからのエタノール抽出プロセスを以下に示す。

=====

①粗粉碎処理

粉碎機により原料を砕き、粒径2mm程度まで粉碎する。

②前処理

糖化処理の効率を高めるための処理を行う。

③糖化処理

木質バイオマス中のセルロースをグルコースへと分解する。様々な方法があるが、一般的には分解酵素(セルラーゼ)の働きを利用する。

④発酵

糖化処理により得たグルコースを、酵母発酵によりエタノールへ転換する。

=====

基本的には、酒造りや、食用作物(デンプン系バイオマス)を原料とするバイオエタノールと同じ手順であり、原料をある程度砕いた後(粗粉碎)、分解酵素により糖化し(糖化処理)、得られたグルコースを酵母によりエタノール発酵させる。ただし、木質バイオマスの場合、図1に示すように、グルコースの基となるセ

ルコースはヘミセルコースやリグニンに被覆されており、セルコースと分解酵素の接触が妨げられるため、食用作物を原材料とした場合よりも糖化効率は低い。前処理は、ヘミセルコースやリグニンの影響を取り除き、糖化効率を向上させるための工程であり⁶⁾、加圧熱水処理、アルカリ処理、微粉碎処理など様々な手法が研究されている。

＜2. 2＞MDF 木屑からのバイオエタノール抽出

MDF (Medium Density Fiberboard) とは、木材などの植物繊維を接着剤で固めた繊維板で、密度が 0.35～0.80g/cm³ のものである⁷⁾。室内ドアや収納ボードなどの建材に多用されているが、これらの製品製造時に発生する木屑が大量に廃棄されていたため、有効な活用法が求められていた。そこで本研究では、バイオエタノールの原材料として、未利用の木質バイオマスである MDF 木屑に着目した。

日本国内には間伐材や稲わら等、多くの未利用木質バイオマスが存在するが、バイオエタノールの原料として利用する場合、調達コストに課題が残る。例えば間伐材の場合、調達価格はおおむね 20 円/kg 前後と言われており、バイオエタノールの製造コストを 100 円/L 以上も押し上げる⁸⁾。バイオエタノールの目標価格が 100 円/L 程度⁹⁾である事を考えると、非常に割高な資源といえる。一方、MDF 木屑をはじめとする廃棄物系の未利用木質バイオマスは、逆有償か、有償であっても殆ど無償に近い価格で入手できるため、経済的に見れば非常に魅力的な資源である。

しかし、MDF 木屑からバイオエタノールを抽出する場合、以下の問題が懸念される。

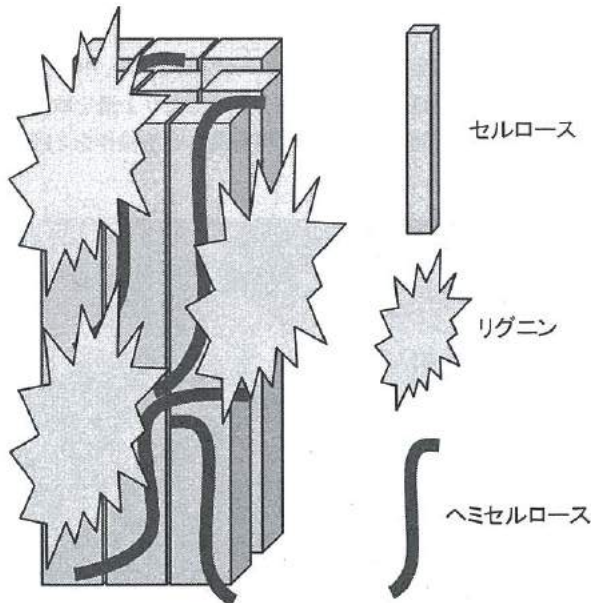


図1 木質系のセルコース
Fig.1 The cellulose of wood

【接着剤の被覆による糖化効率の低下】

先述したように、木質繊維中のセルコースは、リグニンやヘミセルコースに覆われており、これが糖化効率を低下させている。MDF の場合、更に接着剤が被覆されているため、より効率の低下を招く可能性がある。

【発酵阻害物質】

MDF の接着剤には、メラミン樹脂系やユリア樹脂系が使われているが、これらの合成樹脂に由来するホルムアルデヒドには強い毒性があり、発酵を阻害する事が知られている¹⁰⁾。さらに、MDF 板の食害を防ぐため添加されている防虫剤も、発酵阻害の原因となりうる。

そこで本研究では、接着剤の被覆や発酵阻害物質の影響を極力抑え、MDF 木屑から効率よくバイオエタノールを抽出するプロセスの構築を目指した。

3. 実験方法

＜3. 1＞実験試料

MDF 木屑は、協立アルミ株式会社井口工場（富山県南砺市井口 110 番地）から廃棄されたものを用いた。また、杉木屑は富山県西部森林組合より購入したものを用いた（図2）。

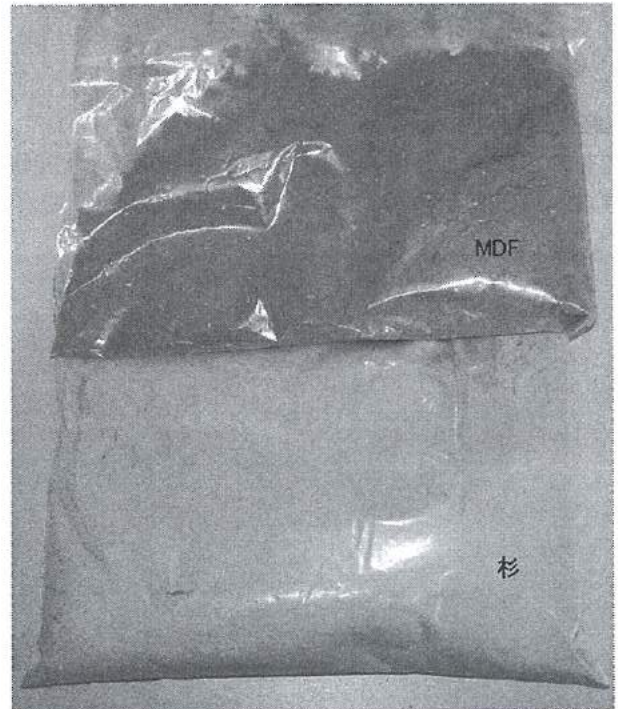


図2 木屑の外観
Fig.2 The appearance of MDF and cedar sawdust

グルコース及びエタノールの測定は、ロシュ・ダイアグノステイックス株式会社製 F-キットグルコース及び F-キットエタノールを用いた。

糖化处理に用いた酵素は、ヤクルト薬品工業株式会社製のセルラーゼオゾカ 12S 及びセルラーゼ Y-NC を用いた。

発酵では酵母 *Saccharomyces cerevisiae* NBRC0216 を用いた。

< 3. 2 > MDF 木屑の組成・粒径分析

MDF 木屑の組成分析は、エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社製熱分析装置 (TG/DTA7300) を用いて行った。粒径分析は、日機装株式会社製粒度分析計 (MT3300 II) 及び日本電子株式会社製走査型電子顕微鏡 (JSM-6610LA) を使用した。

< 3. 3 > グルコース及びエタノール濃度測定、転換率算出

F-キットグルコース及び F-キットエタノールを用いた吸光度測定法により濃度を求めた。吸光度の測定には BioTek 社製マイクロプレートリーダー (SynergyHT) を用いた。また、セルロースからグルコースへの転換率 (糖化率) と、グルコースからエタノールへの転換率 (発酵率) は下記式より算出した。

糖化率 (%) = 生成グルコース重量 / (木屑重量 × セルロース含有率) × 100

発酵率 (%) = 生成エタノール重量 / (グルコース重量 × 0.5²⁶) × 100

※グルコースからエタノールへの理論転換率は約 50%

< 3. 4 > 前処理

【加圧熱水処理】

蒸留水に分散させた 10wt% 木屑スラリーを、図 3 に示す三愛科学株式会社製密閉容器 (HUT-50) に入れ、恒温槽で 1 時間熱処理した。

【アルカリ処理】

1% NaOH 水溶液に分散させた 10wt% 木屑スラリーを室温で 2 時間穏やかに攪拌した。その後、遠心分離により NaOH 水溶液を取り除き、酢酸バッファー (pH 4) に置換した。



図 3 密閉容器の外観

Fig.3 The appearance of pressure vessel

【微粉碎処理】

図 4 に示す日陶科学株式会社製ポットミル粉碎装置 (AN-3S) を用いた湿式法で微粉碎した。蒸留水に分散させた 5wt% 木屑スラリーと適量のビーズをポットに入れ、約 500RPM で回転させた。その後、遠心分離により水分を取り除き、木屑スラリー濃度を 15wt% 程度に高めた。

< 3. 5 > 糖化处理

前処理後の木屑スラリーに、セルロース分解酵素 (セルラーゼ) を加え、55°C で 16 時間穏やかに攪拌することで、木屑中のセルロース成分をグルコースへと分解した。ここで糖化处理時間については、糖化率の上限値は酵素濃度に依存し⁽¹¹⁾、時間を延ばしても糖化率が頭打ちとなる事から、一般的な処理時間や実験の進め易さを考慮し、16 時間とした。

< 3. 6 > 発酵

YM 培地で前培養した酵母 (OD600 = 約 1.3) を、糖化液 (木屑スラリーを糖化处理したもの) に対し約 5wt% 加え、さらに Tryptone と Yeast Extract をそれぞれ 5g/L、3g/L となるように加えた。それを 30°C で 16 時間攪拌し、グルコースをエタノールへと転換した。

< 3. 7 > 洗浄

【煮沸処理】

6 時間煮沸処理した後、遠心分離により上清を取り除き、取り除いた上清と同量の蒸留水で再懸濁させる操作を 3 回繰り返した。

【オートクレーブ処理】

ヤマト科学株式会社製オートクレーブ (SP200) を用い、121°C、0.18MPa で 2 時間処理した後、遠心分離により上清を取り除き、取り除いた上清と同量の蒸留水で再懸濁させる操作を 3 回繰り返した。

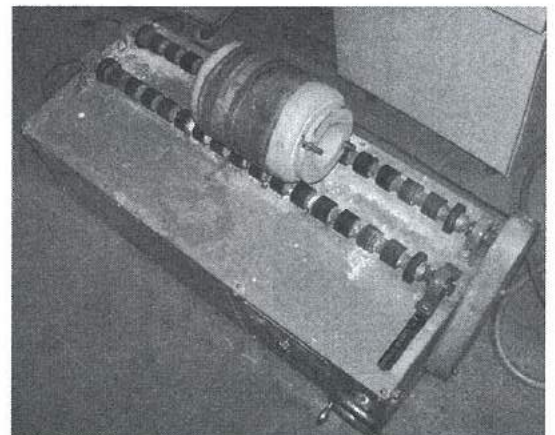


図 4 ポットミルの外観

Fig.4 The appearance of the pot mill

4. 結果及び考察

< 4. 1 > MDF 木屑の組成分析 (セルロースの含有率)

MDF 木屑に含まれるセルロースの割合を調査するため、熱重量 (TG) - 示差熱分析 (DTA) を実施した。熱分析とは、温度を変化させながら、測定対象物の物理的性質を測定するものであり、熱重量 (TG) は質量を、示差熱 (DTA) は吸発熱反応を示さない基準物質との温度差を測定する。

測定結果を図 5 に示す。室温～100℃にかけて、DTA の結果に小さな吸熱ピークが見られるが、これは MDF 木屑中の水分蒸発に伴うものと考えられる。この時の TG の減少率が約 6%であったことから、MDF 木屑の水分率は約 6wt% であると推定される。次に、約 350℃ を中心とし 200℃～400℃ にかけての DTA の発熱ピークが見られる。ヘミセルロースの燃焼温度は 200℃～300℃、セルロースが 300℃～370℃⁽¹²⁾ であることから、これら成分の燃焼に伴う発熱ピークであると考えられる。この時の TG の減少率が約 60%であったことから、MDF 木屑中のヘミセルロース、セルロースの含有率は約 60wt% と考えられる。また、リグニンの燃焼温度は～500℃程度⁽¹²⁾ であることから、500℃付近の DTA のピークはリグニンの燃焼によるものと考えられ、この時の TG の減少率から、MDF 木屑中のリグニンの含有率は 30wt% 程度と考えられる。

なお、ヘミセルロースとセルロースの燃焼ピークを分離する事ができないため、それぞれの含有率を判断する事は出来ないが、一般に双方はほぼ同重量と言われていることから、糖化率算出式のセルロース含有率を 30wt% とした。なお、この値は一般的な針葉植物と同程度である。

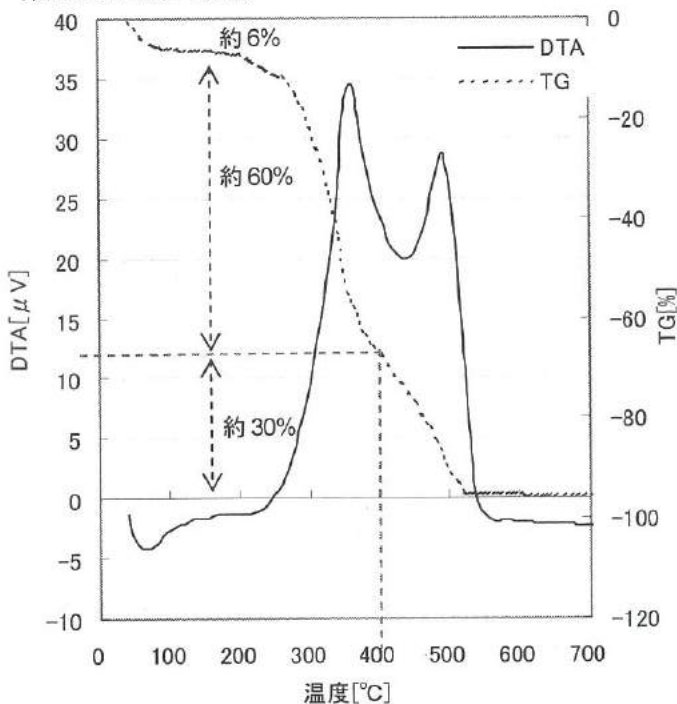


図 5 熱分析結果

Fig.5 Thermal analysis result

< 4. 2 > MDF 木屑の粒径分析

2. 1 節で述べたように、一般的なバイオエタノール抽出プロセスでは、バイオマス原料を 2mm 程度まで粗粉碎する必要がある。しかし、今回対象とする MDF 木屑は、細い粉状であるため、粗粉碎処理を省略できる可能性がある。そこで、粒度分析及び SEM により MDF 木屑の粒径を測定した。粒度測定の結果 (図 6) から、平均粒径は約 100μm、最大粒径は約 420μm であった。また、SEM 画像 (図 7) からも粒径がおおよそ 100μm 程度である事が分かる。以上から、粗粉碎処理は不要であると判断した。MDF 木屑をバイオエタノールの原料として用いる事で、材料費が安価になるメリットに加え、粗粉碎処理に伴うコスト・エネルギーを削減できるメリットもある事がわかった。

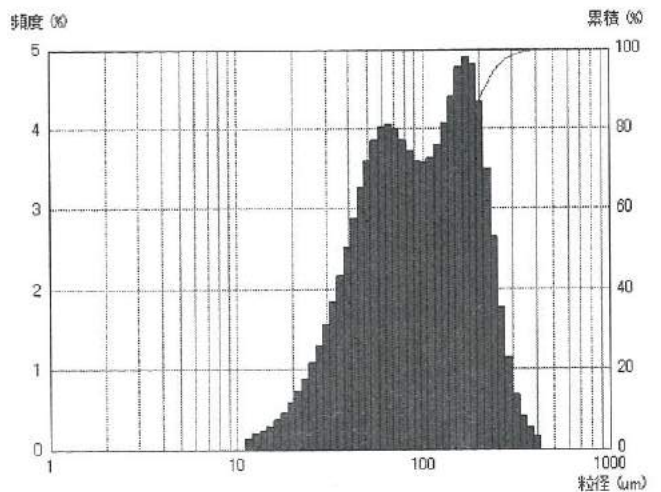


図 6 MDF 木屑の粒度分布

Fig.6 Particle size distribution of MDF sawdust

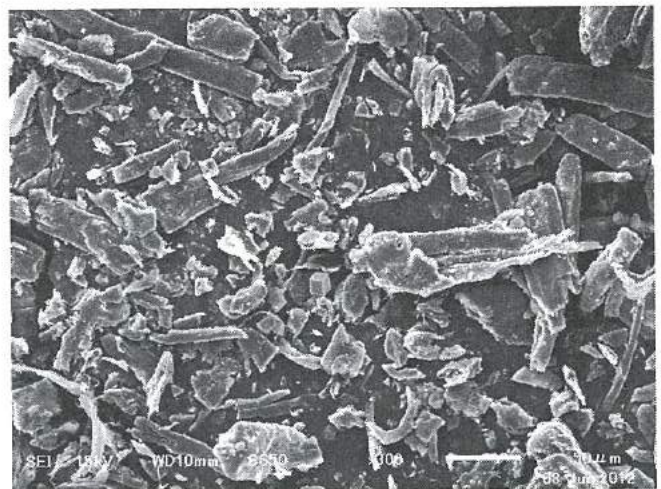


図 7 MDF 木屑の SEM 画像 (300 倍)

Fig.7 SEM image of MDF sawdust (×300)

< 4. 3 > 糖化処理方法の検討 (分解酵素の選択)

MDF 木屑中のセルロース成分を、2 種類の分解酵素 (セルラーゼオノズカ 12S、セルラーゼ Y-NC) を用いてグルコースへ分解した。ここで、セルロースは多数のグルコースの分子が直鎖状に結合した高分子であるが (図 8a)、セルラーゼオノズカ 12S は、分子鎖の切断能は高いものの、グルコース分子が2つ結合したセロビオース (図 8b) の段階で反応が終了し易い特徴を持つ。一方セルラーゼ Y-NC は、分子鎖の切断能は低いものの、グルコースまで反応が進む特徴がある。MDF 木屑スラリー中に分解酵素を、それぞれ単独で添加した場合、混合 (50 : 50) して添加した場合 (添加量は MDF 木屑に対し 1wt%、処理時間は 16 時間) の糖化率を図 9 に示す。単独添加よりも混合添加の方が糖化率は高く、1.4% となった。混合添加では、セルラーゼオノズカ 12S がセルロースをセロビオースへ分解した後、セルラーゼ Y-NC がセロビオースを

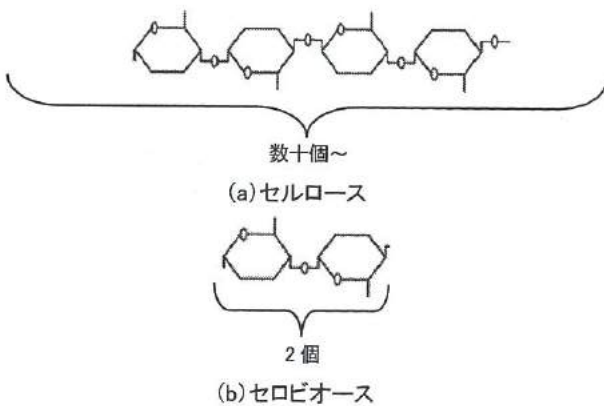


図8 セルロース及びセロビオースの構造

Fig.8 Structure of cellulose and cellobiose

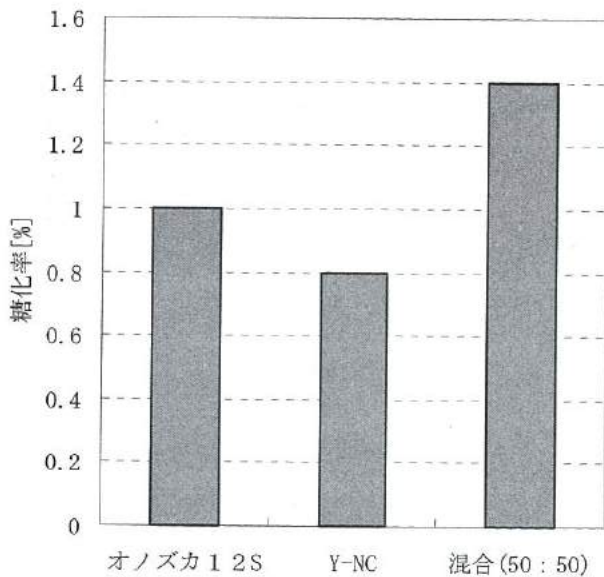


図9 酵素の種類と糖化率の関係

Fig.9 Relations of enzyme type and the saccharification rate

グルコースへと分解する、といった役割分担により、それぞれの欠点が補われ、糖化効率が上がったものと考えられる。以後の実験では全て、酵素を2種類混合したものを用いた。

< 4. 4 > 前処理方法、処理条件の検討

4. 3 節では、セルラーゼの混合により糖化効率が向上する事を明らかにしたが、糖化率は最大でも 1.4% と依然として低かったため、前処理による糖化率向上を検討した。前処理方法としては、加圧熱水処理、アルカリ処理、微粉碎処理の3種を検討した。何れも木質バイオマスの前処理として頻りに用いられる方法である。それぞれの概要と処理条件を以下に示す。

【加圧熱水処理】

熱処理により、ヘミセルロースを分解する。また、木質繊維の解繊によりリグニンが剥離される。廃液は出ないが、エネルギー消費量が多い。また、分解物が発酵を阻害する恐れがある。

条件：200℃で1時間

【アルカリ処理】

アルカリの作用により、ヘミセルロース及びリグニンを剥離する。処理コストは安い、廃液処理に課題がある。

条件：1%NaOHで2時間

【微粉碎処理】

微粒化する事で、表面積を増大させる。廃液は出ないが、エネルギー消費量が多く、処理時間が長い。

条件：ポットミル粉碎 24 時間

各前処理を行った MDF 木屑スラリーに分解酵素 (1wt%) を添加し、16 時間糖化処理した時の糖化率を図 10 に示す。

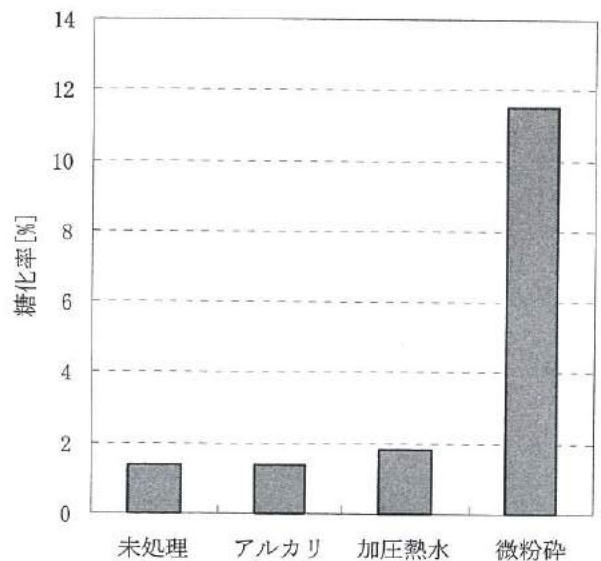


図10 前処理と糖化率の関係

Fig.10 Relations of pre-treatments and the saccharification rate

アルカリ処理、加圧熱水処理は殆ど効果が見られなかったが、微粉砕処理では糖化率が大幅に向上した。2. 2節で述べたように、MDF中のセルロース成分は、木質繊維に由来するヘミセルロース、リグニンに加えて、接着剤成分にも被覆されている。微粉砕処理の場合、機械的な作用を利用するため、被覆物の組成にはあまり影響されず、前処理効果を十分発揮できるが、化学的、熱的作用を利用するアルカリ処理、加圧熱水処理は、組成の影響を受け易く、ヘミセルロース、リグニンに対しては効果的であっても、接着剤成分には効力を発揮できなかつたと推察される。

次に、詳細な微粉砕条件・糖化条件について検討した。図11は、微粉砕処理の時間と糖化率の関係を示しており、各時間微粉砕処理を行ったMDF木屑スラリーに、分解酵素(1wt%)を添加し、16時間糖化処理を行った時の結果である。72時間までは糖化率の向上が見られるが、それ以降は頭打ちとなっている事から、微粉砕処理時間は72時間が最適である事が分かった。

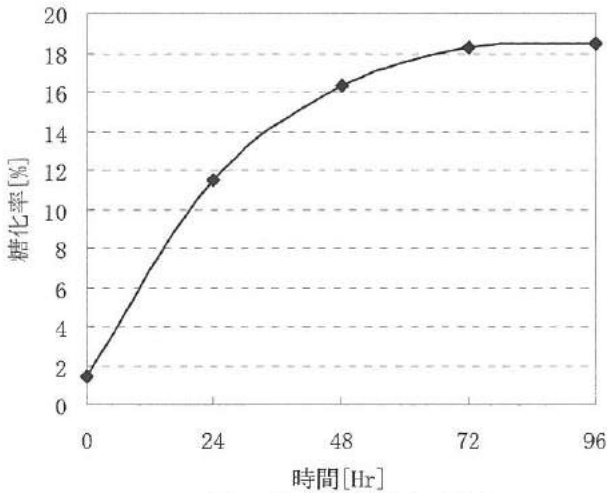


図11 粉砕時間と糖化率の関係

Fig.11 Relations of grinding time and the saccharification rate

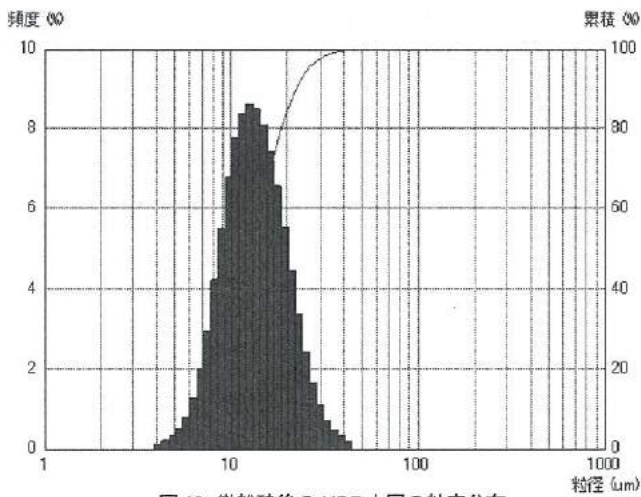


図12 微粉砕後のMDF木屑の粒度分布

Fig.12 Particle size distribution of MDF sawdust after grinding

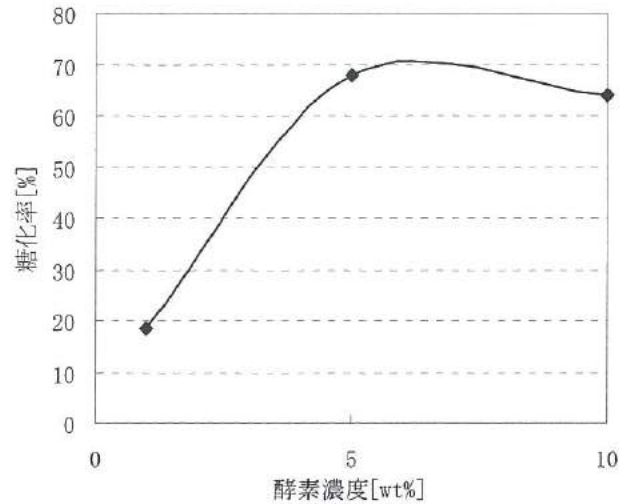


図13 酵素濃度と糖化率の関係

Fig.13 Relations of enzyme concentration and the saccharification rate

また、96時間微粉砕処理後のMDF木屑を粒度分析計で測定した結果を図12に示す。平均粒径は約10 μ mとなり、処理前の10分の1以下にまで粉砕されていることが確認できる。

次に、酵素添加量と糖化率の関係を調査した。図13は、72時間微粉砕したMDF木屑スラリーに、各量の分解酵素を添加し、16時間糖化処理を行った時の結果である。5wt%以降は頭打ちとなっている事から、酵素濃度は5wt%が最適である事が分かった。以上の最適化により糖化率は約70%まで向上した。以降の実験では全て、72時間微粉砕処理、酵素添加量5wt%(16時間糖化処理)の条件で処理した糖化液を用いた。

< 4. 5 > 酵母発酵

酵母発酵によるエタノールの生成を試みた。最適な糖化条件で抽出した糖化液を用い、24時間発酵させた結果を図14に示す。なお、参考として、一般木材である杉木屑から抽出した糖化液も供試した。杉木屑では発酵率が約70%と高かったのに対し、MDF木屑は約7%と非常に低かった。2. 2節で述べたように、MDFに含まれる阻害物質により、発酵が阻害された事が原因と考えられる。

< 4. 6 > 発酵阻害物質の除去

発酵阻害物質を除去するため、煮沸及びオートクレーブを用いたMDF木屑の洗浄を検討した。MDF木屑を微粉砕したMDF木屑スラリーを、各方法で洗浄した後、糖化処理、酵母発酵した結果を図15に示す。煮沸処理では効果は見られなかったが、オートクレーブ処理では発酵率が大幅に向上し、約85%となった。高温・高圧で処理される事により、木屑中心部に存在する阻害物質も効率よく排出されたと考えられる。

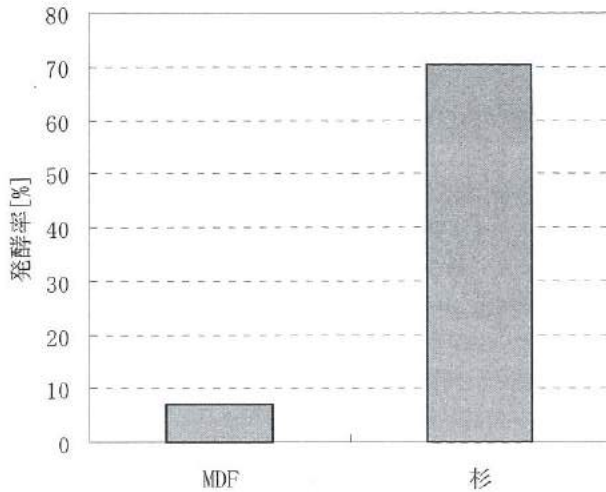


図 14 洗浄処理前の MDF と杉の発酵率

Fig.14 Fermentation rates of MDF and cedar sawdust before washing process

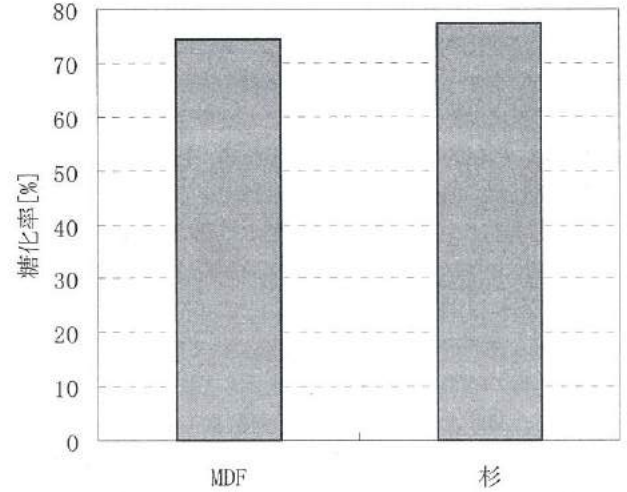


図 16 洗浄処理後の MDF と杉の糖化率

Fig.16 Saccharification rates of MDF and cedar sawdust after washing process

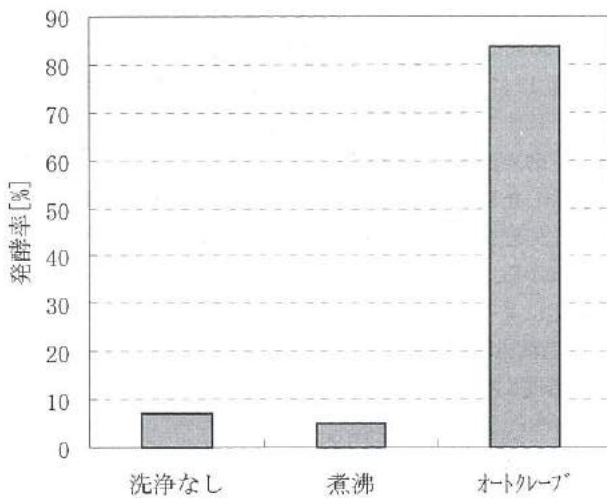


図 15 洗浄処理による発酵率の変化

Fig.15 Fermentation rates of MDF sawdust after two washing processes

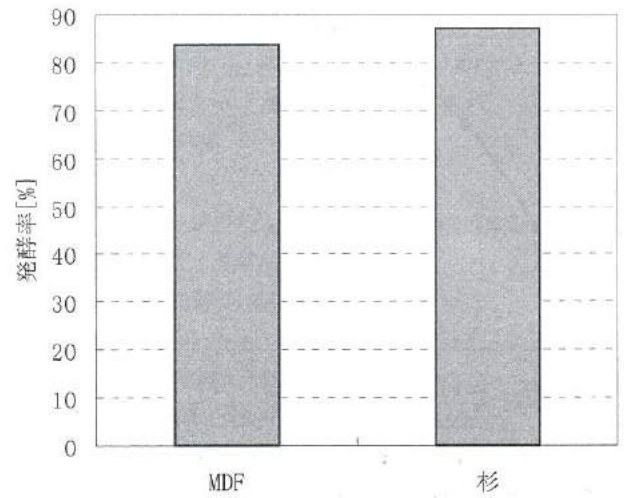


図 17 洗浄処理後の MDF と杉の発酵率

Fig.17 Fermentation rates of MDF and cedar sawdust after washing process

< 4. 7 > 一般木材との比較

72 時間微粉砕後にオートクレーブを用いて洗浄し、5wt%の混合酵素を用いて糖化处理を行い、酵母発酵させることで、MDF 木屑から効率良くエタノールが抽出できることが明らかとなった。糖化率、発酵率は最大でそれぞれ約 70%、約 85%であったので、トータルでの転換率は約 60%であり、MDF 木屑 1kg から、約 100mL のエタノールが得られる計算となる。また、参考として、同様のプロセスで杉木屑からエタノールの抽出を試みた。この時の糖化率を図 16、発酵率を図 17 に示すが、糖化率、発酵率共に MDF 木屑と杉木屑で殆ど差はなかった。従って、今回構築したエタノール抽出プロセスは、2. 2 節で述べた接着剤や阻害物質の影響を

受けず、MDF 木屑からでも一般の木材と同様に高い効率でエタノールを抽出できる方法であると言える。

5. 結言

本研究では、接着剤の被覆や発酵阻害物質の影響を極力抑え、MDF 木屑から効率よくバイオエタノールを抽出するプロセスの構築を目指した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- ① MDF 木屑中のセルロース成分の割合は約 30%である事が分かった。これは一般的な針葉樹と同程度であった。

- ② MDF 木屑の平均粒径は約 100 μ m、最大粒径は約 420 μ m であり、粗粉碎処理は不要である事が分かった。
- ③ 酵素の種類を検討し、2 種類の酵素を混合して使用する事で、糖化効率が向上する事が分かった。
- ④ 前処理として、加圧熱水処理、アルカリ処理、微粉碎処理を検討し、MDF 木屑に対しては微粉碎処理が最も効果的である事が分かった。
- ⑤ 処理条件を検討し、微粉碎処理時間は 72 時間、酵素添加量は MDF 木屑に対し 5wt% が最適である事が分かった。これにより糖化率は約 70% となった。
- ⑥ MDF 木屑から抽出した糖液から、酵母発酵によるエタノールの生成を試みたが、発酵率は約 7% と非常に低かった。これは MDF に含まれる阻害物質の影響と考えられた。
- ⑦ 阻害物質の除去方法として、煮沸、オートクレーブを用いた方法を検討し、オートクレーブを用いた方法が効果的である事が分かった。これにより発酵率は約 85% となった。
- ⑧ トータルの転換効率は約 60% であり、MDF 木屑 1kg から約 100mL のエタノールが得られる計算になる。また、同様のプロセスで、杉木屑からエタノールの抽出した結果は MDF 木屑の場合と同等であった。従って、今回構築したエタノール抽出プロセスは、MDF 中の接着剤や阻害物質の影響を受けず、一般木材と同様に高い効率でエタノールを抽出できる方法であると言える。

本研究により、接着剤や阻害物質などの不純物を含んだ資源からでも、効率よくエタノールを抽出できる事が示された。この成果は、MDF 木屑をはじめ、他の廃棄系木質バイオマスへも応用可能であるから、この研究の持つ意義は非常に大きいと考えられる。

- (1) Renewables: 2012 Global Status Report
- (2) Licht, F.O.: World Ethanol & Biofuels Report (2006)
- (3) 松岡 浩, 伊藤 明子, 佐藤 未怜: 酵素糖化とパン酵母発酵による竹からのエタノール生産、帝京科学大学紀要 Vol.8(2012) PP87-91
- (4) 六辻彰二: 対立からわかる [最新] 世界情勢、成美堂出版 (2008) P12~13
- (5) 鮫島 正浩: リグノセルロース系バイオマスからの燃料用エタノール生産に向けて取り組むべき課題、日本エネルギー学会誌 90(1)(2011), PP10-16
- (6) 佐賀 清崇ほか: 前処理・糖化法の違いを考慮したセルロース系バイオエタノール製造プロセスの比較評価、Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol.30, No.2(2009)
- (7) JIS A 5905 「繊維板」
- (8) 竹内 修己: バイオマス技術ハンドブック、オーム社(2008)、P517、P553
- (9) バイオ燃料技術革新協議会:
http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_innovation/02/pdf/data4.pdf
(2009/04/22)
- (10) 南野 淳, 栗原 宏征, 山田 勝成: 糖液の製造方法、特許公開番号 WO2010067785_(2010/6/17)
- (11) 堀川 祥生: 高効率エタノール生産を目指したバイオマス(セルロース)の構造解析、セルロース学会 第 18 回マイクロシンポジウム要旨集(2013)、P10
- (12) 加藤 貴志, 大原 聖美: 木質バイオマス組成成分の熱分解特性、福岡大学工学集報 第 78 版(2007/3)

II. マグネシウムイオン 2 次電池に関する研究

Development of the magnesium-ion secondary battery

作道 千枝 角田 龍則 本保 栄治

TSUKURIMICHI Chie KAKUDA Tatsunori HONBO Eiji

高田 耕児 二口 友昭

TAKATA Kouji FUTAKUCHI Tomoaki

Abstract

Today, various rechargeable batteries are spread in the market, for the increasing of the electric power demand and the evolution of diversification. The rechargeable lithium-ion battery is especially used widely as a power supply for personal digital assistants. Although operating voltage and energy density are greatly lightweight, lithium used as a career is very active, and it poses a problem that there is danger of ignition or that cost is expensive since it is unevenly distributed also in resources.

So, in this study, we developed the magnesium ion rechargeable battery, because the magnesium is abundant resources and the handling metal is safe. However, magnesium ion is easier to be trap into active material and the diffusion is slower than lithium in the cause of the large electrostatic interaction with an anion. For this reason, the discharge capacity of magnesium battery is not enough, and the problem is left in the capacity and the cycle.

The purpose of this development was that the magnesium ion rechargeable battery is prepared with anode material, cathode material and electrolyte. Evaluation was performed by XRD and SEM measurement of an anode material, and the impedance measurement of a cathode material and an electrolyte. Moreover, we evaluated the battery characteristic by measuring the electric current and voltage under charge and discharge using the small battery cell.

1. 緒言

今日、電力需要の増加および多様化が進んだことにより様々な 2 次電池が広く普及している。中でもリチウムイオン 2 次電池は携帯端末用電源として広く利用されている。作動電圧、エネルギー密度が大きく軽量であるが、キャリアとなるリチウムが極めて活性であり発火の危険があることや資源的にも偏在しているためにコストが高価であることが問題となっている。

そこで、本研究では、取扱いが安全で資源量の豊富なマグネシウムに着目し、マグネシウムイオン 2 次電池の開発を行った。マグネシウムは 2 価のイオンであり、1 価のリチウムに比べ、1 原子あたり 2 倍の電流が得られ、エネルギー密度を向上させられる利点もある。しかしながら、マグネシウムイオンはアニオンとの静電相互作用も大きいいため、リチウムより拡散が遅く、正極活物質中にトラップされやすい。このため、マグネシウムイオン 2 次電池は充放電容量が上らず、サイクル性能も維持しにくい欠点がある。

これまでマグネシウム 2 次電池の研究においては、マグネシウムイオンを錯体の状態にして活物質との挿入脱離を可能にするた

めに電解液に水を添加した水系電解液⁽¹⁾や、高レートでの充放電を実現させるポリマー状の電極など⁽²⁾の検討がなされてきた。その他にも、マグネシウムイオンをトラップしにくくするために五酸化バナジウムに硫黄を添加した正極の検討⁽³⁾も行われている。これらの検討において、ある程度の放電容量は確認されているが、コスト面やサイクル特性において課題が残されている。

本開発の目的は、充放電特性が得られるマグネシウムイオン 2 次電池正極材料、負極材料、電解液の開発とした。正極材料には、リチウムイオン 2 次電池の正極材料として普及しているコバルト酸リチウムのリチウムをマグネシウムに置き換えたコバルト酸マグネシウムや、ある程度実績のある酸化バナジウム、酸化バナジウム系ガラスを用いた。負極にはマグネシウム箔、及び酸化バナジウムにマグネシウムを導入した化合物、電解液にはマグネシウムイオンを含む有機溶剤を用いた。

具体的な内容として以下の実験をおこなった。まず、正極材料の XRD 測定および SEM 観察、次に負極材料と電解液のインピーダンス測定をおこなった。最後に小型電池セルを使用し、充放電中の電流値と電圧値を測定することで充放電特性の評価を行った。

2. 正極材料の検討

< 2. 1 > コバルト酸マグネシウム系材料

正極材料の比較を表1に示した。コバルト酸リチウム (LiCoO₂) に置き換わる正極材料としてリン酸鉄リチウム (LiFePO₄) の研究も進んでいるが、理論セル容量が小さいことや、特許の権利上自由に使用することができないなどの理由から、日本では普及が進んでいない。

表1 正極活物質
Table1. Cathode active materials.

構造式	LiCoO ₂	LiFePO ₄	Mg _x CoO ₂ Mg _x V ₂ O ₅
結晶構造	層状構造	オリビン構造	層状構造
セル電圧 (V)	3.7	3.2	3.2
セル容量 (mAh/g) [理論値]	274	170	260
熱分解温度 (°C)	225	>400	?
主要構成材料 コスト	安価	安価 特許	安価
可採埋蔵量 (M ton)	Li : 4 Co : 7	Li : 4 Fe : 80,000 P : 18,000	Co : 7 Mg : 2,200

コバルト酸リチウムに比べ、コバルト酸マグネシウム (Mg_xCoO₂) のセル電圧はやや小さくなるが、理論セル容量はほぼ同じ値である。また、マグネシウムは可採埋蔵量が多いことからマグネシウム系正極材料は比較的安価に作製できる利点がある。

図1の作製方法に従ってコバルト酸マグネシウムの作製を試みた。

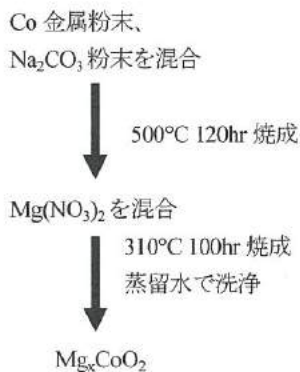


図1 Mg_xCoO₂ 作製方法
Fig.1. Method of preparing Mg_xCoO₂.

図2は得られた粉末のX線回折測定結果を示す。原料として用いたNa₂CO₃、Mg(NO₃)₂のピークは無かったが、Co₃O₄、MgCO₃等のピークが確認できた。ある程度Mg_xCoO₂は作製できているが、純度の高い単一組成物を生成することは困難であった。

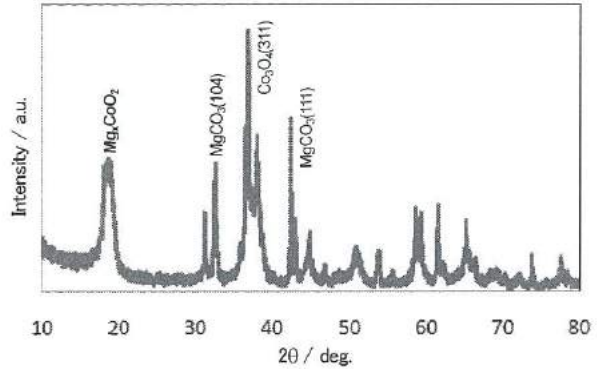


図2 X線回折測定結果(コバルト酸マグネシウム)
Fig.2. XRD pattern (Mg_xCoO₂).

< 2. 2 > 酸化バナジウム系材料 (酸化バナジウム)

これまで、マグネシウム2次電池の正極活物質には、酸化バナジウムや酸化タングステン等の遷移金属複合酸化物を用いたものが知られており、正極活物質にマグネシウムが含まれないため、2次電池として充放電させるにはまず外部から放電を行って、電気化学的に正極へマグネシウムイオンを入れ込む操作が必要となる。

酸化バナジウムは不導体物質であるため、電極とするには、導電補助剤である炭素粉末と粘結剤となるPVDFをNMPなどの溶媒に分散・混合してアルミニウム箔に印刷・乾燥して作製する。このとき、酸化バナジウムを十分均一に分散する必要があり、また、粒子が大きいと電池作製時にセパレータを突き破って短絡する恐れがある。そのため、酸化バナジウムは微細な粉末であることが望ましい。そこで、酸化バナジウムと水、1mm ジルコニアボールを専用容器に入れ、遊星ミルにて6時間500rpmにて粉碎した。この粉碎により粒子の平均粒径は0.3μmとなった。

< 2. 3 > 酸化バナジウム系ガラス (酸化バナジウム-五酸化リン)

正極活物質表面に非晶質相が含まれることで、イオンの活物質からの挿入脱離が容易になり正極中にトラップされるマグネシウムイオンが減少し、正極活物質材料のサイクル維持率をより改善できることが報告されている。

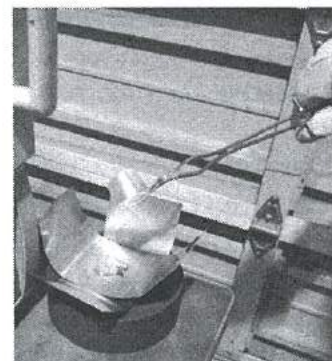


図3 急冷によるガラス化
Fig.3. Glass forming by rapid cooling.

そこで、酸化バナジウムと五酸化リンの混合物を溶解し急冷させることでガラス状化合物を形成した。酸化バナジウム：五酸化リンの重量比を9：1として白金るつばに入れて1000℃で2時間熔融し、ステンレス板上に流して急冷した(図3)。得られた固体を乳鉢で粉碎後、420℃で50時間加熱し、酸化物ガラス中に結晶子を析出させた。その粒子は約2μmの凝集体であることを確認した(図4)。

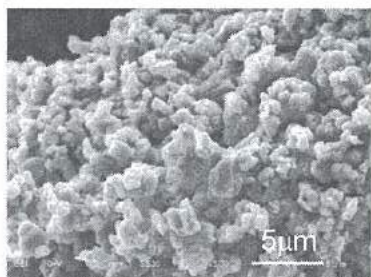


図4 SEM画像(酸化バナジウム-五酸化リン)
Fig.4. SEM image (V₂O₅-P₂O₅).

< 2. 4 > 酸化バナジウム系ガラス

(酸化バナジウム-五酸化リン-酸化鉄)

また、酸化バナジウムの層状構造の層間に陽イオンが規則的に結合すると単斜晶系の結晶となり、マグネシウムイオンの移動が容易に行われる。安全性と入手しやすさから陽イオンには、鉄イオンを選択した。正極活物質は、酸化バナジウムと五酸化リンと酸化鉄の混合物を溶解急冷させることにより作製した。酸化バナジウム：五酸化リン：酸化鉄を重量比で8：1：1とし、熔融時に酸化鉄を添加する以外は2.3の作製方法と同様に行った。微粉碎後、その粒径を確認したところ1μm以下の凝集体であった(図5)。

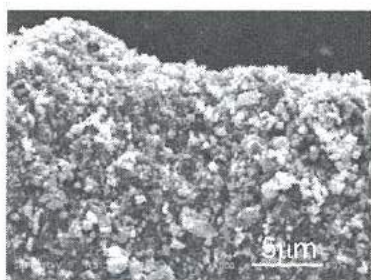


図5 SEM画像(酸化バナジウム-五酸化リン-酸化鉄)
Fig.5. SEM image (V₂O₅-P₂O₅-Fe₂O₃).

酸化バナジウムと2つの酸化バナジウム系ガラスの正極活物質のX線回折を測定した。図6.1は酸化バナジウム、図6.2は酸化バナジウム-五酸化リンガラス、図6.3は酸化バナジウム-五酸化リン-酸化鉄ガラスの回折結果を示す。ガラスの回折結果から、バックグラウンド強度が増加しており、非結晶な部分が存在することが確認できた。また、酸化バナジウム-五酸化リン-酸化鉄ガラスからはFeV₂O₄のピークが確認できた。

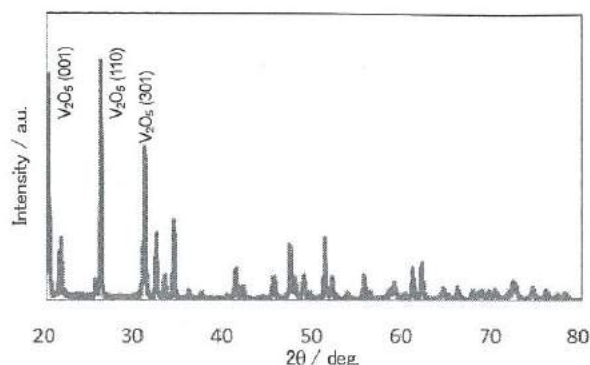


図6.1 X線回折測定結果(酸化バナジウム)
Fig.6.1. XRD pattern (V₂O₅).

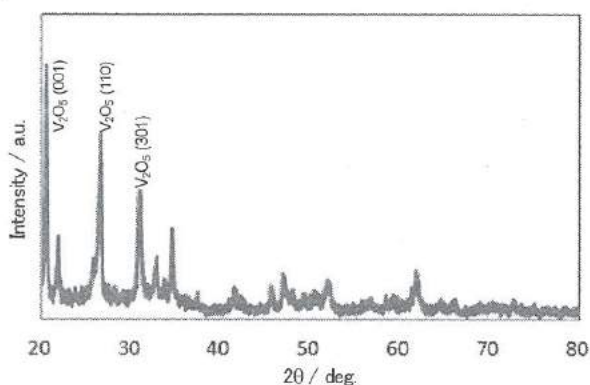


図6.2 X線回折測定結果(酸化バナジウム-五酸化リン)
Fig.6.2. XRD pattern (V₂O₅-P₂O₅).

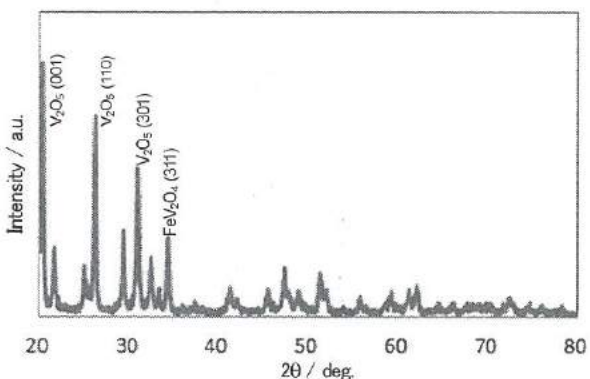


図6.3 X線回折測定結果(酸化バナジウム-五酸化リン-酸化鉄)
Fig.6.3. XRD pattern (V₂O₅-P₂O₅-Fe₂O₃).

3. 負極、電解液の検討

< 3. 1 > 電解液の作製

マグネシウム2次電池における電解液は、マグネシウム塩が溶解している有機溶媒^(4,5)を使用した。非水電解液として有機溶剤(アセトニトリル、テトラヒドロフラン(THF)、プロピレンカーボネート(PC))を採用した。マグネシウム塩としては、過塩素酸マグネシウム(Mg(ClO₄)₂)、臭化マグネシウム(MgBr₂)、マグネシウムエトキシド(EtMg)、グリニャール試薬(EtMgBr)を使用した。

マグネシウム金属は電解液と容易に反応し、その表面に不導体膜を形成してしまう。マグネシウム電池を作製するには、電極表面における不導体膜の形成を制御するために適切な電解液の選定が必要となる。そこで、有機溶剤にマグネシウム塩を溶解させ、以下の3種類の電解液を作製した。

- Mg-アセトニトリル
 - ・・・アセトニトリルに1mol/Lの過塩素酸マグネシウム
- Mg-PC
 - ・・・プロピレンカーボネートに0.3mol/Lの過塩素酸マグネシウム 0.1mol/Lの過塩素酸ナトリウム
- Mg-THF
 - ・・・テトラヒドロフランに0.5mol/Lの臭化マグネシウム 0.1mol/Lのマグネシウムエトキシド

< 3. 2 > インピーダンス測定

電解液と電極/電極界面の抵抗を確認するため、2次電池評価用のセルにマグネシウム箔とそれぞれの電解液を注入し、交流インピーダンス測定⁽⁶⁾をおこなった。図7.1は、同一条件で測定した3つの電解液とマグネシウム電極の交流インピーダンス測定結果を示す。周波数範囲は10mHzから10kHzとした。

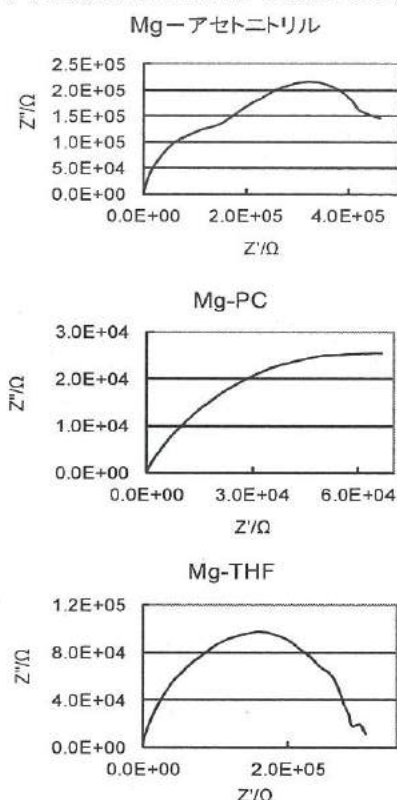


図7.1 マグネシウム電極の交流インピーダンス測定結果
Fig.7.1. Cole-Cole plots Mg electrode.

負極にマグネシウム箔を使用する場合、界面付近の抵抗が10の4から5乗であった。一般的な2次電池用リチウム箔とプロピ

レンカーボネート系電解液の交流インピーダンス測定では、界面の抵抗が10の2乗程度であった(図7.2)。作製したマグネシウム2次電池用の電解液においては、電解液そのものの抵抗は小さいが、マグネシウム箔との界面抵抗が比較的高いことを実軸の値から確認できた。

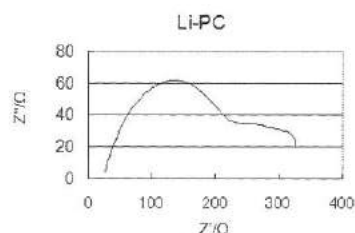


図7.2 リチウム電極の交流インピーダンス測定結果
Fig.7.2. Cole-Cole plots Li electrode.

< 3. 3 > 電解液とバナジウム酸マグネシウムのインピーダンス測定

界面抵抗を低下させるため、負極材料の検討をおこなった。酸化バナジウムを印刷したアルミニウム箔とマグネシウム箔を電池セルに組み込み、放電することで酸化バナジウムにマグネシウムを導入させた。このバナジウム酸マグネシウム ($Mg_xV_2O_5$) 電極とプロピレンカーボネート系電解液の交流インピーダンスを測定したところ(図7.3)、抵抗は小さくなり、リチウム金属とその電解液の場合と同程度の10の2乗の界面抵抗となった。

図8は、マグネシウム導入前後のX線回折測定結果を示す。X線回折の結果から、導入後に酸化バナジウムが、バナジウム酸マグネシウム ($Mg_{0.5}V_2O_5$) に変化していることが確認できた。

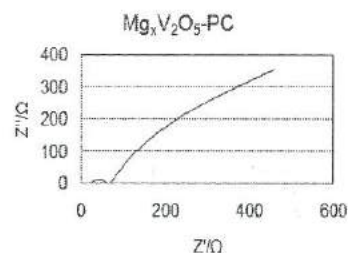


図7.3 バナジウム酸マグネシウム電極の交流インピーダンス測定結果
Fig.7.3. Cole-Cole plots MgV_2O_5 electrode.

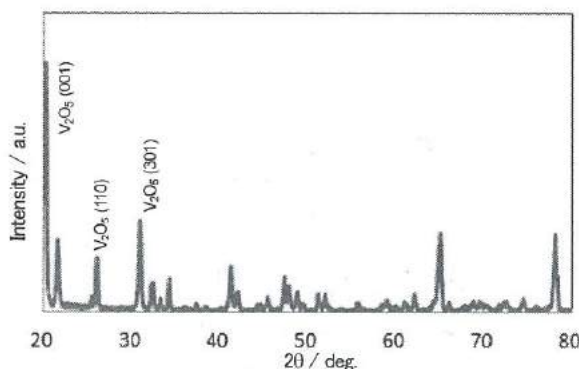


図8.1 電極のX線回折測定結果(導入前)
Fig.8.1. XRD pattern for electrode(before Mg-charge).

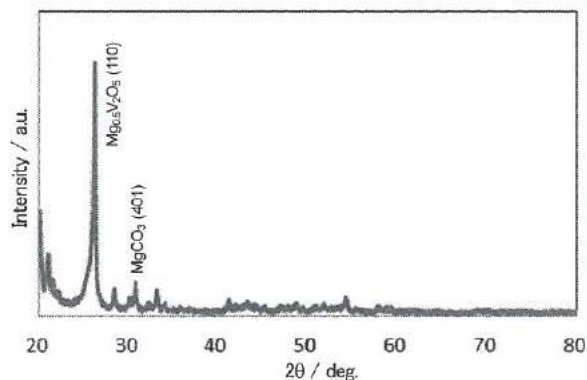


図 8.2 電極の X 線回折測定結果(導入後)
Fig.8.2. XRD pattern for electrode(after Mg-charge).

4. 電池評価

< 4. 1 > 充放電特性評価方法

小型電池セル (HS フラットセル: 宝泉株式会社製) を用いて充放電特性の測定を行った。図 9 はセルの構造を示す。セル内に、正極 (ϕ 16mm)、セパレータ (ϕ 24mm)、電解液および負極 (ϕ 15mm) を順に組み込み、評価装置により 0.3V - 3.0V までの充放電を 10 回程度測定した。水分の影響を極力受けまいよう、セルの組み立てはグローブボックス内 (図 10) で行った。

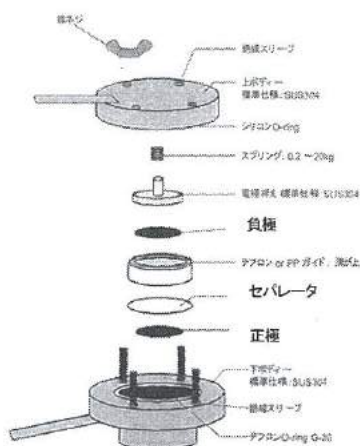


図 9 セル構造
Fig.9. Cell structure.

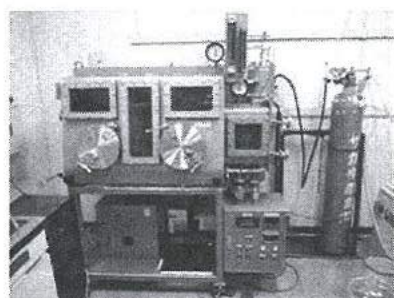


図 10 グローブボックス
Fig.10. Glove - box.

< 4. 2 > 充放電特性評価結果

正極の電極基板をアルミニウム箔とし、正極活物質をコバルト酸マグネシウム、負極をマグネシウム箔、電解液をアセトニトリル系として測定を行った。図 11.1 はその充放電特性を示す。わずかなではあるが充放電特性をしめした。その放電容量は 0.2mAh/g 程度であった。

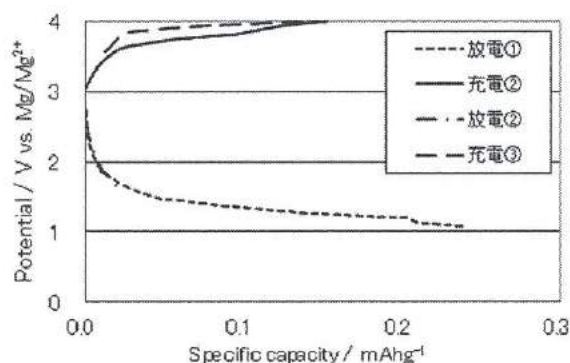


図 11.1 充放電特性結果(コバルト酸マグネシウム/アルミニウム)
Fig.11.1. Charge - discharge characteristic (Mg_2CoO_4 / aluminum).

次に電極基板はアルミニウム箔とし、正極活物質を酸化バナジウム、負極活物質をバナジウム酸マグネシウム、電解液をポリプロピレンカーボネート系として測定を行った。図 11.2 はその充放電特性を示す。2 次電池特性を示すことは確認できたが、放電容量としては、およそ 1mAh/g であった。

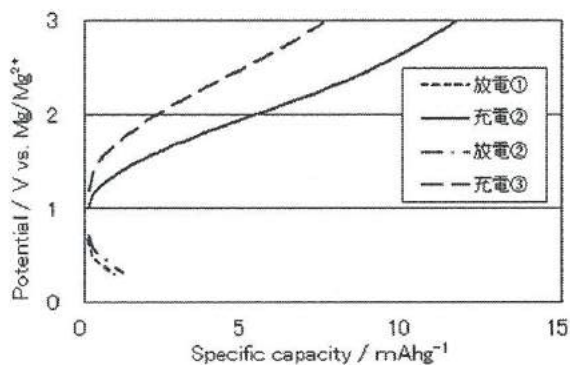


図 11.2 充放電特性結果(酸化バナジウム/アルミニウム)
Fig.11.2. Charge - discharge characteristic (V_2O_5 / aluminum).

インピーダンス測定の結果から、ポリプロピレンカーボネート系電解液の抵抗は充分小さく、負極であるバナジウム酸マグネシウムの界面抵抗も低減できたため、放電容量低下の理由として基板材料であるアルミニウムの影響が考えられた。そこで、アルミニウム箔に代わり燃料電池用カーボンシートを使用して、同様に充放電特性を測定した。図 11.3, 11.4 はカーボンシートを電極基材に使用した場合の充放電特性を示す。その結果、放電容量が 25mAh/g に増加した。

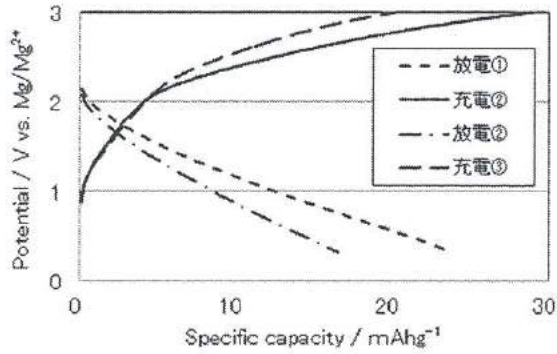


図 11.3 充放電特性結果(酸化バナジウム/カーボンシート)
Fig.11.3. Charge - discharge characteristic (V_2O_5 / carbon-sheet).

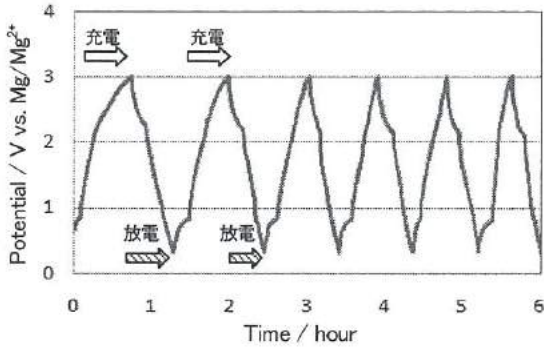


図 11.4 充放電曲線(酸化バナジウム/カーボンシート)
Fig.11.4. Charge - discharge curves (V_2O_5 / carbon-sheet).

最後に、正極活物質としてガラス系の材料を使用して同様の測定をおこなった。図 11.5 はカーボンシートを電極基材に使用し、酸化バナジウム系ガラスを使用して、充放電特性を測定した結果を示す。2 種類の酸化バナジウム系ガラスを作製したが、その放電容量はどちらも 10mAh/g 以下となった。活物質表面をアモルファス状態にした負極は、今回の実験では容量の増加に寄与していなかった。

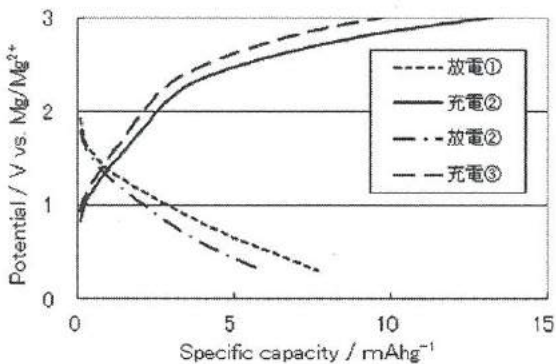


図 11.5 充放電特性結果(酸化バナジウム系ガラス/カーボンシート)
Fig.11.5. Charge - discharge characteristic (glassy V_2O_5 / carbon-sheet).

5. 結言

本研究ではマグネシウムイオン 2 次電池の開発を目標に研究を行った。その結果、得られた容量は小さいが繰り返し充放電特性を示すマグネシウム 2 次電池が作製できた。また、以下の知見が得られた。

- ① 正極活物質として純度の高いマグネシウム系材料を作製することはできなかった。得られた活物質の放電容量は、 0.2mAh/g であった。
- ② カーボンシートに酸化バナジウムを印刷した正極、カーボンシートにバナジウム酸マグネシウムを印刷した負極(酸化バナジウムにマグネシウムを導入したもの)、プロピレンカーボネート系の電解液の構造において繰り返し充放電特性が得られることを確認した。その放電容量は 25mAh/g であった。
- ③ カーボンシートに酸化バナジウム系ガラスを印刷した正極とそれにマグネシウムを導入した負極を用いて、充放電特性を測定した結果、放電容量は約 10mAh/g であった。

文 献

- (1) L. Yu and X. Zhang : 「Electrochemical insertion of magnesium ions into V_2O_5 from aprotic electrolytes with varied water content」 *Journal of Colloid and Interface Science*, 278(2004), 160-165
- (2) D. Imamura, M. Miyayama, M. Hibino and T. Kudo : 「Mg Intercalation Properties into V_2O_5 gel/Carbon Composites under High-Rate Condition」 *Journal of The Electrochemical Society*, 150(6), A753-A758 (2003)
- (3) M. Inamoto, H. Kurihara and T. Yajima : 「Electrode Performance of S-doped Vanadium Pentoxide as Cathode Active Material for Rechargeable Magnesium Battery」 *Hyoumenggijutsu*, Vol.62, No.10, 516-520 (2011)
- (4) N. Yoshimoto and M. Morita : 「マグネシウム 2 次電池開発に向けた電解質の設計」 *Electrochemistry*, 80(2), 104-108 (2012)
- (5) N. Yoshimoto and M. Morita : 「Rechargeable Magnesium Battery」 *Hyoumenggijutsu*, Vol.62, No.4, 211-216 (2011)
- (6) M. Itagaki, R. Saruwatari and K. Murata : 「Interpretation of the Electrochemical Impedance under Diffusion and Charge Transfer Controls」 *Zairyo-to-Kankyo*, 51, 410-417 (2002)

ナノインプリントを応用した 微細電極パターンの形成に関する研究

Study on formation of fine electrode pattern by nanoimprint lithography

大門 貴史 丹保 浩行 角田 龍則
DAIMON Takashi TAMBO Hiroyuki KAKUDA Tatsunori
横山 義之 坂井 雄一 二口 友昭
YOKOYAMA Yoshiyuki SAKAI Yuichi FUTAKUCHI Tomoaki

Abstract

A direct Ag nanopatterning technique using thermal nanoimprint lithography was investigated. Ag nanoparticles of 10 nm in diameter were used in the experiment. As a result, it was found that precise Ag nanoink pattern was fabricated by nanoimprinting method. With spin-coating speed increases, the height of line pattern and thickness of residual layer were decreased. The post-nanoimprint patterns were fired in an electric furnace to remove an organic solvent and sinter the Ag nanoparticles. We also found that when the Ag nanoink pattern was fired at 250°C, the precise electrode pattern was formed and grain growth of Ag nanoparticles occurred. With the increase of firing temperature, the dimensions of line pattern were decreased and the crystalline quality of Ag pattern was improved.

1. 緒言

近年のフォトリソグラフィ技術の発展により、ミクロンオーダー (10^6 m) の微細電極が電子デバイスに形成されている。また、サブミクロン以下の超微細電極を得るためには、極紫外線といった可視光よりも短い波長の光が利用されている。しかし、このような波長を取り扱う装置は大掛かりとなってしまうため、サブミクロン以下の構造を低いコストで製造するのは困難である。そこで、注目されているのは 1995 年に提案されたナノインプリントという転写技術である^{1,2)}。ナノインプリントは、微細パターンが施されたモールドを対象物に押し付けることによってパターンを転写する技術であり、比較的簡便な装置、工程で行うことができる。また、サブミクロン以下の短いパターンも安価にハイスループットで一括加工できる。Si 基板の上にスピコートされた PMMA 樹脂に SiO₂ モールドを押し込むことで、10 nm のレジストパターンの転写が報告されており、高い解像能力も秘めている。近年、タブレット型端末のフロントライトにナノインプリント技術が用いられた製品の販売が始まったことで、量産化技術としての期待がさらに高まっている。

金属ナノ粒子が研究されるようになったのは、今から 30 年以上前のことである³⁾。しかし、研究当初はまだナノ粒子の材料としての実用性が全く未知であったので、注目されることはなかった。ナノ材料にスポットがあたるようになったのは、フラーレンやナノチューブが発見されてからである。しかし、これらのナノ材料には課題が多く、現在の技術レベルでは電極としての実用化が難しい。これに対して、金属ナノ粒子は材料技術が進歩してお

り、粒径を数 nm に微細化できるようになっている。また、金属ナノ粒子は粒径が小さくなるとバルクよりも表面に存在する原子数の割合が増えるため、ナノ粒子が不安定になる。このため、融点が下がり、低温下での焼結が可能となる。導電率が高く、バルクでは考えられない特性が現れる金属ナノ粒子は、ナノ材料として最も注目を浴びている。

本研究では金属ナノ粒子インクに対して直接ナノインプリントを行うことで、ライン状の電極パターンをミクロン以下で形成することを目的とした。

2. 表面弾性波フィルタ

表面弾性波 (SAW) フィルタは、主に携帯電話に搭載されており、不必要な周波数 (雑音) を取り除き、必要な周波数のみを取り出す役割を持つ⁴⁾。SAW フィルタの原理を図 1 の構造図を用いて説明する。

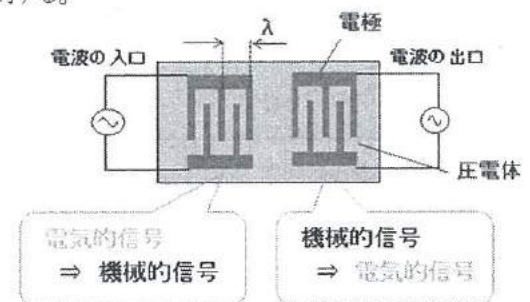


図 1. SAW フィルタの構造

Fig.1. Structure of SAW filter

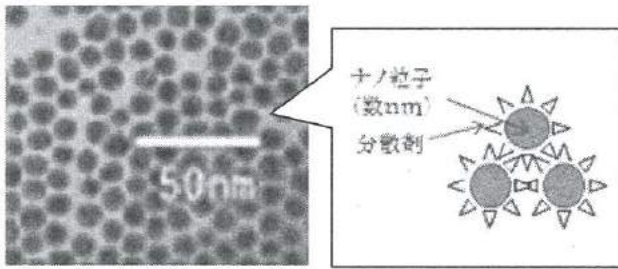
圧電体基板には、2組のクシを向かい合わせにした電極が形成されている。電波が片方の電極（入口）に入ってきたとき、電気的信号は機械的信号に変換される。この信号は、圧電体表面を伝播して、もう片方の電極（出口）で再び電気的信号に変換される。電極の間隔が波長に相当するため、特定の周波数だけを電気的信号として取り出すことができる。

現在、携帯電話の使用周波数帯域は最大で2 GHzである。しかしながら平成27年以降、携帯電話に用いられる周波数帯域が3.4 GHz~4.2 GHzに変更される見通しである。それに付随して、SAWフィルタの電極線幅は0.2~0.3 μm（タンタル酸リチウムを基板として用いた場合）と算出されるため、より線幅が短く精密な形状が要求される。

3. 金属ナノ粒子

<3. 1> Ag ナノインク

金属ナノ粒子はエネルギー的に不安定であるため、粒子同士が結合して凝集することで安定しようとする。このようにして、金属ナノ粒子が融着すると、粒径が大きくなり、ナノオーダーを維持できなくなる。そのため、金属ナノインクには金属ナノ粒子同士の凝集を防ぐために、図2に示すような分散剤が使われている。本研究では、Agの粒径が10 nmのナノインク（株式会社アルバック）を使用した。このAgナノインクには分散剤の他にテトラデカンなどの有機溶剤が含まれている。



(a) AgナノインクのTEM写真⁹⁾ (b) Agナノ粒子と分散剤の模式図

図2. Agナノインク

Fig.2. Ag nanoink.

<3. 2> Ag ナノインクの熱分析

ナノ粒子の周りには分散剤が取り囲んでいるので、導電性が低く、このままでは電極として使用するには問題がある。分散剤が熱分解して脱離することで、金属ナノ粒子同士が融着して導電性が高くなる。

Agナノインクに含まれている有機成分の情報を得るために熱分析を行った。図3の太線は熱重量(TG)分析、細線は示差熱分析(DTA)を示している。温度が高くなるにつれて、TGは減少していき、400°CになるまでTGは42%減少している。一方、DTAからは、300°Cと400°C付近で発熱ピークを観察できる。つまり、

200°Cと300°C付近からインクに含まれている分散剤等が燃焼し始め、インク中から脱離した有機成分のTGだけ減少したと考えられる。さらに温度を上昇させていくと、950°Cで吸熱ピークが観察できる。Agの融点は960°Cなので、このピークはAg凝集体が融けたことを示していると考えられる。

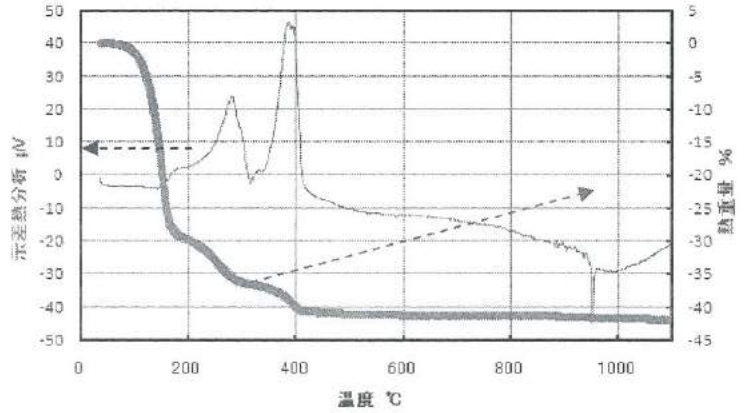


図3. Agナノインクの熱分析

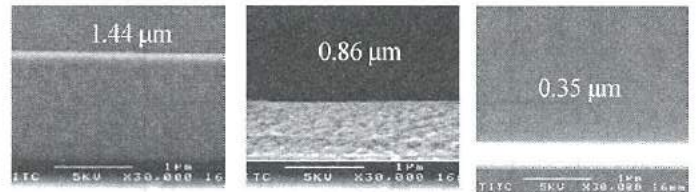
Fig.3. TG-DTA curve of Ag nanoink.

<3. 3> スピンコートによるAgナノインク膜の作製

電極パターン形成は、膜形成工程（スピンコート）、転写工程（ナノインプリント）、焼成工程の順序で行った。また、基板としては安価なSiを用いた。

Si基板を100°Cに加熱された硫酸および過酸化水素の混合液(4:1)に10 min浸した後、純水を用いて洗浄した。続いてAgナノインクを基板上にスピンコートしてAgナノインク膜を成膜した。スピンコート回転速度は、400 rpmから4000 rpmとした。また、Agナノインク膜の膜厚は試料を割り、電界放出型走査型電子顕微鏡(FE-SEM)を用いて観察した。

スピンコート回転速度600 rpm、1000 rpm、4000 rpmで作製したAgナノインク膜のSEM写真を図4に示す。いずれの回転速度でも平坦なAgナノインク膜を観察できる。



(a) 回転速度 600 rpm (b) 回転速度 1000 rpm (c) 回転速度 4000 rpm

図4. Agナノインク膜のSEM写真

Fig.4. SEM images of spin-coated Ag nanoink film.

スピコート回転速度に対する膜厚の変化を図5に示す。スピコート回転速度を400 rpmから1000 rpmに増加させていくと膜厚は急激に減少していき、1000 rpmを超えると緩やかに減少した。本研究で使用するモールドの溝の深さは1 μmであるため、スピコート回転速度は1000 rpm以上が妥当であると考えた。

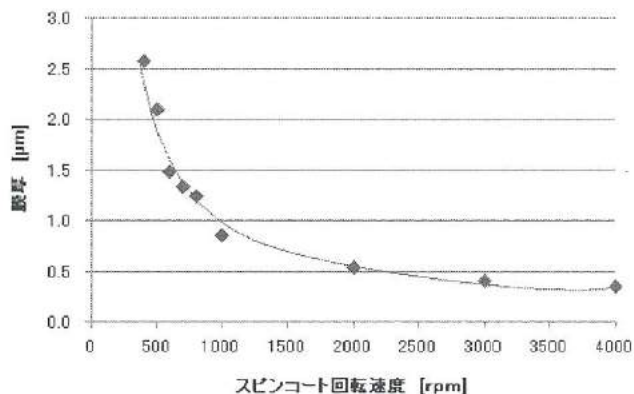


図5. スピコート回転速度におけるAg薄膜の膜厚依存性

Fig.5. Thickness of Ag thick films as a function of spin speed.

< 3. 4 > Ag薄膜の結晶性

スピコートを用いて1000 rpmで作製したAgナノインク膜の有機成分を除去するために、250°C、300°C、350°C、400°Cで1h焼成を行った。焼成後のAg薄膜のX線回折スペクトルを図6に示す。全ての試料から、Ag(111)、Ag(200)に由来する回折ピークが観察できる。焼成温度が高くなるにつれて、Agのピークが鋭くなることから、結晶性は向上している。ここで、焼成温度が250°Cと400°CのAg薄膜の結晶性には大きな差異はないと判断した。

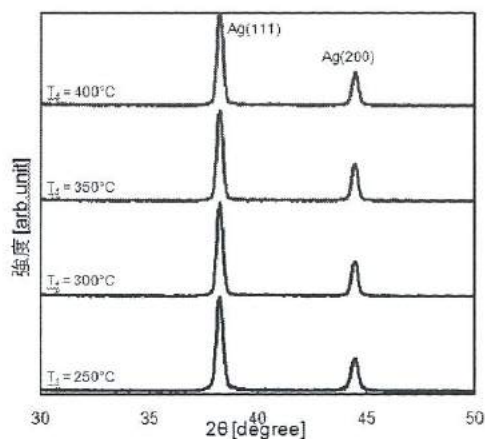


図6. Ag薄膜のX線回折スペクトル

Fig.6. XRD spectra of Ag thin film.

< 3. 5 > 4探針法

図7に4探針法の模式図を示す。4探針法では、外側の2探針(AとD)間に一定電流Iを流し、内側の2探針(BとC)に生じる電位差Vを測定して、表面抵抗率を求める。しかし、4探針法の測定で生じる電界が試料の外に出られないため、試料内部の電界は変化する。そのため、試料サイズが小さいときや試料の端を測定するときは、補正係数(RCF)をかける必要がある。体積抵抗率ρ_vは、以下の式で表される。

$$\rho_v = \left(\frac{V}{I} \times RCF \times t \right)$$

tは膜厚である。

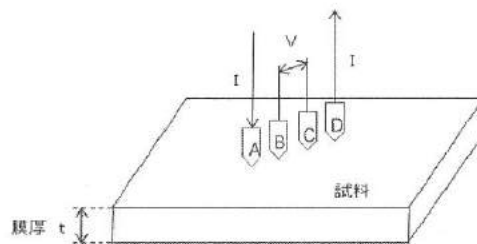


図7. 4端針法

Fig.7. Four probe method.

< 3. 6 > Ag薄膜の体積抵抗率

Ag薄膜の膜厚は1 μm以下と薄いため、X線回折を測定したAg薄膜の体積抵抗率は4探針法により求めた。Ag薄膜の体積抵抗率を図8に示す。ここで、RCFは4.532とした。

体積抵抗率は、焼成温度が高くなるにつれて減少し、Agのバルク金属の値に近づいていく。焼成温度が250°C、400°Cのときの体積抵抗率は、3.9 μm・cm、3.3 μm・cmである。ここで、Ag、Au、Alのバルク金属の体積抵抗率は、それぞれ1.59、2.35、2.65 μΩ・cmである⁶⁾。したがって、Agナノインクを用いて作製したAgは電極として十分に機能すると考えられる。

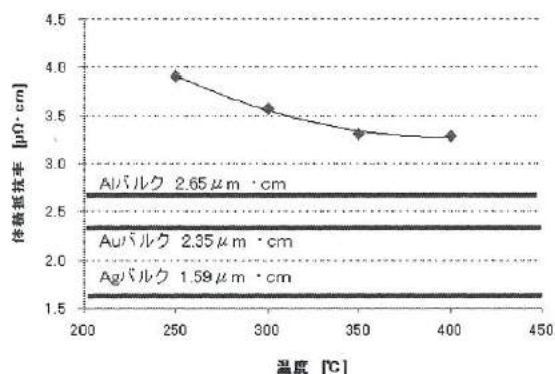


図8. Ag薄膜の体積抵抗率と焼成温度の関係

Fig.8. Volume resistivity of Ag thick films as a function of firing temperature.

4. ナノインプリント

<4. 1> ナノ粒子インクに直接ナノインプリント

電極パターン形成の工程を図8に示す。まず、スピコート工程で平坦なナノインク膜を基板上に形成する。乾燥工程でナノインク膜に含まれる有機溶剤を適度に蒸発させる。ナノインプリント工程でモールドをナノインク膜にプレスしてナノインクパターンを形成する。焼成工程でナノインクパターンに残った分散剤を完全に脱離させてナノ粒子を凝集させて焼結させる。

本研究では、70°Cに加熱されたホットプレート上にAgナノインク膜を成膜した試料を置いて乾燥させた後、加熱温度80°C、プレス圧3 MPa、プレス時間600 sでナノインプリントを行った。モールドの外形は20 mm×20 mmであり、パターン面には線幅0.5 μm、1.0 μm、2.0 μmのパターンが施されており、パターン溝の深さはいずれも1.0 μmである。モールドには離型剤を塗布して、ミクロン以下である線幅0.5 μmのパターンで評価をした。

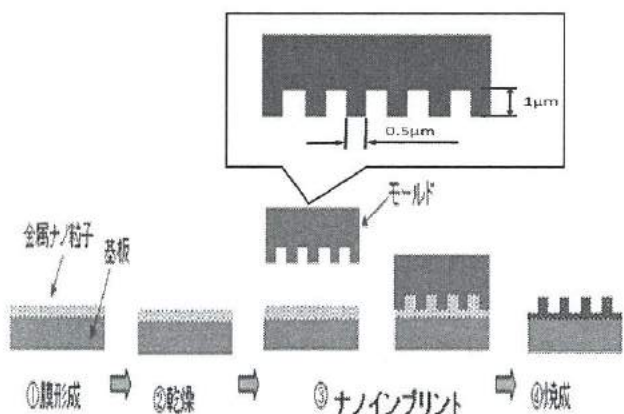


図9. 電極パターン形成工程

Fig.9. Electrode pattern formation process.

<4. 2> Agナノインクパターン - スピコート回転速度 -

平坦なAgナノインク膜にナノインプリントしたとき、パターン形状がどのように変化するかを検討した。試料はスピコート回転速度1000 rpm、2000 rpm、3000 rpmで成膜した厚さの異なるAgナノインク膜を用いた。ナノインプリント後のAgナノインクパターンのSEM写真を図10に示す。1000 rpmのスピコート回転速度で成膜されたAgナノインクに対して転写されたパターンの線幅は0.50 μm、高さは1.00 μm、残膜の厚さは0.38 μmである(図10(a))。そして、2000 rpmのときパターンは、線幅0.50 μm、高さ0.72 μm、残膜厚さ0.24 μm(図10(b))、3000 rpmのときは、線幅0.50 μm、高さ0.54 μm、残膜厚さ0.08 μm(図10(c))である。図11にスピコート回転速度に対するナノインプリント後のAgナノインクパターンの高さ及び残膜の厚さの関係を示す。スピコート回転速度が増加するにつれて、ラインパターン高さ及び残膜の厚さが減少している。ラインパターン高さ及び残膜の厚さが

減少するのは、スピコート回転速度が増加するにつれて、ナノインプリント前のAgナノインク膜の厚さが薄くなるためであると推測される。そして、パターン高さが低いとき、モールドを押し込みやすくなり、残膜が薄くなると考えられる。

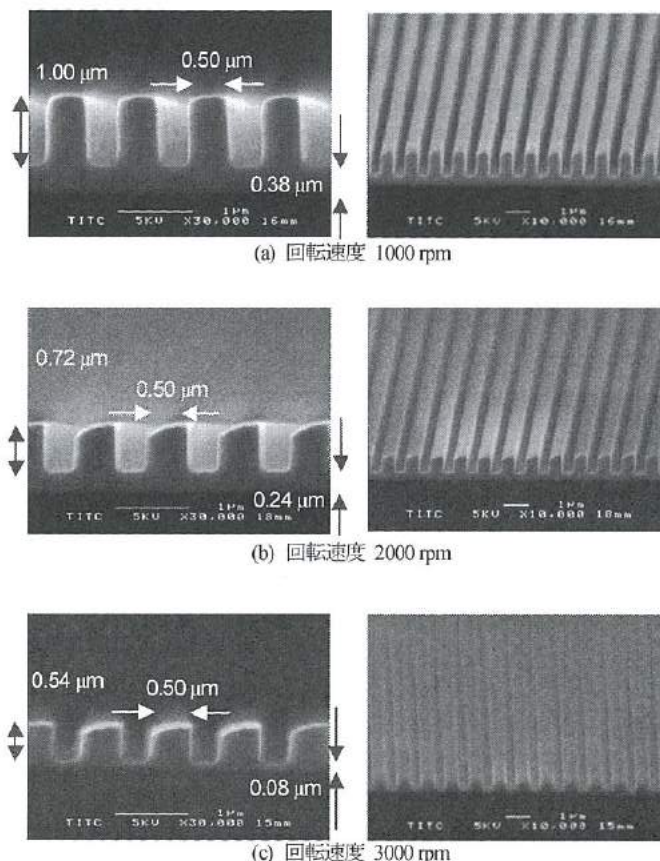


図10. ナノインプリント後のAgナノインクパターンSEM写真

Fig.10. SEM images of post-imprint Ag nanoink pattern.

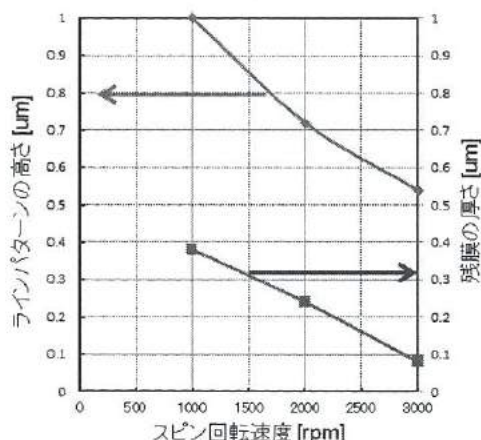


図11. スピコート回転速度におけるAgパターンの形状依存性

Fig.11. Spin speed dependence of Ag pattern shape.

< 4. 3 > Ag ナノインクパターン - 乾燥時間 -

液状である Ag ナノインク膜の乾燥時間を変化させてナノインプリントを行ったとき、パターン形状がどのように変化するかを検討した。Ag ナノインク膜は、スピコート回転速度 1000 rpm で形成した。ナノインプリントは、①乾燥なし、②70°C のホットプレート上で 30 s の乾燥、③60 s の乾燥をさせた Ag ナノインク膜に行った。Ag ナノインクパターンの断面 SEM 写真を図 12 に示す。本実験の条件では乾燥を省略した Ag ナノインク膜にナノインプリントを行ったとき、モールドが Ag ナノインク膜から離型させることができず付着した。そこで、乾燥を 30 s あるいは 60 s としたとき、残膜厚さが 0.31 μm あるいは 0.38 μm の Ag パターンを形成できた。Ag ナノインク中に残存する溶剤が多く粘度が低いほうが、モールドをインクに押し込みやすいため、乾燥時間が 30 s と短い Ag ナノインクパターンの残膜厚さは薄くなったと考えられる。

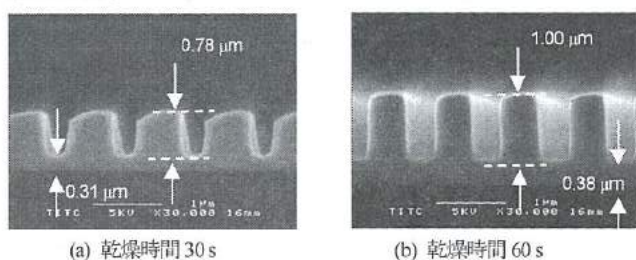


図 12. ナノインプリント後の Ag ナノインクパターン断面 SEM 写真
Fig.12. Cross-sectional SEM images of post-imprint Ag nanoink pattern.

< 4. 4 > Ag パターン - 焼成温度 -

Ag ナノインクパターンから金属パターンを形成するために、電気炉で焼成を 1 h 行ったとき、パターン形状がどのように変化するかを検討した。250°C、300°C で焼成したパターンの SEM 写真を図 13 に示す。

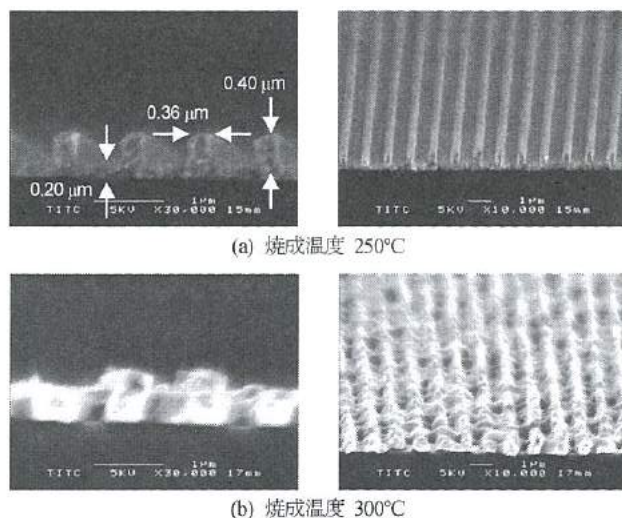


図 13. ナノインプリント後の Ag パターン SEM 写真
Fig.13. SEM images of post-imprint Ag pattern.

焼成温度が 250°C のとき、線幅 0.36 μm 、高さ 0.40 μm 、残膜 0.20 μm である精密なパターンを観察できる (図 13(a))。このパターンは、モールドに対して線幅が 28%、高さが 60%減少している。さらに、Ag ナノ粒子の粒成長も観察できる。一方、焼成温度が 300°C のとき、パターンは荒れている (図 13(b))。したがって、金属ナノインクをある温度以上で焼成すると、有機成分が蒸発して、ナノ粒子が拡散しながら凝集すると考えられる。

< 4. 5 > Ag の X 線回折スペクトル

ナノインプリントを用いて形成した Ag ナノインクパターンを焼成すると、結晶性がどのように変化するかを検討した。図 14 に Ag の X 線回折スペクトルを示す。

図 14(a)のナノインプリント後の Ag ナノインクパターンからは Ag(111)の回折ピークが観察される。この広い幅のピークは、分散剤で覆われた粒径が 10 nm の Ag ナノ粒子からの回折を示している。これに対して、250°C (図 14(b))、300°C (図 14(c)) で焼成された Ag パターンからは、Ag(111)と Ag(200)の回折ピークが観察される。そして、Ag(111)の回折ピーク強度は、焼成温度が高くなるにつれて、鋭くなっている。また、比較として、図 14(d)に 300°C で焼成したパターン無しの Ag 薄膜の X 線回折スペクトルも示す。Ag ナノインクの焼成を行うとテトラデカンや分散剤などの有機物が脱離して、Ag ナノ粒子が焼結して粒成長するため、Ag パターンの結晶性が改善されるのだと考えられる。また、焼成温度が 250°C と 300°C の Ag パターンの結晶性に大差はないと判断した。

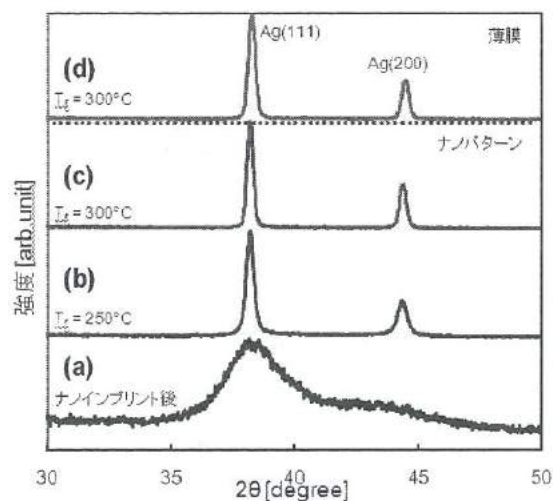


図 14. Ag の X 線回折スペクトル
Fig.14. XRD spectra of Ag.

5. Ag 薄膜のウェットエッチング

残膜を除去して電極を基板上で分離させるための条件を検討するために Ag のウェットエッチングを行った。エッチング液は次の薬品から生成した。60-61%の硝酸、85%のリン酸、99.5%の酢酸、純水をそれぞれの重量比 1.60、33.2、25.8、39.4 で混合した。ここで、硝酸にリン酸を加えたのはエッチングむらを無くすため、酢酸を加えたのは、腐食電位を高くするためである。また、純水を加えたのはエッチングレートを調節するためである。

スピコート回転速度を 600 rpm で成膜して、300°C で焼成した Ag 薄膜をエッチング液に浸した。エッチング時間に対する鳥瞰 SEM 写真を図 15、膜厚の関係を図 16 に示す。図 15(a) の SEM 写真から、焼成後の Ag 薄膜は有機成分が蒸発するので、表面が荒れていることが分かる。また、膜厚の薄い領域の Ag が除去されて基板が露出した後、Ag は体積を減らしてダマ状になり Ag ナノドットが形成される。図 16 から、エッチングレート(高さ方向)は $0.0246 \mu\text{m}/\text{min}$ であると見積もられる。250°C で焼成した Ag パターンの残膜は $0.20 \mu\text{m}$ であったため(図 13(a))、これを除去するためには 8 min 要すると算出される。また、縦方向と横方向は、同じエッチングレートで除去されると予想されるので、ラインパターンをエッチングするとき、線幅が減少することになる。そのため、分離した電極を形成するためには、残膜の厚さが薄いパターンが適していると考えられる。

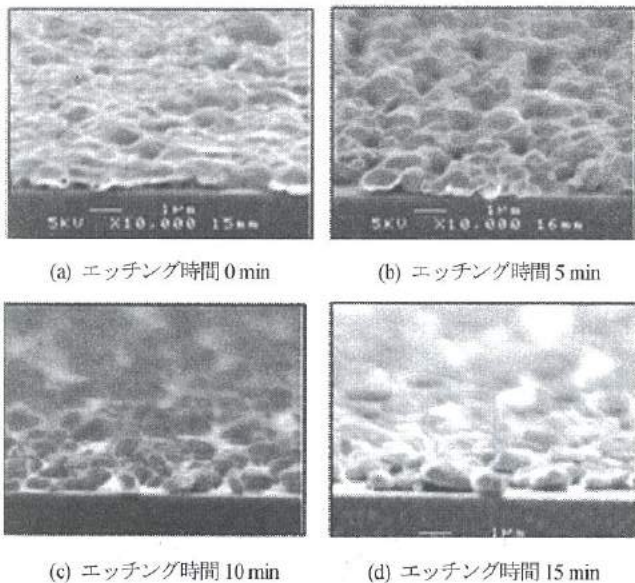


図 15. Ag の SEM 写真
Fig.15. SEM images of Ag.

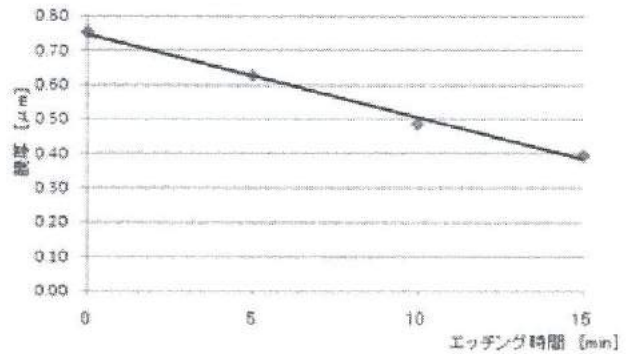


図 16. Ag 膜厚のウェットエッチング時間依存性
Fig.16. Wet etching time dependence of Ag thickness.

6. 結言

本研究では Ag ナノ粒子に対して直接ナノインプリントを行い、ミクロン以下の電極パターン形成を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① Ag ナノインク膜の焼成温度を増加させていくと、Ag パルクの体積抵抗率 ($1.59 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) に近づいていくことを確認した。また、焼成温度が 250°C、400°C の Ag 薄膜の体積抵抗率は、それぞれ $3.9 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 、 $3.3 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ であった。
- ② Ag ナノインクに直接ナノインプリントを行うことにより、Ag ナノインクパターンを形成できることを明らかとした。
- ③ スピコート回転速度を増加させることで、ナノインプリント後のパターン高さおよび残膜の厚さは共に減少することが分かった。
- ④ 焼成温度が 250°C のとき、モールドのパターンに対して線幅が 28%、高さが 60% 減少するが、精密なパターンが形成されることを明らかとした。
- ⑤ Ag ナノインクパターンの結晶性は、焼成温度の増加ともない、改善された。
- ⑥ Ag を混合液(硝酸、リン酸、酢酸、純水)でエッチングしたときのエッチングレートは $0.0246 \mu\text{m}/\text{min}$ であり、薄膜からナノドットが形成されることが分かった。

文 献

- (1) 前田龍太郎：ナノインプリントのはなし (2005)
- (2) 松井真二、古室昌徳：ナノインプリント技術および装置の開発 (2005)
- (3) 菅沼克昭：金属ナノ粒子インクの配線技術—インクジェット技術を中心に— (2006)
- (4) 富士通研究所 やさしい技術講座 (SAW フィルタ)
<http://jp.fujitsu.com/group/labs/downloads/techinfo/techguide/saw/pdf>
- (5) アルバック ナノメタルインク製品カタログ
- (6) 大木 道則：化学便覧 基礎編 II 改訂 4 版 日本化学会編 (1993) P490

IV. 小水力発電システムの研究

Study on Micro Hydropower System

中瀬 典章 荒井 勇人 熊澤 周士 金森 直希
NAKASE Noriaki ARAI Hayato KUMAZAWA Shuji KANAMORI Naoki
羽柴 利直 浅田 峯夫 石黒 智明 佐山 利彦
HASHIBA Toshinao ASADA Mineo ISHIKURO Tomoaki SAYAMA Toshihiko

Abstract

In this study, we developed a simulator for a hydropower system of very low capacity. That is, we formulated 50 W of power generation system, which consists of an open type water turbine wheel and a DC generator, the coefficients of each part of the system were identified, and then a full simulator of the hydropower system was built on an algebra-based software MapleSim. The efficiency and power output fluctuation were examined by using the simulator. Consequently, from the point of power generation efficiency, the best combination was found in gear ratio of transmission and the number of coil turns of DC generator. In addition, it was shown that the inertial moment of the open type water turbine wheel is very effective for suppressing fluctuation of output power.

1. 緒言

近年、国内の電力事情への対応やCO₂削減への貢献などの観点から水力発電の利点が再認識されており^①、農業用水や水道設備などを利用した低容量の水力発電システムの導入や研究開発が盛んに行われている^②。しかし、水路、雨樋、排水管などより身近でかつ未利用の極低容量の水エネルギー源が様々な形態で存在するにもかかわらず、それらの水エネルギーはほとんど利用されていない。このような極低容量発電システムを開発するにあたっては、経験に基づく設計パラメータの選定や多数回の試作・試験が必要とされるが、動特性シミュレーションによる客観的な評価に基づいて発電システムの設計や実現可能性の検討が行えるようにすることも、重要な技術になり得ると考えられる。

そこで、本研究では典型的な極低容量の水力発電システムについて、発電効率の検討、および流量変動に対する出力電力特性の検討など、発電システムの最適化に向けた基礎的な検討を、動特性シミュレーションにより行った。

2. 対象とする発電システム

図1に示すように、低落差かつ低流量の水流を水車によって回転エネルギーに変換し、変速機を介して直流発電機を回すことで電力に変換する典型的な極低容量の水力発電システムを検討対象とすることとした。具体的には、雨水管、小水路、屋根などから落下する水の活用を想定したものである。発電システムの規模は、実験場所や装置製作の都合などを考慮し、落差 1.7 m、流量 1.5 l/sとした。したがって、水の流入仕事率は約 50 W である。

3. 研究の流れ

水力発電システムを、構成要素である流路部、水車部、変速部および発電機部に分割し、それぞれの要素の動特性（運動特性や電気特性）をモデル化（数式化）および係数同定した後、同定した各要素を動特性シミュレータ上で接続して、一つの水力発電システムとして機能するよう構成した。最終的には、この動特性シミュレータを使用して、流入流量を一定とする定常状態での発電効率、および流量が変動する場合の出力電力特性を調べた。

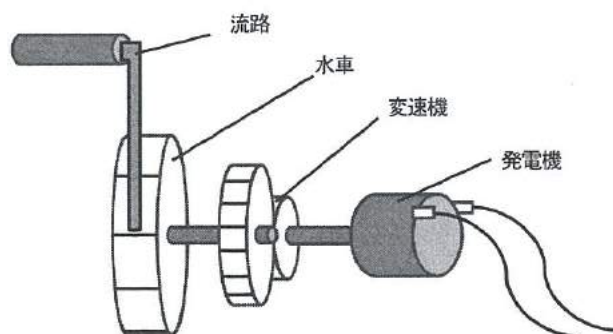


図1. 位置エネルギーを利用する水力発電システムの模式図
Fig.1. Schematic image of hydropower system using potential energy

4. 発電システムの動特性のモデル化

< 4. 1 >モデル化方法

対象とする発電システムを、流路部、水車部、変速機部、発電機部の要素に分け、それぞれの要素の動特性を数式で表現した。次に、実験用装置を要素ごとに製作して動作させ、各要素の数式の係数を同定した。以下、各要素の動特性のモデル化と係数同定について述べる。

< 4. 2 >流路部

図2に示すように、開放水路を流れる流量 Q の水が落差 h で自由落下し水車の羽根に当たった際に、水の位置エネルギーがすべて水車の運動エネルギーに変換されると仮定して、流路部の運動特性をモデル化した。水の質量を m 、水車の羽根板に接触する瞬間の水の速度を v とすると力学的エネルギー保存則より次式が成り立つ。

$$mgh = mv^2 / 2 \quad (1)$$

水の運動量の変化が羽根板に加わる力積に等しいとすると、羽根板に加わる力を F_w とし次式が成り立つ。

$$F_w t = mv \quad (2)$$

式(1)、(2)より水車の羽根に加わる力 F_w は次のように求まる。ここに、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。

$$\begin{cases} v = \sqrt{2gh} & (3) \\ F_w = \rho Qv & (4) \end{cases}$$

< 4. 3 >水車部

既存の水車は、表1に示すように様々な形状・特徴のものが実用化されている⁹⁾。本研究では、低落差かつ低流量向きのものの中から、構造が単純で作製がしやすく設計パラメータの変更が容易なものとして、開放ホイール型水車を選択した。開放ホイール型水車の運動を、軸回りの慣性モーメント J_w および粘性係数 C_w から成る1次遅れ系としてモデル化した。すなわち、水車部の運動方程式は式(5)となる。ここに、 ω_w は水車の回転角速度、 T_w は水車軸に加わるトルクである。



図2. 流路部の物理モデル
Fig.2. A physical model of flow path

表1 水車の型式と特徴

Table 1. Characteristics of water wheels

水車の型式	許容流量	許容落差	構造
フランス型	大	低	複雑
プロペラ型	大	低	複雑
チューブラ型	大	低	複雑
ベルト型	小	高	複雑
ターゴ型	小	高	複雑
らせん型	小	低	複雑
クロスフロー型	小	低	単純
開放ホイール型	小	低	単純

$$J_w \dot{\omega} + C_w \omega = T_w \quad (5)$$

慣性モーメントと粘性係数の同定は、図3に示す試作水車（アルミニウム薄板にて製作）を試作流路からの流 s 入水により動作させた際の測定値を、1次系へ近似することで行った。図4に水車の角速度の測定値と近似した1次系の時刻歴をプロットしたものを示す。立ち上がりの部分において両者の差が表れているが、十分に時間が経過した後の定常状態においては、ほぼ一致している。羽根への水の当たり方などが立ち上がり部分の差に大きく表れたものと考えられる。

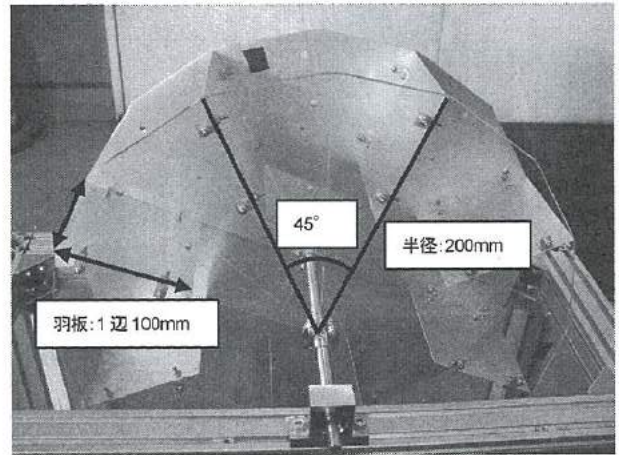


図3. 試作水車
Fig.3. A prototype waterwheel.

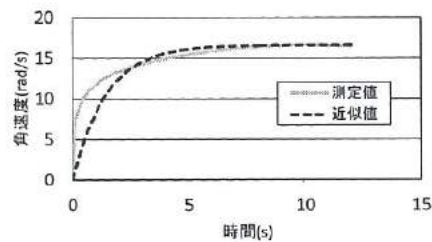


図4. 水車のステップ応答
Fig.4. A step response of the waterwheel

< 4. 4 > 変速機部

変速機部の運動は、水車部と同様に慣性モーメントと粘性係数のみで表現する1次系として式(6)のようにモデル化した。

$$J_{gw} \dot{\omega}_{gw} + C_{gw} \omega_{gw} = T_{gw} \quad (6)$$

ここに、 J_{gw} 、 C_{gw} 、 ω_{gw} 、 T_{gw} はそれぞれ変速機の慣性モーメント、粘性係数、角速度およびトルクであり、これらはすべて変速機の水車側軸からみた係数および変数である。

係数同定については、図5に示す歯車変速機を製作し、この変速機の発電機側軸をモータにより駆動した際の、水車側軸の角速度を測定することで行った。この変速機は、5、20、25、100の4つのギヤ比を設定することが可能である。

ギヤ比 100 の場合における水車の角速度の測定値と近似した1次系の時刻歴をプロットしたものを図6に示す。立ち上がり部においては水車部と同様に両者の差が表れているが、十分に時間が経過した定常状態ではほぼ一致している。なお、この実験装置を用いた測定では、変速機部の動特性だけでなく発電機の動特性も含まれてしまうため、変速機部の係数算出においては、後述の発電機部の同定結果を用いて変速機部のみの慣性モーメントを抽出した。

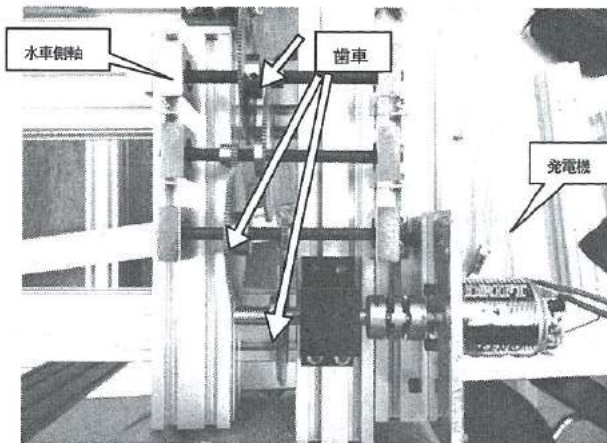


図5. 試作変速機
Fig.5. A prototype transmission

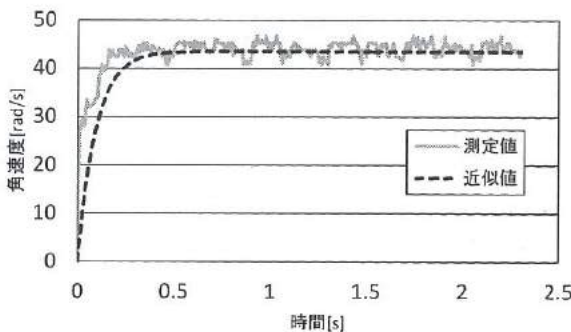


図6. 変速機のステップ応答
Fig.6. A step response of the transmission

< 4. 5 > 発電機部

発電機部の動特性については、図7に示す等価回路で表現される直流発電機として動特性をモデル化した。発電機部の動特性の特徴はローターの運動と電気回路が機械-電気変換部を介して相互作用する系となっていることである。これらを数式で表すと以下のようになる。

$$J_m \dot{\omega}_m = T_m \quad (7)$$

$$LI + RI + R_L I = V_e - V \quad (8)$$

$$k_t I = T_m \quad (9)$$

$$k_e \omega_m = V_e \quad (10)$$

式(7)はローターの運動方程式、式(8)は電気系の回路方程式、式(9)および式(10)は機械-電気変換を担う部分である。ここに、 J_m はローターの軸回りの慣性モーメント、 L は発電機のインダクタンス、 R は発電機の内部抵抗、 R_L は負荷の抵抗、 T_m は発電機に加わるトルク、 V_e は起電力、 I は負荷抵抗を流れる電流、 V は負荷抵抗の端子間電圧、 k_t はトルク定数、 k_e は起電力定数である。

発電機の慣性モーメントの同定については、図8に示す実験装置を試作し動作させて行った。ダミーの負荷を取り付けた発電機に電圧を加えた際の発電機の角速度を測定し、1次系にフィッティングすることで同定した。発電機のローターのコイル巻き数が19、35、50である3種類のモータについて、それぞれ係数同定を行った。発電機の角速度の測定値および同定した1次系の時刻歴をプロットしたものを図9に示す。立ち上がり部も含めよく近似されていることがわかる。

トルク定数 k_t 、および起電力定数 k_e の同定については、図10に示す実験装置を試作し、動作させて行った。対象となる発電機の軸を、別途設けたモータにより強制回転させて、角速度と発電機の出力電圧の関係(図11)、およびトルクと発電機を流れる電流の関係(図12)から、それぞれトルク定数 k_t 、起電力定数 k_e を求めた。トルク定数の逆数と起電力定数はほぼ同一の値となり、線形性も良いことがわかった。また、発電機のインダクタンス L と内部抵抗 R については、発電機の出力端子をマルチメータに接続して測定した。

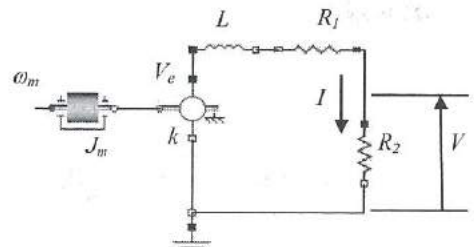


図7. 直流発電機の等価回路
Fig.7. Equivalent circuit of the DC generator.

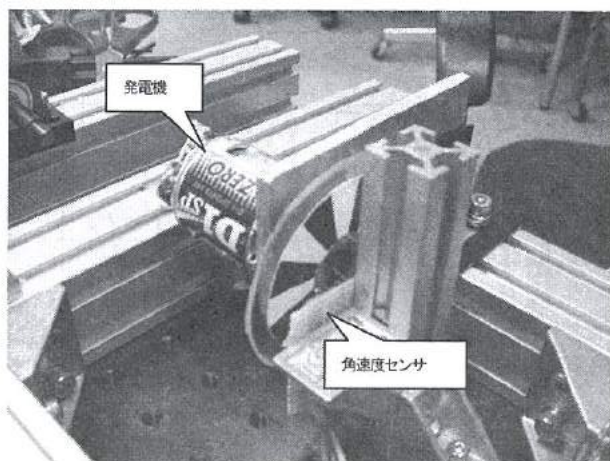


図 8. 直流発電機の動特性同定用実験装置

Fig.8. An experimental apparatus for identifying dynamics of the DC generator

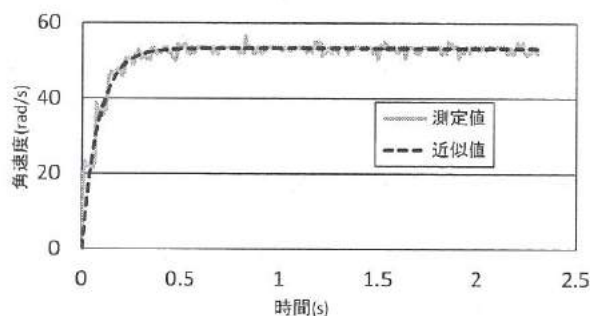


図 9. 直流発電機のステップ応答

Fig.9. A step response of the DC generator

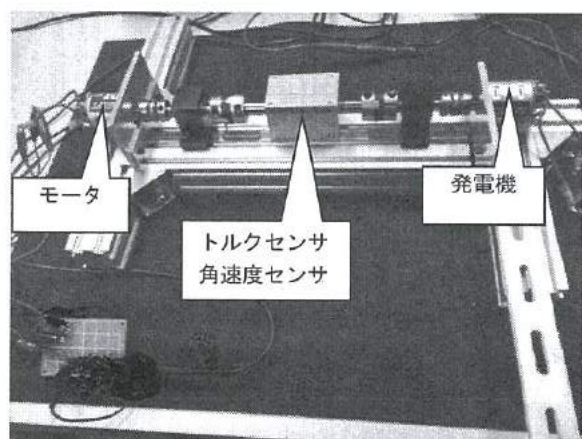


図 10. トルク定数および起電力定数同定用実験装置

Fig.10. An experimental apparatus for identification torque constant and EMF constant of the DC generator

5. 動特性シミュレータによる発電システムの特性調査

< 5. 1 > 水力発電動特性シミュレータの概要

前章でモデル化した各要素をすべて接続し、動特性シミュレータ上で、水力発電モデルを構成した。シミュレータには、富山県工業技術センターの保有設備である「メカトロ検証システム」に搭載されているサイバネットシステム社製 MapleSim を用いた。MapleSim は、数式処理ベースの動特性シミュレータであるため、(1)本研究でモデル化した数式を変形することなく用いることができる、(2)機械系と電気系など複数の物理系や信号処理系が混在した複雑なシステムの解を求める前段階で数式の簡単化（近似ではなく厳密な簡単化）を行うため、計算精度の低下なしに求解速度の向上が期待できる、(3)要素間を数値でやり取りする数値処理ベースのシミュレータで発生しやすい代数ループによる悪影響がない、などの特長がありスムーズにシミュレーションを行うことができると判断し採用した。図 13 は、作成した水力発電シミュレータの全体構成を示す。各要素ブロックは微分方程式や代数方程式そのものを表しており、要素間の結線は要素間の拘束条件（拘束方程式）を表している。

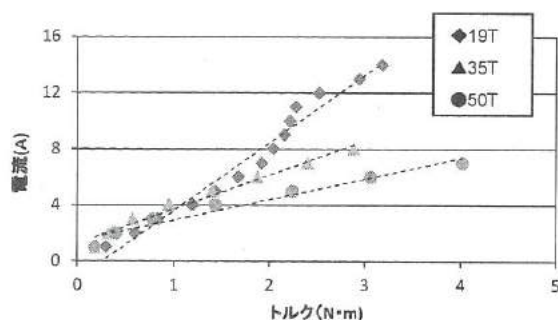


図 11. トルク定数 k_t の同定結果

Fig.11. Identification results of torque constant k_t

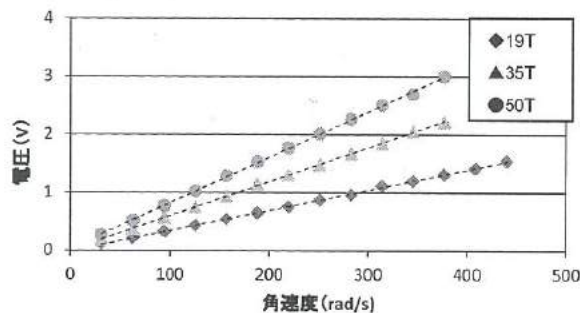


図 12. 起電力定数 k_e の同定結果

Fig.12. Identification results of EMF constant k_e

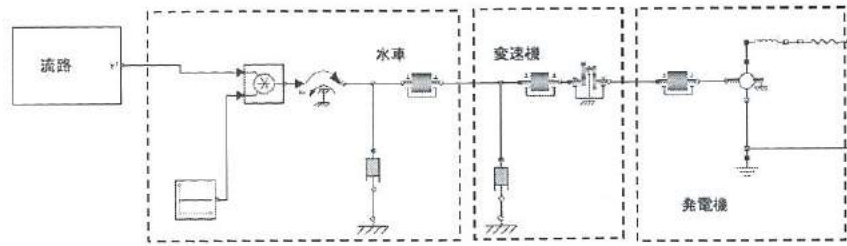


図 13. 水力発電システムの動特性シミュレータの全体構成

Fig. 13. Overall configuration of the present dynamics simulator of hydropower system

＜5. 2＞発電効率の検討

十分に時間が経過した定常状態における発電効率 η を、流入水の仕事率 $P_m = F_w v$ と発電機の出力電力 $P_{out} = IV$ の比すなわち $\eta = P_{out} / P_m$ と定義し、シミュレーション結果より発電効率 η を調べた。ここでは、発電実験装置を用いた実験のしやすさを考慮して、変速機のギヤ比で4つおよび発電機のコイル巻き数で3つのパラメータのみを変更可能とし、流路部および水車部のパラメータはすべて固定した。最も発電効率 η が大きくなったパラメータ組み合わせは、ギヤ比100かつコイル巻き数35ターンのときであった。

まず、コイル巻き数35のものを使用した場合における変速機のギヤ比と発電効率の関係を図14に示す。これより、ギヤ比100の場合に効率が最も大きく、発電効率は55.6%であった。なお、ギヤ比が5、25、50、100以外の値は試作実験装置による発電実験ができない値であるが、どのギヤ比において発電効率が最大となるか調べるために追加した値である。また、水の流入流量が半分に減少した場合は、効率の数値は低くなるが、ギヤ比100の場合に効率が最も高いことには変わりなかった。なお、水の位置エネルギーすべて水車の駆動力になると仮定しているため、概して高い発電効率となっている。

次に、変速機のギヤ比を100とした場合の発電機コイル巻き数と発電効率の関係を図15に示す。巻き数35の発電機を使用した場合に効率が最も大きいことがわかる。

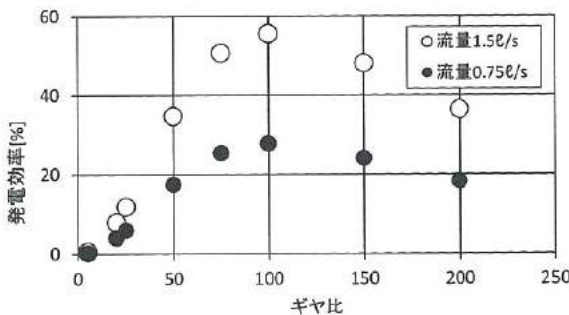


図 14. ギヤ比と発電効率の関係(コイル巻き数35の発電機の場合)

Fig. 14. Relationship between gear ratio and power generation efficiency at 35 coil turns of the DC generator

6. 流量変動に対する出力電力特性

本研究の対象としている極低容量の水力発電システムでは、流入する水の流量が大きく変動することが推察される。そこで、水の流入流量を正弦波形状に変化させた場合の出力電力の変動を調べた。

図16は、水車へ流入する流量の変動周期が100、10、1秒のそれぞれの場合において、流入する水の仕事率と発電機の出力電力の時刻歴を表したものである。変動周期が100秒のとき、流入する水の仕事率の振幅に対する出力電力の振幅の割合は約47.3%であるのに対し、変動周期が10秒のときは約15.2%、1秒の時は約1.6%となっており、流量の変動周期が短くなるほど出力電力の変動が抑制されていることがわかる。これは、発電機へ伝達される動力の変動を水車が平滑化したものと考えられる。すなわち、水車の慣性モーメントが流量変動に対して十分大きく運動エネルギーを十分に蓄えることができたため、水による流入動力が低下してもそれを補うように発電機へ動力を供給することができたと考えられる。

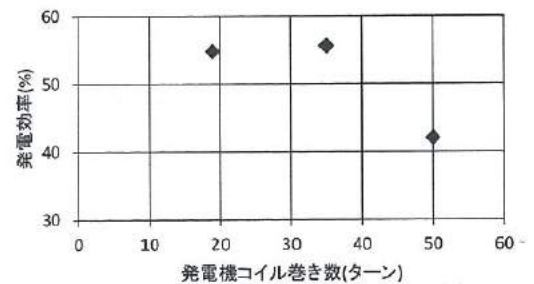
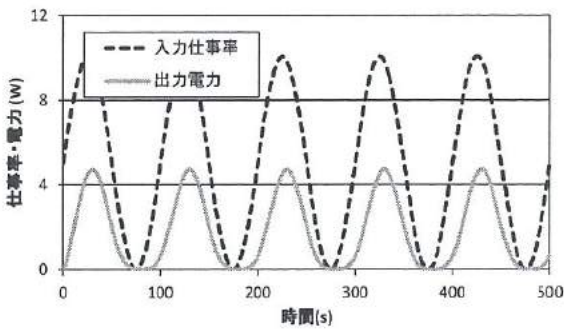
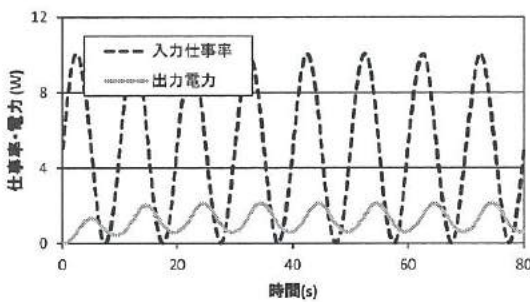


図 15. 発電機コイル巻き数と発電効率の関係(ギヤ比100の場合)

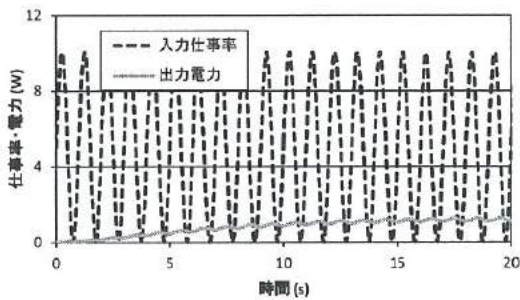
Fig. 15. Relationship between the numbers of coil turns and power generation efficiency at 100 gear ratio of the transmission



(a) 流量の変動周期が 100 秒の場合
Flow fluctuation period of 100 second



(b) 流量の変動周期が 10 秒の場合
Flow fluctuation period of 10 second



(c) 流量の変動周期が 1 秒の場合
Flow fluctuation period of 1 second

図 16. 入力仕事率と出力電力の時間応答

Fig.16. Time response of input flow power and output electric power

7. 結言

本研究では極低容量の水力発電システムについて、システムの最適化に向けた基礎検討として、動特性シミュレータを活用した発電効率の検討および流量変動に対する出力電力特性の検討を行った。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 極低容量の水エネルギー源の活用を想定して、水の落差による仕事率が 50W 程度の規模の開放ホイール型水車と直流発電機を用いた発電システムの最適化に向けた基礎的な検討を行った。
- (2) 発電システムを流路部、水車部、変速機部、発電機部の各要素に分割して、それぞれ動特性のモデル化を行うとともに、各要素の試験装置を製作しモデル式の係数同定を実施した。
- (3) モデル化した各要素を動特性シミュレータへ入力し、発電システムの動特性フルシミュレータを構成することができた。
- (4) 定常状態における発電効率について検討し、ギヤ比と発電機コイル巻き数の組み合わせが最良となるものを選定できた。
- (5) 流入流量の変動に対する出力電力の変動について検討し、開放型ホイール水車の慣性モーメントが出力電力変動の抑制に大いに役立っていることが見出された。

極低容量水力発電システムの最適化に向けた今後の検討課題を以下に示す。

- (1) 最適化のためには、各要素の動特性とくに流路部と水車部の運動特性の詳細なモデル化を行い、より実態に近いシミュレーションを行う必要がある。
- (2) 動特性係数の同定のためには試験装置を用いた大量のデータ取得が必要となるため、同定にかかる費用と時間を軽減する工夫が必要である。
- (3) 発電システムの最適化のためには、パラメータとなり得る動特性に関わるすべての係数の最適化を同時に行う必要がある。
- (4) システム設計や実現可能性検討などの現実問題に対応するためには、実際の装置の製作や設置などに要する費用や時間に関する評価関数を最適化に要する条件として組み込む必要がある。

文 献

- (1) 環境省地球環境局地球温暖化対策課小水力発電情報
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/shg/page01.html> (2012年5月24日参照)
- (2) 全国小水力利用推進協議会 小水力技術
<http://j-water.jp/hmc/042%20Turbine%20Gen.html> (2012年5月24日参照)
- (3) 株式会社エイワット 小水力発電
<http://www.ciwat.co.jp/product/water/index.html> (2012年5月24日参照)

V. 受動的歩行ロボットの開発

Development of Passive Dynamic Walking Robot

水上 慎太郎 若崎 祥人 上野 実
MIZUKAMI Shintaro WAKASAKI Yoshito UENO Minoru
釣谷 浩之 金森 直希 杉森 博
TSURITANI Hiroyuki KANAMORI Naoki SUGIMORI Hiroshi

Abstract

Walking form is classified into active walking and passive dynamic walking. Actuator or motor, sensor for control walking are used for active walking. On other hand, these systems are not needed for passive dynamic walking. Passive dynamic walking is a stable walking action using energy of the gravity and pendulum motion without any actuators, sensors and controls. This mechanism is high energy efficiency and it has been applied to some toys which walk down a slope, for a long time. The passive dynamic walker is able to walk continuously, even if it is also pushed in small force. In this study, passive dynamic walking robot which could transport the cargo by the human support, was developed.

1. 緒言

歩行の形態を大別すると、受動歩行と能動歩行に分けられる。一般の2足歩行ロボットは、アクチュエータやモータ等の動力を用い、センサによる制御をおこなって歩行している。これに対し、受動歩行は、動力や制御を必要とせず、単純な構造で構成可能でありながら、歩行が可能であるとされている。また、この歩行形態は、人の歩行に近く、エネルギー効率も非常に高いといわれている。このため、一層の省資源・省エネルギーの徹底が求められている昨今において無視できない機構と言える。

近年、ヒトの歩行を模したロボットが活発に研究・開発されているが、専ら一般に広く知られている成果は能動歩行を採用したものである。その一方で、受動歩行の原理そのものは、古くから坂を下るおもちゃに利用されるなど、経験則的に知られているものの、受動歩行を利用したロボットの開発は決して盛んとは言えない。

本研究では、人間が後ろから推進力を与えるとともに、補助的に姿勢を制御する役割を担うことでロバスト性を高め、平地においても歩行可能な受動的歩行ロボットの開発をおこなう。また、車輪機構を併せて採用する事で、幅広い環境下での使用が可能な車輪併用型の荷物運搬用受動的歩行ロボットの開発を目的とする。

2. 受動歩行の概要

2足歩行の流れは、支持脚が体重を支える立脚期と、足底が地面から離れた遊脚が前に振り出される遊脚期の2期に分けられる。

2本の脚が交互にこの2期を繰り返して歩行している。受動歩行では、アクチュエータやモータを使わず、重力及び位置エネルギーを動力として歩行する。また、歩行を安定にするためのフィードバック機構が動作の中に内在しており、姿勢制御を必要としない。このためエネルギー効率は能動歩行より優れる事が特長としてまず挙げられる。また、受動歩行は能動歩行よりも機構が簡易である事から開発費用も抑えられる。その一方で、受動歩行は外部から積極的に姿勢制御を行わないため、外乱に弱い、動きの自由度が低い、歩行を為す条件が狭いといったロバスト性の低さが欠点である。

3. コンセプトと検討事項

< 3. 1 > 従来の荷物運搬方法の問題点

日常生活における一般的な荷物の運搬方法を次に示す。

- (1) 人が荷物を直接持って運ぶ。
- (2) 車輪を用いて荷物を乗せて運ぶ。

(1)は最も簡単な方法であるが、荷物が重い場合は作業者に負担がかかる上、多くの荷物を一度に運搬できないという短所がある。(2)は凹凸の少ない平坦面では運搬しやすいが、地面の起伏が大きい不整地等では走行時に不安定になりやすく、作業者に負担がかかってしまう。道路の舗装化が進み、手押し車等が普及している昨今、荷物を運搬する環境は十分整備されているといえるが、不整地など、手押し車の性能を十分発揮できない環境においては、より効率よく楽に運搬できる方法があると考えられる。

本研究では、手押し車の長所を残しつつ、不整地などでも安定して荷物を運搬できる受動的歩行ロボットを検討した。

< 3. 2 > 受動歩行機構と全体構想

受動歩行の機構を大別すると以下の3つの機構が挙げられる。

- (1)前後に脚を配置した、2足前後タイプ
- (2)ひざ関節を持たず腰関節だけのコンパスタイプ
- (3)ひざ関節を持ったひざ有りタイプ

ここで(1)の2足前後タイプは、機体を前後に揺動することで、いずれかの脚に重心を移動して支持脚とし、その間に遊脚を前に振り出すもので、坂道を下る玩具などに用いられている。(2)のコンパスタイプは、腰関節で保持された脚を交互に振り出す機構であるが、支持脚と遊脚の長さは同じであるため、そのままでは振り出した遊脚が床面に接触することとなる。このため、(2)-1 機体を左右に揺動させ、支持脚側に傾いている間に遊脚を振り出すものや、(2)-2 路面上に飛び石を置き、この上に支持脚を接地させ、遊脚が路面に触れないように振り出し歩行するものがある。(3)のひざ有りタイプは、遊脚が振り出される際、大腿部が先に戻ろうとするため、ひざ関節が屈曲し、見かけの脚の長さが短くなることにより、床面に足底が接触することなく歩行できるものである。

荷物の運搬という目的を考慮した場合、揺動の大きい(1)、(2)-1は好ましくないと考えられる。また(2)-2は歩行できる路面が限定されるため実用的ではない。これらのことから、今回は(3)のひざ有りタイプの受動歩行を歩行機構として採用する。

また、舗装路などの平坦面では車輪による走行の方が速く運搬できると思われるので、平坦面では車輪による運搬に切り替えが可能な構造を検討する。全体構想のイメージを図1に示す。

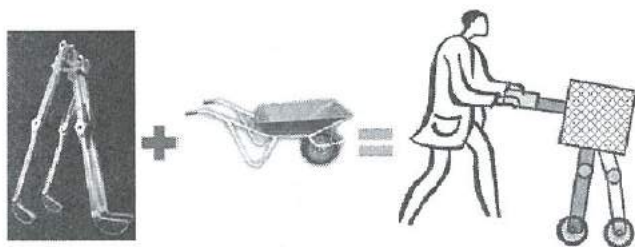


図1 受動的歩行ロボットの完成イメージ

Fig.1.Completion image of passive dynamic walking robot.

4. 受動歩行動作の解析

< 4. 1 > 受動歩行型玩具の動作解析

受動的歩行ロボットを製作する前に、3. < 3. 2 > 項(1)に代表されるアヒルの形をした受動歩行玩具を例にとって解析を行

った。このアヒル型玩具は、前脚と本体が一体化しており、後脚のみが本体中央の軸を中心として、歩幅分だけ回転できるようになっている。前脚および後脚の接地面は揺動しやすいうように円弧形状となっており、この玩具を付属の斜面に置くと、体を前後に揺動しながら一定速度で斜面を下る。玩具の外観および動作の様子を図2に示す。玩具全体の重心は後足の軸のわずかに上に位置しており、平面上に静止させた状態では、図2の①のように脚を開いた状態で、後脚で起立する。また、玩具を斜面上に静止させた場合は、脚を閉じた状態で②のように、前脚で起立する。

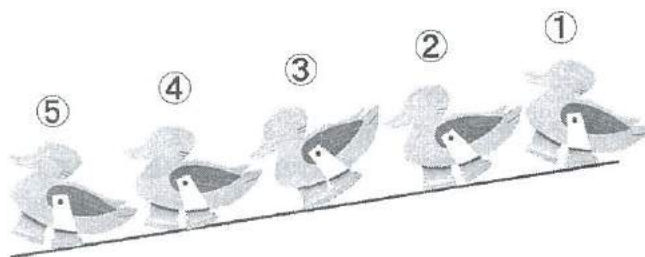


図2 アヒル型玩具の歩行

Fig.2.Walking of a duck toy.

玩具を動作させるには、①の状態では斜面上に置かず、②の状態ではわずかに玩具を前後に揺動させるだけでよい。この時の①から⑤の動作は以下のとおりである。

- ① 後脚に荷重がかかっており、重心は接地箇所よりも前にあるので前方に倒れるように進む
- ② 倒れこむに従い重心が前に移動し、足が開いた状態で、前脚に接地箇所が移動する
- ③ 後脚が前脚にぶつかるように前方に移動(回転)して足が閉じるとともに、前脚に荷重がかかり前方に倒れそうになるが、接地点よりも後方に重心があるため倒れずに後方に戻ろうとする力が働く
- ④ 後ろに倒れこむようにして、後脚に荷重が移動し、足が開く
- ⑤ ①と同じ状態となり再び②から④の動きを繰り返す

これらの動きから、前傾の時は接地点より重心が後方に、後傾の時は前方に移動するような動きをすることで、転倒しないためのフィードバックを行なっていることがわかった。これは外部からの積極的な姿勢制御ではなく、動きの中にフィードバック機構が内在しているといえる。

また、斜面の傾斜を初期角度の8°から9°に変更しただけで、前後の揺動が大きくなりすぎ、3歩程度で前のめりに転倒する結果となった。これは、歩行を制御するフィードバックが収束しきらず、接地点よりも重心が前方に移動してしまったことが原因だと考えられる。坂道で補助なく自立的に歩行するにはフィードバックが収束する条件(前傾時に接地点よりも後方に重心がある状

態) でなければ歩行しないことがわかった。

<4. 2>コンパスタイプの受動歩行機

次に歩行実験と解析を目的として、コンパスタイプの受動歩行機の製作を行った。コンパスタイプの受動歩行機は、製作が比較的容易で解析も行きやすい構造のため、これを用いて歩行に対して寄与率の高いパラメータを抽出し、歩行性能やロバスト性を確認した。

今回製作したコンパスタイプの受動歩行機の写真を図3に示す。操作性や実験規模を考慮し脚の長さを370mmとした。左右方向に倒れないようにするため4脚とし、中央の2脚(中脚)と外側の2脚(外脚)はそれぞれ連結部材で一体化している。中脚と外脚は腰部のシャフトでベアリングを介して結合しており、独立して回転する構造となっている。また、35gと70gのウェイトを用意し、任意の箇所に取り付け、歩行の安定性の評価ができるようにした。足底は半径16mmの円弧状になっている。足底には当初、衝撃吸収の目的で空洞の半円状のゴムを採用したが、着地の際のバウンドが大きく、変形により歩行動作が不安定であった。そこで、安定性を向上させるためプラスチック製とした。また、滑り止めのゴムを底面に貼ることにより安定して接地することが出来るようになっている。

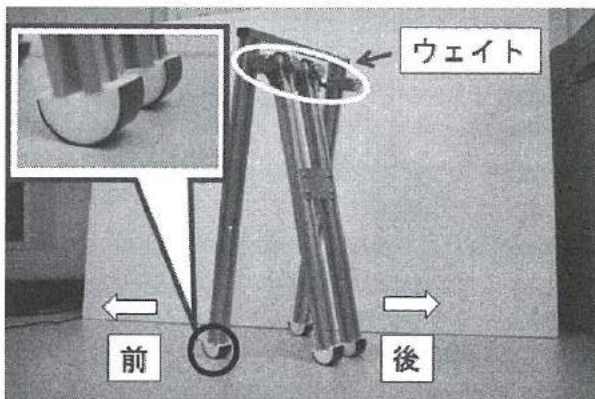


図3 コンパスタイプ受動歩行機
Fig.3. Compass type biped walking robot.

このコンパスタイプの受動歩行機を用いて歩行実験を行った。平坦な路面では中脚と外脚の長さが同じであるため、脚を振り出した際に地面と接触してしまい転倒してしまう。このため、間隔を任意に変更可能な100×140×20mm程度の飛び石状の板を斜面に配置した。また、予備実験で歩行機の脚の角度などの初期条件の僅かな違いにより、歩幅や歩数など歩き方が大きく異なることが判明したため、歩行機の各脚の初期角度を一定にできる治具を作成し、斜面に設置した。製作した斜面の写真を図4に示す。

予備実験の結果から斜面の傾斜が5°の時に最も歩数が多かったことから、傾斜の角度は5°とした。また、ウェイトについて

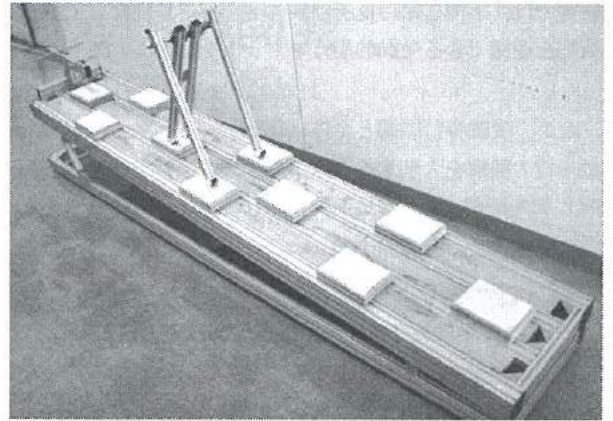


図4 コンパスタイプ受動歩行機用斜面
Fig.4. Slope for Compass type biped walking robot.

は、進行方向に対し後ろ側の腰関節付近に中脚35g、外脚70gのウェイトをそれぞれ取り付けた際、最も歩行が安定したため、この状態で歩行に最適な条件を導出する歩行実験を行った。ウェイトを取り付け安定するのは、直立させた際、足底の接地点よりも歩行機の重心が後方になるためと考えられる。

図5に歩行に対し寄与率が高い因子と思われる中脚・外脚の初期角度 θ_1 と θ_2 を示す。歩行実験ではこの θ_1 と θ_2 を変えて歩行可能な歩数を測定した。測定結果を表1ならびに図6に示す。測定はそれぞれの条件でn=5回行い、その平均を求めた。初期角度の条件により、歩数や歩幅が変化した。特に θ_2 の角度が大きくなるほど歩幅が大きくなる結果となった。そのため、その都度飛び石の位置を調整し測定を行った。また、歩数が1.0歩と示すものについては、最初に振り出した脚は着地するものの、その後機体が前または後ろに倒れてしまい、まったく歩けない状態を示している。

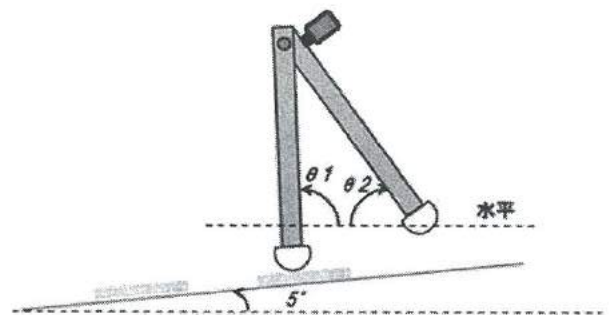


図5 歩行開始時の初期角度
Fig.5. Initial angle of beginning.

表1 初期角度と歩数

Table.1. Initial angle and the number of steps.

$\theta_1 \backslash \theta_2$	57.0°	58.0°	59.0°	60.0°	61.0°	62.0°	63.0°
91.5°	3.4	3.4	3.0	3.0	2.6	2.6	1.0
92.5°	2.8	2.8	3.0	3.4	3.0	3.4	3.0
93.5°	1.0	1.0	1.0	1.4	1.8	2.2	3.8

この実験結果から、 $\theta_1=93.5^\circ$ 、 $\theta_2=63.0$ が最も歩行に適していることが分かった。この条件で繰り返し測定した結果、用意した斜面の端部まで7歩で歩行し、更に歩き続けようとする状態が観察できた。一方、この条件から θ_1 や θ_2 をそれぞれ 2° 変えただけでも歩行できない結果となった。このことから、歩行条件が非常に狭く、限られていることがわかる。

この角度以外にも歩行に適した条件が存在する可能性はあるが、準備した傾斜台や角度固定治具では評価困難となったため、追加実験は行わないこととした。

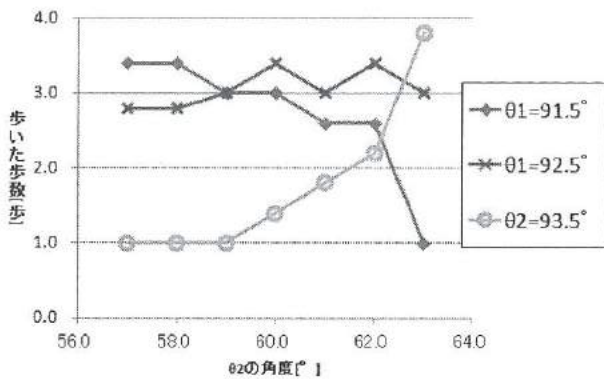


図6 初期角度と歩数
Fig.6. Initial angle and the number of steps.

5. 受動的歩行ロボットの製作と動作の確認

< 5. 1 > ひざ有りタイプ試作機の製作

以上の実験から得られた知見を基に、ひざ有りタイプの受動的歩行ロボットの試作機を製作した。まずはひざ及び腰の関節部にはベアリング・シャフトホルダを用いる事とし、使用する部材を決定した。それらを三次元CAD Solid Works によって設計し、実機を製作した。各部の仕様を表2に示す。また、図7にCAD上

表2 試作受動的歩行ロボットの仕様

Table 2. Specifications about prototype biped robot.

項目	内容
サイズ	W340×H1150×D350 [mm]
重量	8000 [g]
脚幅	200[mm]
大腿部長さ	560[mm]
下腿部長さ	570[mm]
関節部	ベアリング
脚部材料	アルミフレーム材
足底材料	ポリアセタール 半径100[mm]

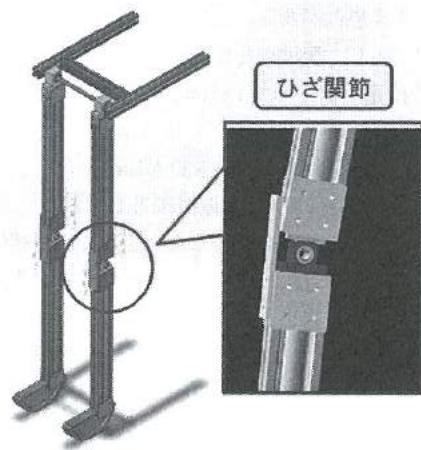


図7. CAD 上で組み立てた受動的歩行ロボットモデル
Fig.7. Biped robot model assembled in solid works.

で設計した受動的歩行ロボットのモデルを示す。

この受動的歩行ロボットは後部に操縦者が立ち、脚上部に設けられた左右のハンドルを握り、歩行させる事を想定して設計した。

また、歩行の際はひざ有りタイプの受動歩行の機構上、片方の脚を支持脚、もう片方の脚を遊脚として左右へ揺動する事となる。なお、関節部については、ひざ関節部にひざが伸びきった状態 ($\theta_0=180^\circ$) でそれ以上前方に曲がらないようひざ止めを設置した他は、特に制限を設けず自由に回転できるようにした。ここで θ_0 は、図8に示すひざ関節の角度を表している。

足底の形状は、足首が固定されていることから、接地面積の確保と滑らかな歩行を行うため、半径 100mm の円弧形状とした。ここで、ひざ関節部にロック機構やブレーキ機構等を設けていないため、支持脚として荷重が掛かった際、図8の上の図のように

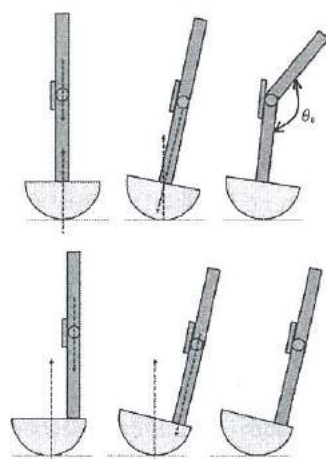


図8. 荷重と接地点に関する概念図
Fig.8. Image of relation between load and landing point.

脚の中心線上に接地点を配置した場合、わずかな外力でひざ折れが生じてしまう恐れがある。このため、図8の下の図のように足底を前方にずらし、接地点をオフセットさせた。これにより、単純な構造で荷重が掛かっている状態ではひざ折れが防止される構造とした。

以上の構造で、機構解析ソフトMD Adams上にモデルを作成し、脚を吊り下げて脚部のみを二重振り子としてみたときのシミュレート結果と、実機の動きを比較した。ここでは、腰関節部を固定部とし、ひざ関節を180°に伸ばした状態で脚を後方へ規定の角度だけ振り上げて、静止した状態から解放し、脚が最大まで振り出されるまでの、歩行における遊脚期の大腿部・下腿部の動きを比較対象とした。振り上げ角度30°のとき、振り出された脚の動きについて、実機とシミュレーションを比較した様子を図9に示す。

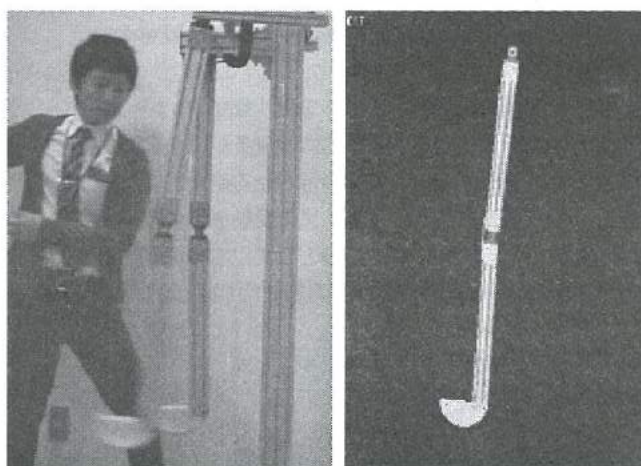


図9. 実機・シミュレーションの動作比較

Fig.9. Comparing actual machine and simulated model moving.

両者を比較した結果、実機とシミュレーションの振り出し動作は概ね一致し、シミュレーションによって得られた結果を実機へフィードバックできる事が確認された。

図10に振り出し動作におけるひざ関節と足底の鉛直高さの経時的変化を示す。また、図11に振り出してから0.39秒後と0.47秒後の脚部の状態を示す。いずれもシミュレーション結果を示している。図10において上の曲線は膝関節の鉛直方向の高さの変化を、下の曲線は足底の高さの変化を表している。鉛直方向の基準0.0は、大腿部が垂直となっている時の膝関節の座標を示している。

ひざ有りタイプの受動歩行においては、足底が地面と接触しないよう、大腿部が下腿部に先行して振り出され、足底が最も地面へ近付いた時、腰関節から足底までの見掛けの長さ、即ち距離が極力短くなる事が望ましい。図10及び図11から、この試作機の大腿部は、振り始めから0.39秒経過した時点で垂直になり、ひざの位置が最も下になっている。これに対し足底は0.47秒時点で最

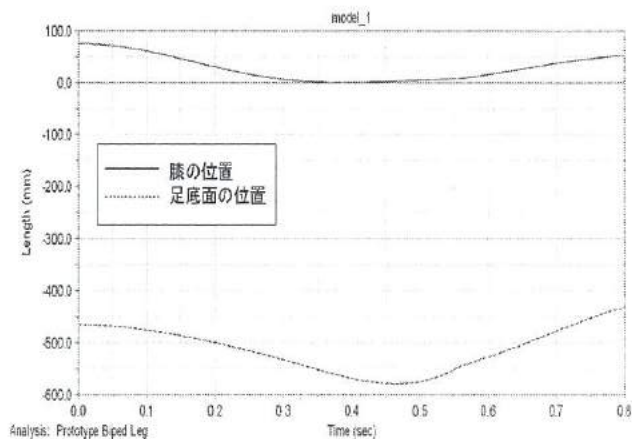


図10. 膝関節及び足底面の変位

Fig.10. Plotted displacement of knee and foot.

も下へ振れている事が判る。つまり、大腿部が先に振り出され、下腿部がその後で振り出されると言える。

また、シミュレーション上の計測では、ひざを伸ばした状態で脚全体を垂直におろした時の足底面の座標は577.8mmである。一方、図11(2)における足底の高さの座標は、図10下の曲線のピークから579.4mmであった。脚の振り出し時に大腿部が先に振り出され、下腿部がその後で振り出されているにも拘わらず、腰関節から足底までの距離が短くならない理由は、図8に示したように脚の中心軸から接地点を前へずらしたため、ひざ関節の角度によっては見かけの脚の長さが屈曲させるとかえって長くなるためである。

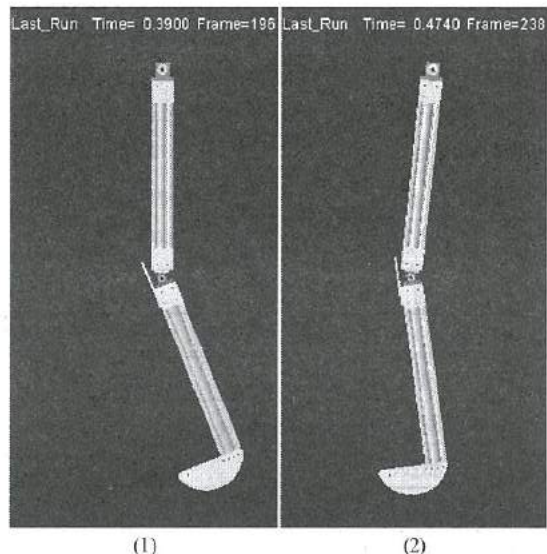


図11. 脚部全体の変位

Fig.11. Displacement of leg.

したがって、ひざ有りタイプの受動歩行において歩行可能とするには、足が床に最も近くなる時に足底と床に隙間ができるよう、大腿部と下腿部の長さや各関節の曲がり具合を工夫して、見かけの脚の長さを短くするか、または左右の脚の幅を変えて、支持脚側への傾きを調節して隙間を作る、等の方法が考えられる。

これまで脚部を2重振り子として見た場合のシミュレーションを行ったが、実際の歩行動作では腰関節が進行方向に移動するとともに高さも支持脚の角度により変化することから、試作した受動的歩行ロボットにおいて、水平な床上で歩行試験を行った。人間の歩行では、骨盤の傾斜、旋回、側方移動等により股関節の幅に対し、左右や上下の重心移動が抑制されている。しかし試作した受動的歩行ロボットでは、腰部の脚の間隔 200mm がそのまま足底の間隔となり、脚が接地するごとに左右に 200mm の重心移動が必要となる。このため、必然的に受動的歩行ロボット本体を揺動させることとなり、足底と路面の間に隙間ができることとなる。この結果、大まかな基本寸法のみで設計したにも関わらず、人間の歩行と同様実際に歩行させられる事が確認された。従って、この試作機のように人が後ろから外力を与え、補助的に操縦する受動的歩行ロボットは、コンパスタイプの受動歩行機などに比べてロバスト性が高く、道具として十分に有用な可能性があるという事が言える。

作成した脚部の振り出しが受動歩行に適したものであるか確認した。重心移動による左右の揺動の影響を極力小さくするため、左右の脚の間隔を 200mm から 60mm に変更して、歩行実験を行った。この結果、受動的歩行ロボットを支持脚側へ倒す揺動幅が小さくなり、遊脚を振り出す際に足底が地面へ引っ掛かりやすくなり、歩行を満足に行う事が出来なくなった。

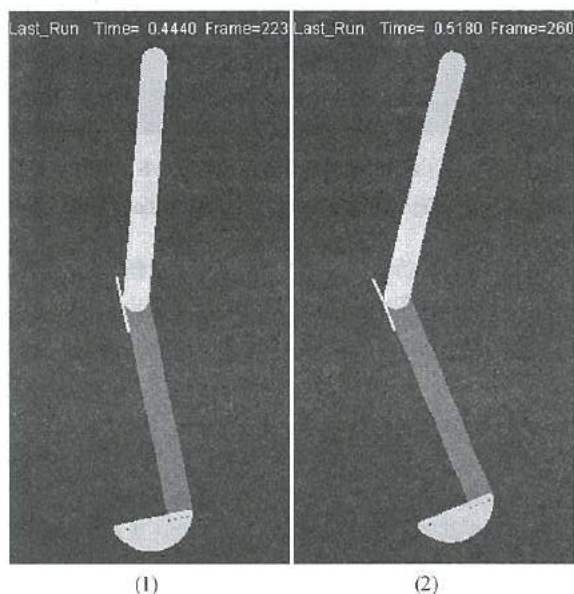


図 12. 振り出し周期の比較

Fig.12. Comparison of swing cycle.

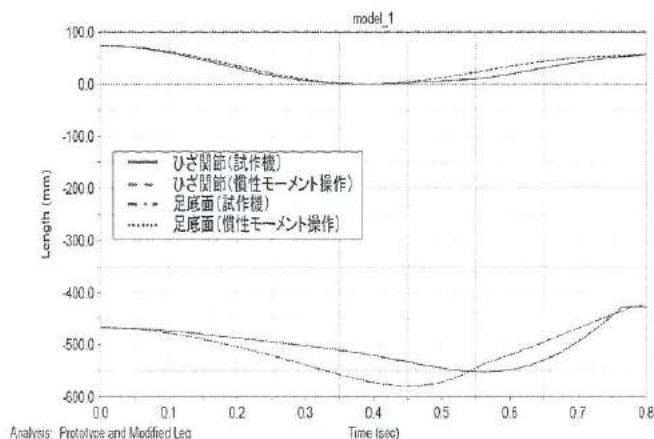


図 13. 膝関節及び足底面の周期比較

Fig.13. Comparing plotted displacement of knee and foot.

< 5. 2 > シミュレーションによる試作機の解析

以上の事から、ひざ有りタイプの受動歩行では、大腿部の振り出しを大きくし、ひざ関節の屈曲角度を大きくすることで、安定的に歩行させられると考えた。このため、機構解析ソフトで大腿部・下腿部それぞれの重量・重心位置を変化させて、動作シミュレーションを行い、理想的な慣性モーメントを探索した。この中で、大腿部に対する下腿部の重量の比率を小さくし、大腿部・下腿部それぞれの重心を膝関節へ近付けたときに得られた結果を次に示す。図 12 は(1)に試作機のモデル、(2)に慣性モーメントを変化させたモデルの、それぞれ足底と地面との距離が最短となった瞬間を示し、比較した図である。

図 13 は、図 12 で用いたものと同じ条件において得られた膝関節・足底の変位をプロットしたものである。上二つの曲線は膝関節の、そして下二つの曲線は足底の鉛直高さの変化を表している。

この曲線から、試作した受動的歩行ロボットの脚も慣性モーメントを操作した脚も共に大腿部が先に振り出され、下腿部がその後振り出される条件を満たしている事が判る。しかし足底の曲線に注目してみると、慣性モーメントを操作した脚は、試作機の脚に比べて足底が高い位置を通過している。この事から、大腿部と下腿部の重心は膝関節に近い方がより受動歩行に適していると言える。

< 5. 3 > 試作機の改造

シミュレーション結果を基に、受動的歩行ロボットの試作機の改良を行った。その際、運搬用の道具として扱い易くするため軽量化も実施した。当初の試作機は 8000g の重量で、脚部の長さも操縦者の脚よりも専ら長く、取り回しに難が有った。このため、この点も考慮に入れて改良した。まずベアリング・シャフトホルダ等の材質を軽量化するとともに、大腿部・下腿部のアルミフレームの長さを変更し、成人男性の平均的な脚の長さと同じとした。

また、重心位置の変更と軽量化のため、下腿部に用いていたアルミフレームの寸法を 30mm×60mm 角から 30mm×30mm 角へと変更した。さらに軽量化された足底を取り付けた。図 14 に改造後の受動的歩行ロボットを示す。

上記の改良を施すことにより、当初の試作機と比べて安定した歩行が可能となった。これは、脚を前に振り出した際に足底と地面との間のクリアランスがより大きくなり、足底を引きずりにくくなったことが要因と思われる。これによって意識的に左右に揺動させる必要もなくなり、より安定して歩行できるようになった。

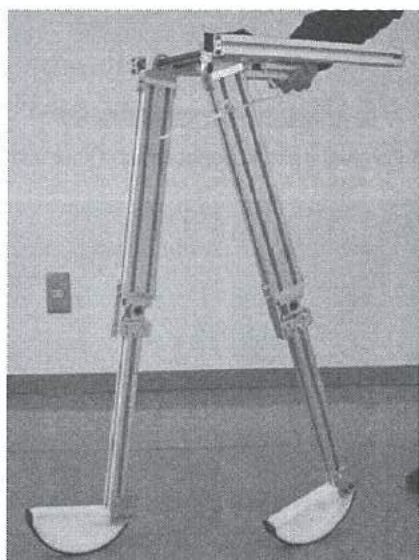


図 14. 軽量化した受動的歩行ロボット
Fig. 14. Lightweighted biped robot.

< 5. 4 > 運搬用受動的歩行ロボットの製作

これまでの結果を踏まえ、最終目的である荷物運搬用受動的歩

表 3. 運搬用受動的歩行ロボットの仕様

Table 3. Specifications about biped robot for transportation.

項目	内容
全体サイズ	W527×H900×D800 [mm]
重量	7500 [g]
籠サイズ	W315×H260×D440 [mm]
脚幅	395[mm]
大腿部長さ	434[mm]
下腿部長さ	444[mm]
関節部	ベアリング
脚部材料	アルミフレーム材
足底材料	ポリアセタール 半径78[mm]



図 15. 運搬用受動的歩行ロボットのモデル

Fig.15. Completion image of biped robot for transportation.

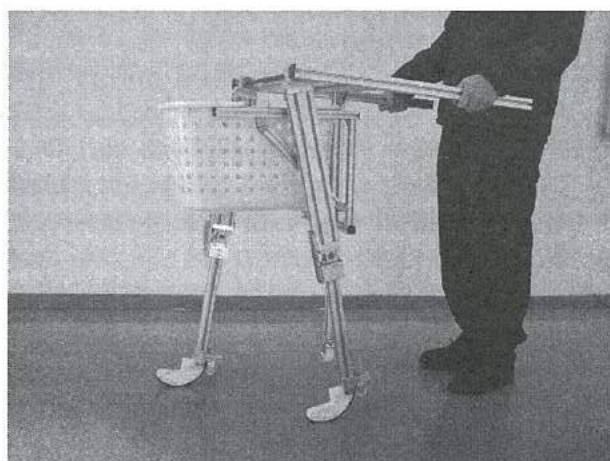


図 16. 運搬用受動的歩行ロボット

Fig.16. Biped robot for transportation.

行ロボットの作成を行った。脚部の基本構造は軽量化した試作機を基本的にそのまま用い、荷物積載用の籠を載せるアルミフレーム枠と車輪を取り付け、荷物を運搬可能にした。CADによる設計図を図 15 に、完成した運搬用受動的歩行ロボットの外観を図 16 に示す。また、仕様は表 3 のとおりである。

運搬用の籠については、左右に振り分けると、機体の横幅が広くなり、同じ重量を積載した場合、一つひとつの籠が小さくなるため、機体中央部に一つ設置することとした。また、設置位置については、重心位置を下げるため、両脚の間に吊り下げる構造とした。このため、両脚の間隔を籠が入るよう広げ、籠の脱着が可能な固定用の枠を配置した。

車輪機構は、受動的歩行ロボットを定置させるためのスタンド用の脚を機体後方に設置し、この部分に自在キャスタを配置するとともに、脚部先端の踵にあたる部分に固定キャスタを取り付けた。脚部に取り付けたキャスタは、両脚を前方へ30°振り出すと接地する位置で固定した。(図17)

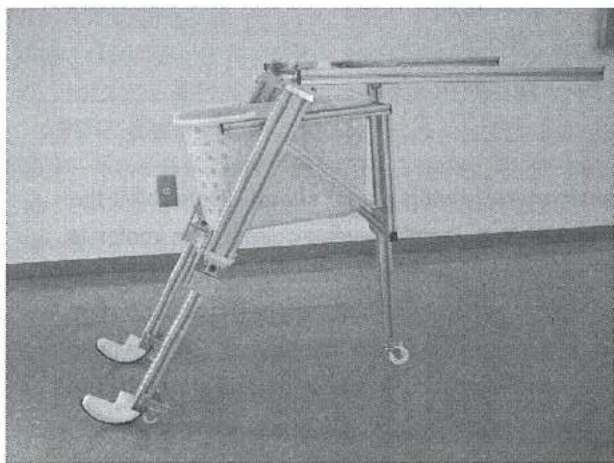


図 17. キャスタ運搬時

Fig.17. Wheel transportation mode.

製作した運搬用受動的歩行ロボットの動作試験を行ったところ、歩行移動が可能であった。また歩行動作と車輪走行の切り替えについては、機体を後方に倒す、または持ち上げるだけで容易に可能であった。しかし歩行の途中で振り出しの周期やバランス等の歩容が乱れ易く、操縦する際慣れが必要であった。車輪走行に関しては、歩行機構と両立させる関係上、キャスタ径が小さく、脚の固定が弱くバランスが悪いなどの問題があった。このため、一般に充分使える道具とするには、改善すべき課題が残った。

6. 結言

本研究では不整地などでも安定して荷物を運搬することを目的とし、受動歩行を利用した荷物運搬用受動的歩行ロボットの構造検討・製作を行った。その結果、下記の知見が得られた。

- (1) コンバスタイプの受動歩行機は、脚の初期角度の条件が非常に狭く限られている。
- (2) ひざ有りタイプの受動的歩行ロボットは、大腿部よりも下腿部を軽くし、大腿部および下腿部の重心を膝近くにすることで、大腿部の振り出しが大きくなり、足底を引きずりにくい動作をすることが分かった。
- (3) 製作したひざ有りタイプの荷物運搬用受動的歩行ロボットは、操作には多少の慣れが必要であるが、荷物を運搬できることが確認できた。

文 献

- (1) 池俣吉人 他,日本ロボット学会誌,Vol. 30 No.4,pp.350-355
- (2) 名古屋工業大学 藤本研究室・佐野研究室,
http://drei.mech.nitech.ac.jp/~fujimoto/sano/walk_jpn.html
- (3) 中村和志,よくわかる筋肉・関節の動きとしくみ,秀和システム
- (4) AIST 人体寸法データベース 1991-92
<http://riodb.ibase.aist.go.jp/dhbodydb/91-92/>

VI. 積層鋼板の磁気特性に関する研究 (2)

Study on Magnetic Properties of Electrical laminated Steel Sheet (2)

藤岡 英示
FUJIOKA Eiji

浅田 峯夫
ASADA Mineo

上野 実
UENO Minoru

丹保 浩行
TAMBO Hiroyuki

横山 義之
YOKOYAMA Yoshiyuki

谷野 克巳
TANINO Katsumi

丹保 豊和
TAMBO Toyokazu

Abstract

Electrical laminated steel sheet is used for cores of transformers, motors, and so on. Generally, the characteristics of low core loss, high magnetic flux density and high permeability are required. The motor is magnetized by a PWM (Pulse Width Modulation) inverter which can easily control the velocity. In this study, we intend to make clear the characteristics of lamination cores composed of soft magnetic materials and electric steel sheet (ES), and one of purpose is to reduce the material cost of the motor due to the insertion of soft magnetic material. Additionally we examined the influence of temperature on magnetic properties, and iron loss of the lamination core under different PWM wave excitation.

As a result, the lamination core loss $W_{10/400}$ of ES, SUY, SPC was 38.3(W/kg), 72.4(W/kg), 93.4(W/kg), whereas the ES/SUY lamination core was 49.2(W/kg), the ES/SPC lamination core was 53.5(W/kg). We consider that these results are due to the difference of the hysteresis loss and the eddy current loss between them. Iron loss and magnetic flux density decreased with the increase of the core temperature. In addition, iron loss of the PWM wave excitation was larger than that of a sine wave magnetization. We consider that this result is due to minor loop.

1. 緒言

近年、地球環境の観点から次世代自動車としてCO₂を全く排出しない電気自動車(以下、EVと略記)が急速に注目を集めている。一般に、EV用モータの鉄心材料には無方向性電磁鋼板の積層コアが用いられている。前回の報告¹⁾では、無方向性電磁鋼板を中心に各種磁性材料の磁気特性について検討した。しかし、電磁鋼板は通常の鋼板と比べて高価であり、モータの低コスト化を図るためには積層コアを電磁鋼板だけで構成するのではなく、安価な電磁軟鉄と組み合わせて構成することが一つの方法として考えられる。

そこで、本研究ではEV用モータ用積層コアの低コスト化を目的として、電磁鋼板と電磁軟鉄を積層したコアを作製し、鉄損などの磁気特性にどのような影響を及ぼすかについて検討した。さらに、モータの回転速度制御が容易なPWM(Pulse Width Modulation)波励磁下における磁気特性について検討を加えた。

2. 実験方法

<2. 1>積層コア材料

積層コアを構成する試験材料として、接着層付無方向性電磁鋼板50A400(以下、Si鋼と略記)、トランスのコア材などに使用される極低炭素純鉄材SUY-0材(以下、SUYと略記)、金属ケース

などに使用される冷間圧延鋼板SPCC材(以下、SPCと略記)、および炭素工具鋼であるSK材を選んだ。材料の選定では市場の流通性や単価などを考慮した。また、積層コア全体の有効な磁化²⁾と加工性を考慮して、コア材料の板厚は0.5mmとした。コア材料の薄板化は渦電流損の減少にも寄与する。

<2. 2>積層コアの作製

板厚が0.5mmの試験材料から外径35mm、内径25mmのリング状試料を作製した。試料の加工には、熱による磁氣的損失増大を考慮して放電加工機(DWC110SA、三菱電機製)を用いた。次に、接着剤付Si鋼板は蒸留水、SPC、SUY、SK材はアセトンで超音波洗浄を行った。また、試作した加圧治具を使用して推奨加圧力98N/cm²でリング試料を積層接着した。この時、加圧治具の

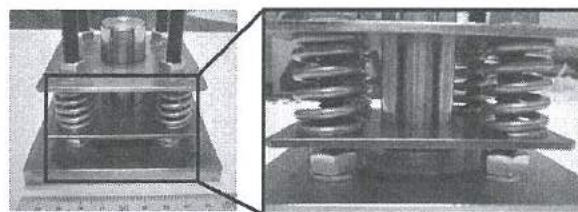


図1. 試作した加圧治具

Fig.1. Original pressurization jig.

プレートと接着剤付 Si 鋼とが接着しないように、試料とプレート
の間にフッ素樹脂シートを挿入した。図 1 および図 2 は試作した
加圧治具の写真と積層コアの作製方法を示す。積層したリング試
料を加圧した状態で高温槽中 200℃、30 分間保持すると、Si 鋼表
面の接着剤層が融解、硬化して厚さ約 10.5mm の積層コアが完成
する。

< 2. 3 > 測定方法

鉄損とは試料をコイルで励磁した時に試料中で消費される電
力のことをいう。正弦波励磁下での鉄損および最大磁束密度は、
リング試料に励磁コイル（1 次側 40 ターン）と検出コイル（2 次
側 40 ターン）を巻き、B-H アナライザ（SY-8258、岩通計測機製）
を用いて測定した。図 3 は巻線した積層コアの概要を示す。

飽和磁束密度および保磁力の測定には試料振動型磁化測定装
置（VSM-5AUTO、東工工業製）、成分分析には蛍光 X 線分析装
置（RIX3100、リガク製）を用い、比抵抗の測定は 100 mm×10 mm
の大きさに加工した試料をミリオームハイテスタ（3540、日置電
機製）による四端子法で測定した。ただし、Si 鋼の比抵抗の測定
には予め接着層および絶縁層を研磨によって除去した試料を用
いた。

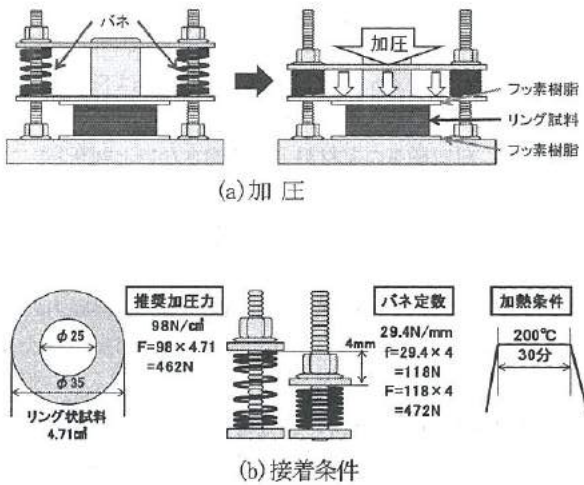


図 2. 積層コア作製方法

Fig.2. Manufacture method of lamination core.

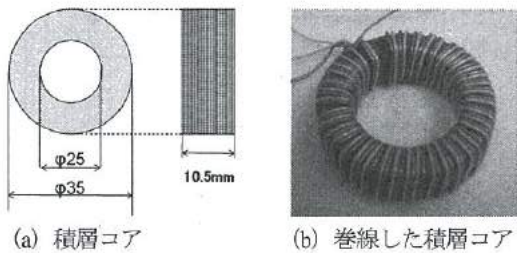


図 3. 積層コアの概要

Fig.3. Appearance of lamination core.

< 2. 4 > PWM 波励磁による鉄損測定方法

EV 用モータの制御に用いられている PWM 駆動とは、パルス
間隔を一定にし、パルスの幅を変化させて擬似的なアナログ波形
を生成する方式である。図 4 は 2 レベル PWM 波形（以下、2-PWM
と略記）、3 レベル PWM 波形（以下、3-PWM と略記）および PWM
波による鉄損測定の概要を示す。一般に、2-PWM は蛍光灯など
の照明器具に、3-PWM は主にモータ駆動に用いられている。前
回の報告と同様に、鉄損の測定方法はリング状試料の 1 次側コイ
ルに流れる電流波形と、2 次側コイルに誘起される電圧波形を乗
算することで試料の鉄損を求めた⁹⁾。ここで、正弦波励磁におい
てデジタルオシロスコープと B-H アナライザによる鉄損測定値
の差異がほとんどないことを確認した後、磁束密度 1T（T はテス
ラ）、基本周波数 200Hz および 400Hz の時の鉄損を測定した。こ
の時の変調度は 90%、キャリア周波数の次数は 24 次、すなわち、
パルス波（変調波）の周波数を 4.8kHz および 9.6kHz とした。

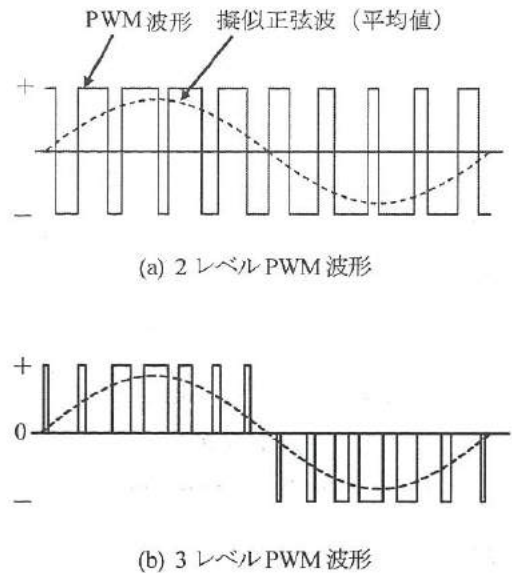


図 4. PWM 波による鉄損測定の概要

Fig.4. PWM waves and schematic diagram of iron loss measurement.

3. 結果と考察

< 3. 1 > コア材料とその磁気特性

鋼板の分析結果から、Si 鋼の Si 添加量は 2.1% および Fe 含有量は 97.3%、SUY の Fe 含有量は 99.4% で他に Mn や P などが含まれていた。SPC の Fe 含有量は 99.7% と純鉄に近かった。また、Si 鋼、SUY、SPC および SK 材の体積抵抗率 ρ はそれぞれ $39.8 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $12.5 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $10.6 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $21.7 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ であり、Si 鋼は他の材料と比べ 2~4 倍高いことが分かった。ここで、SUY については $1\text{--}2 \times 10^3 \text{ Pa}$ の真空中 850°C 、3 時間の熱処理後、 60°C まで炉冷する磁気焼鈍を施すことで磁気特性を向上させた。

鉄損の表記は JIS で定められており⁽⁴⁾、特に周波数 $f(\text{Hz})$ 、最大磁束密度 $B_m(\text{T})$ で磁化した場合の記号を $W_{10B_m/f}$ で表す。例えば、鉄損 $W_{10/50}$ とは最大磁束密度 1.0T、周波数 50Hz における鉄損をいう。また、磁化特性は、ある磁界 $H(\text{A/m})$ に対応する磁束密度を $B_{0.01H}$ で表す。例えば、 B_8 とは磁界の強さが 800 A/m における磁束密度をいう。また、想定している EV 用同期モータは、電源周波数 50Hz 付近は低速域、400Hz 付近は中速域、1000Hz 付近は高速域のため、本研究では、前報と同様に 400Hz、1T の鉄損 $W_{10/400}$ を中心に測定した。

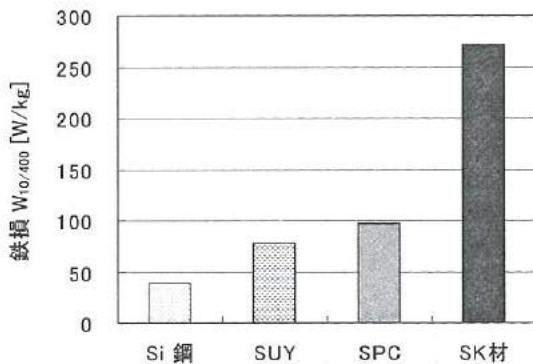


図 5. コア材料の鉄損

Fig.5. Iron loss of various steel materials.

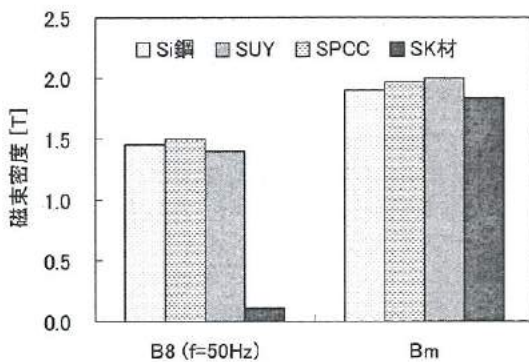


図 6. コア材料の最大磁束密度

Fig.6. Maximum magnetic flux density of various steel materials.

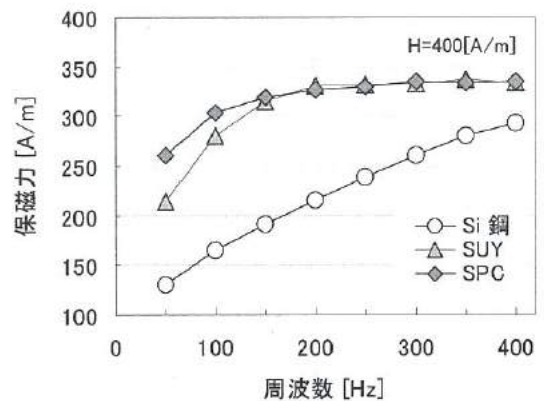


図 7. コア材料の保磁力

Fig.7. Frequency dependence of coercive force of core materials.

コア材料として選んだ Si 鋼、SPC、SUY、SK 材について、鉄損 $W_{10/400}$ 、磁束密度 B_8 、飽和磁束密度 B_m を測定した。図 5 はコア材料の鉄損、図 6 はコア材料の最大磁束密度を示す。図 5 より、鉄損は Si 鋼、SUY、SPC の順に大きくなり、SK 材は Si 鋼と比べて 6 倍以上である。図 6 より、最大磁束密度 B_8 は Si 鋼、SUY、SPC とともに約 1.5T であったが、SK 材は 0.1T と極端に小さかった。この結果、SK 材は磁気コア材料として適さないと判断し、これ以後は試料対象から除外した。

図 7 は磁界が 400 A/m の時のコア材保磁力の周波数依存性を示す。図より、50Hz では保磁力は Si 鋼が最も小さく、SUY、SPC の順に大きくなるが、150Hz 付近で SUY と SPC の保磁力の増加は鈍化するのに対し、Si 鋼では 400Hz まで保磁力が増加した。

< 3. 2 > コア材料の積層数と磁気特性

ここまでは単層のコア材料の磁気特性に対して検討を加えたが、ここからはコア材料を積層することによって鉄損がどのよう

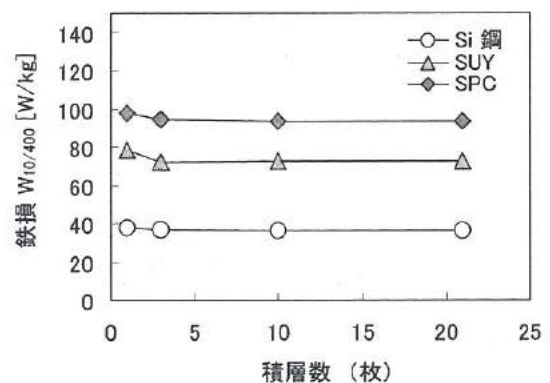


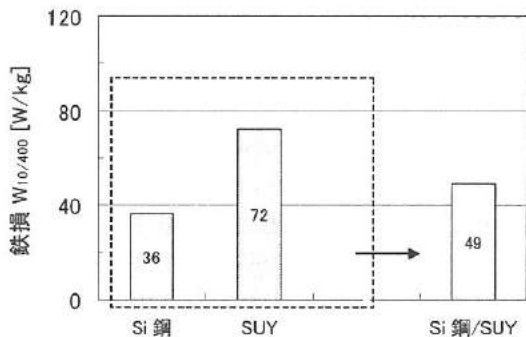
図 8. コア材料の積層数と鉄損

Fig.8. Lamination number dependence of iron loss.

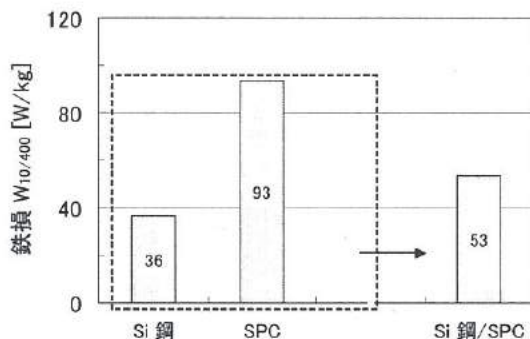
に変化するかを調べた。図8はSi鋼板、SPCおよびSUYの積層数と鉄損の関係を示す。測定の結果、各材料とも積層数1~3枚までは鉄損に減少傾向が見られたが、積層数3枚から21枚までの間には大きな変化は見られなかった。

<3. 3>異種金属の積層と鉄損

次に、Si鋼、SUY、SPCをそれぞれ21枚積層したコア材、Si鋼11枚とSUY10枚を交互に積層したコア材、同様にSi鋼板11枚とSPC10枚を交互に積層した5種類のコア材を作製し、その磁気特性を測定した。Si鋼を含む積層コアは、Si鋼に接着剤層があるため加熱圧着して作製した。一方、SUYもしくはSPCだけで構成する積層コアは、コア材同士が接着できないため、21枚をできる限り密着させて測定用試料とした。図9は積層コアの鉄損の一例を示す。この結果、異なる材料を積層すると、鉄損は個々の鉄損の平均値よりやや低い値を示すことがわかった。これは、積層による効果と考えられるが、この点については次項で検討することとする。図10は鉄損の周波数および磁束密度依存性を示す。図より、鉄損は周波数と磁束密度に大きく依存することが分かった。



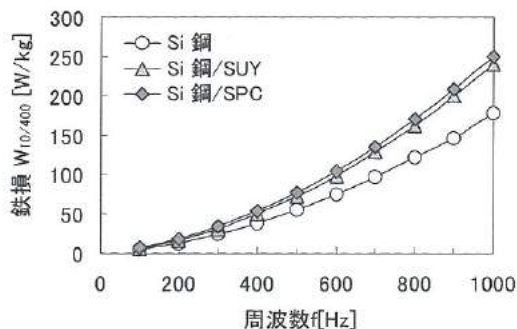
(a) Si鋼とSUYの積層



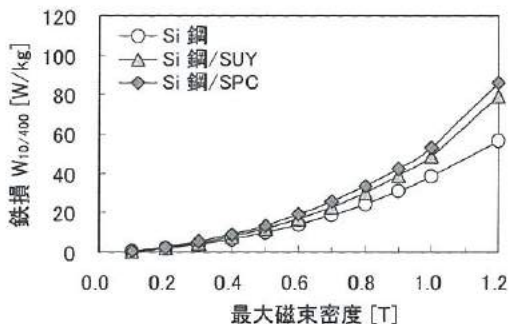
(b) Si鋼とSPCの積層

図9. 積層コアの鉄損

Fig.9. Iron loss change of lamination cores by combination of different steel plates.



(a) 鉄損の周波数依存性



(b) 鉄損の磁束密度依存性

図10. 積層コアの鉄損

Fig.10. Frequency and magnetic field dependence of iron

<3. 4>積層コアの鉄損分離

磁性材料の鉄損には主にヒステリシス損と渦電流損があり、2周波数法によって鉄損を分離することができる⁽¹⁾。そこで、50Hzと400Hzの鉄損を測定して鉄損分離を行なった。図11は各種積層コアの鉄損分離の一例を示す。SPCの渦電流損が最も大きいのは、 ρ 値が最も小さいためであり、各種コアのヒステリシス損の大きさは主にコア材料の保磁力に起因している。異種金属を積層

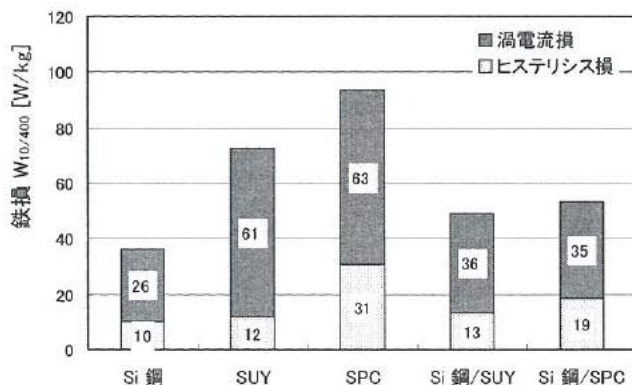


図11. 積層コアの種類と鉄損分離

Fig.11. Relation between hysteresis loss and eddy current loss.

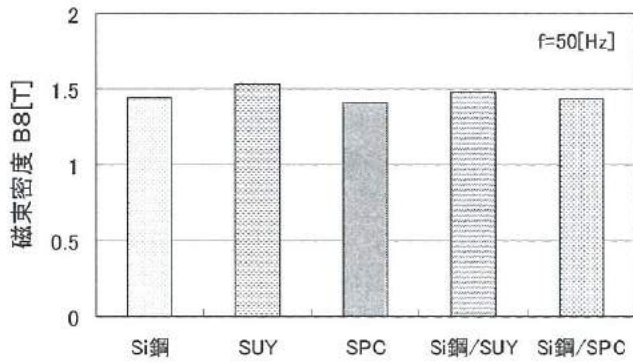


図 12. 積層コアの種類と磁束密度

Fig.12. Magnetic flux density B_8 of lamination cores.

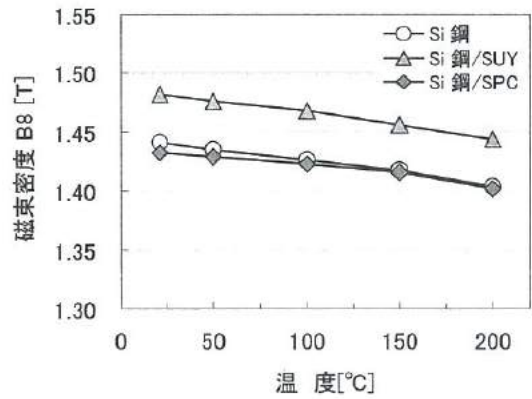


図 14. 磁束密度の温度依存性

Fig.14. Temperature dependence of magnetic flux density B_8 .

したコアに着目すると、ヒステリシス損は構成材料の損失のほぼ平均となっているのに対し、渦電流損は構成材料の損失の平均より大きく減少していることが分かる。この理由として、渦電流が流れ易いSUYやSPCの間に、 ρ 値の高いSi鋼が挿入されることにより、コア全体で渦電流が流れにくくなることが考えられる。図12は積層コアの種類と磁束密度の関係の一例を示す。

＜3. 5＞積層コアの温度による影響

高温時の磁気特性測定には専用の恒温槽 (IE-1210、岩通計測株式会社) を用いた。自動車用モータの耐高温テストは 150°C前後の環境で実施されている。図13および14は各種積層コアの鉄損 $W_{10/400}$ および磁束密度 B_8 の温度依存性を示す。図より、温度が上昇すると鉄損は減少し、200°C下では室温に対して19~27%減少した。また、磁束密度も温度が上昇すると減少し、200°C下では室温に対して2~3%減少した。一方、温度上昇にともなう保磁力の減少も確認している。そこで、鉄損の減少の要因を探るため鉄損分離を行ったところ、温度の上昇にともなってヒステリシス損および渦

電流損ともに減少することが分かった。従って、温度上昇にともなう鉄損の減少は、積層コアの保磁力の減少と比抵抗の増加によるものと考えられる。

＜3. 6＞PWM波励磁

図15はPWM波および正弦波励磁による積層コアの鉄損を示す。図より、各試料ともPWM波では正弦波よりも鉄損が増加し、さらに、2-PWMでは3-PWMよりも増加した。基本波200Hzと基本波400HzのPWM波励磁による2周鉄損分離⁽¹⁾を行なった結果、ヒステリシス損は3-PWMより2-PWMの方が大きく、渦電流損は2-PWMと3-PWMとでは大きな差はないが、いずれも正弦波より増加した。また、図16は励磁方法の違いによるB-Hカーブの比較を示す。図より、PWM励磁では正弦波励磁には見られないマイナーループが形成されていることがわかる。従って、

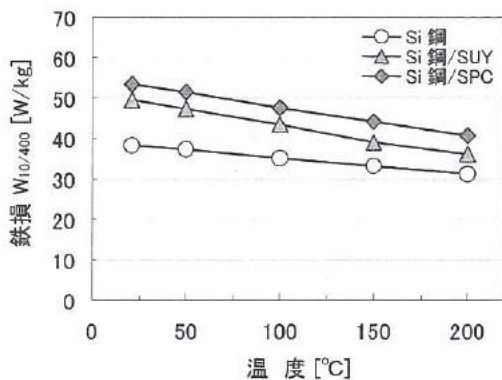


図 13. 鉄損の温度依存性

Fig.13. Temperature dependence of magnetic flux density.

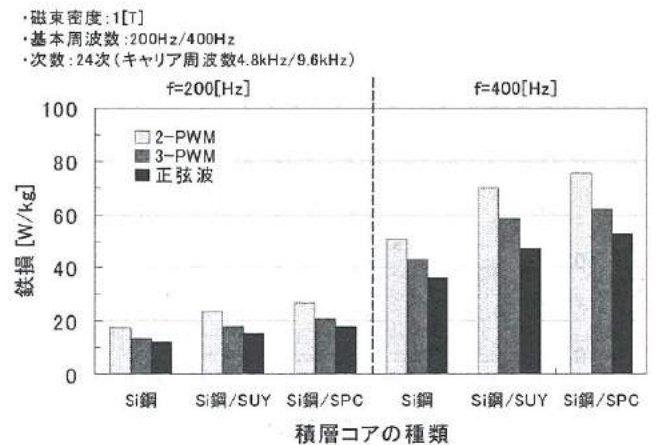


図 15. PWM波励磁下の積層コアの種類と鉄損

Fig.15. Iron loss under PWM wave excitation.

正弦波と比較して PWM 波の鉄損が増えた要因は、PWM 励磁では正弦波励磁には見られないマイナーループが形成されるため、高周波成分が増加したことが考えられる。また、3-PWM が 2-PWM と比較して鉄損が低いのは、形成されるマイナーループが小さいために高調波成分が減少することが考えられる。

一方、正弦波励磁の鉄損と比較した場合、3-PWM では 18.4%~23.8%の増加となる。このことから、正弦波励磁の鉄損を知ることによって PWM 波励磁による鉄損のおおよその値が推測できる。

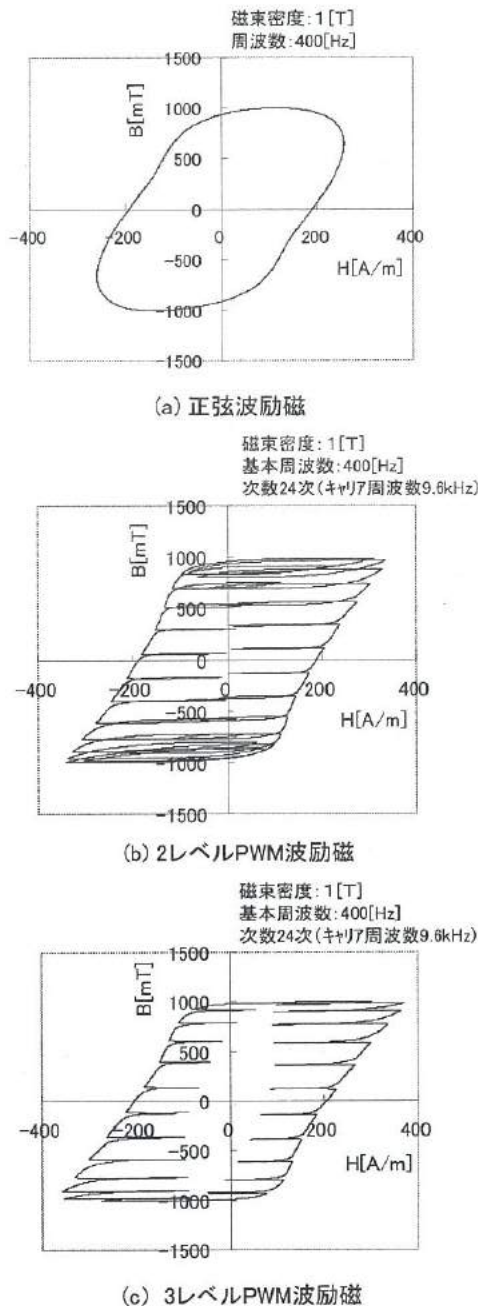


図 16. 励磁方法の違いによる B-H カーブの比較

Fig.16. Comparison of B-H curve by different excitation waves.

4. 結 言

ここでは、EV 用モータ用積層コアの低コスト化を目的として、電磁鋼板と電磁軟鉄をそれぞれ単独積層ならびに交互積層した電磁コアを作製し、交互積層が鉄損などの磁気特性にどのような影響を及ぼすかなどについて検討を行った。

以下に得られた成果を述べる。

- ① 鉄損 $W_{10/400}$ は、電磁鋼板のみの積層コアと比較して電磁鋼板と SUY 材を交互に積層したコアは 1.36 倍、電磁鋼板と SPCC 材を交互に積層したコアでは 1.47 倍となった。
- ② 異種金属を交互積層したコアの鉄損は、構成材料それぞれの値の平均値よりやや低い値を示した。この理由として、渦電流が流れ易い金属板の間に体積抵抗率 ρ の高い金属板が挿入されることにより、コア全体で渦電流が流れにくくなることが考えられる。
- ③ いずれの電磁鋼板も周囲温度の上昇とともに鉄損および磁束密度が減少した。鉄損の減少は温度上昇にともなうコア材の保磁力減少によるヒステリシス損の減少に依存するものであり、磁束密度の減少は温度上昇にともなうコア材の抵抗増加による渦電流損の減少に依存するものである。
- ④ PWM 波励磁での鉄損は、正弦波励磁に比べて増加した。さらに、2-PWM は 3-PWM よりも増加した。これは、B-H カーブ測定からも判明したように、PWM 波励磁では正弦波励磁には見られないマイナーループが形成されるためと考えられる。

文 献

- (1) 平成 24 年度 若い研究者を育てる会 研究論文集 p16~23
- (2) 近角聡信, 強磁性体の物理 (下) P315, 裳華房 (1984)
- (3) JIS C 2550-1:2011 付属書 A (参考) 「デジタルサンプリング法による磁気特性測定
- (4) JIS C 2550:2000

VII. SW電源の電磁ノイズのシミュレーション

Electromagnetic wave simulation for switching power supply

野口 拓 宮田 直幸 佐々木 克浩 塚本 吉俊
NOGUCHI Hiromu MIYATA Naoyuki SASAKI Katsuhiko TSUKAMOTO Yoshitoshi
浅田 峯夫 岩坪 聡
ASADA Mineo IWATSUBO Satoshi

Abstract

A switching power supply is a significant source of radiated noise, and regulations for that are strict. To handle this problem, numerical simulation methods of electromagnetic wave are essential. In this study, we manufacture an electromagnetic wave simulator based on FDTD method and confirm its validity by comparison between numerical results and exact solutions using the theoretical value of electric far field radiated from a current element. We also show that our prediction of electric near field around a spectral peak is within a few decibels from that of commercially available software using finite element method (FEM).

1. 緒言

近年の電力事情や環境保護の観点から、家庭用電気機器をはじめとした様々な機器において、省エネルギーの要求が一層高まっている。このような背景もあって、電源には電力変換効率が高くかつ小型化が可能なスイッチング電源 (Switching power supply, 以下 SW 電源と呼ぶ) が広く用いられている。

しかし、SW 電源は広帯域の電磁ノイズを発生するため、EMC (Electro-Magnetic Compatibility) の観点から、対策が必要である。しかしながら、SPICE に代表される回路シミュレータによる解析だけでは、プリント基板のレイアウトや信号ライン間の干渉など電磁界の影響を含めることはできず、その対策法は十分に確立されているとは言いがたい。そのため製品を試作し、電波暗室での放射エミッション測定を行ってはじめて、その放射スペクトルを知ることになり、そこから試行錯誤によって放射ノイズを減らしていくという手法を取らざるを得ないのが現状である。

したがって、電磁界解析に対する有効な数値計算法を確立することは、回路設計の段階から放射ノイズの傾向を推定することができる。そのほか、電磁界を可視化することによって、部品配置の電磁ノイズ発生に及ぼす影響への理解が深まり、設計プロセスにおける手戻り回数が減り、設計の効率が高まると考えられる。

そこで本研究では、いくつかのシミュレーション手法の有効性を、厳密解と簡易モデルとの比較によって検証する。また、有効な手法に基づき電磁波シミュレータを自作し、電源をはじめとする製品設計に有効な電磁ノイズ対策に関する知見を得ることを目標とする。

2. 数値計算法

電磁界の数値計算法には大きくわけて、周波数領域のものと同

間領域のものがある。代表的な周波数領域のものには、有限要素法 (FEM) やモーメント法がある。一方、時間領域のものには、FDTD 法 (Finite-difference time-domain method) や CIP 法 (Constrained Interpolation Profile Scheme) がある。周波数領域のものは、格子点数の増加に対して、計算量が指数的に増加するのに対し、時間領域のものは、4/3 乗に比例して増加することが知られている⁽¹⁾。本研究の最終目標としては、多層プリント基板のような複雑な対象物を想定しているため、格子点数が増加するほど有利になる時間領域のものを考察することとする。

表 1 で、FDTD 法と CIP 法の特徴を比較する。FDTD 法と CIP 法位相誤差の違いを表現した計算例を、図 1 に示す。平面波として矩形上の分布を持つ電磁界が時間発展した時の、磁界 (または電界) の様子が示されている。FDTD 法では、高調波の位相速度が遅いため、数値振動が起こっている。

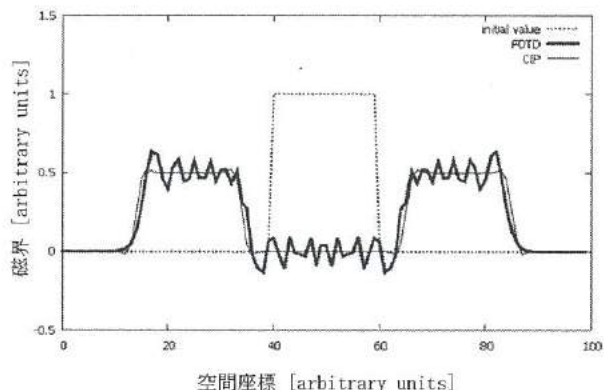


図1. FDTD 法と CIP 法の計算の比較
Fig.1. Comparison of calculation between FDTD method and CIP method.

表1. FDTD法とCIP法の特徴
Table.1. Characteristics of FDTD and CIP.

	FDTD法	CIP法
プログラミングの難易度	Yeeアルゴリズム：易 PML吸収境界条件：難 Yee格子であることによる設定の難しさ、バグの発生し易さが顕著である。	移流アルゴリズム：中 吸収境界条件：易 通常の格子であれば、設定は易しい。
振幅誤差	ほとんどの周波数領域で無視できる、つまり周波数領域では有利 ⁽²⁾	周波数の高い領域で無視できない、つまり周波数領域では不利 ⁽²⁾
位相誤差	周波数の高い領域で大きくなる、つまり時間領域では不利 ⁽²⁾	ほとんどの周波数領域で無視できる、つまり時間領域では有利 ⁽²⁾
Courant条件	$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}}$	CFL数 $\frac{c\Delta t}{\Delta x} > 1$ も可能
必要メモリ比	1	≧ 8 (M型)
計算量比	1	≧ 20 ⁽³⁾

そのFDTD法が、スペクトルの計算では有利なのは、遅れているが、時間窓の中に入っているので問題なく計算に含まれるからだと考えられている⁽⁴⁾。一方、CIP法は振幅が高い周波数で減衰するため、放射スペクトルの計算で不利であるし、計算時間もかかる。前者をCIP-CSL4によって改善することもできる⁽⁵⁾。あるいは、後者をCIP法の精度の良さから、格子点数を減らし、CFL数を大きくすることで、計算時間をFDTD法並みにすることも考えられる。ただ、元のCIP法は計算量が多いので、より計算時間のかかるCIP-CSL4を用いてまで、精度良く計算する価値があるかという問題や、電子回路の配線自体が多くの格子点数で表現されているものではないので、ほとんど格子点数を減らせないという問題がある。よって、今後のエレクトロニクス産業の発展によっては、CIP法が優位になる可能性はあるが、今の問題に対しては、FDTD法で必要十分であると考え、本論文ではFDTD法を用いることとした。

3. FDTD法プログラミングの妥当性の検証

例えば、距離10m離れたアンテナ位置の電界を知りたい時に、そこまでの空間全てを解析することは、メモリの的にも計算量的にも現実的ではない。ここでは、解析対象の周囲だけの解析で済むためより効率的な近傍界-遠方界変換を用いることとした。

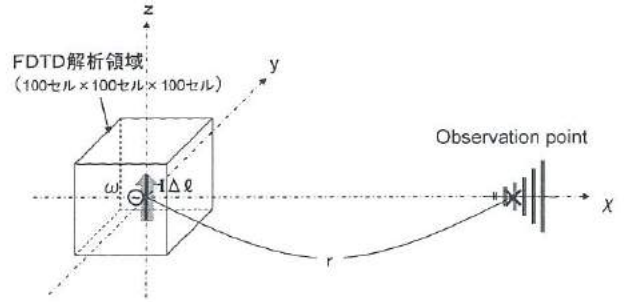


図2. 電流素片からの遠方界の計算モデル
Fig.2. Calculation model of far field radiated from a current element.

電流 I 、長さ Δl 、周波数 ω の電流素片が、距離 r の位置に作る電流と平行な遠方電界の成分の振幅は、遅延ポテンシャルより容易に計算され、

$$|E_\theta| = \frac{\mu_0 I \Delta l \omega}{4\pi r} \quad (1)$$

となる。ここで、 μ_0 は真空の透磁率である。一方、「放射源から放射される電磁界は、それを取り囲む境界を完全導体と見なした時の、鏡像からの電磁界の反射波である。」という事実が成り立つから、近傍界から遠方界を求めるためには、放射源を取り囲む表面での電磁界を知れば十分である。

よって、遠方界を計算するには、仮想的な完全導体に誘起される等価電流を求め、そこから放射される遠方界を計算すればよい。等価電流は $\mathbf{J} = \hat{n} \times \mathbf{H}$ で、等価磁流は $\mathbf{M} = \mathbf{E} \times \hat{n}$ で求められる。そこから、

$$\mathbf{W}(t) = \frac{1}{4\pi r} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{J}(t + \frac{\hat{r} \cdot \mathbf{r}'}{c} - \frac{r}{c}) dS' \quad (2)$$

$$\mathbf{U}(t) = \frac{1}{4\pi r} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{M}(t + \frac{\hat{r} \cdot \mathbf{r}'}{c} - \frac{r}{c}) dS' \quad (3)$$

を使って、遠方電界については、

$$E_\theta = -Z_0 W_\theta - U_\phi \quad (4)$$

$$E_\phi = -Z_0 W_\phi + U_\theta \quad (5)$$

と求められる⁽⁶⁾。ここで、 \hat{r} は、観測方向の単位ベクトル、 S は変換する境界である。ここで注意すべきことは、上の公式は、無限遠への極限で完全に正しくなるような近似である、ということである。つまり、第一に遠方界の成分のみが観測されるのは、無限遠であるということ、次に、境界がどの場所も同じ重みで加えられ、同時に観測点までの距離 r も定義があいまいなこと、そして最後に、同時刻の面形態は球面ではなく、平面であることである。

近傍界-遠方界変換を用いたプログラミングの妥当性を検証するため、電流素片からの遠方界について、計算結果を厳密解と比較を行った。

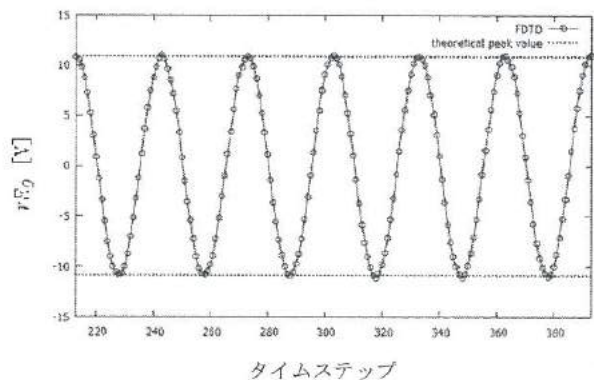


図3. 電流素片からの遠方電界(E_{θ})

Fig.3. Electric far field(E_{θ}) radiated from a current element

図2に、電流素片からの遠方電界の計算モデルを示す。図3は、遠方電界の厳密解と数値計算の比較結果である。FDTD法による解析は12層PMLとし、PML境界から10セル内側で近傍界を計算した。また、面積分にはシンプソン則を用いた。 $\Delta x = 0.003m$ の立方格子でCourant条件の時間刻みにおいて周期 $T = 30\Delta t$ の1Aの電流素片の持つ遠方電界の振幅(ピーク) $rE_{\theta} = \pm 2\pi\sqrt{3}$ が破線で示されている。概ね一致していることから、アルゴリズムと解析プログラムの妥当性が確認されたと考える。

4. 電子回路基板とその近傍電界解析

< 4. 1 > 電子回路基板

開発した解析プログラムの妥当性を検証するため、SW電源を簡易化したモデルを検討する。SW電源は、半導体トランジスタ(スイッチ素子)のオン・オフの時間比を制御することで電力を調整する方式の電源である⁷⁾。そのオン・オフの際にスイッチング周波数(100kHz前後が多い)よりも高周波(数十MHz程度)の電流サージ⁷⁾が発生し、ループ回路やケーブルがアンテナとなることで、数十MHz以上の周波数帯の電磁ノイズを放射する。本研究では、アンテナとしてループ回路の方が解析空間を小さくできるため簡易なモデルに適していると考え、電子回路基板上のループ電流を想定した図4に示すモデルを検討することとした。厚さ1mmのベークライト基板上に、長さ200mm、幅150mm、線路幅3mmのループ状の線路を銅製の導電テープにより作製した。その線路に給電するための発振回路と駆動用のアルカリ電池(9V)を樹脂ケースに内蔵し、銅製の導電テープで覆った。ケースからリード線を出し、線路に給電した。発振回路を図5に示す。タイマーIC(LMC555)から出力される矩形波により電界効果トランジスタ(Field effect transistor; FET、東芝製シリコンNチャネルMOS型SSM3K7002FU)のオン・オフを制御する。矩形波の周波数が100kHzとなるように、 R_1 、 R_2 、 C_2 を決定した。また、FETの定格電流を越えないようにするため $R_3 = 50\Omega$ とし、負荷抵抗 $R_L = 50\Omega$ とした。

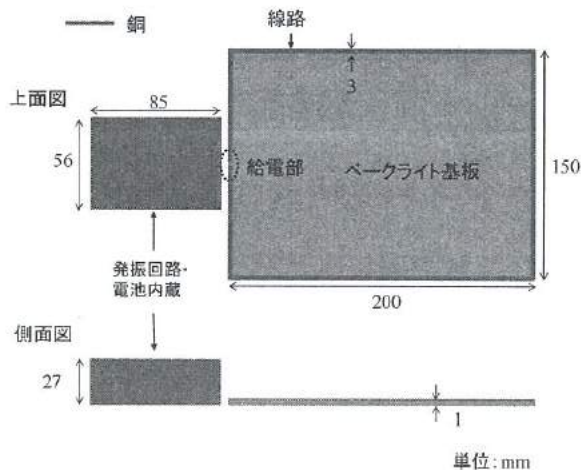


図4. 電子回路基板の形状

Fig. 4 Configuration of electronic circuit board.

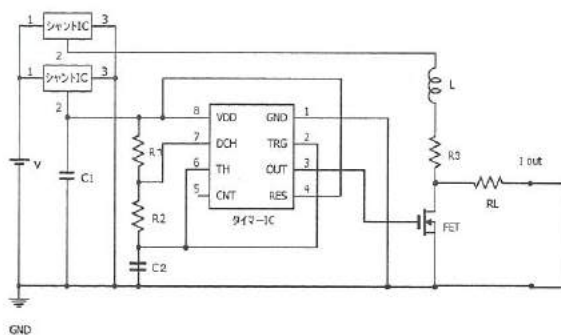
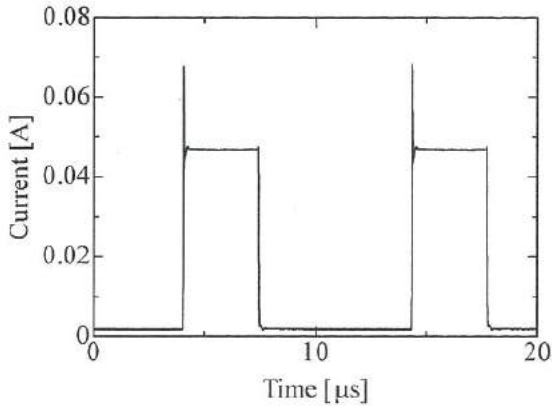


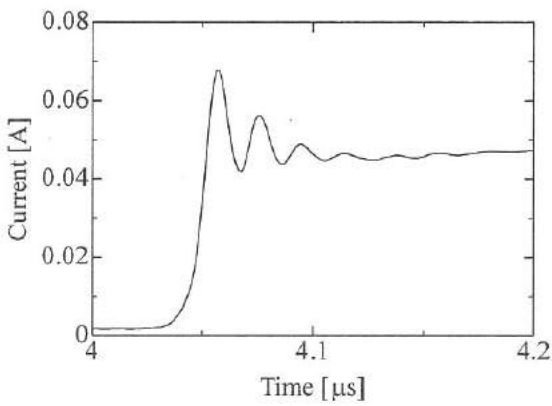
図5. 発振回路

Fig. 5 Oscillating circuit.

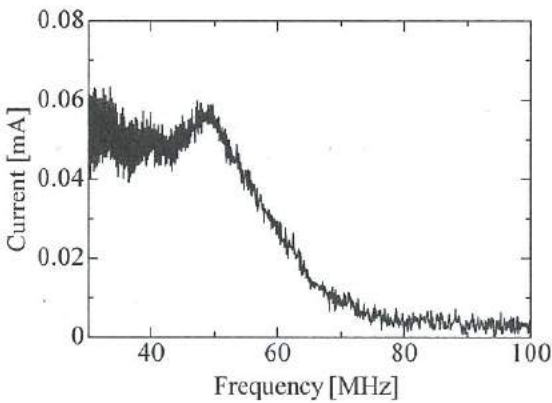
線路に流れる電流を給電部において測定した。測定には、オシロスコープ(アジレント・テクノロジー社製DSOX3034A)と電流プローブ(アジレント・テクノロジー社製N2783A)を用いた。矩形波の周期に同期して256回の加算平均を行った測定結果を図6(a)に示す。同図より、周波数100kHzでスイッチング動作していることが確認できる。図6(a)の波形の立ち上がり部分を拡大したグラフを図6(b)に示す。同図中における第一波の周期は20ns程度であることから、50MHz付近の周波数成分を含んでいると推測される。図6(a)の波形(一周期(=10 μ s)まで)を離散フーリエ変換により周波数解析した結果を図6(c)に示す(電流プローブの帯域を考慮し100MHzまで)。この結果より、50MHz付近の周波数成分を含んでいることが確認できた。



(a) 波形例



(b) 立ち上がり部分の拡大



(c) 離散フーリエ変換

図6. 線路に流れる電流波形の測定結果

Fig. 6 Measured current flowing in electric line.

(a) Typical waveform, (b) Part of initial rise and (c) Discrete Fourier Transform

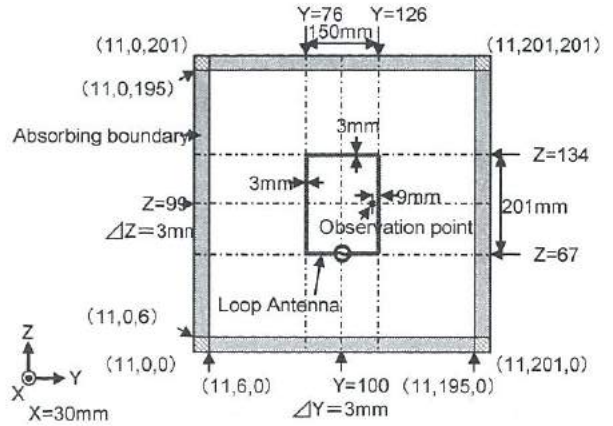


図7. 解析における座標

Fig. 7. Coordinate system for analysis.

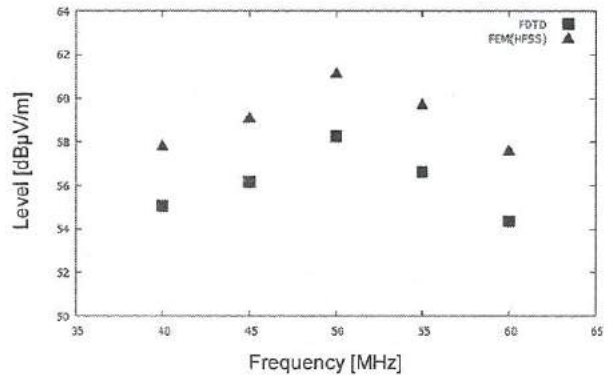
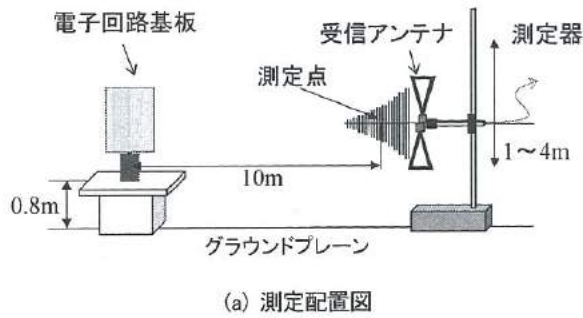


図8. 簡易モデルの近傍電界

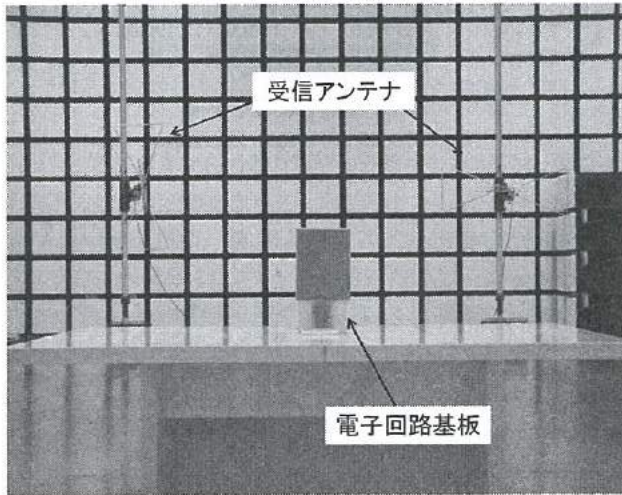
Fig. 8. Electric near field radiated from the simplified model

< 4. 2 > 近傍界解析

FDTD法の解析条件は6層PMLで、給電点は内部抵抗 50Ω のレジスティブ・ボルテージ・ソース (resistive voltage source) を用いた⁸⁾。FDTD法においては、先に測定した電流のスペクトルから、単一周波数の正弦波を入力し、数周期計算し、peak to peakで振幅を求めた。近傍界の計算箇所を図7に示す。開発した解析プログラムの妥当性を検証するため、市販されている高周波3次元電磁界解析ソフトウェアであるAnsoft社製のHFSS (High Frequency Structure Simulator) を用いても解析を行った。計算結果を図8に示す。オーダーと傾向が大体一致していることがわかる。このことから、FDTD法を用いた開発プログラムが妥当なものであることが確認できた。



(a) 測定配置図



(b) 測定風景

図9. 遠方電界の測定系

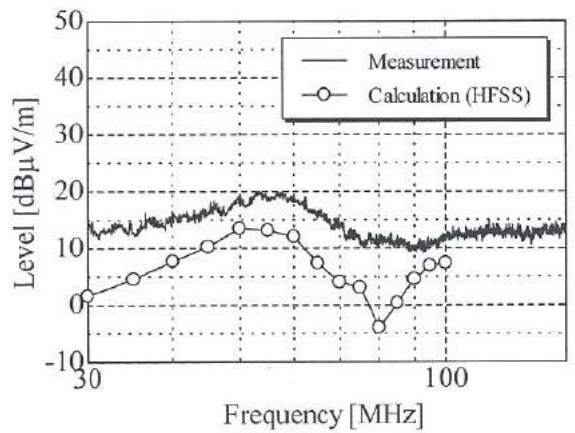
Fig. 9 Measurement system of electric far field.

(a) Measurement arrangement and (b) Overview of the measurement set-up.

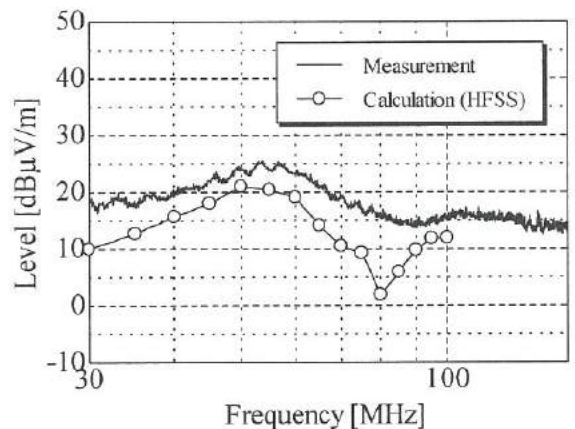
5. 遠方電界

< 5. 1 > 解析方法

今回作成したプログラミングコードでは、波長がループ寸法と同程度の高い周波数 (GHz 帯) では遠方界を問題なく解析できたが、ループと比較してかなり大きい周波数 (MHz 帯) では、数値振動が発生し、解析は困難であった。その原因としては、吸収境界の誤差が考えられる。PML 吸収境界条件は、最も精度が高い吸収境界条件としているが、低周波領域でカットオフ周波数が存在し、層が厚く、導電率の傾きが急峻であるほど、低周波まで吸収特性が向上する⁽⁹⁾ので、吸収がおきなかったことが原因と考えられる。逆に、近傍界では MHz 帯でも信頼できる計算が実行できたのは、波源に十分近いことによって、S/N 比が向上したためと考えられる。3MHz まで計算するために、50 層を用いた例⁽¹⁰⁾はあるが、その依存性は明確でない。層数を増やすことは、計算コストを大幅に増加させ、今回の計算機環境では実行が困難であると



(a) 水平偏波



(b) 垂直偏波

図10. 遠方電界強度の測定実験および解析結果

Fig. 10 Measured and calculated results of electric field strength. (a) Horizontal and (b) Vertical polarized waves.

考えられるので、MHz 帯の計算については、いずれ検討したい。そこで、現状は遠方界の解析には至っていないが、今後可能となった際の見通しを立てることに、電磁界解析に関する知見を得ることを目的に、HFSS を用いて遠方界の解析を行うこととした。

< 5. 2 > 遠方電界の測定方法

電子回路基板から遠方の電界強度を電波暗室 (富山県工業技術センター「ものづくり研究開発センター 10m 法電波暗室 (VCCI・FCC 登録)」) において測定した。その測定系を図9に示す。高さ 0.8m の非導電性テーブルの中央に電子回路基板を設置し、電子回路基板から 10m 離れた位置で受信アンテナ (ハイブリッドアンテナ、SCHWARZBECK 社製 VULB9168) により電磁ノイズを測定した。受信アンテナを高さ 1~4m 走査し、電子回路基板を 360° 回転させ、スペクトラムアナライザ (アジレン

ト・テクノロジー社製,N9000A)により電界強度のスペクトラムピーク値を測定した(分解能帯域幅:100kHz,ビデオ帯域幅:300kHz)。

<5. 3>HFSSを用いた解析方法

図4の電子回路基板をモデル化し、図9の測定環境を模擬して、電子回路基板の下端から0.8m離れた床面には完全導体条件を、それ以外の壁面は電子回路基板から約3m離して電磁波が無反射となる(放射境界)条件に設定した。図4の給電部は定電流源とし、図6(c)のスペクトルの電流値を入力する。実験における電子回路基板の回転と測定点の高さに対応させ観測点を可変し、電界強度のピーク値を求めた。

<5. 4>結果と考察

水平および垂直の偏波別に対比してそれぞれ図10(a)と(b)に示す。両偏波において、実験と解析結果のスペクトルのピーク周波数は50MHz付近ではほぼ一致しており、スペクトルの概略も同様の傾向を示している。電界強度のピーク周波数を知ることは、設計においては、原因となる回路上の構成要素を推定するひとつの手段となるため、ノイズ対策において重要なポイントになる。

一方、実験と解析の電界強度には差が生じている。その要因のひとつとして、解析において給電部を定電流源としたことが挙げられ、その対策として発振回路から出力される波形を回路シミュレータにより解析することが考えられる。

6. 結言

スイッチング電源をはじめとする製品設計に有用な電磁ノイズ対策手法を確立するため、電磁界解析シミュレーション手法についての検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 電磁界の数値計算法には、周波数領域で解析するものと時間領域で解析するものがあるが、回路をモデル化したときの計算量を考慮して、時間領域を扱うFDTD法とCIP法について検討した。それぞれの長短について検討した結果、計算精度と計算量を考慮してFDTD法を採用した。
- (2) FDTD法において、電流素片の遠方界の厳密解と数値計算結果を比較したところ、良好な一致が得られ、作成したFDTD法による処理アルゴリズムの妥当性が確認された。
- (3) 実回路を模擬した簡易モデルを用いたシミュレーションでは、近傍界においては、市販シミュレータ(HFSS)とオーダーと傾向において、一致した結果が得られた。一方、遠方界での解析では、PML吸収境界条件の周波数特性から、計算結果の信頼性に課題が残った。その対策として、吸収境界条件の最適化が必要ではあるが、数値計算を行う上での道筋をつけることができた。
- (4) 市販シミュレータによる遠方界解析に用いた簡易モデルについて実物を作製し放射電界強度を測定したところ、スペクトルのピーク周波数が一致し、スペクトルも同様の傾向を示したので、シミュレーションの有用性が確認された。

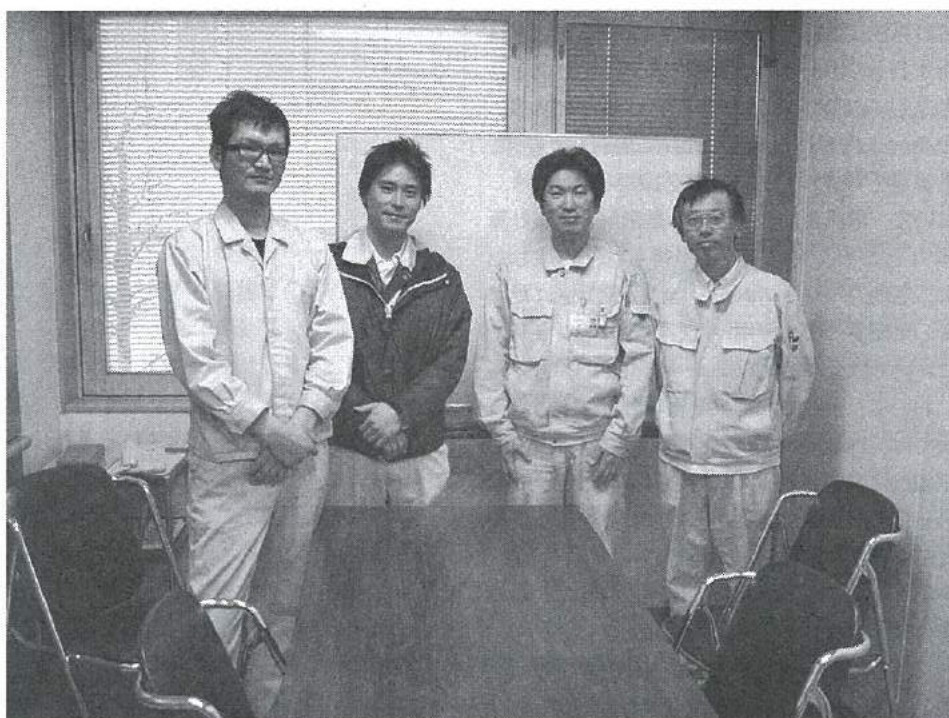
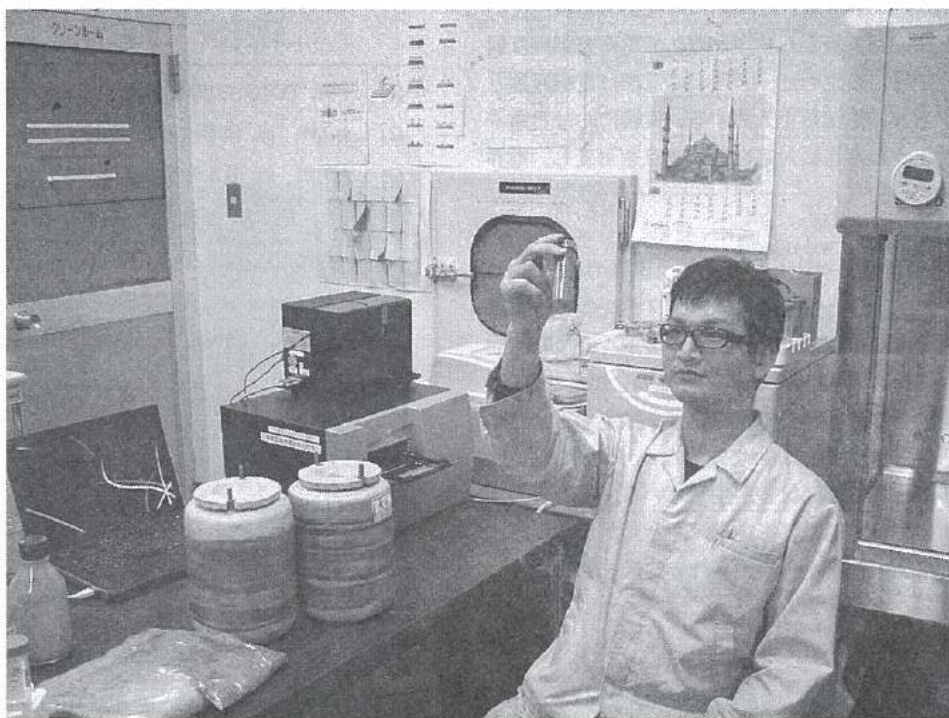
謝辞

本研究の一部は、アンシス・ジャパン(株)からご提供いただいたHFSSの評価版を用いて行った。ここに記して謝意を表する。

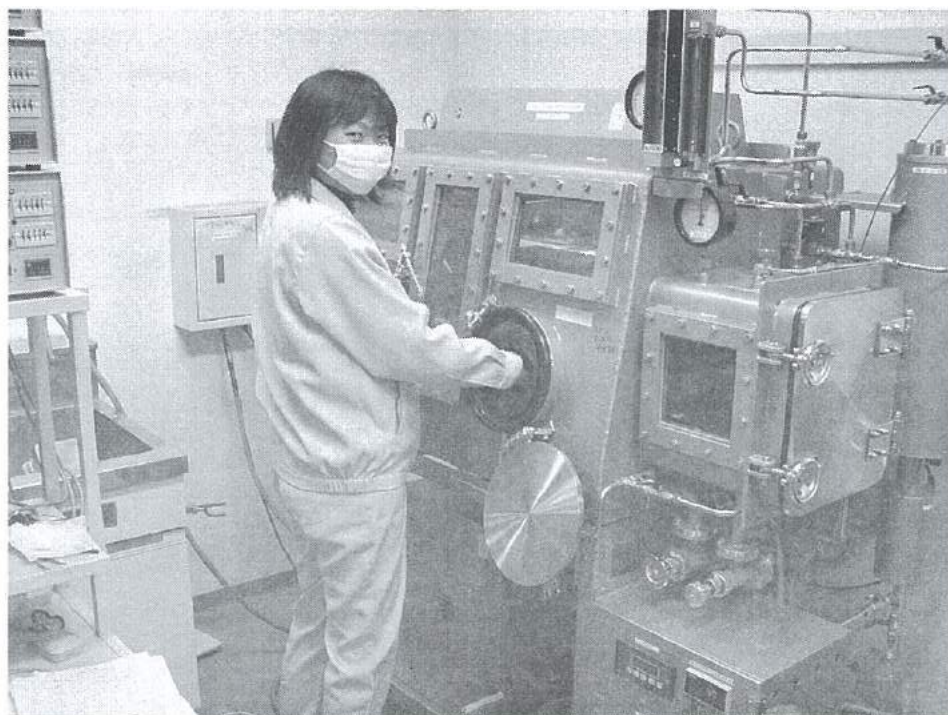
文献

- (1) 宇野, “FDTD法による電磁界およびアンテナ解析”, コロナ社
- (2) 大久保 他, 信学技報, EA2006-52, 2006-9
- (3) 太刀岡 他, 日本音響学会講演論文集, 979, 2007-9
- (4) 土屋 他, 信学技報, US2006-75, 2006-11
- (5) 大久保 他, 信学技報, AP2006-104, 2006-12
- (6) R. J. Luebbers et al., IEEE Trans. Antennas Propagate., vol. 39, no. 4, pp. 429-433, 1991
- (7) 原田 他, “スイッチングコンバータの基礎”, コロナ社 (1992)
- (8) Melinda Picket-May et al., IEEE Trans. Micro Wave Theory Tech., vol. 42, no. 8, Aug. 1994
- (9) J. P. Berenger, IEEE trans. Antennas Propagate., vol. 47, no. 10, Oct 1999
- (10) 春日 他, 信学技報, EMCJ2003-91, MW2003-188, 2003-10

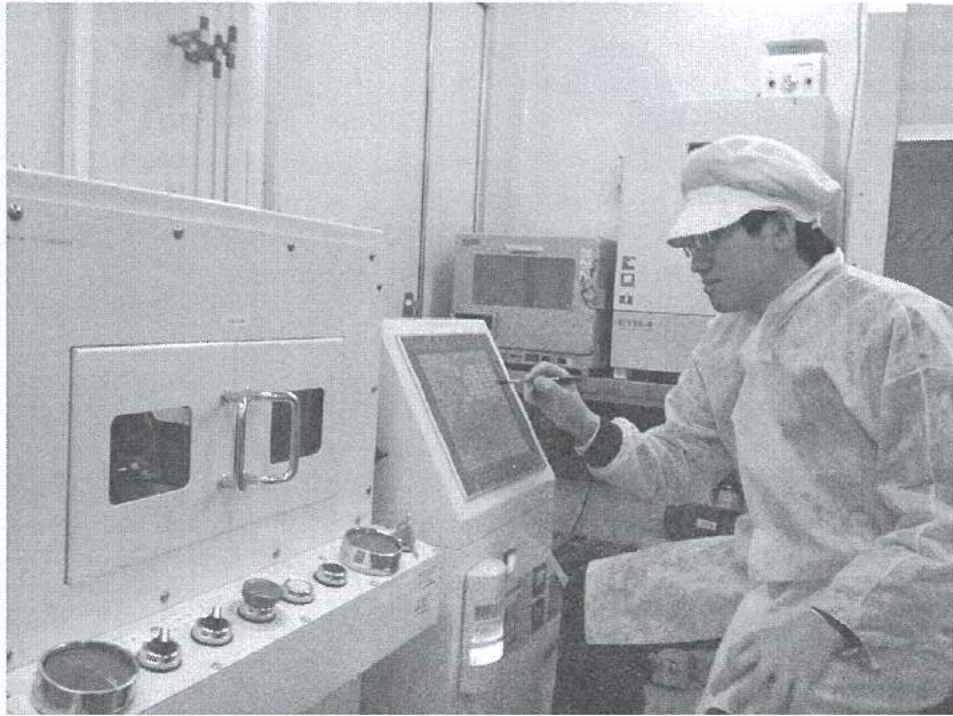
「MDF木屑からのバイオエタノール抽出技術の開発」グループの研究活動風景



「マグネシウムイオン2次電池に関する研究」グループの研究活動風景



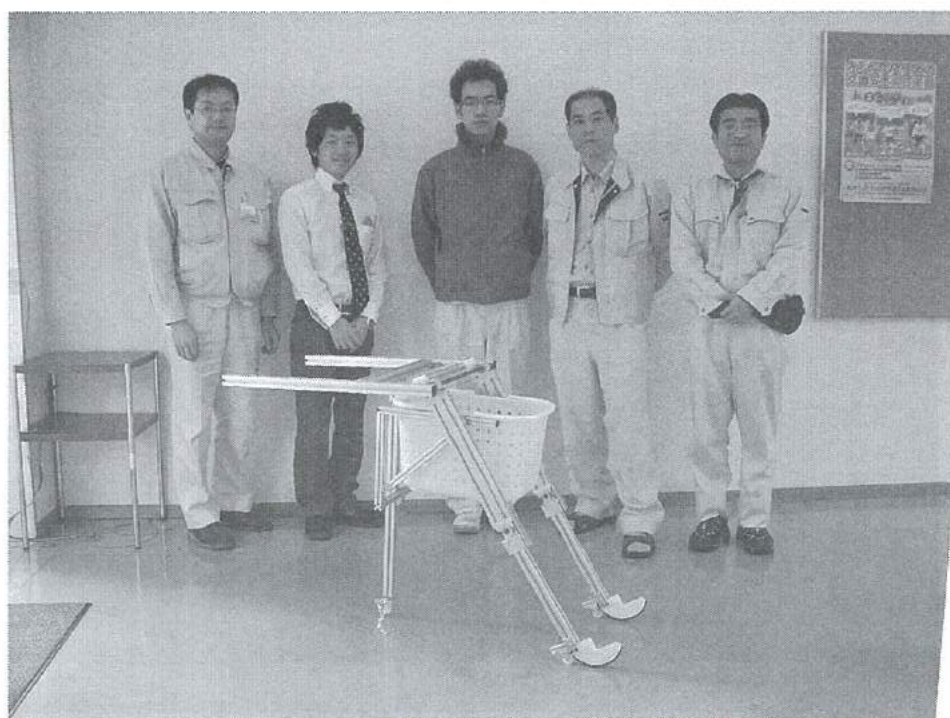
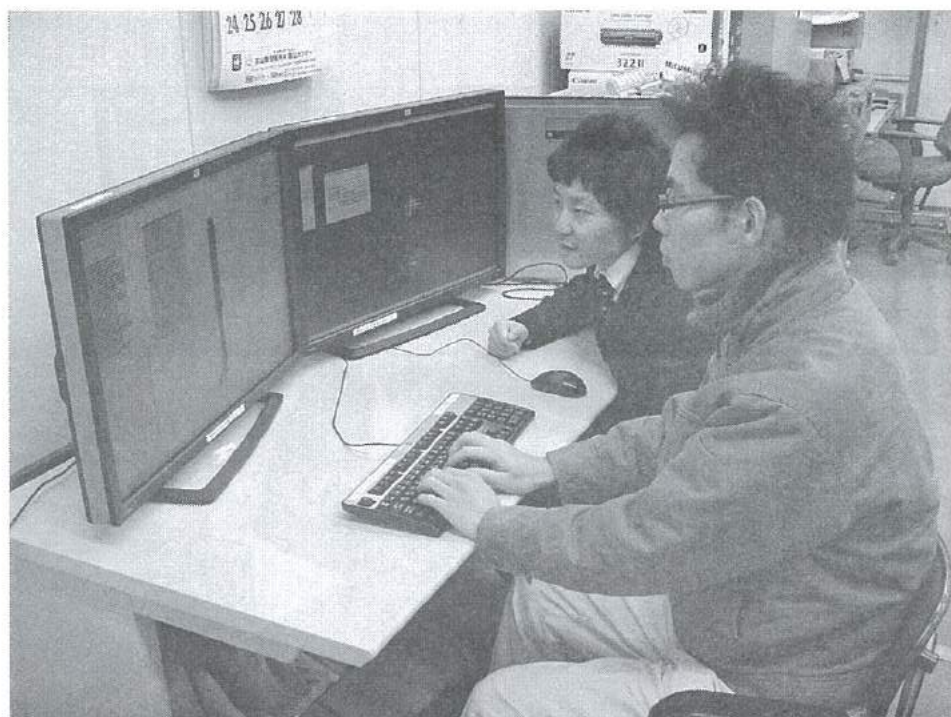
「ナノインプリントを応用した微細電極パターンの形成に関する研究」グループの研究活動風景



「小水力発電システムの研究」グループの研究活動風景



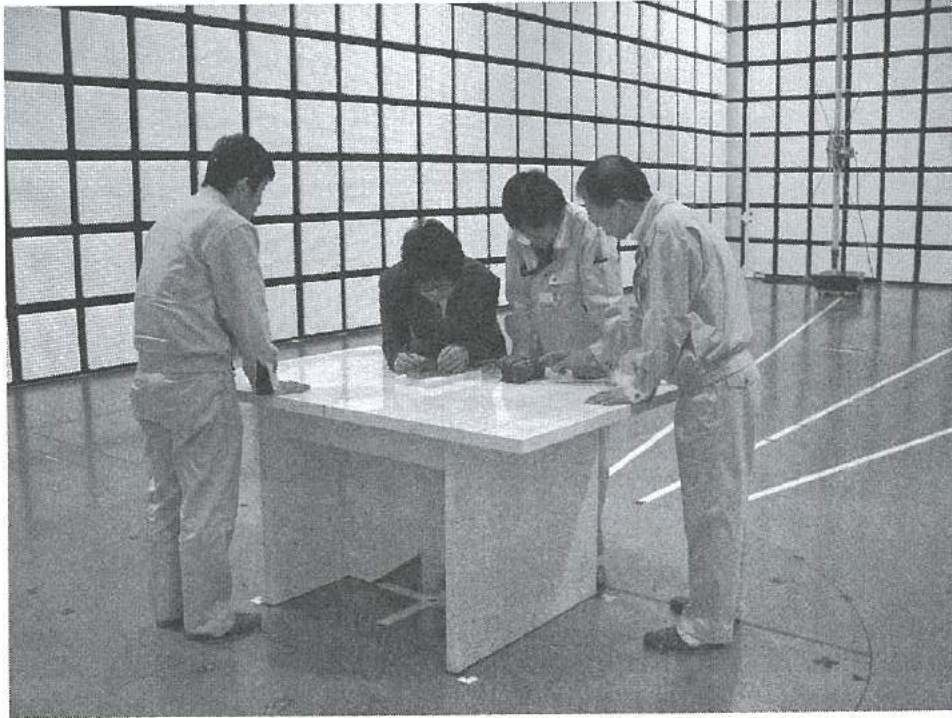
「受動的歩行ロボットの開発」グループの研究活動風景



「積層鋼板の磁気特性に関する研究（２）」グループの研究活動風景



「SW電源の電磁ノイズのシミュレーション」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

- 26年間の研究テーマ数：166テーマ（昭和62年度～平成24年度）
- 参加研究員延べ人数：324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（㈱タカギセイコー）、田上輝次（東洋化工㈱）、長柄 勝（長柄鉄工㈱）
◎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㈱）、加藤昌憲（日本鋼管㈱）、滝川義弘（磷化学工業㈱）
堀田 孝章（立山科学工業㈱）
◎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㈱）、茨木正則（北日本電子㈱）、西田信孝（㈱タカギセイコー）
山田俊一（エルコー㈱、現コーセル㈱）
◎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㈱）、茨木正則（北日本電子㈱）
窪池義文（エルコー㈱、現コーセル㈱）、滝脇優治（㈱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㈱）、小町秀彦（㈱タカギセイコー）、滝川義弘（磷化学工業㈱）
平能 司（㈱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（㈱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（㈱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）
◎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㈱）、水谷里志（立山電化工業㈱）、山田義昭（東洋化工㈱）
宮沢進一（吉田工業㈱、現YKK㈱黒部工場）、山本直樹（NKK（日本鋼管㈱）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㈱）
◎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（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（タカノギケン株）、滝川義弘・煙田不二男（磷化学工業株）、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（東洋化工株）、吉田孝一（株タカギセイコー）、吉野正浩（吉田工業株、現YKK株）

◎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（株不二越）、西田達也（北陸電気工業株）、前坂昌春（エルコー株、現コーセル株）

◎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（株インテック）、堀井 孝（エルコー株、現コーセル株）

◎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（北日本電子株）、中山正明（株和泉電気富山製作所）

◎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（株不二越）、高島 誠（エルコー株、現コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 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（株タカギセイコー）、田村正行（吉田工業株、現YKK株）、柳原 潔（株黒田精型）

◎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. 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

尾畑哲史（株和泉電気富山製作所）、山田義昭（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. 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（磷化学工業株）、若林成喜（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

5. 画像による寸法計測に関する研究

石黒哲也（株タナカエンジニアリング）、窪池義文（エルコー株、現コーセル株）

・西浦慎一・村井哲雄（株タカノギケン）

◎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（北日本電子株）、堀登紀男（株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
尾畑哲史（㈱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㈱）、竹端清己（㈱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
白石信行（コーセル㈱）、新谷哲也（北陸電気工業㈱）、吉井靖岳（㈱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—トランスの試作
伊勢寿夫（コーセル㈱）、戸田雅規（㈱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㈱）
◎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㈱）、長峰浩幸（㈱タカギセイコー）、本堂 裕（㈱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㈱）、島野英明（㈱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 睦（磷化学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. RIMのCAE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（株タカギセイコー）、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（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. 機能性薄膜と半導体の複合素子の開発

高柳 毅（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. リン酸エッチング液の基礎研究

山口 睦（磷化学工業株）

◎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（株タカギセイコー）

山下慎也（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

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 (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. 電子回路用ウエットエッチング液の開発

山口 睦 (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 (株タカギセイコー)、能村輝一 (北陸電気工業株)、山下慎也 (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

5. 微動機構による機械の高度化の研究

佐野仁一 (東洋化工株)

◎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 (コーセル株)、谷上英樹 (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

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 (富山軽金属工業株)、三井清隆 (株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)

◎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株)

◎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・笹島和明 (株タカギセイコー)、田島正康 (株タナカエンジニアリング)

田中 篤 (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. 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 (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. レドックス型太陽発電システムの開発 (2)

市川良雄 (富山軽金属工業株)、田畑裕信 (中越合金鑄工株)、三井清隆 (株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)

◎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（コーセル株式会社）、森田裕之（立山アルミニウム工業株式会社）
◎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（北陸電気工業株式会社）、安田純子（コーセル株式会社）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
6. 蓄光性蛍光膜の開発
佐野仁一（東洋化工株式会社）、二見泰雄（三協アルミニウム工業株式会社）
◎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（富山軽金属工業株式会社）、田畑裕信（中越合金鋳工株式会社）、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株式会社）、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（コーセル株式会社）、角谷哲哉（北陸電気工業株式会社）、小島理敬（三協アルミニウム工業株式会社）
◎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ンスの開発
堀井一宏（コーセル株式会社）、柳川 新（立山科学工業株式会社）
◎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（北陸電気工業株式会社）、野上拓也（㈱タナカエンジニアリング）、山田浩美（東洋化工株式会社）
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（㈱斉藤製作所）、高橋 聡（㈱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 聡（北陸電気工業株式会社）、渡辺暁信（田中精密工業株式会社）
◎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（田中精密工業株式会社）
◎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（コーセル株式会社）、南 政克（北陸電気工業株式会社）、山田浩美（東洋化工株式会社）
◎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 (㈱斉藤製作所)

◎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 (㈱斉藤製作所)、橋本 明 (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、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 (㈱タカギセイコー)、福田隆之 (コーセル㈱)

◎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㈱)

◎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㈱)

◎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

東堂浩次 (コーセル㈱)、坂本雅美 (㈱斉藤製作所)、長谷川益夫 (木材試験場)、小善圭一 (水産試験場)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

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㈱)、高瀬 洋 (県警察本部)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

5. インテリジェントにおいセンサの開発

小森一哉 (北陸電気工業㈱)、石川勝巳 (コーセル㈱)

◎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 (㈱斉藤製作所)

◎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㈱)、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

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 (㈱タカギセイコー)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成12年度 (第14回) 研究テーマと研究参加者 (5テーマ、8名)

1. 「ANSYS」を使用した動的機構解析の応用

島村和孝 (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. インテリジェントにおいセンサーの開発 (2)

小森一哉 (北陸電気工業㈱)、谷口真也 (コーセル㈱)

◎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

3. 高摩擦係数材料の開発

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

4. 木粉末を配合したプラスチックスリサイクル材の研究

酒井康弘 (㈱タカギセイコー)、前田健二 (立山アルミニウム工業株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

5. 低温駆動型小型燃料電池の開発に関する基礎研究

高橋雄一 (コーセル株)、山田浩美 (東洋化工株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成13年度(第15回)研究テーマと研究参加者(8テーマ、14名)

1. 滑雪板(着雪防止版)の開発

河井牧夫 (田中精密工業株)、高橋伸忠 (㈱タカギセイコー)、野田耕司 (三協アルミニウム工業株)

石井 雅 (富山県土木部)

◎指導機関：工業技術センターP J・中央研究所

2. 分子機能材料を用いた光電池の研究開発

濱口 誠 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 高摩擦係数材料の研究(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

4. 木粉末を配合したプラスチックリサイクル材料の研究

酒井康弘 (㈱タカギセイコー)、前田健二 (立山アルミニウム工業株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所、富山県立大学工学部

5. ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発

小出哲雄 (コーセル株)、坂本雅美 (㈱斉藤製作所)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部

6. 体質診断用DNAチップと測定装置の開発

水島昌徳 (立山科学工業株)、川上浩美 (東洋化工株)

◎指導機関：工業技術センターP J・機械電子研究所

7. マイクロマシニング技術による2軸型シリコンピエゾ抵抗式加速度センサの開発

桑原大輔 (北陸電気工業株)

◎指導機関：工業技術センターP J・機械電子研究所、富山大学工学部、JST

8. アルミ表面解析技術の高度化に関する研究

澤井 崇 (武内プレス工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成14年度(第16回)研究テーマと研究参加者(8テーマ、13名)

1. ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発(2)

石見雅美 (㈱斉藤製作所)、稲澤直子 (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

2. 生活習慣病等体質診断用DNAチップと評価機器の開発(2)

碓井洋平 (立山科学工業株)、水原 崇 (コーセル株)、米嶋勝宏 (東洋化工株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・P J・中央研究所

3. MEMSを応用した高精度温度センサの開発
今村徹治（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・P J、富山大学工学部
4. アルミ飲料容器の形状評価手法の開発
清水 歩（武内プレス工業株）
◎指導機関：工業技術センター中央研究所・P J
5. 超小型(20cc 前後)4サイクルエンジンの開発
杉森雅一（エヌアイシ・オートテック株）、中西智英（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
6. 滑雪機構の改善に関する研究
河井牧夫（田中精密工業株）、野田耕司（三協アルミニウム工業株）
◎指導機関：工業技術センターP J・中央研究所
7. 圧電トランスを用いたマイナスイオン発生装置の開発
山田英子（立山科学工業株）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
8. 有機材料を用いた排ガス吸着材料の検討
酒井康弘（株タカギセイコー）
◎指導機関：工業技術センター生活工学研究所、機械電子研究所

☆平成15年度（第17回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、9名）

1. ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発（3）
石見雅美（株斎藤製作所）、魚谷一成（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
2. 生活習慣病等体質診断用DNAチップの検出精度向上に関する研究（3）
碓井洋平（立山科学工業株）、中山 均（コーセル株）、中林俊幸（東洋化工株）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
3. 薄膜超低温度特性抵抗器の開発
桑原大輔（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、富山大学工学部
4. 小型穴加工システムの開発
手嶋成市（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・中央研究所
5. 超小型4サイクルエンジンの開発（2）
花崎 大（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・中央研究所
6. インクジェット法による電子部品作製に関する基礎研究
増山智英（立山科学工業株）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成16年度（第18回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、12名）

1. 大型色素増感太陽電池の開発
廣田和也（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

2. 交流法を用いたバイオセンサの開発

米澤久恵（コーセル株）、碓井洋平（立山科学工業株）、深沢正樹（立山マシン株）
宝泉重徳（東洋化工株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所、富山県新世紀産業機構

3. インクジェット用機能性インクの開発

松田杏子（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. 小型燃料改質器を用いた燃料電池の開発

澤田篤宏（コーセル株）、石見雅美（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・中央研究所

5. 薄膜超低温度特性抵抗器の開発（2）

桑原大輔（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部

6. 環境適応型インテリジェント窓の開発

堀 剛文・松田 力（立山アルミニウム工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

7. 高摩擦係数材料の研究（3）

上田修一（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・生活工学研究所・機械電子研究所

☆平成17年度（第19回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、10名）

1. 小型燃料改質器を用いた燃料電池の開発（2）

小杉京平（コーセル株）、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・中央研究所

2. 交流法を用いたバイオセンサの開発（2）

上谷聡史（コーセル株）、深沢正樹（立山マシン株）、中田守人（東洋化工株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所、富山県新世紀産業機構

3. 薄膜超低温度特性抵抗器の開発（Ⅲ）

津幡 健（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部

4. 圧電材料による起電力素子の研究

猪田明宏（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

5. 高摩擦係数材料の研究（Ⅳ）

山下剛史（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・生活工学研究所・中央研究所

6. インクジェット技術の応用研究

田中裕美（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

7. 大型色素増感太陽電池の開発（2）

廣田和也（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

☆平成18年度(第20回)研究テーマと研究参加者(9テーマ、11名)

1. **メタボリック症候群検出装置の開発**
三宅正浩(コーセル株)、深沢正樹(立山マシン株)
◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所、富山県新世紀産業機構
2. **マイクロTASチップの開発**
嶋 将伸(コーセル株)
◎指導機関:工業技術センター中央研究所・PJ推進担当・機械電子研究所
3. **陽極酸化皮膜を用いたナノ構造体の開発**
清水裕也(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・機械電子研究所・PJ推進担当
4. **インクジェット法による電子回路パターンの作製**
篠原おりえ、田中裕美(立山科学工業株)
◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
5. **小径穴の仕上げ加工**
高岡利尚(田中精密工業株)
◎指導機関:工業技術センターPJ推進担当・中央研究所・機械電子研究所
6. **ナノポーラス構造薄膜の作製とセンサーへの応用研究**
中野貴之(北陸電気工業株)
◎指導機関:工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部
7. **高温耐熱型サーミスタの開発**
山野 博(立山科学工業株)
◎指導機関:工業技術センター中央研究所・機械電子研究所
8. **超小型指向性アンテナの開発**
徳島達也(立山科学工業株)
◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
9. **機械部品の洗浄に関する研究**
杉森雅一(エヌアイシ・オートテック株)
◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所・中央研究所・PJ推進担当

☆平成19年度(第21回)研究テーマと研究参加者(8テーマ、10名)

1. **電子回路用ウェットエッチング液の研究**
曾根宏信(燐化学工業株)
◎指導機関:富山県立大学工学部、工業技術センター中央研究所
2. **肉盛りステライトの硬さに影響を与える溶接条件の研究**
田中隆尚(田中精密工業株)、長柄大介(長柄鉄工株)
◎国立大学法人富山大学芸術文化学部、富山県工業技術センター中央研究所・PJ推進担当
3. **インクジェット法を用いたアンテナの作製**
廣島大三(立山科学工業株)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
4. **燃料電池用超小型水素発生器の開発**
川端基裕(コーセル株)、遠藤 亮(三協立山アルミ株)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所
5. **三次元座標測定機における測定信頼性向上に関する研究**
中橋秀記(立山マシン株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・企画管理部

6. ナノポーラス構造薄膜の作製とセンサーへの応用研究 (2)

石橋孝裕 (北陸電気工業株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

7. 陽極酸化皮膜を用いたナノ構造体の応用研究

清水裕也 (株)タカギセイコー)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・PJ推進担当

8. マイクロTASチップの開発 (2)

石村和雄 (コーセル株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・生活工学研究所

☆平成20年度 (第22回) 研究テーマと研究参加者 (5テーマ、8名)

1. マイクロリアクタによる反応制御方法に関する研究

大橋裕之 (磷化学工業株)、梅原洋平 (コーセル株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・生活工学研究所

2. 空中超音波を用いた空間温度計測システムの研究

正源浩之 (コーセル株)、木下正之 (立山科学工業株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・生活工学研究所

3. ダイカスト金型材料の接合技術の開発

花崎裕美 (田中精密工業株)、古川万晃 (株)タカギセイコー)

◎国立大学法人富山大学芸術文化学部、富山県工業技術センター中央研究所・PJ推進担当

4. 局部加熱によるプラスチック表面の高機能化

吉田康子 (株)タカギセイコー)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

5. 酵母を利用した和漢薬の薬理作用の解析および測定デバイスの開発

日出嶋宗一 (立山マシン株)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

☆平成21年度 (第23回) 研究テーマと研究参加者 (5テーマ、9名)

1. 軽量・フレキシブルな色素増感太陽電池の開発

吉田康子 (株)タカギセイコー)、中田裕一 (北陸電気工業株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

2. ハンダ付着性導電塗料を用いた試作基板作製法の開発

熊田泉実 (コーセル株)、日出嶋宗一 (立山マシン株)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

3. X線CTを用いた実寸計測に基づくCAE技術

山根幸治 (コーセル株)、細川修宏 (株)タカギセイコー)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

4. ダイカスト金型材料の接合技術の開発 (2)

中田雄三 (田中精密工業株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学芸術文化学部

5. スクリーン印刷法による低コスト色素増感太陽電池の開発

斉藤洋輔 (コーセル株)、若林 傑 (立山科学工業株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

☆平成22年度（第24回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、8名）

1. ミニロボット群による水田防除草システムの開発
上田将志（コーセル(株)）、古川和明（立山科学工業(株)）
◎富山県工業技術センター機械電子研究所
2. CMM（三次元測定機）用簡易検査器の開発
広地信一（立山マシン(株)）
◎富山県工業技術センター中央研究所、富山大学芸術文化学部
3. 高耐摩耗性を有する熱可塑性樹脂複合材料の開発
須田誠（田中精密工業(株)）
◎富山県工業技術センター中央研究所・企画管理部
4. CAEによる仮想振動試験の信頼性評価への適用
澤田修平（コーセル(株)）、細川修宏（(株)タカギセイコー）
◎富山県工業技術センター機械電子研究所
5. 光触媒による自立型水質浄化浮遊物の開発
高見和志（コーセル(株)）、新川翔平（北陸電気工業(株)）
◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部・中央研究所

☆平成23年度（第25回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、7名）

1. CMM（三次元測定機）用簡易検査器の開発2
広地信一（立山マシン(株)）
◎富山県工業技術センター中央研究所、富山大学芸術文化学部
2. LED照明のEMC・ノイズ対策に関する研究
平田哲郎（コーセル(株)）
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所
3. 積層鋼板の磁気特性に関する研究
堀田哲朗（田中精密工業(株)）、杉本考行（コーセル(株)）
◎富山県工業技術センター機械電子研究所、谷野技術士事務所、富山大学大学院理工学研究部
4. シリコンアーマチュアデバイスの研究開発
木澤裕志（立山科学工業(株)）、岩滝幸司（北陸電気工業(株)）
◎富山県工業技術センター中央研究所、富山大学大学院理工学研究部
5. 精密切削加工による表面機能創成に関する研究
藤井美里（(株)タカギセイコー）
◎富山県工業技術センター中央研究所

☆平成24年度（第26回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、10名）

1. MDF木屑からのバイオエタノール抽出技術の開発
羽根新太郎（三協立山(株)）
◎富山県工業技術センター機械電子研究所
2. マグネシウムイオン2次電池に関する研究
作道千枝（(株)タカギセイコー）
◎富山県工業技術センター機械電子研究所
3. ナノインプリントを応用した微細電極パターンの形成に関する研究
大門貴史（北陸電気工業(株)）
◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部

4. 小水力発電システムの研究

中瀬典章 (コーセル株)、荒井勇人 (立山科学工業株)、熊澤周士 (㈱タカギセイコー)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部

5. 受動的歩行ロボットの開発

水上慎太郎 (コーセル株)、若崎祥人 (立山マシン株)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

6. 積層鋼板の磁気特性に関する研究 (2)

藤岡英示 (田中精密工業株)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所、谷野技術士事務所、富山大学大学院理工学研究部

7. SW電源の電磁ノイズのシミュレーション

野口拓 (コーセル株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

○ 会 員 企 業

平成25年3月14日現在（50音順）

	企 業 名	代表者名	運営委員	電話番号
1	エヌアイシ・オートテック㈱	西川 浩司	大茂 達朗	076-462-0578
2	コーセル㈱	福村 恵一	山影 隆	076-432-8151
3	㈱斉藤製作所	斉藤 恵三	齊藤 行男	076-468-2727
4	三協立山㈱	藤木 正和	宇野 清文	0766-20-2366
5	㈱タカギセイコー	笠井 千秋	高橋 伸忠	0766-84-2318
6	タカノギケン㈱	高野 啓良	瀧森 幸浩	076-455-2525
7	武内プレス工業㈱	武内 繁和	駒井 義時	076-441-1856
8	立山科学工業㈱	水口昭一郎	森 喜代志	076-483-3088
9	立山マシン㈱	宮野 兼美	矢郷 徳一	076-483-4123
10	田中精密工業㈱	田中 一郎	櫛田 孝隆	076-451-7651
11	東洋化工㈱	中田 守人	中田 守人	076-475-2125
12	長柄鉄工㈱	長柄 勝	長柄 大介	0766-22-3170
13	北陸電気工業㈱	津田 信治	山本 肇	076-467-1111
14	燐化学工業㈱	安田 陽一	稲生 吉一	0766-86-2511

事務局：(財)富山県新世紀産業機構内 〒930-0866 富山市高田 529 TEL:076-444-5607(角崎雅博、加茂真理子)

○ 研 究 会 員

氏 名	所 属	役 職	学 位	電話番号
研究幹事				
石 黒 智 明	工業技術センター機械電子研究所	機械システム課長	博士(工学)	076-433-5466
岩 坪 聡	工業技術センター中央研究所	主幹研究員	博士(工学)	0766-21-2121
佐 山 利 彦	工業技術センター企画管理部	主幹研究員	博士(工学)	0766-21-2121
杉 森 博	工業技術センター中央研究所	材料技術課長	博士(工学)	0766-21-2121
高 林 外 広	県商工労働部商工企画課	新産業科学技術班長	博士(工学)	076-444-4562
丹 保 豊 和	富山大学大学院理工学研究部	准教授	工学博士	076-445-6727
土 肥 義 治	工業技術センター企画管理部	部 長	博士(工学)	0766-21-2121
富 田 正 吾	工業技術センター中央研究所	加工技術課長	工学博士	0766-21-2121
長 柄 毅 一	富山大学芸術文化学部	准教授	博士(工学)	0766-25-9111
二 口 友 昭	工業技術センター	次 長	博士(工学)	076-433-5466
松 田 敏 弘	富山県立大学工学部	教 授	博士(工学)	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～平成12年度) | 6代会長 武内 繁和 (平成13年度～平成14年度) |
| 7代会長 斉藤 恵三 (平成15年度～平成16年度) | 8代会長 水口昭一郎 (平成17年度～平成18年度) |
| 9代会長 町野 利道 (平成19年度～平成20年度) | 10代会長 笠井 千秋 (平成21年度～平成22年度) |
| 11代会長 津田 信治 (平成23年度～) | |

○ 顧 問 ・ 運 営 ア ド バ イ ザ ー

谷野 克巳 (谷野技術士事務所)

○ 顧 問 (50音順)

- 石坂 誠一 (富山国際大学・名誉学長)
- 海野 進 ((財)富山県新世紀産業機構専務理事)
- 榎本 祐嗣 (工業技術センター所長・中央研究所長)
- 龍山 智榮 (富山大学・名誉教授)
- 東保喜八郎 ((財)富山県新世紀産業機構参与)
- 南日 康夫 ((財)富山県新世紀産業機構科学技術コーディネータ)
- 藤城 敏史 ((財)富山県新世紀産業機構産学官連携推進センター長)
- 米田 政明 (富山高等専門学校校長)

(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・ファクシミリ番号 〒 TEL: FAX:
連絡担当者所属・役職・氏名・E-mail address
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（事業所名） 印 「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わせください。

☆申し込み先

〒930-0866 富山市高田529

(財)富山県新世紀産業機構

「若い研究者を育てる会」事務局

TEL 076-444-5607

FAX 076-444-5630

発 行 者	若い研究者を育てる会
	〒930-0866 富山市高田529 (財)富山県新世紀産業機構 プロジェクト推進課内
発行責任者	富山県工業技術センター 二口 友昭 石黒 智明 杉森 博 (財)富山県新世紀産業機構 加茂 真理子
発行年月日	平成25年3月14日
印 刷 所	富山スガキ株式会社

*無断転載を禁ずる。非 売 品。