

平成 28 年 度

(第 30 回)

若い研究者を育てる会研究発表会

研究論文集

平成 29 年 3 月 15 日 (水)

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
富山県立大学工学部

ごあいさつ

会長 武内 繁和

若い研究者を育てる会では、今年度も県内の各企業から選ばれた若き精鋭が、一年間にわたり各研究テーマに真剣に取り組んでまいりましたが、その成果報告としての研究論文集が今年も発行されるはこびとなりました。当会は今年度で節目の30周年を迎えたわけですが、「これからの県内企業の若手技術者を、創造的な研究者として育成していこう」との趣旨により、昭和62(1987)年1月に異業種交流団体として発足して以来、今日まで継続的に活動してこられましたのも、ひとえに大学の諸先生方や工業技術センターの方々の熱心な指導をはじめ、富山県新世紀産業機構、他会員企業の関係各位のご支援の賜物とここに深く感謝申し上げます。



さて、当会設立の原点に立ち返ってみますと、研究の成果は勿論大切ではありますが、研究活動に携わる過程で、研究者としての素養を身につけると同時に、研究や共同作業を通じての問題発見・問題解決力や計画管理・調整力、報告発表を通じてのプレゼンテーション能力等を養うこと、また、県工業技術センターをはじめ同世代の異業種の方々との繋がりが得られることは、将来を担う若い人たちにとっては貴重な経験となっていると思います。各企業が単独でこのような機会をもつことは難しいと思われませんが、富山県による「ものづくり研究開発センター」でのデジタルものづくりラボ、高機能素材ラボや最先端機器等設備の拡充といったサポート体制や30年も前から県内の若手研究者の育成やその環境づくりを支えている当会の活動実績には、大きな意義があるものと思います。

今後は、より短期間で実利に結びつくような研究テーマへの取り組みも考えながら、富山県が産官学の連携により注力している「ものづくり県とやま」としての本県の産業と県内企業の技術力の発展に向け、当会の活動がさらに活性化し、また若い研究者の皆さんにとって将来的に世界に通ずる活躍に繋がることを心から期待しております。

おわりにになりましたが、この記念すべき年の「第30回研究論文集」の発行を機に、当会の今後のますますの発展を祈念するとともに、関係各位の変わらぬご指導とご支援をお願いして、発行にあたってのごあいさつとさせていただきます。

研究の概要

「若い研究者を育てる会」（以下、「若研」）の研究発表会は今年度で30回目を迎えた。本論文集は「若研」に参加する企業（現在の会員企業数13社）と会員企業の研究者が6つの研究テーマとグループを定め、平成28年5月から富山県工業技術センターにおいて、6グループ（6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、6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協力と指導のもとで実施した。ここでは、今年度実施した6テーマの研究概要を研究発表順に述べる。

富山大学大学院理工学研究部 理学博士 西村 克彦

①「厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究-II」の研究グループ（参加企業1社）。

省エネルギーと自動制御は社会の流れであり、センサーネットワークシステムに対する要求は益々高まると考える。本研究は、このシステムを構築する上で不可欠なエネルギーハーベスティングを身近にある環境エネルギーを利用して行き、半永久的な電力供給源を得ることを目指した挑戦的取り組みである。昨年度までの研究の結果、セラミック基板のイットリア安定化ジルコニアと安価な金属基板上に圧電体厚膜をスクリーン印刷法で形成し発電に成功した。しかし、金属基板を用いた素子の発生電力はセラミック基板を用いた素子の1/4程度であったこと、さらに電極に高価なPtを使用しており、コストが高いといった課題があった。そこで、本研究では安価な金属基板を用いて、セラミック基板を用いた圧電体厚膜と同等程度の電気的特性を得ることと電極の低コスト化を目指した。結果、安価なAgPd電極を利用してPt電極以上の最大発電量を得ることに成功している。



富山県工業技術センター機械電子研究所 博士(工学) 佐山 利彦

②「振動の簡便な測定法・低減法の開発」の研究グループ

（参加企業1社）では、振動対策の要求が厳しい自動車分野に関連し、ホビー用模型自動車の制振ホイールを研究対象として、制振デバイスを簡便に製作する方法の検討、振動エネルギーを消散する内部構造の検討、および試作ホイールの振動減衰効果の評価を行った。まず、制振機能を有しない部材に対して、外形寸法を変えず、内部構造の大幅な変更や寸法の微調整が容易に可能な3Dプリンタによる造形方法を適用した。種々の構造のホイールを試作した結果、部材の表面同士が接触する際の滑り摩擦を利用する円板状櫛歯対向構造を有するホイールが優れた振動減衰効果を示した。すなわち、磁石を用いて接触面の滑り摩擦力を調整することにより、振動減衰比を増加させ、衝撃負荷に対する強い振動減衰応答を期待できることが分かった。今後、3Dプリンタを用いた応急的な制振デバイスの開発へ適用していきたい。



富山県工業技術センター中央研究所 博士(工学) 石黒 智明

③「金属積層造形の基礎と造形物の評価に関する研究」の研究グループ（参加企業2社）。

金属の積層造形法によるものづくりは、特異な形状が製造できる、納期短縮や特性向上の可能性があるなどにより注目されている技術である。しかしながら、造形不得手な形状やサポート材が必要な場合があるなど、上記メリットを最大限に発揮させるには、その特徴の修得が必要である。そこで、本研究では、種々の構造要素を含む形状物をアルミニウム合金やステンレス鋼で造形し、造形物の形状や特性を評価することで、造形限界等の基礎的な特性を明らかにした。



富山県工業技術センター・中央研究所 博士(工学) 土肥 義治

④「容器用実用アルミ材の耐食性および腐食反応の解析に関する研究」の研究グループ（参加企業1社）では、実際に容器用に使用されている成形加工後のアルミ材について内容物に使用される成分を想定したモデル液で耐食性試験を行うことで、耐食性に影響する成分の特定及び電気化学的測定と浸漬腐食試験の相関について比較検討した。具体的には、まず、電気化学測定におけるセルの構成や測定手順の検討から始め、再現性を得るための実験手法や現象の理解に取り組み、アルミ材の腐食に及ぼす塩化物イオンやpHだけではなく、キレート剤や界面活性剤、アミノ酸、クエン酸などの影響など幅広く調べている。特に、電気化学測定において、不動態形成が阻害される組み合わせでは、浸漬試験における腐食量が著しく増大する相関が得られている。飲料メーカー、化粧品メーカーなどのユーザーニーズの多様化に伴い、充填される内容物の液性も様々なものとなり、容器に要求される耐食性もますます厳しいものとなっている。本テーマは、生産現場からのニーズに基づいており、アルミ材の耐食性を評価することは、素材の選定や製品のリスク管理の観点からも重要と考えられる。



富山県工業技術センター機械電子研究所 博士(工学) 杉森 博

⑤「エンドミル加工での工具寿命向上に関する研究」の研究グループ（参加企業1社）では、エンドミル加工時にリアルタイムで計測できる切削力や振動から工具寿命を推定する手法について検討した。加工中の切削力と振動の（治具の固有振動数由来の）特定周波数成分の大きさと加工された試料の表面粗さの相関が概ね見られた。工具寿命は、加工後の試料の表面粗さ等を指標としていることから、切削力と振動の特定周波数成分のモニタリングによる工具寿命検出の可能性が見られた。さらに検討を加え、本手法の信頼性が高まれば、これまで製品の仕上がり具合に安全率



を見込んで工具寿命としていた方法より工具の寿命向上につながることを期待される。

富山県工業技術センター中央研究所 博士(工学) 岩坪 聡

⑥「ウェアラブル電源の開発」の研究グループ（参加企業3社）では、ウェアラブル機器用の小型電源として期待されている有機薄膜太陽電池の作製とその応用について検討した。ガラス基板を用いて、電池作製に必要な基本的なデータを取り、その後、PETフレキシブル基板への適用と、大面積化のプロセスの検討を行った。大面積化では、溶液塗布過程でのムラや残留水分などからピンホールが発生し、全体の効率を減少させたが、SEM観察から目的とする活性層のナノドメイン構造が確認できたことと、変換効率は活性層の厚みが50 nmで0.35%、190 nmで0.26%と、活性層が薄い方が変換効率が良くなることなど、有機薄膜太陽電池における変換効率の向上に関する知見が得られた。



以上、本論文集は6つの独立した研究テーマと成果から構成されているが、残念なことに今年度も一つのテーマに対して複数の企業が参加した研究テーマは6テーマ中2テーマであった。

化石エネルギーの消費に伴う二酸化炭素の大量排出と地球温暖化や、原発に対する信頼性の低下などの問題もあって、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2テーマ実施した。

今年度を含めた30年間で190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。30年間のテーマを富山県が戦略的に進める科学技術事項に準拠して分類すると次のとおりとなる。

- ・ライフイノベーション関連：28テーマ（14.7%）
- ・グリーンイノベーション関連：41テーマ（21.6%）
- ・先端ものづくり技術開発関連：121テーマ（63.7%）

また、今年度は「若研」が発足して30年にあたることから、昨年10月8日（土）にホテルグランテラス富山で30周年記念講演会と交流会を開催した。記念講演には国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）から研究開発員島明日香博士（理学）（富山県小矢部市出身）を招へいし、JAXAで実施している宇宙開発プロジェクトの概要や島博士自身が行っている宇宙での空気再生技術の開発研究の概要などを講演していただいた。講演会には約130名、交流会には約90名が参加し「若研」卒業生同士や研究指導者などとの旧交を温めた。

「若研」のこの30年間の研究で得られた成果は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や製品の検査技術などに応用され、材料技術などはセンサー技術や建材関連技術、自動車の機能性部品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、企業・業種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29年3月（名誉研究幹事 工学博士 谷野克巳）

研究グループの構成

I. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究-IIの研究グループ

研究担当者 **今井 航平 (北陸電気工業㈱)**

- 坂井 雄一 (工業技術センター機械電子研)
- 升方 康智 (工業技術センター機械電子研)
- 寺澤 孝志 (工業技術センター機械電子研)
- ☆西村 克彦 (富山大学大学院理工学研究部)

II. 振動の簡便な測定法・低減法の開発の研究グループ

研究担当者 **林 大清 (コーセル㈱)**

- 金森 直希 (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)
- 住岡 淳司 (工業技術センター中央研究所)
- ☆佐山 利彦 (工業技術センター機械電子研)

III. 金属積層造形の基礎と造形物の評価に関する研究の研究グループ

研究担当者 **永田 直也 (三協立山㈱)**

滝沢 将史 (コーセル㈱)

- 氷見 清和 (工業技術センターものづくり)
- 山本 貴文 (工業技術センター中央研究所)
- 住岡 淳司 (工業技術センター中央研究所)
- ☆石黒 智明 (工業技術センター中央研究所)

IV. 容器用実用アルミ材の耐食性および腐食反応の解析に関する研究

の研究グループ

研究担当者 **深川 裕之 (武内プレス工業㈱)**

- 本保 栄治 (工業技術センター機械電子研)
- 鍋澤 浩文 (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)
- ☆土肥 義治 (工業技術センター)

V. エンドミル加工での工具寿命向上に関する研究の研究グループ

研究担当者 **中嶋 謙 (田中精密工業㈱)**

- 羽柴 利直 (工業技術センター機械電子研)
- 上野 実 (工業技術センター生活工学研)
- 金森 直希 (工業技術センター機械電子研)
- 川堰 宣隆 (工業技術センター中央研究所)
- ☆杉森 博 (工業技術センター機械電子研)

VI. ウェアラブル電源の開発の研究グループ

研究担当者 **関口 貴彬 (コーセル㈱)**

天野久美子 (北陸電気工業㈱)

坂井 友樹 (立山科学工業㈱)

- 寺澤 孝志 (工業技術センター機械電子研)
- 升方 康智 (工業技術センター機械電子研)
- 坂井 雄一 (工業技術センター機械電子研)
- 本保 栄治 (工業技術センター機械電子研)
- 関口 徳朗 (工業技術センター機械電子研)
- 杉森 博 (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

☆印は研究幹事

目 次

I. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究-II	1
1. 緒 言	1
2. 実験方法	1
3. 実験結果	3
4. まとめ	7
II. 振動の簡便な測定法・低減法の開発	8
1. 緒 言	8
2. 自動車模型のサスペンション	8
3. 振動エネルギーを消散する制御ホイール	9
4. 樹脂用3Dプリンタによる制御ホイールの一体造形	10
5. 造形物の制振性能評価試験	11
6. 結 言	13
III. 金属積層造形の基礎と造形物の評価に関する研究	14
1. 緒 言	14
2. 金属3Dプリンターの概要	14
3. 実験方法、結果および考察	15
4. 結 言	20
IV. 容器用実用アルミ材の耐食性および腐食反応の解析に関する研究	21
1. 緒 言	21
2. 実験方法	21
3. 実験結果と考察	22
4. 結 言	28
V. エンドミル加工での工具寿命向上に関する研究	29
1. 緒 言	29
2. 実験装置の構成	29
3. 実験方法及び結果	30
4. 結 言	36

VI. ウェアラブル電源の開発	-----	37
1. 緒言	-----	37
2. 実験方法	-----	37
3. 実験結果および考察	-----	39
4. 結言	-----	44
○各研究グループの研究活動風景	-----	付-1
○「若い研究者を育てる会」30年間の研究活動の足跡	-----	付-7
○「若い研究者を育てる会」30周年記念講演会について	-----	付-23
○会員企業および研究幹事名簿	-----	付-24
○入会申込書	-----	付-25

I . 厚膜型圧電発電振動素子の 開発に関する研究- II

Study on Thick-film Piezoelectric Element for Energy Harvesting-II

今井 航平 坂井 雄一 升方 康智 寺澤 孝志 西村 克彦
IMAI Kouhei SAKAI Yuichi MASUGATA Yasutomo TERASAWA Takashi NISHIMURA Katsuhiko

Abstract

Energy harvesting (EH) techniques using piezoelectric devices which generate electric power from vibration energy in a surrounding environment are extensively studied for a power source of mobile devices and wireless sensor networks. However, these devices are mostly formed on a ceramics substrate with Pt electrode, so it has low impact resistance and a manufacturing cost is high. To solve the problem, we have been fabricating a lead zirconate titanate (PZT) thick film on a stainless and inconel substrate with Ag-Pd alloy electrode of various concentration ratios of Ag and Pd by the screen printing method to achieve high impact resistance and reduce the manufacturing cost. The electrode formed on the stainless substrate peeled off during the firing process because the interface between the metal substrate and the electrode was oxidized. In contrast, oxidation of the metal substrate was inhibited by a short time firing process. The oxidization of Inconel substrate was also reduced by the short firing process, but the grain size of the PZT film with normal firing process are larger and the electrical properties are better than those with the short firing process. The generated power of the PZT thick film on the Inconel substrate was found to be comparable with those of the thick film on a YSZ substrate with a Pt electrode when the concentration ratio of Ag-Pd was 8:2 for the electrode.

1. 緒言

化石燃料の枯渇や地球温暖化さらには原子力発電の安全性への懸念を背景に、風力発電や太陽光発電を代表とする大規模な環境発電の開発が加速している。その中で、我々の身の回りに存在する環境エネルギーから比較的小きな電気エネルギーを獲得することができるエネルギーハーベスティング技術にも関心が高まりつつある。この技術の最大の特徴は環境エネルギーが存在している限り半永久的に電力を供給することが可能な点にあり、電池レスやメンテナンスフリーといったメリットがある。

近年、もののインターネット「IoT」のような無線センサがインターネットを介して情報を伝達する技術も注目されているが、センサネットワークシステムを構築する上で、電池交換や電気配線が問題点として挙げられている。エネルギーハーベスティング技術により、身近にある環境エネルギーを利用して半永久的な電力供給源にすることができるため、その問題を解決することができる。

エネルギーハーベスティング技術では、光・熱(温度差)・振動・電磁波など様々な形態で存在する自然エネルギーを微小電力に変換することができ、利用するエネルギーの形態に応じた発電方式がある。その中でも我々は振動エネルギーを利用した発電に着目し、振動を電力に変換する方法の中でも構造が簡単で比較的大きな発生電圧を得ることができる圧電素子を用いた発電を行うこと

にした。

圧電素子の形状にはバルク、薄膜、厚膜等があるが本研究ではパターン形成の際、エッチング等の複雑な工程が不要で材料ロスも少なく量産向きであるスクリーン印刷法で圧電体厚膜の形成を行うことにした。

昨年度までの研究の結果、セラミック基板のイットリア安定化ジルコニア(以下YSZと省略)と安価な金属基板(Ni)上に圧電体厚膜をスクリーン印刷法で形成し発電に成功した。しかし、金属基板を用いた素子の発生電力はセラミック基板を用いた素子の1/4程度であったこと、さらに電極に高価なPtを使用しており、コストが高いといった課題があった。そこで、本研究では安価な金属基板を用いて、セラミック基板(YSZ)を用いた圧電体厚膜と同等程度の電気的特性を得ることと電極の低コスト化を目指した。具体的には、金属基板の変更と使用電極のPtからAg-Pdへの変更について検討した。

2. 実験方法

< 2. 1 > スクリーン印刷法による圧電体厚膜の作製

厚膜の作製手順を図1に示す。基板には、セラミック基板と金属基板を使用した。セラミック基板材料としては、昨年度も使用

した高温でも安定性の高いイットリア安定化ジルコニア(以下 YSZ と省略)を、金属基板材料としては、耐熱性・耐食性の高いニッケル系合金のインコネル 600 (以下インコネルと省略)と耐熱鋼として使われ比較的安価なステンレス鋼 SUS310S (以下 SUS と省略)を用いた。電極には Ag 粉と Pd 粉が Ag-Pd=7:3、8:2、9:1 の割合で含まれる 3 種類のペーストを用いた。基板に各々の Ag-Pd ペーストをスクリーン印刷し、950°C、1000°C、1050°C の 3 条件で焼成し、下部電極とした。さらにハード系 PZT の圧電材料のペーストを下部電極の上部にスクリーン印刷し、550°C で脱バインダをした後、950°C、1000°C、1050°C の 3 条件で焼成を行った。この印刷⇒脱バインダ⇒焼成の工程を 3 回繰り返して圧電体の厚膜を厚くしていった。焼成のパターンとしては圧電体を焼成するのに一般的な焼成プロファイル (以下、通常焼成) と基板へのダメージを軽減させることを目的とした短時間焼成の 2 種類行った。それぞれの焼成プロファイルを図 2 に示す。圧電体厚膜形成後、金(以下 Au) ペーストをスクリーン印刷し、900°C で焼成することで上部電極を形成した。各電気特性を測定後、120°C で 2kV/cm で 5 分間の分極処理を行い、圧電特性を評価した。

厚膜の構成は図 3 (a) のようになっており、焼成後の厚みは上部電極が約 10μm、圧電材料が 30~50μm、下部電極が約 10μm であった。また、使用した基板の厚みは YSZ、インコネル、SUS とともに 200μm であった。図 3 (b) に試作した素子の写真を示す。完成した素子のサイズは、縦幅 16mm、横幅 2mm であった。

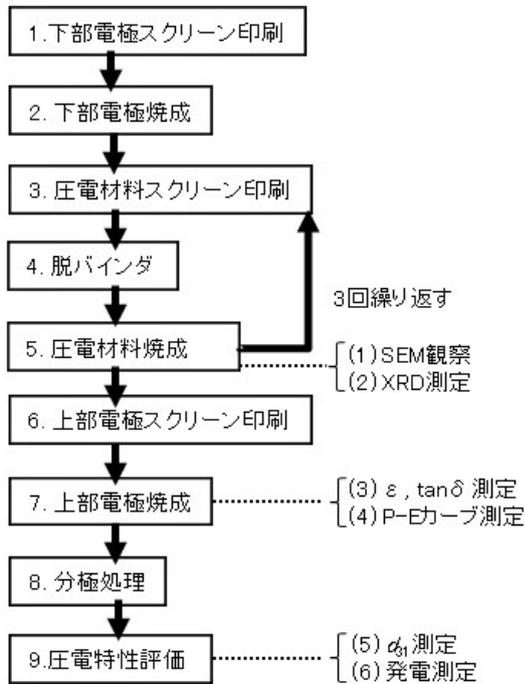


図 1 圧電体厚膜の作製手順
Fig. 1 Preparation process of piezoelectric thick films

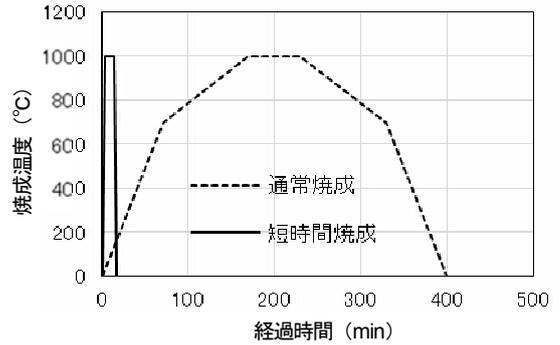


図 2 通常焼成と短時間焼成の焼成プロファイル
Fig. 2 Firing profiles of conventional firing and short time firing

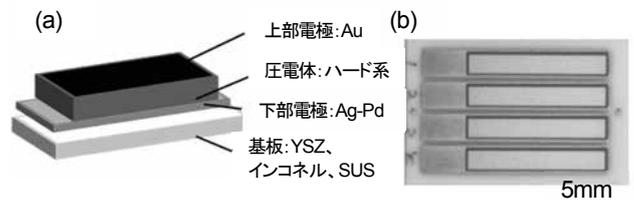


図 3 (a) 厚膜模式図および(b)厚膜試料外観
Fig. 3 (a) Schematic image of thick film and (b) OM image of prepared thick films

< 2. 2 > 圧電体厚膜の評価方法

作製した圧電体厚膜は焼成後に SEM 観察 (JSM-6610LA、日本電子株) による結晶粒の確認と XRD (D8DISCOVER with GADDS、ブルカー-AXS) による結晶相の確認を行なった。

< 2. 3 > 厚膜の電気特性評価方法

インピーダンスアナライザ (4192A、横河ヒューレットパッカード株) により、1kHz での静電容量 C、tan δ を測定し、静電容量 C は厚膜厚みと電極面積から比誘電率 ε_r を計算した。また、強誘電体テストシステム (FCE-I、株東陽テクニカ) により 1Hz での P-E ヒステリシスカーブを測定した。

素子の圧電定数 d₃₁ は、図 4 に示すように、素子に電圧を印加した際の変位量をレーザー変位計で測定し、以下の式から算出した。²⁾

$$d_{31} = -\frac{h_s^2 E_s}{3E_p L^2} \times \frac{\delta}{V} \quad (1)$$

ここで h_s: 基板厚み、E_s: 基板ヤング率、E_p: 厚膜ヤング率、L: 長さ、δ: 変位、V: 印加電圧である。

素子の圧電定数 g₃₁ は、以下の式から算出した。

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (2)$$

ここで d₃₁: 圧電定数、ε_r: 比誘電率、ε₀: 真空の誘電率、である。

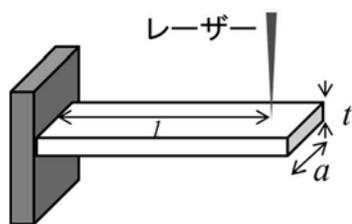


図4 素子の d_{31} 測定システム模式図。
Fig. 4 Schematic image of measurement system of d_{31}

< 2. 4 > 厚膜の発電特性評価方法

作製した素子に 0.68g の錘を取り付け、下部電極および上部電極から配線を引き出し、加振器 (F-16000BDH/SLS16、EMIC(株)) に固定し、加速度 0.5G、周波数 60~120Hz で振動させた。図 5 に、出力電圧測定時の模式図を示す。素子から引き出された配線をオシロスコープに接続し、共振周波数付近で負荷抵抗毎の出力電圧を測定し出力電力を見積った。

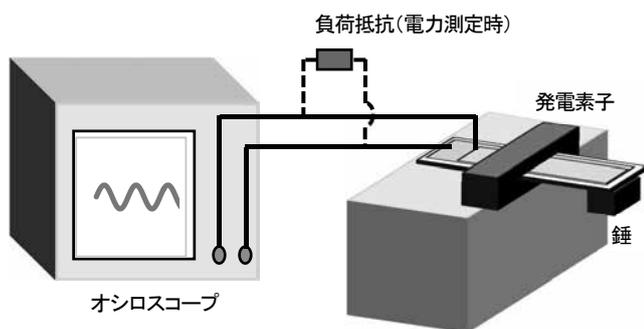


図5 出力電圧および出力電力測定系の模式図
Fig. 5 Schematic image of measurement system for output power

3. 実験結果

< 3. 1 > 電極形成の結果

電極形成を行う条件として使用電極に Ag-Pd7:3、8:2、9:1、焼成温度を 950°C、1000°C、1050°C の条件で基板 (YSZ、インコネル、SUS) 上に電極ペーストを印刷、焼成し、SEM および XRD で焼成状態の確認を行った。

YSZ 基板上に形成した電極を観察した SEM 写真を図 6 に示す。この写真は横に電極の焼成温度 950°C、1000°C、1050°C、縦に Ag-Pd 電極の配合比 7:3、8:2、9:1 と並んでいる。写真を観察すると焼成温度が高くなるほど粒成長が進み、Ag と Pd の比率に関しては Ag の含有量が増加するにつれて粒成長が進んだ。これは Ag の割合が増加すると融点も低くなるためと考えられた。Ag-Pd9:1 の 1050°C では焼成温度が高すぎるため電極が溶けて一度液状になったことによる金属の凝集体が見られた。よって Ag-Pd9:1 のペーストは 1050°C 以上では電極として使用することが出来ないことが分かった。

次に YSZ 基板上に形成した電極の XRD 結果を図 7 に示す。XRD の結果を見ると合金化した Ag-Pd のピークが見られた。さらに Ag-Pd7:3 の条件では PdO のピークが観察された。表 1 に YSZ 基板上の Ag-Pd 電極に PdO のピークの有無を示す。通常、PdO は 1000°C 付近の高温で焼成すると還元されているはずだが、Pd 含有量の多い 7:3 の条件では PdO が検出され、Pd 含有量の少ない 8:2、9:1 の条件では PdO のピークは見られなかった。

次にインコネル基板および短時間焼成での Ag-Pd 電極の SEM 写真を図 8 に XRD 結果を図 9 に示す。SEM 観察の結果、YSZ 基板同様に焼成温度が高く、Ag-Pd 電極の Ag 含有量が多い条件の方が粒成長しやすかった。XRD 測定の結果についても合金化した Ag-Pd のピークが見られるが、Ag-Pd7:3 の条件に限っては PdO のピークも観察された。表 2 にインコネル基板上の焼成後の電極の PdO ピークの有無を示す。Pd 含有量の多い 7:3 の条件では YSZ 基板上の Ag-Pd 電極と同じく PdO が検出される傾向にあった。

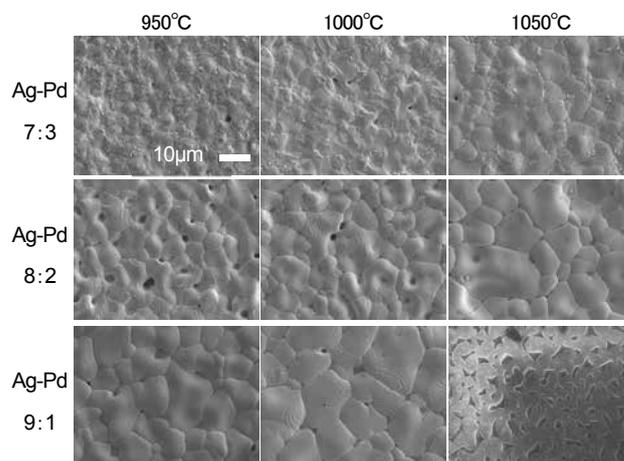


図6 YSZ 基板上に焼成した Ag-Pd 電極 SEM 像
Fig. 6 SEM images of surface of Ag-Pd electrodes after firing prepared on YSZ substrates

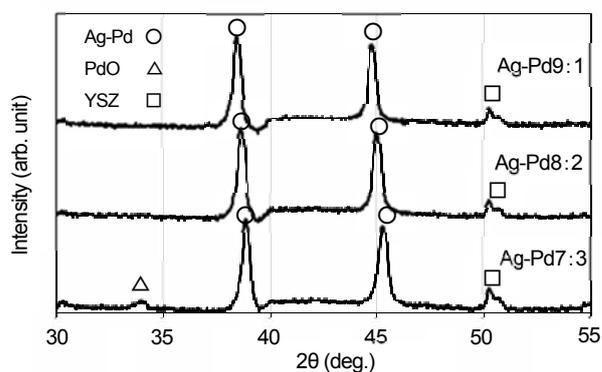


図7 YSZ 基板上に焼成した Ag-Pd 電極の XRD チャート
Fig. 7 XRD charts of Ag-Pd electrodes prepared on YSZ substrates

表1 YSZ 基板上に作製した Ag-Pd 電極における PdO ピークの有無
Table 1 Appearance of PdO peaks in XRD charts of Ag-Pd electrodes after firing prepared on YSZ substrates

		焼成温度		
		950°C	1000°C	1050°C
AgPd 配合比	7:3	有り	有り	有り
	8:2	無し	無し	無し
	9:1	無し	無し	無し

表2 インコネル基板上に作製した Ag-Pd 電極における PdO ピークの有無

Table 2 Appearance of PdO peaks in XRD charts of Ag-Pd electrodes after firing prepared on YSZ substrates

		焼成温度		
		950°C	1000°C	1050°C
AgPd 配合比	7:3	有り	有り	有り
	8:2	無し	無し	無し
	9:1	無し	無し	無し
	8:2 短時間焼成	無し	無し	無し

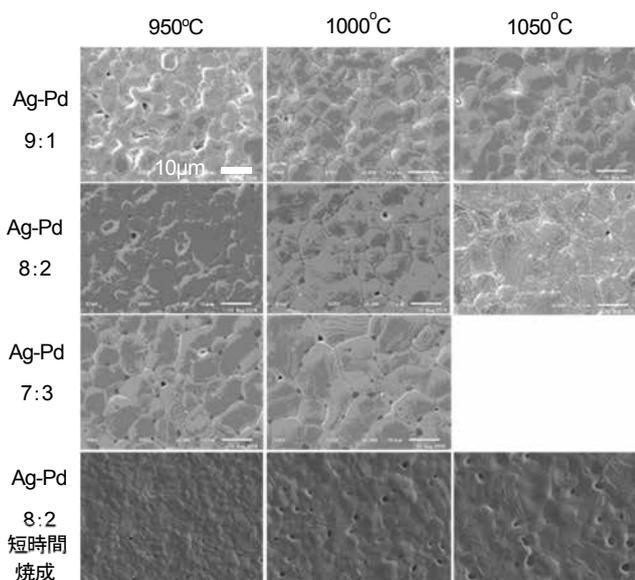


図8 インコネル基板上に焼成した Ag-Pd 電極 SEM 像

Fig. 8 SEM images of Ag-Pd electrodes prepared on Inconel substrates after firing

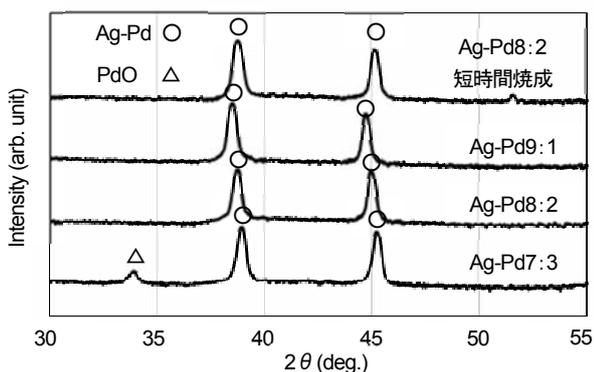


図9 インコネル基板上に焼成した Ag-Pd 電極の XRD チャート

Fig. 9 XRD charts of Ag-Pd electrodes prepared on Inconel substrates after firing

< 3. 2 > 圧電体厚膜形成の結果

YSZ 基板を用い、Ag-Pd 電極焼成、圧電材料印刷、脱バインダを順に行ったところ、脱バインダ後に剥離が発生した。観察の結果、下部電極-圧電厚膜間での剥離であることが分かった。この下部電極-圧電厚膜間の剥離発生の有無を表3に示す。表3と表2を比較すると剥離は電極にPdOのピークが見られた条件で発生している。Ag-Pdは大気中で加熱すると200-500°C付近でPdが酸化しPdOとなり、急激な熱膨張を起こす。³⁾本研究の脱バインダの際にも昇温に伴うPdO生成による急激な体積変化により下部電極-圧電厚膜間の剥離が発生したと考えられた。そこでPdOが生成され、下部電極-圧電厚膜間の剥離を発生させてしまうAg-Pd7:3は下部電極としては不适当と考えられた。また前述のとおりAg-Pd9:1は1050°Cの高温では溶けて使用出来ないため本研究ではAg-Pd8:2を下部電極として使用することとした。

Ag-Pd8:2の電極でYSZ基板とインコネル基板、SUS基板を用いて圧電体厚膜の作製プロセスを進めたところ、あらたに焼成後に剥離が発生した。表4にAg-Pd8:2電極を用いて通常焼成を行った後の剥離状態を示す。剥離が生じた条件はSUS基板を用いたもので、他の条件は問題なかった。SUS基板の剥離箇所を調べるため剥離面の表面分析を行った。図10に1000°C焼成の電極剥離面をXPS(Quantum2000、アルバックファイ(株))で分析した結果を示す。剥離界面にはFeやCrの酸化物があることが分かった。このことから、焼成後の剥離はSUS基板と下部電極の界面に形成されたSUS基板成分の酸化層で発生している事が分かった。図11はSUS基板の焼成前後でのSEM画像になるが、焼成後には基板表面に酸化層が形成している。この酸化層が基板-下部電極間の密着を悪化させる要因となっている。SUS基板の通常焼成はすべて剥離した。そこで、通常焼成よりも熱履歴が少ないと考えられる短時間焼成を行い剥離の有無を調べた。その結果を表5に示す。SUS基板を用いたものでも短時間焼成の熱履歴が少ない分、酸化の影響も少ないので剥離は生じなかった。しかし、焼成後の基板分割のためダイシングを行った時の振動により、短時間焼成のものでも950°C焼成以外は基板-下部電極間で剥離を生じた。SUS基板を用いる場合は短時間焼成でも焼成温度を950°C以下に抑える必要がある。

表3 YSZ 基板の上に作製された厚膜の脱バインダ後の剥離発生

Table 3 Occurrence of delaminations of thick films prepared on YSZ substrates after de-binder process

		焼成温度		
		950°C	1000°C	1050°C
AgPd 配合比	7:3	有り	有り	有り
	8:2	無し	無し	無し
	9:1	無し	無し	無し

表4 通常焼成後の厚膜剥離の発生

Table 4 Occurrence of delaminations of thick films after conventional firing process

		焼成温度		
		950°C	1000°C	1050°C
基板	YSZ	無し	無し	無し
	インコネル	無し	無し	無し
	SUS	有り	有り	有り

表5 短時間焼成後の厚膜剥離の発生

Table 5 Occurrence of delaminations of thick films after short time firing process

		焼成温度		
		950°C	1000°C	1050°C
基板	YSZ	無し	無し	無し
	インコネル	無し	無し	無し
	SUS	無し	有り	有り

< 3. 3 > 電気特性の結果

YSZ 基板およびインコネル基板の上に作製した圧電体厚膜について電気特性の測定を行った。YSZ 基板の上に通常焼成と短時間焼成で作製した厚膜の比誘電率と $\tan\delta$ の焼成温度依存性を図 12 に示す。YSZ 基板の結果は比誘電率の数値は 450~500 程度で推移し、 $\tan\delta$ の数値は約 1% 程度と低い水準となっている。金属基板上に作製した厚膜の比誘電率と $\tan\delta$ の焼成温度依存性を図 13 に示す。比誘電率は 350~500 程度と広い範囲で推移し、 $\tan\delta$ は 3~10% 程度と焼成温度が低くなるほど値は大きくなった。YSZ 基板の上の厚膜の SEM 写真を図 14 に、インコネル基板の上の厚膜の SEM 写真を図 15 に示す。YSZ 基板の上の厚膜と比較してインコネル基板の厚膜の方が欠陥の多い膜となっており、焼成温度が低いと粒成長が進まず膜内がポーラスとなり、 $\tan\delta$ が高くなる要因として考えられた。

1050°C 焼成の厚膜は電気特性が良好な傾向にあるので P-E ヒステリシスカーブや d_{31} の測定、発電特性の測定は 1050°C 焼成の素子を使用した。次に高電界処理、エージング後の P-E ヒステリシスカーブの結果を図 16 に示す。P-E ヒステリシスカーブは昨年度同様に高電界処理、エージング後に大きくかつ安定化した形状となった。一番大きな残留分極値 (Pr) を示したのはインコネル基板の通常焼成条件で $14.6\mu\text{C}/\text{cm}^2$ であった。どちらの基板においても通常焼成と短時間焼成では通常焼成の方が Pr の値は大きく、形状も四角い良好なヒステリシスを描いている。作製した圧電体厚膜の電気特性を表 6 に示す。 d_{31} はインコネル基板の上の厚膜よりも、YSZ 基板の上の厚膜の方が大きかった。切断直後のインコネル基板にはバリや基板のソリが発生しており、変位が抑制され、 d_{31} 測定時の振幅に影響を及ぼした可能性がある。さらに通常焼成と短時間焼成の比較では通常焼成の方が大きな d_{31} を示した。通常焼成の方が十分な粒成長による膜の緻密化がなされたためである。一番大きな抗電界 (E_c) を示したのは SUS 基板の短時間焼成条件で $12\text{kV}/\text{cm}$ であった。

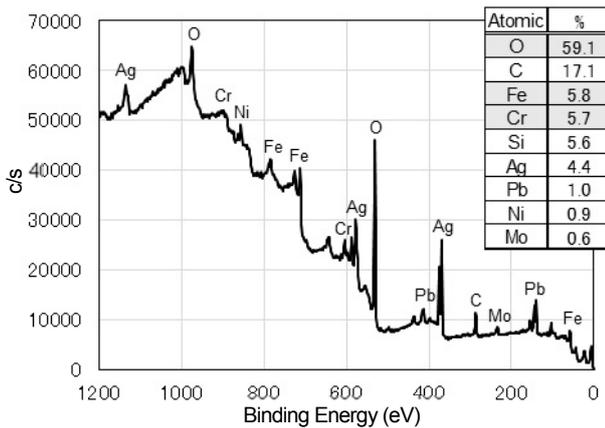


図 10 SUS 基板からの剥離面の XPS スペクトル

Fig. 10 XPS wide spectrum on a peeling surface of SUS substrates

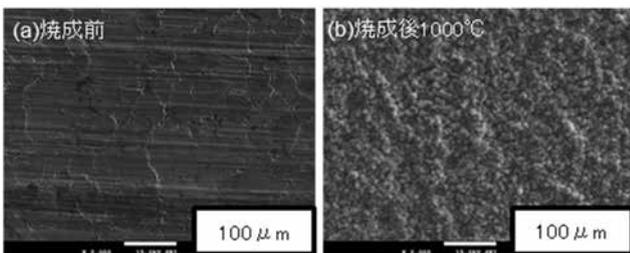


図 11 SUS 基板表面の焼成前後 SEM 像

Fig. 11 SEM images of SUS substrates (a) before and (b) after firing

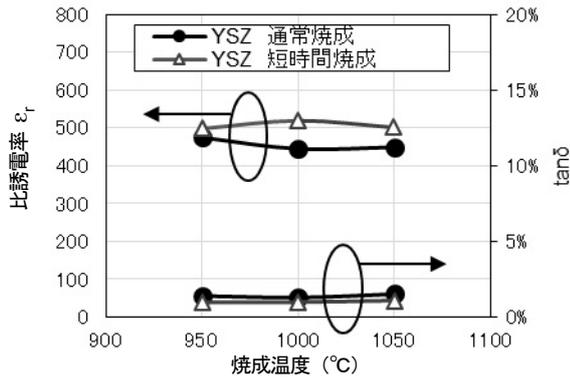


図 12 YSZ 基板に作製した厚膜の比誘電率および tan δ の焼成温度依存性

Fig. 12 Firing temperature dependence of dielectric constant and tan δ prepared on YSZ substrates

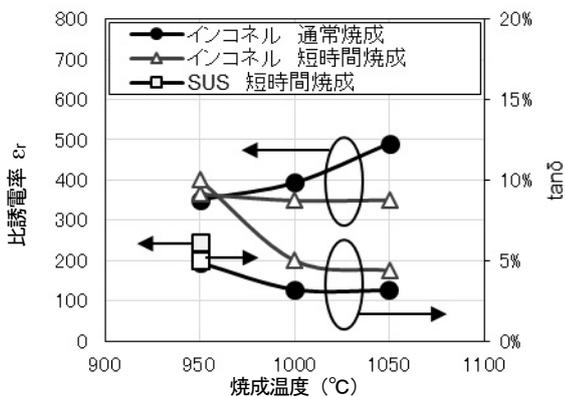


図 13 金属基板に作製した厚膜の比誘電率および tan δ の焼成温度依存性

Fig. 13 Firing temperature dependence of dielectric constant and tan δ prepared on metal substrates

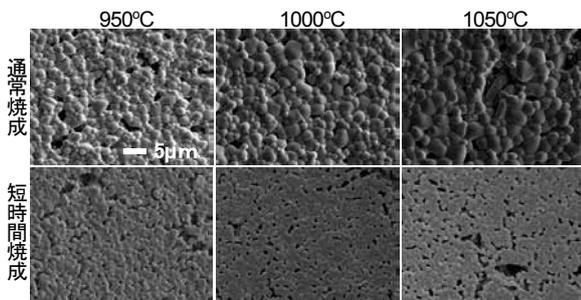


図 14 YSZ 基板上的の圧電体厚膜表面の焼成後 SEM 像

Fig. 14 SEM images of surface of piezoelectric thick films prepared on YSZ substrates

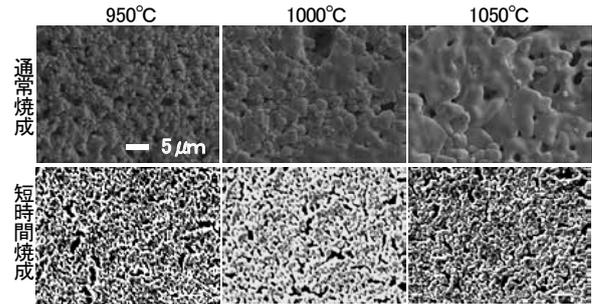


図 15 インコネル基板上的の圧電体厚膜の SEM 像

Fig. 15 SEM images of surface of piezoelectric thick films prepared on YSZ substrates

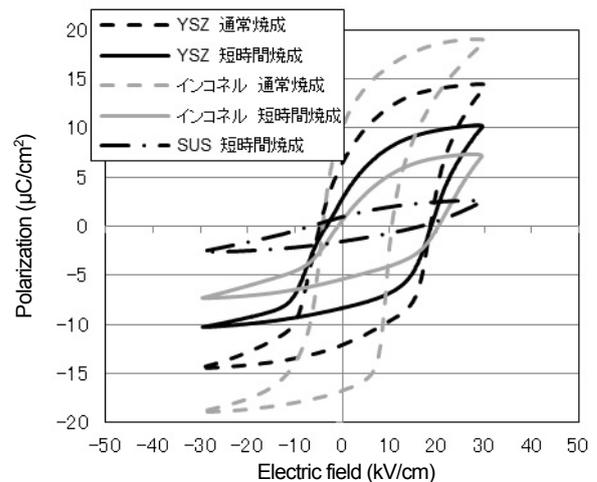


図 16 各種基板に作製した厚膜の P-E ヒステリシスカーブ

Fig. 16 P-E hysteresis curves of thick films prepared on YSZ and Inconel substrates

表 6 作製した圧電体厚膜の電気特性

Table 6 Electric properties of prepared thick films

基板	焼成方法	d_{31} (pC/N)	$-g_{31}$ (V·m/N)	Pr (μC/cm ²)	Ec (kV/cm)	ε _r	tan δ (%)
YSZ	通常 1050°C	38	8.3	10.7	11.6	449	1.5
	短時間 1050°C	31	6.4	7.3	11.0	501	1.1
Inconel	通常 1050°C	8.7	2.3	14.6	7.3	491	3.2
	短時間 1050°C	7.4	2.2	4.6	10.6	350	4.4
SUS	短時間 950°C	3.0	1.3	1.2	12.0	245	5.1

< 3. 4 > 発電特性の結果

図 17 に YSZ 基板とインコネル基板的通常焼成と短時間焼成で作製した素子および SUS 基板的短時間焼成で作製した素子の出力電力を示す。圧電体厚膜の焼成温度は YSZ、インコネル基板上の厚膜が 1050°C、SUS 基板上は 950°C である。YSZ 基板を用いて通常焼成で作製した素子が最も大きな出力電力を示した。共振周波

数は約 99Hz で最大の出力電力は 3.2μW/mm² であった。昨年度作製した YSZ 基板を用いた素子 (Pt 電極、圧電体厚膜焼成温度 1150°C) では約 1.9μW/mm² であった。今年度作製した素子は、昨年度よりも焼成温度が低いにも関わらず大きな出力が得られた。昨年度よりも大きな出力電力を示した要因として、本研究で使用した Ag-Pd 電極の Ag がセラミック焼成の際、液相焼結の助材となり低温

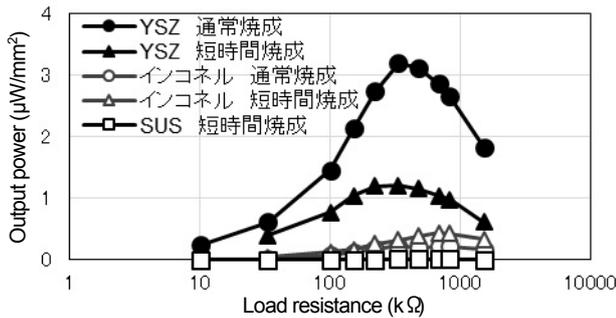


図 17 YSZ、インコネル、SUS 基板上に作製した厚膜の出力電力の負荷抵抗依存性

Fig. 17 Road resistance dependence of output power of thick films prepared on YSZ, Inconel, and SUS substrates

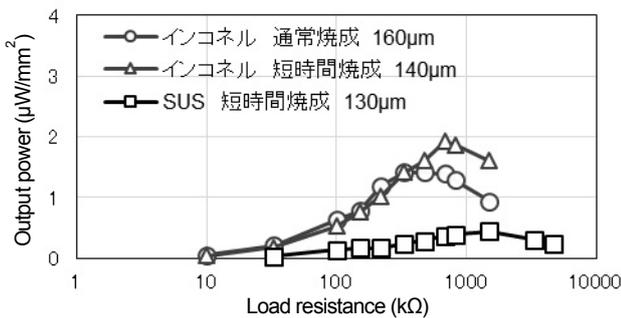


図 18 インコネル、SUS 基板上に作製した厚膜の出力電力の負荷抵抗依存性

Fig. 18 Road resistance dependence of output power of thick films prepared on YSZ, Inconel, and SUS substrates

焼結の効果があつたことや、焼成過程で生じる酸化銀が酸素の供給源となり、圧電厚膜中の酸素欠陥や Pb 欠陥を抑制する効果があつたのではないかと考えられた。通常焼成と短時間焼成の比較では YSZ 基板では通常焼成の方が高い出力電力となった。これは通常焼成の方が粒成長する傾向にあつたためだと考えられた。しかし、インコネル基板を用いて作製した素子では通常焼成と短時間焼成で顕著な差はみられなかった。これは、短時間焼成に比べ通常焼成の方が金属基板の酸化や基板成分のセラミック中への拡散の影響が大きく、出力電力の低下を招くことと、通常焼成の粒成長が大きく緻密化が進むという関係がトレードオフとなるためではないかと考えられた。(通常焼成は基板酸化が進む一方で粒成長が大きく、短時間焼成は基板酸化が進まない一方で粒成長が小さい。)

基板厚みの発電への影響を調べるため金属基板上に作製した厚膜の基板を研磨した。図 18 にインコネル基板を用いて通常焼成と短時間焼成で作製した素子と SUS 基板を用いて短時間焼成で作製した素子の基板研磨後の負荷抵抗と出力電力の関係を示す。同じ厚みに研磨することが出来なかったため比較は出来ないが、基板

を薄くすることで出力電力はどちらも向上し、インコネル基板の通常焼成は最大で $1.4\mu\text{W}/\text{mm}^2$ (共振周波数約 93Hz)、短時間焼成は最大で $1.9\mu\text{W}/\text{mm}^2$ (共振周波数約 64Hz)、となり昨年度作製した YSZ 基板-Pt 電極 1150°C の素子程度の出力電力を示した。さらに薄くした基板でも発電測定を行ったが加振中に素子が折れ、発電特性を測定することができなかった。SUS 基板を用いて短時間焼成で作製した素子は基板研磨を行っても出力電力が低く、最大で $0.4\mu\text{W}/\text{mm}^2$ (共振周波数約 72Hz) であった。

YSZ 基板は高価で脆性材料であることから大面積、大振幅するアクチュエータデバイスには不向きである一方で、今回用いたインコネル基板、SUS 基板は比較的安価でかつ破壊靱性が大きいことから YSZ 基板の問題点を解決できる可能性がある。しかしながら、熱処理による基板酸化の問題が懸念される。そこで焼成回数を 1 回に抑える、還元雰囲気焼成するなど基板酸化の少ない素子の作製条件を検討することや基板厚みの最適化を行うことで、発電特性のさらなる向上が期待できる。

4. まとめ

YSZ、インコネル、SUS、それぞれの基板上にスクリーン印刷を利用して Ag-Pd 電極、圧電体厚膜を形成し、エネルギーハーベスト素子を作製したところ、以下の結果が得られた。

- ・下部電極として Ag-Pd7:3 を使用すると焼成時に PdO が生成し、下部電極-圧電間の剥離が生じた。
- ・金属基板 (SUS) を用いて焼成を行うと基板の酸化層の影響で基板-電極間で剥離が生じたが短時間焼成をすることで金属基板の酸化を低減し、剥離の発生を抑制することができた。
- ・作製した圧電体厚膜は、高電界処理、エージングにより P-E ヒステリシスカーブが安定化した。
- ・短時間焼成では熱履歴が少ないため金属基板の酸化を抑制できる一方で圧電体厚膜の緻密化が進まず通常焼成ほどの発電特性は得られなかった。
- ・YSZ 基板上に Ag-Pd8:2 を下部電極として作製した素子の共振周波数は約 99Hz で最大発電量は $3.2\mu\text{W}/\text{mm}^2$ であった。この値は昨年度 Pt を下部電極とした素子よりも大きな値であった。
- ・インコネル基板上に Ag-Pd8:2 を下部電極として作製した素子の共振周波数は約 64Hz で最大発電量は $1.9\mu\text{W}/\text{mm}^2$ であった。
- ・SUS 基板上に Ag-Pd8:2 を下部電極として作製した素子の共振周波数は約 72Hz で最大発電量は $0.4\mu\text{W}/\text{mm}^2$ であった。

文献

- (1) 山本貴之 他、平成 27 年度若い研究者を育てる会研究発表会 研究論文集, pp. 15
- (2) I. Kanno *et al.*, *Sensor and Actuators A* 107 (2003) pp. 68
- (3) 加藤 他、*電気製鋼* 66 (1995) pp.107

Ⅱ．振動の簡便な測定法・低減法の開発

Development of a Simple Method for Vibration Measurement and Reduction

林 大清 金森 直希 釣谷 浩之 住岡 淳司 佐山 利彦

HAYASHI Taisei KANAMORI Naoki TSURITANI Hiroyuki SUMIOKA Junji SAYAMA Toshihiko

Abstract

Actual vibrational state of machines may differ significantly from the prediction in design. In this case, frequent repetition of vibration measurements leads to prediction delays in delivery and increase in costs. On the other hand, diversification of method for manufacturing the structural members in the machine has made it possible to adjust the mechanical properties by changing its internal structures. Therefore, in the automotive field with strict requirements for vibration control, some methods to adjust in vibration characteristics were investigated by changing the internal structures of the structural members. Especially, focusing on the tire wheels of small model cars requiring vibration countermeasures, the wheels were fabricated by 3D printer using resin. Consequently, damping wheels with opposing disc-shaped comb structure were devised and successfully molded by the 3D printing. The vibration damping effects against steady vibration and impact vibration were evaluated by vibration test apparatus. It was found that the vibration damping performance can be enhanced by increasing the normal force of the friction surface of the wheels using aligned magnets. That is, the vibration damping performance can be controlled by changing the gap and the normal force of the friction surface of the wheels.

1. 緒言

近年、機械の構造材として複合材¹⁾あるいは一体成型部品の使用が増えており、それらの構造材を繋ぎ合わせるために様々な締結法・接合法²⁾が採られるようになってきた。それらを用いた機械の振動状態は非常に複雑なものとなり、設計時に予測することは大変困難であるといえる。そのため、機械の開発時においては、振動の測定・対策を繰り返すことが強いられ、納期の遅れや対策費用の増大を招く恐れがある。他方、機械に使用する構造材の製作方法が多様化しており、構造材の内部構造を変更して機械的特性を調節することができるようになってきた。従来、コストあるいは大きさの観点から、機械の動的な特性である振動への対策が困難であった部材に対して、振動を減衰させる制振機能を付加することなどが期待されている。そこで、本研究では、振動対策の要求が多い自動車に関連する分野を対象として、簡易な制振デバイスの構造および製作方法を検討した。

2. 自動車模型のサスペンション

自動車には、タイヤが路面から受けた振動を車体へ伝達させないようにするために、通常、車体とタイヤホイールの間には、コイルスプリングおよびオイルダンパなどから構成されるサスペンションが設置されている。また、自動車のスケールを小さくしたものに、ホビー用の遠隔操作型の小型自動車模型である RC カーが存在する。この RC カーにおいても、コイルスプリングおよびオイルダンパが車体とタイヤホイールの間に設けられている。

さらに、RC カーよりも更にスケールダウンした自動車模型として、ミニ四駆³⁾と呼ばれる小型の動力付き自動車模型がある。ミニ四駆には、従来、振動を陽に減衰させる目的の部品（タイヤゴムを除く）が搭載されていなかった。しかし、近年のミニ四駆の競技用コース⁴⁾は、大小のジャンプ台をはじめかなりアクロバティックな構成となっており、ジャンプ中の車体姿勢の安定化および着地後の飛び跳ねの低減が勝敗を左右する重要な要素になっている。これに対応するために、近年に上市されている主なミニ四駆モデルでは、車体の前後部などに、衝撃ダンパを取り付けることができるようになってきている。図1は、衝撃ダンパの模式図を示す。衝撃ダンパは、錘およびその錘の運動自由度を所望の方向へ拘束するためのガイドからなる。ミニ四駆の衝撃ダンパは、車体が有する上下方向の運動量を、錘との衝突により迅速に錘へ移動させることで、車体の上下方向の運動量を低減させて着地後の飛び跳ねを抑制するものである。これと同時に、増加した錘の上

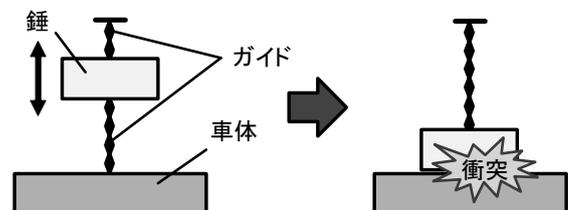


図1 衝撃ダンパの模式図

Fig. 1 Schematic view of an impact damper

下方向の運動量を、ガイドとの摩擦および車体との複数回に渡る小衝突により散逸させる仕組みを有する。衝撃ダンパは、原理的に、ある程度大きな補助質量を必要とし、錘が、車体の振動加速度が 9.8 m/s^2 (1G) を超えた場合のみ車体と分離してダンパとしての役割を果たす。車体の振動加速度が 9.8 m/s^2 以下の場合、錘は車体から分離しないため、単に車重の増加分として寄与することになり、一刻を争う競技には不利益となる。

そこで、本研究では、車重を増加させることなく、かつ 9.8 m/s^2 以下の加速度振幅に対しても振動を減衰させることを目指した制振デバイスとして、サスペンション機能を内在した小型・軽量ホイールを提案する。すなわち、ホビー用途向けに製作した制振ホイールの簡易な製作方法および内部構造の検討、ホイールの試作、および振動試験等による試作ホイールの振動減衰効果の評価について述べる。

3. 振動エネルギーを消散する制振ホイール

< 3. 1 > 制振ホイールの製作方法

サスペンションは、車体および路面の様々な状態に対して振動減衰機能が有効に働く必要がある。ミニ四駆のホイールがホビー用途であり親指サイズ程度であることを考慮すると、振動減衰特性の異なるホイールを予め何種類も作製しておき、テスト走行時の車体の挙動に応じて適切な振動減衰特性のホイールへ交換するという使い方が想定される。比較的低コストで容易に製作が可能であり、ホイールの振動減衰特性を調節でき、かつ再現性の高い製作方法が望ましいと考えられる。このような条件を満たす製作方法として、近年、普及しつつある樹脂用 3D プリンタによる 3 次元造形に着目した。個人向けの 3D プリンタを購入して使用したり、インターネット上の 3D プリントサービスを利用したりすることで、比較的安価に 3 次元造形を実施できる環境が整ってきている。そこで、樹脂用 3D プリンタを使って、単一材料で制振ホイールを一度に造形することを試みることにした。3D プリンタによる造形は、外形寸法を変えずに、内部構造の大幅な変更や各部の寸法を微調整ができる長所がある。このことは、制振機能を持たない部材に対して、部材の内部構造を変更するだけで新たに制振機能を付与できる可能性があることを意味する。産業用途においては、制振部品を 3D プリンタで製作できるようになると、恒常的・根本的な振動対策を実施するまでの繋ぎ役としての活用が期待できる。

< 3. 2 > 振動エネルギーの消散方法

3D プリンタで一度に作成した単一材料の造形物内で振動エネルギーを消散させる方法として、(1) 材料自体が有する粘弾性を利用するもの、および (2) 部材の表面同士が接触する際のすべり摩擦を利用するもの、が考えられる。このうち、(1) については、機械的特性の経年変化や温湿度変化がないものとする、造形時に各部の寸法が決まり、振動の減衰特性は固定される。他方、(2)

については、摩擦力の大きさが接触面の法線力に依存することから、造形後の物体に外力を加えて接触面の法線力を変化させることで振動の減衰特性を調節することができる。

< 3. 3 > 制振ホイールの内部構造の検討

上記 2 つの振動エネルギーの消散方法を取り入れた制振ホイールの内部構造を検討した。外輪は変形しないものとし、軸が外輪の半径方向へ変位する構造を考えた。図 2~4 は、制振ホイールの 3 つの内部構造案を示す。

図 2 は、通常のホイールのすべてのスポークを、重ね板ばね構造で置き換えた形状である。軸が変位した際に発生する板ばね間の接触および滑りに伴う摩擦を利用する。したがって、軸が変位して板ばね構造が圧縮される場合にのみ滑り摩擦の発生が期待でき、板ばね構造が引張り力を受ける場合はすべり摩擦が期待できない。

図 3 は、軸部および外輪部がそれぞれ櫛歯を持つ形状としたものである。対向する櫛歯が接触して滑る際の摩擦を利用する。軸部の櫛歯は櫛先に向かうほど板厚が薄くなるテーパ状となっている。他方、外輪部の隣り合う櫛歯の隙間は、櫛先間の隙間が広く、櫛の根本間の隙間が狭いテーパ状の隙間となっており、軸の変位量が大きくなるほど、摩擦面に加わる法線力が大きくなり、大きな摩擦力が発生することを期待している。なお、軸部と

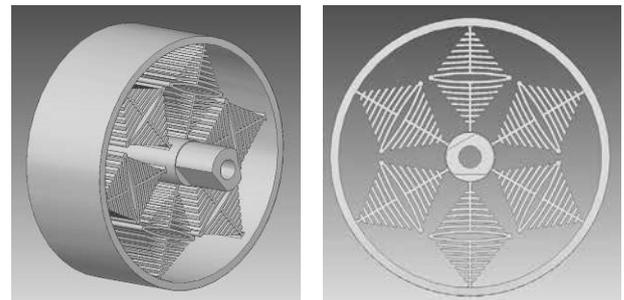


図2 重ね板ばねスポーク構造
Fig. 2 Laminated leaf-spring spoke structure

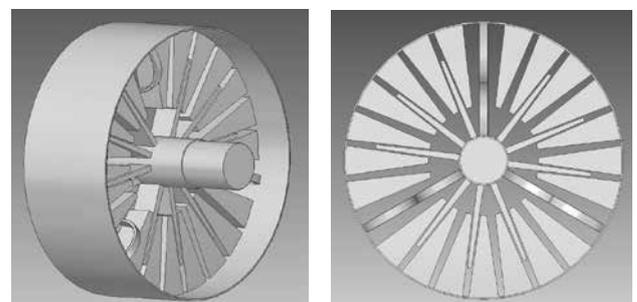


図3 対向櫛歯構造
Fig. 3 Opposing comb structure

外輪部は、120 度に等配置されたバネ部を介して結合している。

図 4 は、図 3 の対向歯構造において、軸部および外輪部の歯の配置方向を変更して円板状の歯としたものである。軸部および外輪部に形成されたそれぞれの円板間に生ずる滑り摩擦を利用する。軸部と外輪部は、90 度に等配置された 4 か所のばね部を介して結合している。

4. 樹脂用 3D プリンタによる制振ホイールの一体造形

< 4. 1 > 造形方法

まず、3D-CAD ソフトウェア (SIEMENS Solid Edge) 上で、3次元ソリッドモデルを作成し、サーフェス (物体の表面) を三角メッシュ化 (同ソフトウェア上で STL データ形式としてファイル保存することで自動的に実施) した後、粉末焼成型の樹脂用 3D プリンタ (EOS Formiga P100) にて STL データを読み込み、所望の形状を一度に造形した。本樹脂用 3D プリンタによる造形の流れは、(1) 樹脂粉末を薄く敷き、(2) ビーム径約 0.5 mm の炭酸ガスレーザを照射して樹脂を溶融・凝固させることで約 0.1 mm の層を作る。そして、(1) および (2) を繰り返すことで薄い樹脂層が積み重なり、所望の形状が完成する。本研究では、造形用樹脂粉末としてポリアミド 12 (ナイロン 12) を用いた。

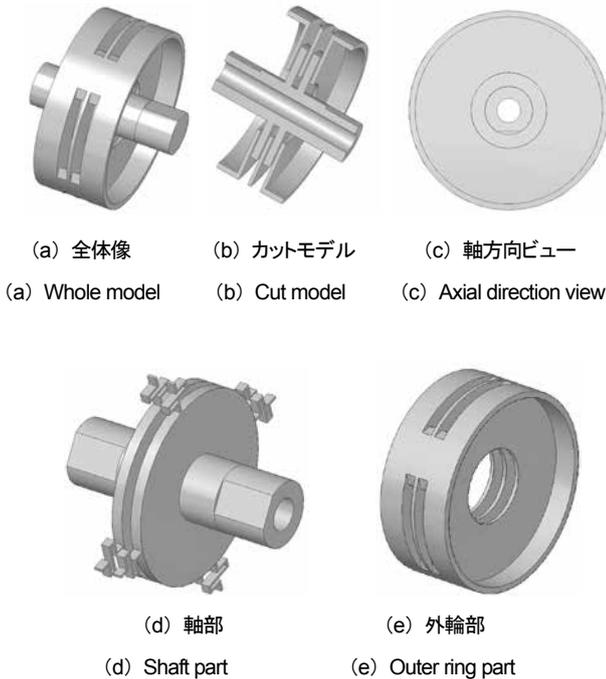


図 4 対向円板状歯構造
Fig. 4 Opposing disc-shaped comb structure

< 4. 2 > ホイールの 3D プリント出力

3章で考案した 3 つのホイール形状について、それぞれ樹脂用 3D プリンタを用いて造形した。図 5~7 は、樹脂用 3D プリンタを使って造形したホイールを示す。ホイールの大きさは、後述の振動試験において実験を容易にするために、ミニ四駆の標準的なホイールよりも大きい直径 50 mm とした。造形時の積層方向は、ホイールの軸方向とした。

図 5 に示された重ね板ばねスポーク構造は、重ね板ばねが圧縮方向の力を受けた際に、板ばねがたわみ、隣り合う板ばね間に滑りを生じる必要がある。造形と CAD データ修正を繰り返して、造形物の隣り合う板ばねが融着しない隙間寸法を探索したところ、CAD 上の寸法値で 0.6 mm 以上が必要であることがわかった。CAD 上でこの隙間の寸法値を 0.6 mm とした造形物において、実際に、軸に大きな変位を与えても隣り合う板ばねが接触せず滑り摩擦の発生には至らなかった。予備造形において、板厚が CAD 上で 2 mm 以上の場合、隣り合う板の間の隙間が 0.4 mm 以上に設定されていれば融着しないことが確認できていたが、本ホイールにおける板ばねの厚さ寸法値は 0.5 mm であり、隙間寸法は 0.6 mm となった。板厚が薄くなるほど隣り合う形状と融着しやすくなる傾向にあり、今回の造形サイズのように小さな重ね板ばね構造は、造形不可能であることが分かった。

図 6 に示された対向歯構造は、軸が外輪の半径方向に変位した際に、歯が対向する歯との間で滑り摩擦を生じる必要がある。

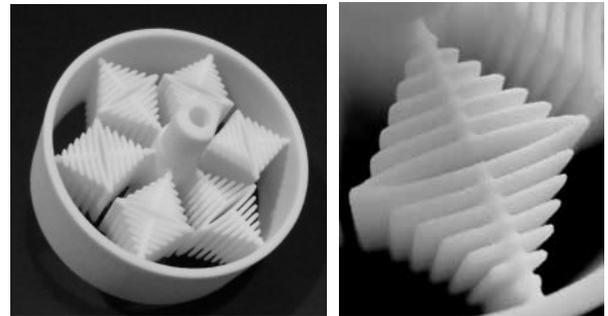


図 5 重ね板ばねスポーク構造の 3D 造形物
Fig. 5 Laminated leaf-spring spoke structure made by 3D printer

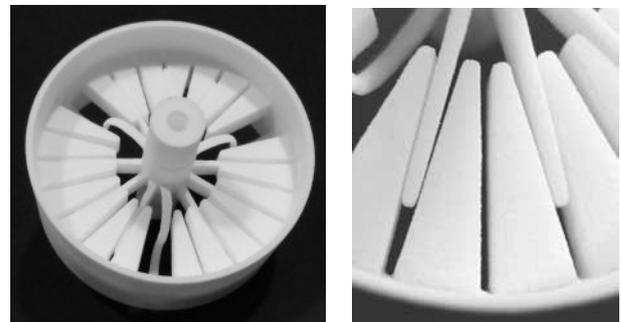


図 6 対向歯構造の 3D 造形物
Fig. 6 Opposing comb structure made by 3D printer

る。造形と CAD データ修正を繰り返して、対向する歯が融着しない隙間寸法を探索したところ、CAD 上の寸法値で 0.4 mm 以上とする必要があることがわかった。手で軸に変位を与えると対向する歯間に滑り摩擦が発生した。ただし、例えば、軸が 6 時の方向に変位した場合、直交する 3 時および 9 時の方向に存在する歯は、ほとんど滑らず、軸部の歯が外輪部の歯を押し付けることに寄与するため、ばね要素としての効果が主なものであった。

図 7 に示された対向円板状歯構造は、軸が外輪の半径方向へ変位した際に、対向する歯との間で滑り摩擦を生じる必要がある。造形と CAD データ修正を繰り返して、対向する歯が融着しない隙間寸法を探索したところ、CAD 上の寸法値で 0.4 mm 以上とする必要があることがわかった。また、軸に変位を与えると対向する歯間に滑り摩擦が発生することがわかった。

< 4. 3 > ばね強さおよび摩擦力の調節

対向歯構造および対向円板状歯構造の造形物は、いずれも軸部と外輪部がばね部で結合された構造となっている。そのため、ばね部の寸法を変更したり、ばね部を別の場所に新たに追加したりすることで、ホイール全体のばね強さを変更することができる。しかし、対向歯構造においては、前述したように歯が対向する部分にも大きなばね要素が存在するため、ばねの強さと摩擦力の大きさを別々に調節することは難しいと考えられる。

したがって、造形後に摩擦力を調節するには、摩擦面の面積または法線力を変更することが求められる。対向円板状歯構造の場合、例えば、外輪部の円板部分の外面に磁石を対向して取り付けすることで、容易に摩擦面の法線力を増加させることができる。

以上より、制振ホイールの内部構造として、対向円板状歯構造を採用し、後述の制振性能評価試験に用いることとした。図 8 は、対向円板状歯構造の造形物にネオジウム磁石 (MISUMI HXNN8-3) を 1 段 (片面 10 個ずつ両面) または 2 段 (片面 20 個ずつ両面) 取り付けた場合の写真を示す。なお、ボルト穴の開いた平板部は、後述する制振性能評価試験の際に加振機へ取り付けるためのものである。

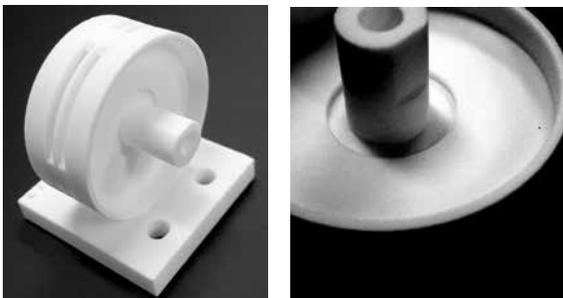
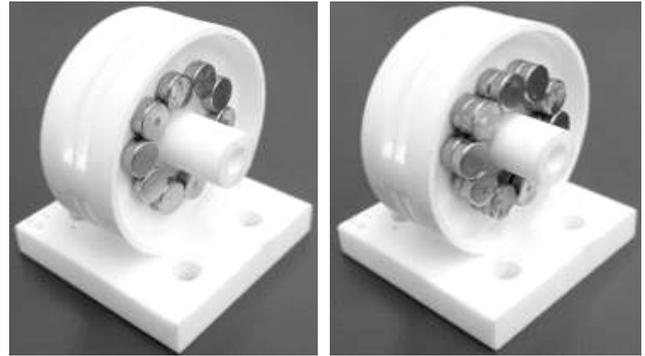


図 7 対向円板状歯構造の 3D 造形物

Fig. 7 A model with opposing disc-shaped comb structure made by 3D printer



(a) 磁石 1 段
(a) Single aligned magnets on the circumference
(b) 磁石 2 段
(b) Doubly aligned magnets on the circumference

図 8 磁石を取り付けた対向円板状歯構造

Fig. 8 Magnet attachment model with opposing disc-shaped comb

5. 造形物の制振性能評価試験

< 5. 1 > 振動伝達率の測定

制振ホイールの目的は、路面振動をできるだけ車体へ伝えないことである。そこで、対向円板状歯構造のホイールの外輪が路面から強制変位を受けた際の軸部の応答変位を表す振動伝達率を測定した。図 9 は、その実験装置の概要を示す。振動試験機

(EMIC F16000BDH/SLS16) 上に造形物を固定して加振した。加振特性はランダム信号で行い、10~1000 Hz の周波数範囲における加速度実効値のパワースペクトル密度が一定となるように設定した。造形物の平板部上面の A 部および軸部上面 B 部に取り付けた 1 軸加速度ピックアップ (小野測器 NP-3211) で検出した加速度信号を FFT アナライザ (小野測器 DS-3000) へ入力し、伝達関数 S_B/S_A として処理することで振動の伝達率を算出した。ここで、 S_A 、 S_B はそれぞれ A および B 点の加速度応答である。図 10 は、加振振幅の実効値を 29.4 m/s^2 (3 G) に設定し、負荷として造形物の軸部の穴に重り (60.5 g) を取り付けた場合の伝達率を示す。伝達率の最大値は、造形物に磁石を 1 段取り付けた場合および磁石を取り付けなかった場合においてはほぼ同じ値となり、磁石を 2 段取り付けた場合に約 3dB 減少した。

< 5. 2 > 減衰比の比較

振動伝達率の周波数特性図から、1 自由度粘性減衰系の理論上の振動伝達率の周波数特性をフィットさせることで、制振性能を表す指標の 1 つである減衰比を求めた。式 (1) は、角周波数 ω の正弦波状の強制変位を受ける 1 自由度粘性減衰系の伝達率 T_R を示す。ここに、 ζ は減衰比であり、 ω_n は固有角振動数である。

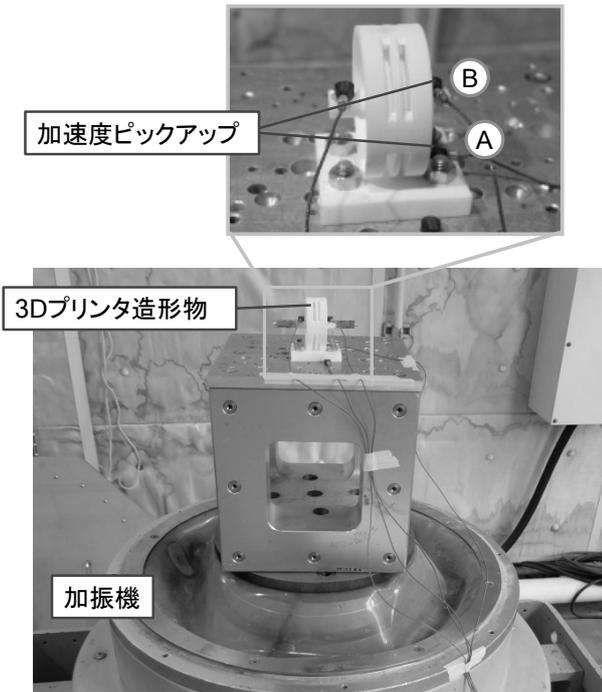


図9 振動伝達率測定のための実験装置

Fig. 9 An experimental setup for vibration transmissibility measurement

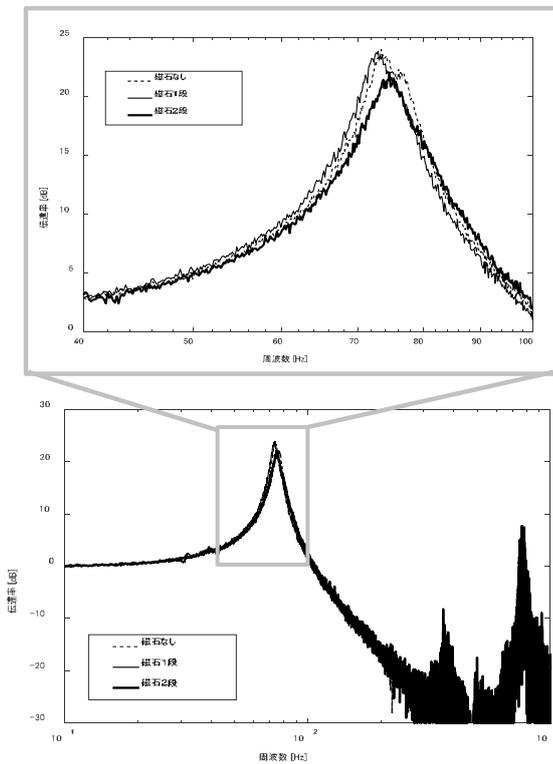


図10 測定された振動伝達率(重り 60.5 g、加振振幅 29.4 m/s²)

Fig. 10 Measured transmissibility under the condition of weight 60.5 g and excitation amplitude 29.4 m/s²

$$T_R = \frac{1 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1)$$

図 11 は、負荷として造形物の軸部の穴に重り (60.5 g) を取り付けた条件において、加振振幅の実効値を 2.45 m/s² (0.25 G) から 49 m/s² (5 G) まで変更した場合の減衰比 ζ の変化を示す。造形物に磁石を 1 段取り付けた場合は、磁石を取り付けない場合に対して、減衰比の大きな増加は見られなかった。しかし、造形物に磁石を 2 段取り付けた場合は、磁石を取り付けた場合と比べて、加振振幅に関わらず減衰比が大きく増加した。また、本造形物の減衰比は加振振幅に大きく依存することもわかった。

< 5. 3 > 衝撃振動に対する応答の測定

制振ホイールは、定常的な振動を低減するだけでなく、過渡的な振動を低減することも求められる。ミニ四駆においては、これは、比較的大きなジャンプをして着地した際に発生する衝撃振動に相当する。そこで、造形物に衝撃振動が加わった際の応答を評価するために、衝撃試験機 (エア・ブラウン SM-110-MP) を用いて対抗円板状歯構造の造形物の加速度波形を測定した。測定点は、図 9 中の B 点と同じ箇所である。加振波形は半波正弦波とし、表 1 に示す衝撃加速度および作用時間の加振条件を設定した。表 2 は、本衝撃試験に用いた供試ホイールの指標を示す。図 12 および図 13 は、それぞれ加振条件 1 および 2 における加速度応答波形を示す。両方の加振条件において、磁石を貼付したホイールは、磁石を貼付しなかったホイールと比べて、振幅が極めて迅速に減少した。具体的には、衝撃を受けた直後の最大振幅は同程度であったが、約 0.02 秒後においては、振幅に 10 倍程度の差が見られた。

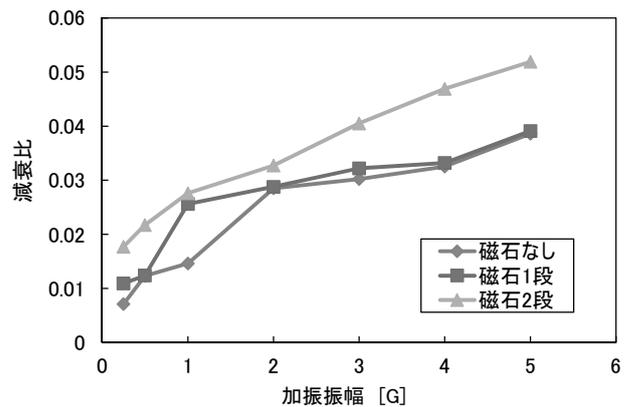


図11 加振振幅と減衰比の関係

Fig. 11 Relationship between excitation amplitude and damping ratio

表 1 加振条件
Table 1 Excitation conditions

加振条件	衝撃加速度		作用時間 [msec]
	[m/s ²]	[G]	
1	1764	180	2.2
2	1296	120	2.8

表 2 供試ホイールの指標
Table 2 Indicators of each test wheel

ホイール名	円板間の隙間 [mm]	磁石の貼付
隙間大(磁石なし)	0.5	なし
隙間小(磁石なし)	0.3	なし
隙間小(磁石 1 段)	0.3	1 段
隙間小(磁石 2 段)	0.3	2 段

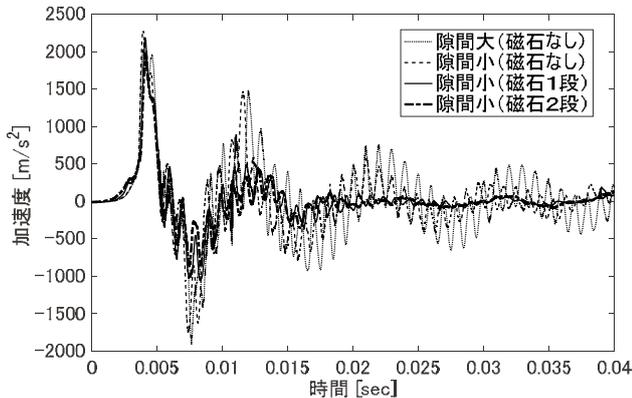


図 12 加振条件 1 における応答波形

Fig. 12 Impact response waveform under the excitation condition 1

磁石を貼付しなかった場合、加振条件 1 では、円板間の隙間の狭い方がより迅速な振幅減少が見られたが、加振条件 2 では、振幅の減少速度の差はほとんど見られなかった。すなわち、衝撃加速度が小さい場合は、円板間の隙間の大きさに注意して 3D プリントすることで、より良い制振効果を期待できるといえる。他方、衝撃加速度が大きい場合は、より良い制振効果を得るために、摩擦面の法線力を大きくして摩擦力を増加させることが必要である。

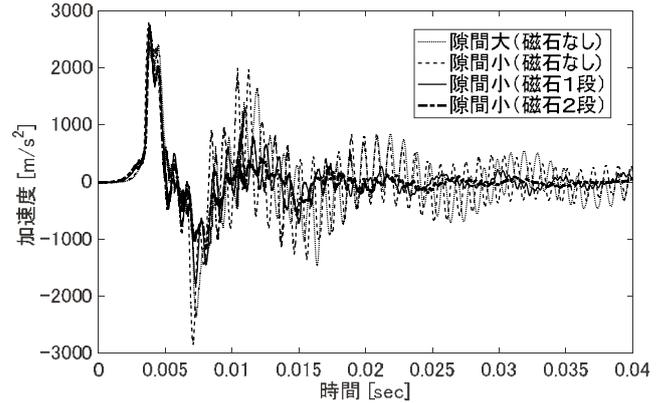


図 13 加振条件 2 における応答波形

Fig. 13 Impact response waveform under the excitation condition 2

6. 結言

本研究では、簡易な制振デバイスの構造および製作方法を検討した。滑り摩擦による振動減衰機構を備えたホビー用途の小型・軽量ホイールを樹脂用 3D プリンタで試作し、その制振特性を振動試験および衝撃試験により評価した。摩擦面の隙間および法線力を変更することで制振性能を制御できることが分かった。特に、加わる衝撃加速度が比較的小さい場合、3D プリンタで一度に造形したホイールのみで、大きな減衰性能を得ることができた。また、造形部に磁石を貼付し、磁力により摩擦面の法線力を変更する手法は、造形後に制振性能を調節する方法として有効であることが分かった。

今後、実際のミニ四駆に装着できるサイズの制振ホイールを設計・製作し、走行試験等により有効性を検証していく。

文献

- (1) 荒井政大, 板垣大輔, 西村正臣, 島村佳伸, 小林和幸; “均質化法による CFRP 積層はりの減衰振動特性評価”, 計算数理工学論文集, Vol. 14, (2014), pp. 43-48.
- (2) 品川幹, 社本英二; “機械構造の結合部における摩擦減衰の解明と定量的予測”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, (2012), No. 790, pp. 113-128.
- (3) ミニ四駆公式サイト, <http://www.tamiya.com/japan/mini4wd/>
- (4) ミニ四駆ジャパンカップ 2016 公式コース 2016, <http://www.tamiya.com/japan/cms/newsttopics/4162-m4news20160422.html>

Ⅲ. 金属積層造形の基礎と

造形物の評価に関する研究

Study on the Base of Metal Lamination and Valuation of Molding Product

永田 直也

NAGATA Naoya

滝沢 将史

TAKIZAWA Masashi

氷見 清和

HIMI Kiyokazu

山本 貴文

YAMAMOTO Takafumi

住岡 淳司

SUMIOKA Junji

石黒 智明

ISHIKURO Tomoaki

Abstract

Metal 3D printer is getting attention to have the advantage molding metal product directly, and it can produce the shape which through method can't produce e.g. cut processing and die casting. However, use of metal 3D printer is limited because of mold size is limited, and it is more expensive than through method. For the reason, it is important to explore the new product group which metal 3D printer should produce.

In this study, we molded samples in made of Al and SUS alloy. Then we compared metal structure and the limit of molding every materials and shapes. Thus, we confirmed the characteristic of 3D printer that there are different metal structures between horizontal direction and vertical direction of molded sample. In addition, we found that limit of molding about vertical direction depends on shape. On the other hand, limit of molding about horizontal direction is fixed regardless the molding shape. Lately as a new valuation, we changed the condition of irradiation terms for researching an element which influence the density and surface roughness. Then we found that relative density of samples depends on energy density a great deal, and there is a tendency that relative density is higher if energy density is higher. Thus, we found more suitable molding condition than manufacture recommends one.

1. 緒言

3Dプリンターは、従来のものづくりで用いられてきた金型や成形機などの大掛かりな設備が不要で、複雑な形状を造製することが可能な装置であることから、産業用途だけでなく趣味範囲での個人使用も増えており、一般にも広く知られる技術となっている^{(1),(2)}。現在では、金属を材料とする3Dプリンターは、切削やダイカストなど従来の金属加工方法では不可能だった形状を直接成形できることから注目されている。

しかし、金属3Dプリンターは、従来の加工方法に比べて造形サイズに制限があること、粉末材料が高価であるといった問題がある。また、造形形状によっては安定した造形を行うためにサポートの付与が必要となり、造形後にサポートの除去作業が入ることから、形状や用途が制限されるという課題を持っている。

そこで本研究では、金属3Dプリンターでしか作れない形状を造製するための前段階として、金属3Dプリンターの基礎的な特性を理解するため、様々な形状を造形し、その寸法計測などの評価を行い、造形限度などについて調査した。

2. 金属3Dプリンターの概要

< 2.1 > 造形方法

3Dプリントの全体の流れを図1に示す。まず、①PCで造形する製品の3Dデータを作成し、②作成した3Dデータをソフトウェアで輪切り状のスライスデータに変換する。③作成したスライスデータを3Dプリンターに入力し、④スライスデータに沿ってプリンター内部で1層ごとに造形を繰り返していき、立体の製品が造形される。

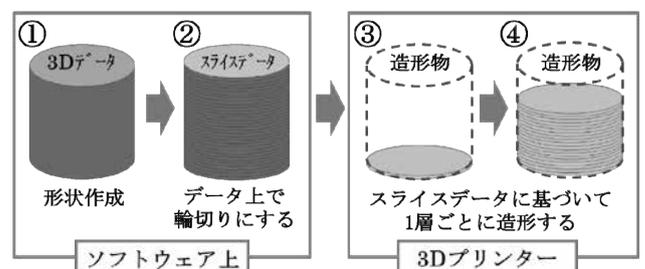


図1 3Dプリントの流れ

Fig. 1 3D printing flow

図2に本研究で使用した金属3Dプリンターの造形手法である「粉末床溶融結合法」について説明する。この動作は、①材料供給部からステージに向かい金属粉末をリコータにより1層分ひく。次に、②レーザーを照射して粉末を溶融、固化させる。その後、③ステージが1層分下がり、材料供給部が1層分上がる。①～③を繰り返すことで造形物を完成させた後、④粉末に埋まっている造形物を取り出し、エアブローなどで粉末を取り払い、製品として仕上げる。

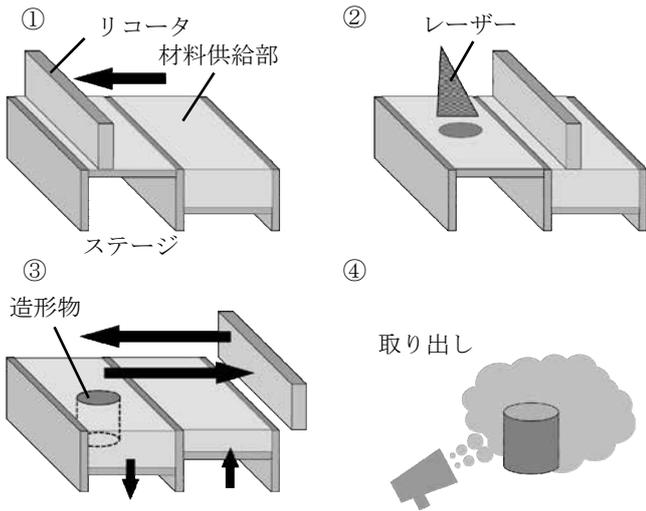


図2 3Dプリンターの造形工程
Fig. 2 Formative process of 3D printer

< 2. 2 > サポートの必要性について

金属3Dプリンターは、従来の加工方法ではできない形状を造形できるメリットを有している。しかし、製品形状や積層方向により、真下に土台や造形物がなく、安定して造形できない部分（以下、オーバーハング部と呼ぶ）が生じる場合がある。サポートとは、オーバーハング部に対し、安定して造形するために付与する仮の土台であり、造形終了後に機械加工や手加工によって除去される部分である。またサポートには、レーザー照射による造形物への熱の蓄積を防止し、変形や変色を抑制する役割もある。

図3にサポートの必要例を示す。図3①と②は、同一形状の造形を目的としている。①は、目的造形物を寝かせて造形した場合であり、オーバーハング部が無いいため、サポートが不要である。一方、②は、目的造形物を立たせて造形した場合であり、オーバーハング部が多く存在するため、付与するサポートの量も多く、複雑になっている。すなわち、サポートにより、造形形状の自由度は上がるが、造形後に取除く工程が発生する。よって、サポートが無い①のほうが、サポート除去工数が無い分、②よりも製造工程の面で有利になる。

このことから、製品設計の際には、3Dプリンターの特性

を理解し、形状や積層方向を考慮する必要があることがわかる。

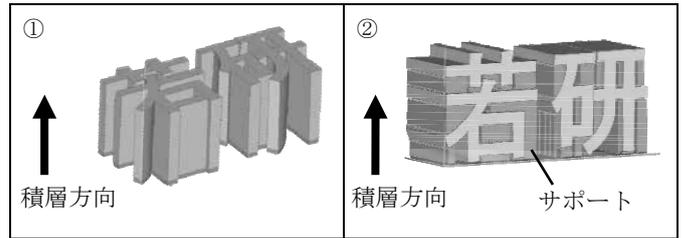


図3 積層方向によるサポートの必要例

①水平方向に積層 ②垂直方向に積層

Fig. 3 Case of necessity of support by mold direction

①Horizontal direction molding ②Vertical direction molding

3. 実験方法、結果および考察

本研究で使用した金属3Dプリンターの仕様を表1に示す。

表1 金属3Dプリンターの主な仕様

Table 1 Main specification of 3D printer

メーカー	EOS GmbH (ドイツ)
型式	EOSINT M280
方式	粉末床溶融結合法
造形可能領域	D250×W250×H325
積層厚	20~40 μ m (材質による)
造形材質	アルミ合金 (ADC3 相当) ステンレス鋼 (SUS316L 相当)

< 3. 1 > 金属材料粉末

粉末材料の粒度分布および形状について、粒度分布計および走査型電子顕微鏡 (SEM) により評価した。

図4に金属粉末 (アルミ合金、ステンレス鋼) のSEM観察結果を示す。

両材料ともに球状をしていることがわかった。球状にすることにより、流動性を上げ、金属粉末を均一にひく目的があると思われる。

図5に粒度分布の測定結果を示す。両材料ともにメジアン径は30 μ m程度で、10~100 μ mの幅をもっていることがわかった。

これにより、粗な粒子間にできる隙間に小さい粒子を充填させ、隙間を極力なくし充填密度を上げて、造形後の製品内部に欠陥を生じ難くしているものと考えられる。

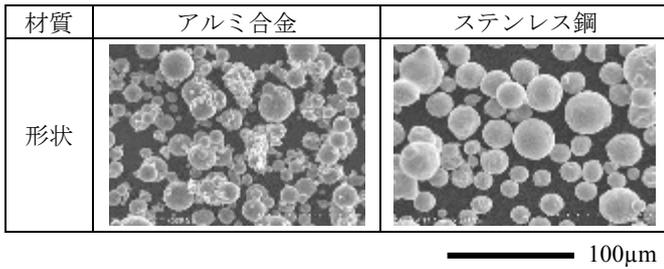


図 4 金属粉末の形状

Fig. 4 Shape of metal powder

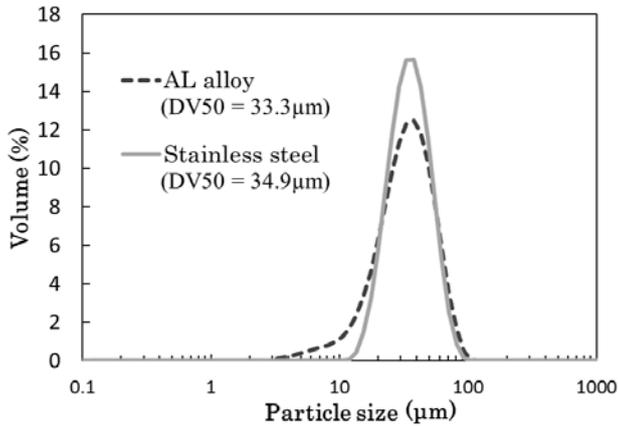


図 5 材料の粒度分布

Fig. 5 Particle size of material

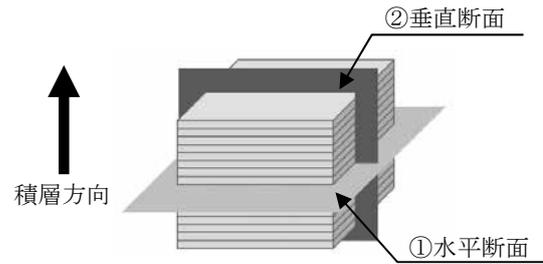


図 6 金属組織の観察位置

Fig. 6 Observation position of metal structure

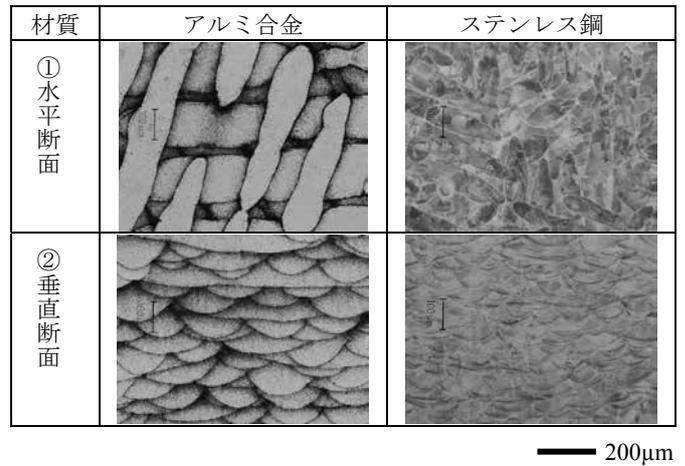


図 7 金属組織の観察結果

Fig. 7 Observation results of metal structure

< 3. 2 > 金属組織観察

3D プリンターでは、1 層ずつ積層造形することから、図 6 に示すように積層方向に対して、①水平方向と②垂直方向で金属組織が変わる可能性がある。そこで、1 辺 10mm の立方体を作製し、各方向の断面の金属組織を金属顕微鏡で観察した。

図 7 に各材料のエッチング後の金属組織の観察結果を示す。

①水平断面では、水平方向の異方性を小さくするため、レーザーを 1 層ごとに約 60° 回転させて照射している。このため、熔融・固化した金属組織が折り重なった網目状であることが確認できた。

また、②垂直断面においては、1 層ずつ層が積み重なっていることが観察され、材料によって積層厚の条件が異なることから（アルミ合金：30μm、ステンレス鋼：20μm）、厚さの違いも確認できた。

このように、金属 3D プリンターで作製された造形物は、水平断面と垂直断面では明確に異なる金属組織であることが確認され、金属 3D プリンター特有の異方性のある金属組織を有していることがわかった。

< 3. 3 > 造形形状調査

金属 3D プリンターは、従来の設備では不可能な形状を作製することが可能な装置であることから、多くの製造分野での活用が期待されている。

例えば、自動車分野では、特殊な構造により軽量化した部品の製造が考えられる。その形状を実現するための構成要素として、穴形状や板形状がある。

造形物の構成要素として多くみられる穴、棒、板について、積層方向、サイズ別の評価を一貫して行うため、図 8 に示す評価サンプルを設計した。

実際に造形した評価サンプルに対して、形状評価および造形限界の調査を行った。

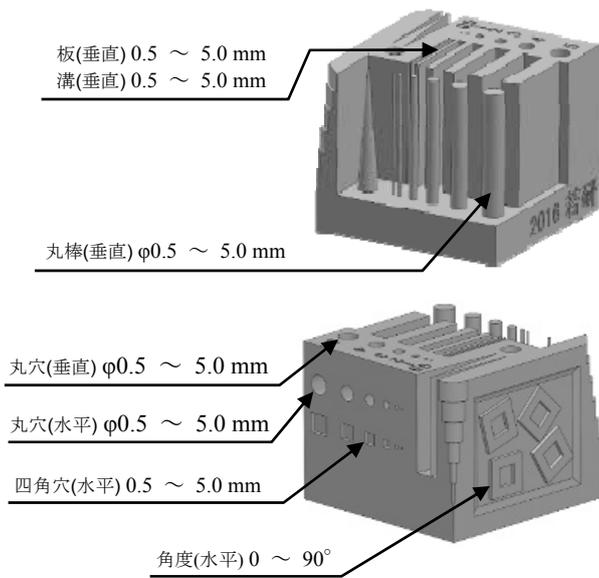


図 8 評価サンプル形状および寸法測定部位

Fig. 8 Valuation sample shape and size measuring position

図 9 にアルミ合金の丸穴（垂直） $\phi 0.5 \sim 5 \text{ mm}$ および丸穴（水平） $\phi 0.5 \sim 5 \text{ mm}$ の観察写真を示す。

丸穴（垂直）は、積層方向と同じ方向に形状を繰り返して積層しているため、オーバーハング部のない、安定した積層となる。そのため、形状は悪いが $\phi 0.5 \text{ mm}$ の小さな穴も造形されていた。丸穴の径が大きくなるほど円に近似しているが、内周部の寸法精度は、穴の直径に関わらず同様な形状をしていることが確認できた。このことから、垂直方向の造形物端は、一定の寸法精度を持っていることがわかった。

丸穴（水平）は、積層方向に対して垂直であるため、造形している際に、穴上部がオーバーハング部の積層となり、不安定な層を造形することになる。そのため、穴の上部が崩れてしまい、造形することが困難となる。観察の結果、直径が大きくなるほど、形状崩れの部分が大きくなっていることがわかる。すなわち、直径が大きくなるほど、形状を保つためにはサポートの付与が必要になるといえる。

図 10 にアルミ合金およびステンレス鋼において、角度を $0 \sim 90^\circ$ に変えた造形物の観察写真を示す。

角度ごとの造形精度では 90° が最も良好であった。角度が 0° に近づくにつれ、オーバーハング部になっていくため、不安定な状態となっており、 45° を境に徐々に形状が崩れていく様子が確認できる。造形角度 45° を下回る部分の造形精度確保には、サポートの付与が必要であることがわかった。

それぞれの形状の測定結果をもとに、表 2 に垂直方向の最小造形限界を、また、表 3 に水平方向の最小造形限界を示す。

垂直方向は水平方向よりも小さい形状を造形できる傾向があることがわかった。また、積層方向や材料によって、造形限界が異なることがわかった。

以上のことから、製品を設計する際には、サイズや形状によって変わる造形精度の変化を考慮する必要がある。また、サポートが不要な形状にするため、表 2 および表 3 の造形限界を超えないように設計することが重要であることがわかった。

径	$\phi 0.5 \text{ mm}$	$\phi 1.0 \text{ mm}$	$\phi 2.0 \text{ mm}$	$\phi 3.0 \text{ mm}$	$\phi 4.0 \text{ mm}$	$\phi 5.0 \text{ mm}$
丸穴 (垂直)						
丸穴 (水平)						

図 9 丸穴形状の観察結果（アルミ合金）

Fig. 9 Observation results of circular hole (AL alloy)

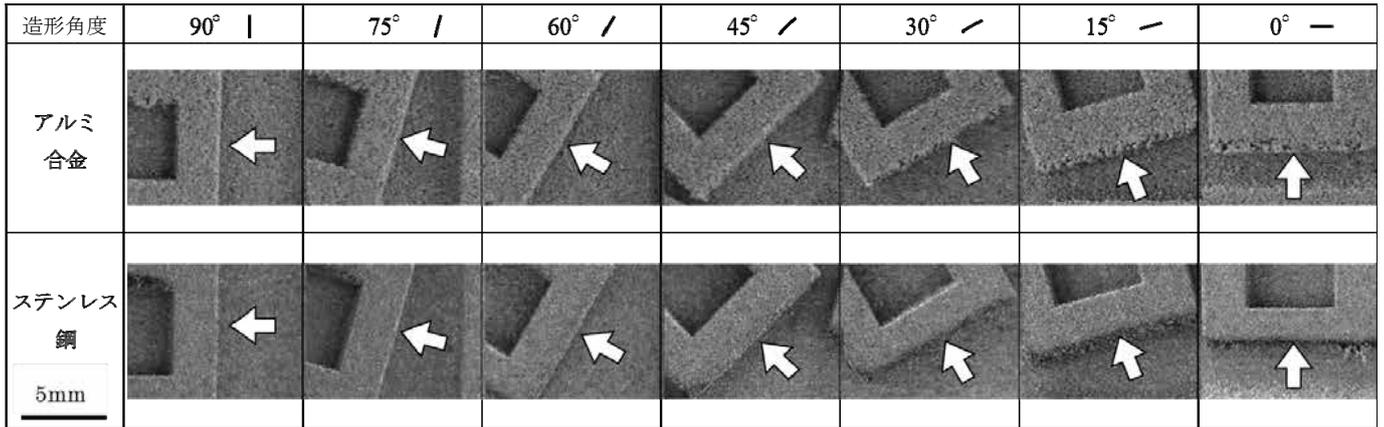


図 10 造形角度ごとの形状
Fig. 10 Shapes of molding angle

表 2 垂直方向の最小造形限界

Table 2 The minimum formative limit (vertical)

材質	アルミ合金	ステンレス鋼
板(mm)	1	1
溝(mm)	1	0.5
丸穴(mm)	φ1	φ1
丸棒(mm)	φ4	φ1

表 3 水平方向の最小造形限界

Table 3 The minimum formative limit (horizontal)

材質	アルミ合金	ステンレス鋼
四角穴(mm)	3	3
丸穴(mm)	φ2	φ1

< 3.4 > エネルギー密度の影響

金属 3D プリンターで造形するには、レーザー出力、速度のほか、走査ピッチ、1層ごとの積層厚、造形時のガス雰囲気、ベースプレートの温度など、設定する条件が数多くある。本実験では、多くのパラメータの中でも造形に最も影響があるエネルギー密度について着目した。このエネルギー密度 E_d は(1)式で算出される⁽³⁾。

本実験では、アルミ合金造形物への影響を調査した。

$$E_d = \frac{P}{v \cdot s \cdot t} \dots (1)$$

P : レーザー出力 (W) v : レーザー速度 (mm/s)
 s : 走査ピッチ (mm) t : 積層厚 (μm)

式(1)の P 、 v 、 s 、 t を次のように設定し、調査した。

- ・ レーザー出力 P (W) : 370, 350, 330
- ・ レーザー速度 v (mm/s) : 1000, 1300, 1600
- ・ 走査ピッチ s (mm) : 0.1
- ・ 積層厚 t (μm) : 30

(1) 組織への影響

造形物を積層方向に対して垂直に切断・研磨し、研磨面を SEM 観察した。その結果を図 11 に示す。

空隙欠陥（黒い部分）は、レーザー速度が速くなるほど、多くなることがわかった。これは、速度が上がるほど、エネルギー密度が減少していき、材料の熔融に必要なエネルギーを十分に与えられなかったために欠陥が発生したと推測される。

SEM 写真を 2 値化し、正常部（白い部分）と空隙欠陥の面積比率を求めることで、相対密度を算出した。図 12 にレーザー出力による相対密度の変化をレーザー速度ごとに示す。その結果、特にレーザー速度が 1600mm/s では相対密度が全体的に低いことが確認できた。

図 13 にエネルギー密度と相対密度の関係を示す。

その結果、エネルギー密度が大きいくほど、相対密度が高くなることがわかる。エネルギー密度が低くなると、エネルギー不足により、熔融不足が起こり、相対密度の低下につながると考えられる。

(2) 表面粗さへの影響

図 14 に造形したサンプルの表面の観察写真を示す。

レーザー速度 1000mm/s では、表面は平滑に見える。しかし、1300mm/s、1600mm/s になると、レーザーの走査ラインが明確であり、表面の粗さが大きいことがわかる。レーザー出力を変えても、レーザー速度が同じならば、この傾向は変わらず、表面粗さへのレーザー出力の影響は小さいことがわかった。

また、図 15 に表面の断面観察結果を示す。レーザー出力による表面粗さの変化は少ないが、レーザー速度が上がるほど、表面粗さが大きくなっていることが明確である。

これらの結果から、相対密度と同様に、レーザー速度が上がるほどエネルギー密度が小さくなり、熔融不足が発生し、積層状態は悪くなる。表面状態が悪い積層が繰り返された結果、内部組織の欠陥が発生すると考えられる。

本実験では、エネルギー密度の最大条件で、相対密度が高く、表面粗さが小さい造形品が得られた。しかし、これ以上にエネルギー密度を上げた場合は、激しく熔融されることで、内部にガスが巻き込まれてガス欠陥が発生し、相対密度は下がり、表面粗さも大きくなると推測している。

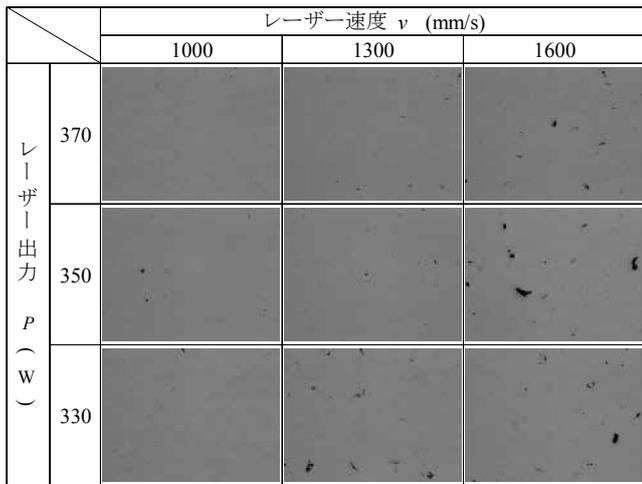


図 11 造形物断面の観察結果

Fig 11 Observation results of mold product cross section

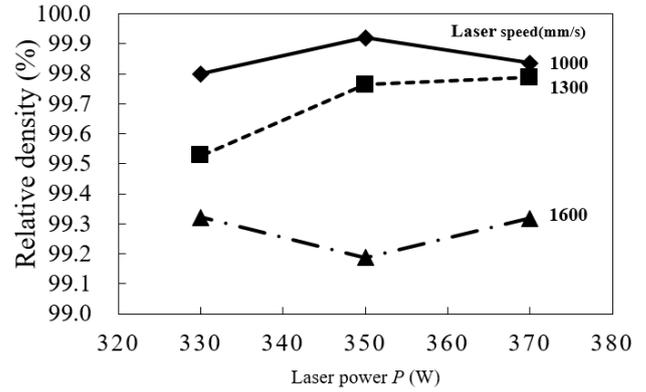


図 12 レーザー出力と相対密度の関係

Fig. 12 Relationship of laser speed and relative density

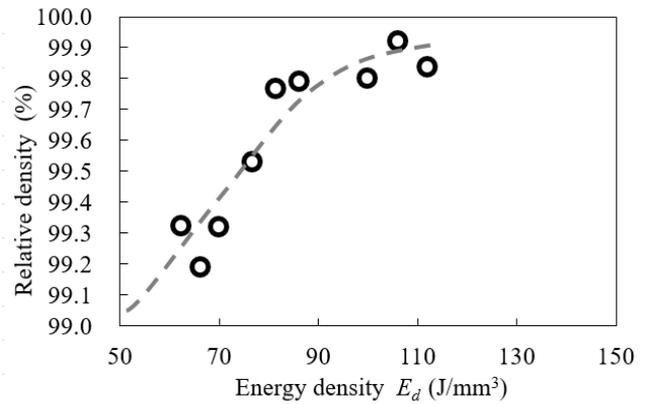


図 13 エネルギー密度と相対密度の関係

Fig. 13 Relationship of energy density and relative density

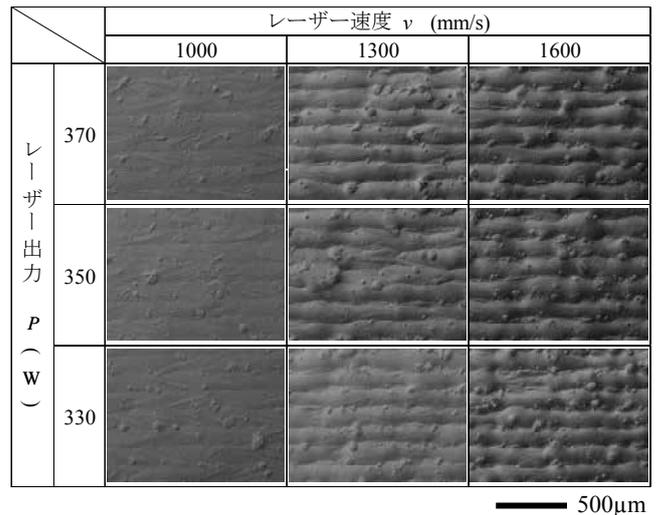


図 14 造形物表面の観察結果

Fig. 14 Observation results of mold product surface

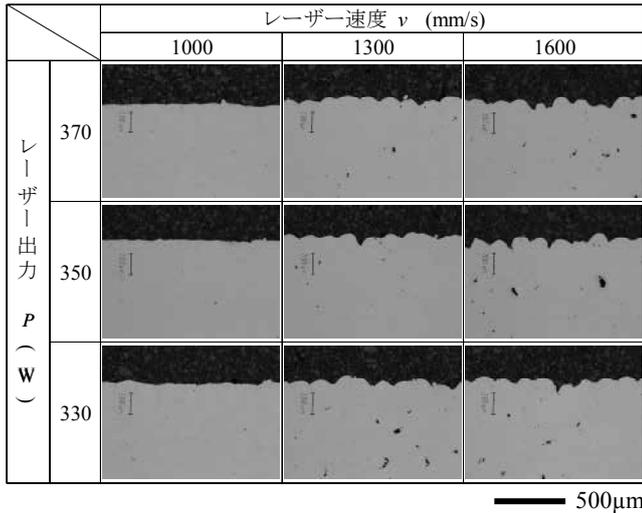


図 15 造形物表面部の断面観察結果

Fig. 15 Observation results of mold product surface cross section

4. 結言

金属 3D プリンターの特性評価のため、金属粉末材料や造形物の金属組織、造形形状の限界、エネルギー密度の影響について調査した。その結果、以下の知見が得られた。

- 金属粉末材料について

アルミ合金、ステンレス鋼の粉末材料は流動性を高めるため、球形状をしている。また、密度を上げるため、粒度分布に幅を持たせている。

- 造形物の金属組織について

金属 3D プリンターによる造形物は、水平断面と垂直断面で形態が異なる 3D プリンター特有の金属組織である。

- 造形形状の限界について

積層方向と同じ方向に形状を繰り返して積層するオーバーハング部のない、安定した積層では、形状は悪いが $\phi 0.5\text{mm}$ の小さな穴も造形できた。

積層方向に対して垂直なオーバーハング部の積層の場合、不安定な層を造形することになるため、造形することが困難である。材料にもよるが、水平方向の穴は $\phi 1\sim 2\text{mm}$ が限界である。オーバーハング部が大きくなるほど、形状が崩れている部分が大きくなっており、形状を保つためにはサポートの付与が必要となる。

また、角度ごとの造形精度は 90° が最も良好である。 0° に近づくにつれて悪くなり、 45° を下回る角

度ではサポートが必要となる。

- エネルギー密度の影響について

相対密度および表面粗さは、レーザーのエネルギー密度に大きく影響される。今回の実験では、エネルギー密度が高くなるほど良好な相対密度と表面粗さが得られた。本実験以上にエネルギー密度を上げると、内部にガス欠陥が発生し、相対密度と表面粗さがともに悪くなると考えられる。

金属 3D プリンターの従来の加工方法では不可能な形状作製技術と従来の加工方法の高精度な加工技術とを組み合わせることにより、高付加価値な金属製品を製造できると考えられる。

文 献

- (1) 原雄司：3D プリンター 導入&製作 完全活用ガイド (2014)
- (2) 桐原慎也：「新たなものづくり」3D プリンタ活用最前線 (2015)
- (3) 山本貴文、住岡淳司、林千歳：富山県工業技術センター 研究報告 No.28 (2014)

IV. 容器用実用アルミ材の耐食性および 腐食反応の解析に関する研究

Study on Corrosion Resistance and Analysis of Corrosion Reaction of Practical Aluminum Material for Aluminum Can

深川 裕之 本保 栄治 鍋澤 浩文
FUKAGAWA Hiroyuki HONBO Eiji NABESAWA Hirofumi
高田 耕児 土肥 義治
TAKATA Koji DOI Yoshiharu

Abstract

Aluminum cans are manufactured from a variety of aluminum materials in terms of lightness, content protection and corrosion resistance. The inner side of aluminum can has coated for the purpose of resisting corrosion but examining the corrosion resistance of aluminum materials is highly important for risk management and evaluation of material characteristic. The corrosion resistance of aluminum materials is investigated by corrosion test at present. However, it is problem that we take a lot of time for the evaluation and it is short in quantitativity.

In this study, corrosion resistance is quantitatively evaluated between components of aluminum materials and content solution with various corrosion factors using corrosion tests and electro-chemical measurement. We improved the method of corrosion test by ICP atomic emission analysis. We identified the factors that influence the corrosion resistance of aluminum materials. Furthermore, we examined correlation between corrosion examinations and electro-chemical measurement.

1. 緒言

アルミ容器は軽量で、耐食性や内容物保護性に優れる点から様々な用途で使用されており、既に十分な実績がある。アルミ容器の種類としては、化粧品や消臭剤に使用されているアルミエアゾール缶、医薬品や染毛剤に使用されているアルミチューブ、炭酸飲料やビール等に使用されているアルミ飲料缶がある。

アルミ容器の外側は多種多様なデザインで装飾されており、塗装によりコーティングされている。一方、アルミ容器の内側にも内容物からの保護を目的とした塗装が施されている。アルミ容器の耐食性は、内容物を充填して加温条件で保存し、一定期間後の腐食の有無や状態を確認する保存試験によって評価を行っている。しかし、アルミ缶の耐食性は最終的にアルミ材自体に依存する。アルミ材の耐食性を評価することは基礎的な材料特性についての知見が得られるだけでなく、素材の選定や製品のリスク管理の観点からも非常に重要である。

一般に内容液に対するアルミ材の耐食性を評価の手法として、アルミ片を試験液に浸漬し、一定期間後の腐食状態を観察評価する浸漬腐食試験が知られている。しかしながら、試験に数ヶ月間

という長い期間がかかり、得られる情報も試験片の表面観察と質量減少量のみであり、試験によって得られる知見に限られる。

一方、アルミ材の耐食性評価を手軽にかつ迅速、高感度に行う方法として、電気化学的測定がある。研究例としては食塩水中のアルミ合金 A1050 材の耐食性について報告されている⁽¹⁾。しかし、成形加工後のアルミ材や、実際にアルミ容器に充填される内容物についての実用的な知見はほとんどないのが現状である。

本研究では、成形加工後のアルミ材について内容物に使用される成分を想定したモデル液で耐食性試験を行うことで、アルミ材の耐食性に影響する成分を特定することを目的とする。また、実際の腐食挙動を示す浸漬腐食試験と電気化学的測定の相関について比較検討した。それらの知見は実際の内容物に対するアルミ材の耐食性評価への応用が期待される。

2. 実験方法

< 2. 1 > 試験片

試験片としてはφ50 アルミエアゾール缶に使用されている工業用アルミ合金材 A1070 (JIS 規格品、以下 1070 と略記する) 及

びφ66 アルミ飲料缶に使用される工業用アルミ合金材 A3104 (JIS 規格品、Mg と Mn を約 1% 添加した合金、以下 3104 と略記する) を用いた。電気化学試験用試験片は 2cm×2cm の 4cm²、浸漬腐食試験用試験片は 5cm×5cm の 25cm² とし、採取の際には缶胴中央部から切り取り実験に供した。

＜ 2. 2 ＞ 試験片の前処理

今回、1070 はアルカリ洗浄+中和処理後の缶を入手できたが、3104 は Zr 化成処理後の缶しか入手できなかった。この場合、3104 表面は Zr 皮膜に覆われており、アルミ材自体の評価とならないので Zr 皮膜を除去する処理を行った。3104 の試験片をアルカリ洗浄 (約 298K の 5wt%NaOH 水溶液に 30 秒間浸漬) を行い、水洗後、中和処理 (約 298K の 30wt%HNO₃ 水溶液に 30 秒間浸漬) を施し、水洗後、風乾した。Zr 皮膜除去の効果を確認するために X 線光電子分光分析装置(アルバック・ファイ株 Quantum2000) を用い、金属表面及び深さ方向における元素分布を調べた。

＜ 2. 3 ＞ 試験液

溶媒は蒸留水を用いた。試薬は市販の特級を使用し、所定の濃度に調整した。試験液の電解質としては NaCl を用いた。添加する成分として 1070 は界面活性剤やキレート剤、3104 はアミノ酸やクエン酸、ビタミン C 等を想定して試験液を作製した。

＜ 2. 4 ＞ 電気化学測定

(1) 試料極

試料極は銅線をアルミ板の下部と接触させ、導電性のあるカーボンテープで接着した。その後、接着部をテフロンテープで覆い、1.5cm×1cm の 1.5cm² の露出面以外の部分をエポキシ塗料で絶縁し、試料極とした。測定前には試料極を十分な水洗、風乾後、測定に供した。

(2) 電気化学測定装置

電気化学測定装置の概要図を図 1 に示す。装置は試験槽、中間溶液槽、参照電極を含む飽和 KCl 水溶液の三槽で構成し、U 字管で接続した。参照電極は飽和 KCl 水溶液中の銀-塩化銀電極(以後、Ag/AgCl と略記する)を用いた。試験槽の対極は白金電極を用い、ガラスフィルターを設け、対極で発生した気体が反応に影響しないようにした。電位制御にはポテンシオスタット (Solartron 社 SH287) を使用した。液温は室温(25℃)とした。試験面からキャピラリー先端の距離を 1mm としたため、iR 値は数 mV と小さいので分極曲線への iR 補正は省略した。また、試験槽と参照電極

の間に試験溶液の入った中間溶液層を設け、塩橋中の KCl が溶け出しても試験槽内に影響しないようにした⁽²⁾。

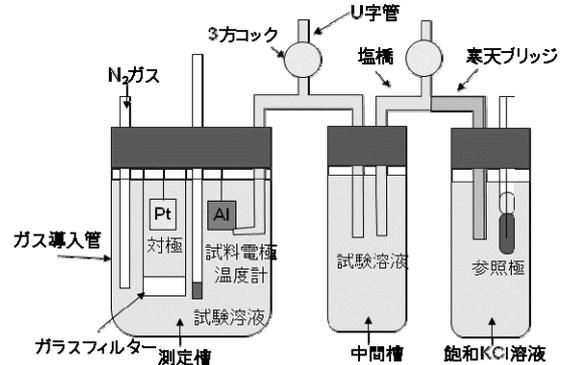


図 1 電気化学測定装置の概要図

Fig. 1 Schematic view of the polarization equipment

(3) 測定方法

まず、ガラスフィルターを通して高純度(99.999vol%以上)の窒素ガスを 30 分間流し、試験液の脱気を行った。脱気後の試験液に試料極を浸漬し、そのときの自然電位 E_{corr} を 30 分間測定した。自然電位が安定した後、動電位法で分極曲線の測定を行った。電位掃引速度は 0.5mV/s、電位掃引範囲は-1.5V から 0V とした。

＜ 2. 5 ＞ 浸漬腐食試験

(1) 実験方法

試験片は 3cm×3cm の 9cm² の露出面以外をテフロンテープにて保護し、試験容器中で試験溶液 100ml 中に立て掛け、密封状態で 40℃×1 ヶ月保存した。試験後、試験液から試験片を取り出し、露出面以外を切断した。その後、試験片表面に残留する腐食生成物を溶解させるために 60%濃硝酸 30ml に 1 時間浸漬した。浸漬後、試験片を取り出し、残った溶液を試験液と混合し、200ml に調整した(2 倍希釈)。測定の際には最終的に 10 倍希釈になるよう調整し、ICP 発光分光分析装置を用いて検量線法で溶出 Al³⁺量を測定した。測定した溶出 Al³⁺量濃度を 10 倍して、原液の濃度となるように換算を行った。なお、浸漬腐食試験前の試験片の 60%濃硝酸 1 時間浸漬による溶出量を検討したところ、溶出 Al³⁺量は 1070 では 0.5ppm、3104 では 1.7ppm と非常に小さな値であったため、補正は行わなかった。

3. 実験結果と考察

＜ 3. 1 ＞ 試料の前処理

3104 のアルカリ洗浄+酸処理前後の表面 XPS スペクトル及びビブスプロファイルの結果を図 2、3 にそれぞれ示す。エッチング

レートは4.2nm/min（シリカ換算）である。

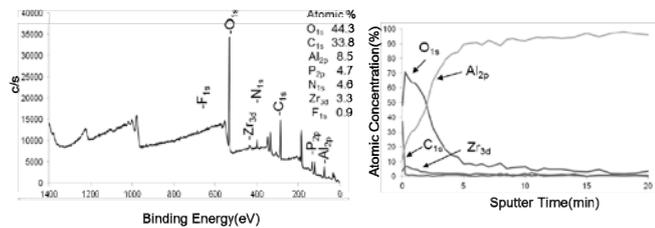


図2 3104(処理前)の表面及び深さ方向における元素分布

Fig. 2 Surface element analysis and depth profile (3104 before treatment)

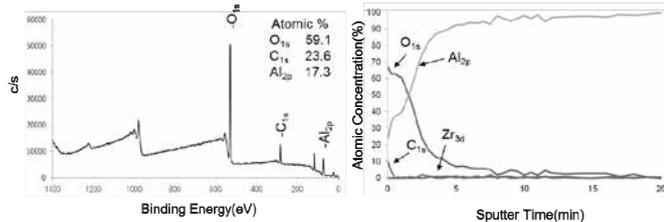


図3 3104(処理後)の表面及び深さ方向における元素分布

Fig. 3 Surface element analysis and depth profile (3104 after treatment)

3104 のアルカリ洗浄+酸処理前では Zr のピークが確認されたが、処理後では確認されなくなったので処理後の缶を試験に供することとした。

< 3. 2 > 電気化学測定

(1) 分極曲線

まず、1070 を 0.1M NaCl 水溶液中で分極曲線を測定した結果を図 4 に示す。また、分極曲線と金属表面状態との相関関係を検討するために孔食電位直前と孔食電位直後、電流密度増加後にて測定をそれぞれ停止し、試料表面を水洗、風乾し、表面状態の SEM 観察を行った。観察結果を図 5 に示す。

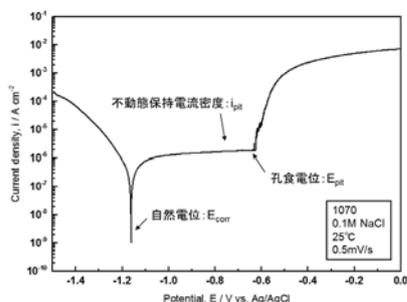


図4 1070 の 0.1M NaCl 水溶液中での分極曲線

Fig. 4 Polarization curves of 1070 in 0.1M NaCl solution

動電位分極測定法の結果は、縦軸は電流密度の絶対値の対数、

横軸は電位で表される。一般的な自然界における化学反応は電子の移動により生じるため、アノード反応とカソード反応が同時に生じている。分極曲線は金属の溶解、腐食生成物の生成などの酸化反応などのアノード反応と、酸素の還元あるいは水素発生などのカソード反応の和として示される。

図 4 の分極曲線において電位が卑に大きいときはカソード反応での水素発生に伴う大きな負の電流が観測される。また、電流密度が 0 に近い点は両極の電子の授受が平衡状態に達している(アノード反応とカソード反応の速度が等しい)点であり、試料金属が自然に腐食している状態である。この時の電位を自然電位 (以下、 E_{corr} と略記する) という。

その後、電位を貴の方向に掃引するとアルミ表面に絶縁性の酸化被膜が形成され、電流密度が一時的に飽和する。この領域を不動領域といい、この時の電流密度の値を不動保持電流密度(以下、 i_{pit} と略記する) という。さらに電位が貴に大きくなると表面酸化膜が一部破壊され、孔食が発生成長し、電流密度が急上昇する。このときの電位を孔食電位(以下、 E_{pit} と略記する) という。一般的には材料の耐食性が高いということは E_{pit} が貴に大きいこととされる³⁾。

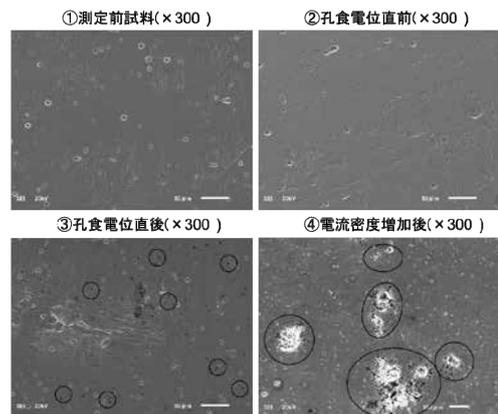


図5 1070 の分極曲線測定後の表面 SEM 表面観察

Fig. 5 SEM surface observations of 1070 after polarization curves tests

図 5 より E_{pit} 直後では表面に腐食の発生点と思われる点を確認した。また、電流密度増加後では腐食生成物と思われる物質の生成を確認した。よって分極曲線の電流密度が上昇するにつれて、金属表面で孔食が発生・成長していることがわかった。

(2) 分極曲線と溶液中の溶存酸素の関係

まず、分極曲線の測定手法を検討するにあたり、脱気の必要性について検討した。0.1M NaCl 水溶液を 30 分間 N_2 脱気処理後と脱気処理なしの 1070 の分極曲線をそれぞれ測定した。得られた分極曲線を図 6 に示す。

脱気なしで E_{pit} は-567mV、 E_{corr} は-1017mV を示し、脱気ありでは E_{pit} は-631mV、 E_{corr} は-1167mV を示した。脱気無しだと E_{pit} と

E_{corr} が共に貴な値を示すことがわかった。

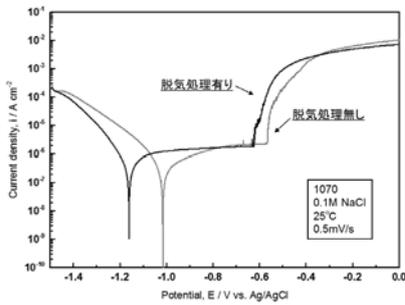


図6 脱気処理有り・無しの 0.1M NaCl 水溶液中の分極曲線(1070)

Fig. 6 Polarization curves of 1070 in 0.1M NaCl solution in deaerated or aerated

アルミの腐食反応において、分極曲線はアルミ溶解のアノード曲線と水素発生のカソード曲線の和として示される。よって分極曲線を考察する上ではアノード反応、カソード反応それぞれについての反応について考える必要がある。カソード反応の反応式は以下のように示される。



だが、溶液中に溶存酸素が存在すると、以下の反応も進行する。



カソード反応が活性化し、溶存酸素の大きな還元電流が流れると分極曲線は貴の方向にシフトすると考えられる。溶存酸素の還元反応が律速となる自然環境中の多くの腐食はこのカソード支配型の形式をとる。水溶液中の溶存酸素量は気圧や気温等によって変化するので、分極曲線を測定する際は溶液をしっかりと脱気し、酸素の混入を防ぐため、試験槽中を不活性ガス雰囲気下に保つ必要があると考えられる。

(3) 1070 と 3104 の分極曲線

1070 と 3104 のアルミ合金材間の耐食性の比較検討を行った。0.1M NaCl 水溶液中で 1070 と 3104 の分極曲線をそれぞれ測定した。得られた分極曲線を図7に示す。

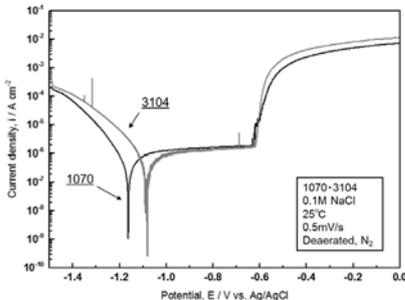


図7 1070 と 3104 の 0.1M NaCl 水溶液中の分極曲線

Fig. 7 Polarization curves of 1070 and 3104 in 0.1M NaCl solution

1070 では E_{corr} と E_{pit} は -1167、-631mV であり、3104 では E_{corr} と E_{pit} は -1082、-625mV であった。 E_{corr} は 1070 よりも 3104 が若干貴な値を示した。純アルミ材と合金剤では、 E_{pit} は同等であり、 E_{corr} は純度が高い金属の方が、より卑な値を示すことがわかった。

(4) 分極曲線における各種添加物及び濃度の影響

①分極曲線に及ぼす塩化物イオン濃度の影響

0.01、0.1、1M NaCl 水溶液中で 1070 と 3104 の分極曲線を測定し、塩化物イオン濃度の分極曲線に及ぼす影響について検討した。1070、3104 の結果を図8、9にそれぞれ示す。

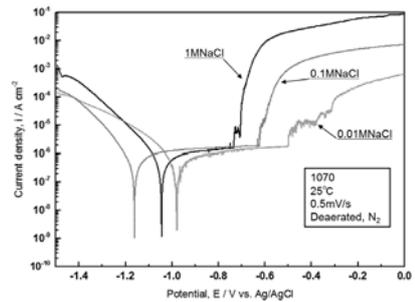


図8 1070 の NaCl 水溶液中の分極曲線

Fig. 8 Polarization curves of 1070 in the NaCl solutions

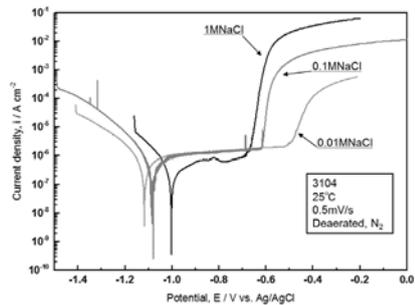
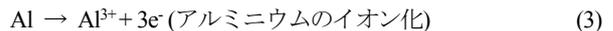
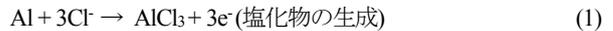


図9 3104 の NaCl 水溶液中の分極曲線

Fig. 9 Polarization curves of 3104 in NaCl solutions

塩化物イオン濃度が増加するにつれて、 E_{pit} が卑に大きくなることを確認した。よって、塩化物イオン濃度が増加すると金属材料の耐食性は低下すると考えられる。孔食は金属表面の酸化膜が塩化物イオンによって破壊され、新生面が系中に曝されることで生じる。この孔食反応は以下のように進行する。



孔食は生じた難溶性の水酸化物とアルミ表面との間に隙間を生じ、局所的に pH の低下が起こることで連鎖的に生じる。よって、塩化物イオン濃度が上昇すると孔食発生個所が増大し、孔食

発生が起りやすくなると考えられる。

②キレート剤添加が分極曲線に及ぼす影響

キレート剤は化粧品のほか、食品などに品質保持を目的に配合されている。今回は、水に対する溶解性が大きく、代表的なキレート剤であるエチレンジアミン四酢酸二ナトリウム塩二水和物(以下、EDTA2Na)を採用した。0.1M NaCl 水溶液に EDTA2Na 濃度が 1.0×10^{-3} 、0.01、0.1M となるよう添加して、分極曲線を測定し、1070 の腐食への影響を調べた。測定結果を図 10 に示す。

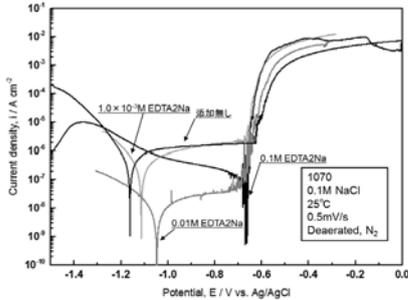
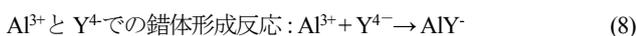
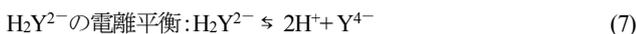
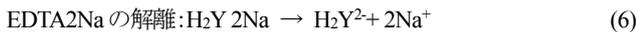


図 10 1070 の EDTA2Na + 0.1M NaCl 水溶液中の分極曲線

Fig. 10 Polarization curves of 1070 in EDTA2Na + 0.1M NaCl solutions

EDTA2Na を 1.0×10^{-3} M 添加した場合、添加なしの場合 ($i_{pit} = 2.0 \mu A$) と同様の分極曲線が得られた。0.01M 添加では i_{pit} が低下 ($3.8 \times 10^{-2} \mu A$) し、0.1M 添加の場合は不動態領域が確認されなかった。

一般的に Al の腐食反応では、アノードでは Al のイオン化が起こる。しかし、EDTA2Na 存在下については EDTA (以下、 H_4Y と略記する) が Al と錯体を形成する。全過程を反応式で表わすと以下になる。通常の NaCl 水溶液中での Al 腐食反応は先述の式(1)-(5)の過程で進行するが、EDTA2Na 存在下では以下の式(6)-(8)の反応も進行する。



式(8)の錯体形成反応におけるアルミ錯体の安定度定数は高く ($\log K_{ML} = 16.1$)、非常に早く進行するので、式(4)の反応物である Al^{3+} はアルミ錯体として消費される。よってルシャトリエの原理より式(4)の平衡は左に偏り、水酸化物生成及び酸化被膜の形成反応が進行にくくなる。

Al の耐食性は最終的には表面に形成される酸化被膜または水酸化物の被膜に依存することを考慮すると、耐食性は相対的に低下するものと考えられる。よって EDTA2Na の添加量が増えるにつれて、耐食性が低下する傾向があることがわかった。

③界面活性剤添加が分極曲線に及ぼす影響

界面活性剤は帯電防止性、殺菌性を持つため、化粧品に配合されている。界面活性剤としては代表的なカチオン系界面活性剤で

ある塩化ステアリルトリメチルアンモニウム (以下、界面活性剤) を採用した。0.1M NaCl 水溶液に界面活性剤の濃度が 1.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 、0.01M となるように添加した溶液を作製し、分極曲線を測定して、腐食への影響を調べた。測定結果を図 11 に示す。

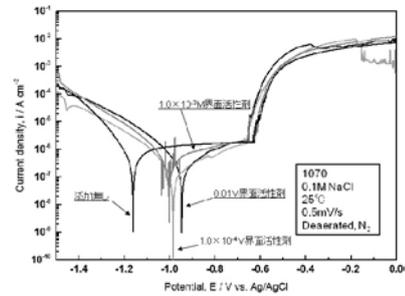


図 11 1070 の界面活性剤 + 0.1M NaCl 水溶液中の分極曲線

Fig. 11 Polarization curves of 1070 in Stearyl trimethyl ammonium Chloride + 0.1M NaCl solutions

界面活性剤添加の 1.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 、0.01M の添加で E_{corr} はそれぞれ -986、-1006、-947mV であった。添加無しでの E_{corr} は -1167mV であったので、界面活性剤の添加で E_{corr} が高くなることがわかった。また、 E_{pit} は添加無しの場合と同程度であった。

一般に金属の腐食の初期過程はハロゲン化物イオンや酸素などの電気陰性度の高いものや、第四級アンモニウムイオンなどが金属に直接吸着することから進行することが知られている。また、溶液中に含まれている吸着物の濃度は腐食速度に影響を及ぼすことが知られている。

今試験の結果では、界面活性剤を添加すると界面活性剤のカチオン部位が金属表面に特異吸着し、界面活性剤の疎水性部分が金属表面を一部保護し、 E_{corr} が高くなったものと考えられる。

④酸、塩基が分極曲線に及ぼす影響

次に酸性条件及び塩基性条件が分極曲線に及ぼす影響について検討するために 0.1M NaCl 水溶液を塩酸または硝酸で pH2 に調整した溶液と pH11 に NaOH で調整した溶液を作製し、それらの溶液にて 1070 の分極曲線を測定した。測定結果を図 12 に示す。

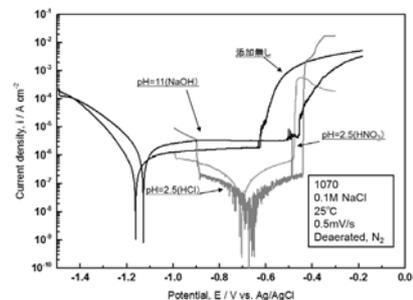


図 12 1070 の 0.1M NaCl 水溶液 (pH = 2, 11) 中の分極曲線

Fig. 12 Polarization curves of 1070 in 0.1M NaCl solutions (pH = 2 or 11)

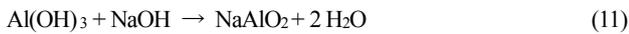
0.1M NaCl 水溶液を pH2 に塩酸または硝酸で調整した酸性溶液と pH11 に NaOH で調整した塩基性溶液中での 1070 の分極曲線の測定結果より、 E_{pit} は -438、-473、-457mV であり、 i_{pit} は 0.21、0.58、 $3.4 \mu A$ であった。 i_{pit} の値は小さいほど、不動態領域での電流密度が低いことから系中での酸化膜の形成を阻害されていると考えられる。よって、アルミの耐食性は pH2 の酸性条件では低下しており、pH11 の塩基性条件では上昇することがわかった。

先述の式 (2) によって生成した水酸化アルミニウムは両性化合物であるため、溶液の pH によっては再び反応し、腐食の進行に関与する。

酸性環境下の場合、塩化アルミニウムを生じる。



アルカリ性環境下の場合、アルミン酸ナトリウムを生じる。



また、腐食液が中性であれば、生成した水酸化アルミニウムは、金属の表面を覆って腐食の進行を妨げる。酸性・塩基性どちらの環境でも溶液中の酸・塩基は腐食が進行していくにつれて消費され、pH は中性付近に変化する。Al は pH4~10 の水溶液中では酸化アルミニウム等の安定種として存在するので、pH11 では腐食が進行するにつれて腐食しにくい環境に移行したものと考えられる。

⑤分極曲線に影響を及ぼす成分の特定

次に飲料缶の内容物に良く含まれる成分(クエン酸、ブドウ糖、アミノ酸、ビタミン C、炭酸水素ナトリウム)が腐食に及ぼす影響を調べた。0.1M NaCl に一定濃度(0.01M)で添加物の種類を変化させ、3104 の分極曲線を測定した。測定結果を図 13 と図 14 に示した。

炭酸水素ナトリウムやブドウ糖を添加した系においては無添加の場合と比べ、有意差は認められなかった。クエン酸、アミノ酸、ビタミン C を添加した系においては、 E_{corr} が貴に大きくなり、 i_{pit} が減少または不動態領域の消失を確認した。これらの系では、耐食性は低下すると考えられる。

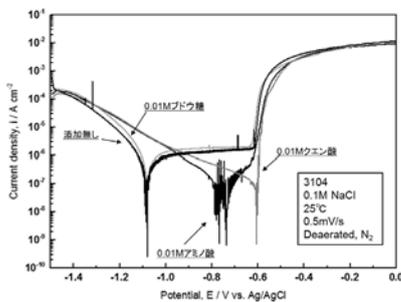


図13 3104の0.01M クエン酸、ブドウ糖、アミノ酸 + 0.1M NaCl水溶液中の分極曲線

Fig. 13 Polarization curves of 3104 in 0.01M citric acid, glucose or amino acid + 0.1M NaCl solutions

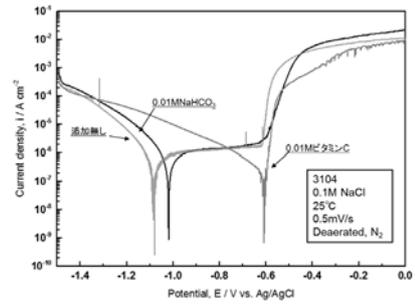


図14 3104の0.01M ビタミン C、炭酸水素ナトリウム + 0.1M NaCl 水溶液中の分極曲線

Fig. 14 Polarization curves of 3104 in 0.01M Vitamin C or $NaHCO_3$ + 0.1M NaCl solutions

⑥クエン酸添加が分極曲線に及ぼす影響

クエン酸は乳酸の分解作用をもち、疲労回復やミネラルの吸収促進を目的に多くの飲料に含まれている。クエン酸添加量の腐食への影響を検討するために 0.1M NaCl 水溶液にクエン酸を 1.0×10^{-3} 、0.01、0.1M となるよう調整し、3104 の分極曲線を測定した。測定結果を図 15 に示した。

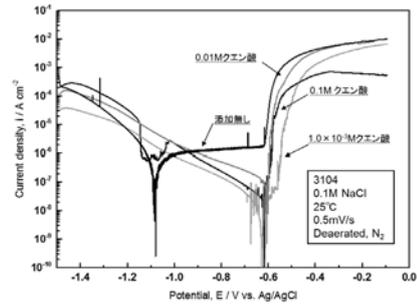


図15 3104のクエン酸 + 0.1M NaCl 水溶液の分極曲線

Fig. 15 Polarization curves of 3104 in citric acid + 0.1M NaCl solutions

クエン酸を添加した系においては E_{corr} が大きく増加し、分極曲線の不動態領域が確認されなくなった。クエン酸を含む溶液ではアルミ耐食性が大きく低下すると考えられる。また、分極曲線のクエン酸濃度依存性は確認されなかった。

⑦アミノ酸添加が分極曲線に及ぼす影響

アミノ酸は脂肪燃焼効果促進や疲労回復効果があり、多くの清涼飲料水で配合されている。今回はアミノ酸として側鎖にイソプロピル基を持つバリンを用いた。3104 の分極曲線へのアミノ酸濃度による変化を検討するために 0.1M NaCl 水溶液にアミノ酸濃度が 1.0×10^{-3} 、0.01、0.1M となるよう添加し、分極曲線を測定した。得られた分極曲線を図 16 に示す。

アミノ酸 $1.0 \times 10^{-3}M$ 添加時には添加なしの場合と同様の分極曲線を示したが、アミノ酸添加濃度が増えるにつれ、 i_{pit} が減少も

しくは不動態域が消失したことを確認した。アルミ耐食性が低下したと考えられる。アミノ酸は水溶液中においてはアミノ基が正に、カルボキシ基が負に帯電した双生イオン状態になっている。今回アミノ酸として用いたバリンは中性アミノ酸であり、等電点はpH5.96であった。0.1M NaCl水溶液に 1.0×10^{-3} 、0.01、0.1Mとなるようにそれぞれアミノ酸を添加した溶液のpHはそれぞれ5.33、5.12、4.99であった。pHが等電点よりもやや小さいため、アミノ酸の大半は正に帯電しているが、一部負に帯電したアミノ酸が存在し、アルミニウムイオンと錯体を形成したと考えられる。

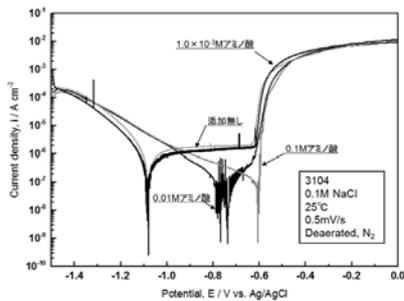


図 16 3104 のアミノ酸 + 0.1M NaCl 水溶液中の分極曲線

Fig. 16 Polarization curves of 3104 in amino acid + 0.1M NaCl solutions

＜ 3. 3 ＞ 浸漬腐食試験の結果と電気化学測定との相関

(1) 浸漬腐食試験後の溶出 Al^{3+} 量

モデル液中で 1070 と 3104 で浸漬腐食試験を行った。40°C × 一ヶ月浸漬腐食試験後、60%硝酸でサンプルから腐食生成物を溶液中に溶出させた。本試験の溶液水準及び pH、溶出 Al^{3+} 濃度及び分極曲線から得られた各特性値を表 1、2 に示す。ここで、不動態域の指標となるため E_{pit} と E_{corr} の差 ($\Delta E = E_{pit} - E_{corr}$) を記載した。

(2) 浸漬腐食試験結果と電気化学測定の相関

① 塩化物イオン濃度の影響

1070 の 0.01、0.1、1M NaCl 水溶液の結果を比較すると、浸漬腐食試験では塩化物イオン濃度と溶出 Al^{3+} 量との相関性はないが、電気化学試験では濃度が上昇するにつれて、耐食性は低下する傾向を確認したので、相関関係は一致しなかった。この結果は不動態膜が形成され、浸漬腐食試験の溶出 Al^{3+} 量の差が少ないために腐食の傾向が表れにくかったためと考えられる。

② 界面活性剤添加の影響

1070 の 0.1M NaCl 水溶液への界面活性剤の添加濃度依存性を比較すると、浸漬腐食試験では 10^{-4} 、 10^{-3} 、0.01M と界面活性剤添加濃度が上がるにつれ、溶出 Al^{3+} 量は若干増加した。

③ pH の影響

1070 の 0.1M NaCl 水溶液の結果を比較すると、0.1M NaCl 水溶液のみの場合(13.4ppm)に比べ、酸性条件では溶出 Al^{3+} 量が大きく増加(331.0ppm)し、塩基性条件では若干減少(4.3ppm)することがわかった。この結果は電気化学測定の結果と一致する。

表 1 1070 の浸漬腐食試験と電気化学測定結果の相関関係

Table 1 Relationships between corrosion examinations and electro-chemical measurement of 1070

試験液	pH	溶出 Al^{3+} 量 (ppm)	E_{corr} (mV)	E_{pit} (mV)	$\Delta E(E_{pit} - E_{corr})$ (mV)	i_{pit} (μA)
0.01MNaCl水	5.56	11.1	-1048	-500	548	1.7
0.1MNaCl水	5.32	13.4	-1178	-631	547	1.8
1MNaCl水	5.10	7.9	-1073	-735	338	1.5
0.1MNaCl水 + 10^{-4} M 界面活性剤	5.30	14.2	-986	-658	328	1.8
0.1MNaCl水 + 10^{-3} M 界面活性剤	5.27	16.1	-1006	-636	370	2.0
0.1MNaCl水 + 0.01M 界面活性剤	5.16	24.4	-947	-655	292	2.0
0.1MNaCl水 (pH=2: HCl調整)	1.98	331.0	-684	-438	246	0.21
0.1MNaCl水 (pH=11: NaOH調整)	11.0	4.3	-1129	-457	562	3.4

表 2 3104 の浸漬腐食試験と電気化学測定結果の相関関係

Table 2 Relationships between corrosion examinations and electro-chemical measurement of 3104

試験液	pH	溶出 Al^{3+} 量 (ppm)	E_{corr} (mV)	E_{pit} (mV)	$\Delta E(E_{pit} - E_{corr})$ (mV)	i_{pit} (μA)
0.1MNaCl水	5.32	12.0	-1082	-615	467	2.0
0.1MNaCl水 (pH=2: HCl調整)	2.00	275.3	—	—	—	—
0.1MNaCl水 + 10^{-3} M クエン酸	3.10	63.4	-591	-586	5	—
0.1MNaCl水 + 0.01M クエン酸	2.47	400.4	-616	-608	8	—
0.1MNaCl水 + 0.1M クエン酸	1.98	3639.0	-681	-672	9	—
0.1MNaCl水 + 10^{-3} M アミノ酸	5.33	8.1	-979	-605	374	2.0
0.1MNaCl水 + 0.01M アミノ酸	5.12	14.5	-742	-617	125	0.5
0.1MNaCl水 + 0.1M アミノ酸	4.99	26.4	-610	-602	8	—

④ クエン酸濃度の影響

3104 の 0.1 M NaCl 水溶液へのクエン酸添加濃度依存性を比較すると、浸漬腐食試験ではクエン酸添加濃度が 10^{-3} 、0.01、0.1M と増加すると溶出 Al^{3+} 量が 63.4、400.4、3639.0ppm と大きく増加した。電気化学ではクエン酸を添加すると不動態領域が見られず、耐食性の低下は確認できたが、濃度依存性は認められなかった。

⑤ アミノ酸添加の影響

3104 の 0.1 M NaCl 水溶液へのアミノ酸添加濃度依存性を比較すると、浸漬腐食試験ではアミノ酸添加濃度が 10^{-3} 、0.01、0.1M と上昇すると溶出 Al^{3+} 量が 8.0、14.5、28.4ppm と若干増加し、アルミ耐食性の低下を確認した。これは電気化学の結果と一致する。

⑥ 有機酸と無機酸の比較

0.1M NaCl 水溶液にクエン酸と塩酸をそれぞれ添加し、pH2 に調製した溶液にて浸漬腐食試験を行い、有機酸と無機酸の腐食への影響の違いについて調べた。塩酸、クエン酸で調整した溶液では溶出 Al^{3+} 量はそれぞれ 275.3、3639.0ppm であり、有機酸の方が無機酸より腐食量が多くなる傾向を確認した。これは pH の影響だけではなく、 Al^{3+} とキレート錯体形成によって耐食性が低下する効果があると考えられる。これは電気化学の結果と一致する。

今回の電気化学測定と浸漬腐食試験の結果から、電気化学試験により不動態域が減少する溶液においては、腐食浸漬試験による溶出量が大きい傾向であることを掴めることがわかった。しかし、孔食電位 E_{pit} から、腐食溶出量の予測は困難であった。

(3) 60°C×一週間での加速試験の検討

浸漬腐食試験の結果より塩化物イオン濃度による試験液への溶出 Al^{3+} 量の差は数 ppm 程度であり、明確な違いとして現れにくいことがわかった。そこで、腐食性の高い成分を含む試験液を用い、溶出量を大きくすることで腐食傾向が捕らえやすくなると考え、再度浸漬腐食試験による塩化物イオン濃度依存性の検討を行った。クエン酸濃度は 0.01M で一定、NaCl 濃度を 0.01、0.1、1M とした溶液を用い、試験片は 1070 材、保存期間は 60°C×一週間で試験を実施した。また、同じ溶液で 1070 の電気化学測定も行い、それらの相関関係について検討した。得られた分極曲線を図 17 に示す。

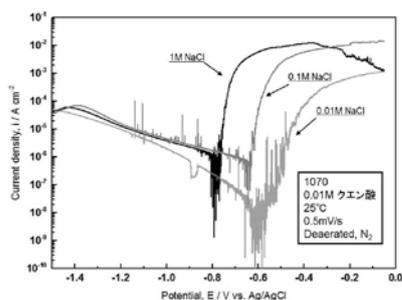


図 17 1070 の 0.1M クエン酸 + NaCl 水溶液中の分極曲線

Fig. 17 Polarization curves of 1070 in citric acid + 0.1M NaCl solutions

浸漬試験の結果より 0.01、0.1、1M NaCl 水溶液(0.01M クエン酸添加)の各溶出 Al^{3+} 量はそれぞれ 212、350、545ppm であった。また、分極曲線より E_{pit} は -605、-675、-790mV を示した。塩化物イオン濃度の増加につれて、耐食性が低下する傾向を両試験において確認した。したがって、浸漬腐食試験の溶出 Al^{3+} 量が小さい水準においても腐食量を増加させる成分を添加することで、腐食傾向を掴みやすくなることを確認した。

< 3.4 > 実内容物での耐食性評価試験結果及び考察

これまで検討したモデル液による耐食性評価の知見が実内容物に対しても利用できるかどうかを検討した。市販の清涼飲料水の原液 (pH3.45) で、1070 の電気化学測定と 40°C×一ヶ月浸漬腐食試験を行った。得られた分極曲線を図 18 に示す。

電気化学測定の結果より、 E_{pit} は -594mV、 E_{corr} は -650mV であり、 ΔE の値は 56mV と比較的小さい値を示した、不動態領域の消失による耐食性の低下を確認した。

一方、浸漬腐食試験での溶出 Al^{3+} 量は 129.3ppm と比較的高い値を示した。このことから清涼飲料水は腐食性の高い内容物であると考えられる。また、清涼飲料水の成分表を確認したところ、NaCl 濃度は約 $8.3 \times 10^{-3}M$ 、クエン酸濃度は約 $1.0 \times 10^{-3}M$ であった。以上に示したようにモデル液による浸漬腐食試験と電気化学測定の知見は実内容物へ応用可能であることを確認した。

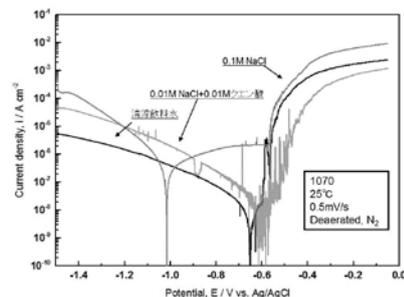


図 18 1070 の清涼飲料水中の分極曲線

Fig. 18 Polarization curves of 1070 in cooling drinks

4. 結言

本研究では、実用アルミ材の実内容物を想定した成分について電気化学測定と浸漬腐食試験を行い、アルミ材の耐食性を低下させる成分の特定及び両試験の相関関係を検討したところ、以下の結果が得られた。

- (1) 本研究ではアルミ材の腐食に影響を及ぼす成分として、従来報告されてきた塩化物イオンや pH だけではなく、キレート剤や界面活性剤、アミノ酸も影響することを確認した。
- (2) 電気化学測定においてクエン酸やビタミン C、アミノ酸、EDTA2Na を添加すると i_{pit} が減少または不動態領域が消失する。これは pH またはキレート錯体形成によってアルミの酸化被膜の形成を阻害された状態であると考えられる。
- (3) ICP 発光分光分析を用いた浸漬腐食試験において腐食生成物の処理法を検討し、定量的に評価する手法を確立した。また、浸漬腐食試験においては界面活性剤、アミノ酸、クエン酸等の添加物の濃度が増加するにつれ、溶出 Al^{3+} 量は増加した。
- (4) モデル液にて蓄積した基礎的な耐食性評価の知見は、実用内容物においても応用可能であることがわかった。

文献

- (1) 島村ら：軽金属,61(2011),303-309.
- (2) 電気化学会，電気化学測定マニュアル，(2002) 丸善株
- (3) 杉本克久，材料電子化学，(2006) 日本金属学会

V. エンドミル加工での工具寿命向上に関する研究

Study on the tool life improvement in end mill processing

中嶋 謙 羽柴 利直 上野 実
NAKASHIMA Ken HASHIBA Toshinao UENO Minoru
金森 直希 川堰 宣隆 杉森 博
KANAMORI Naoki KAWASEGI Noritaka SUGIMORI Hiroshi

Abstract

In cutting process, it is important to use up tools for higher efficiency. However, in the development stage, it is impossible to carry out a large number of machining to determine a real tool life. Thus, the tool life is determined based on the machining precision of the products in mass production stage. Furthermore the tool life is estimated in consideration of a safety factor which depends on tool quality variation or the risk of chipping. When the safety factor is applied to the tool life estimation, stable machining accuracy can be obtained. However, it's difficult to use up the tool. In this study, milling experiments of steel and aluminum alloy were carried out to investigate the effect of cutting parameters on machinability of these materials. Several dynamic signals during cutting were measured to detect the tool life. Cutting force and vibration which influence machining accuracy were measured to investigate the relationship to tool wear. As a result, the high frequency component of cutting force or vibration during machining seemed to be related to surface roughness of workpiece. There is a possibility to estimate machining accuracy or the tool life by measuring cutting force and vibration.

1. 緒言

切削加工の更なる高能率化を図るため、設備性能だけでなく、工具を寿命に至るまで使い切ることが重要である。しかし、開発段階では、工具寿命を見極めるだけ多くの加工を行えないため、量産に入ってから精度が外れるまで加工を行い、工具寿命を設定している。この際、工具のバラつき、突発的な欠けを考慮して、所望の精度から外れた加工数に安全率（1.1～2.0 程度）を見込んで、生産現場では工具寿命としている。このように、工具寿命に安全率を考慮すると安定した精度は得られるが、工具を寿命に至るまで使い切ることができない。

そこで本研究では、加工時に発生する各種物理現象をリアルタイムで捉えて、工具寿命を判断することを試みた。具体的には、精度に影響を及ぼす切削力と加工振動に着目し、これらと工具寿命の関係を検討した。

2. 実験装置の構成

< 2. 1 > 工具

使用する工具は、生産現場で実際の加工に使用されているエンドミルとした。図1は本研究で実際に使用したエンドミル（住



図1 実験で使用したエンドミル

Fig. 1 End mill used for the experiments

友電工 GSH6100SF)である。工具径は $\phi 10$ mm、刃数は6枚である。1刃あたりの切削力の低減を図るため、本研究ではすくい角 50° の強ねじれのエンドミルを使用した。

< 2. 2 > 加工機及び計測装置

実験には図2に示すCNCフライス盤（エンシュウ機製VF-Center）を使用し、エンドミルによる側面加工を行った。本装置のツールシャンクはBT50で、設定可能な主軸回転数は20～4000 rpmである。

フライス盤のテーブルには図3に示すテーブル式動力計測装置（日本キスラー機製9257B）を取り付け、この上に被削材を固定して、被削材に作用する切削力の測定を行った。使用するテーブ

ル式動力計測装置は、X、Y、Zの3方向の切削力を測定できる。

また、振動解析装置（MAL社製Cut Pro）およびFFTアナライザ（株小野測器製DS-3000）を用いて加工振動の測定、周波数分析を行った。



図2 CNC フライス盤

Fig. 2 CNC milling machine

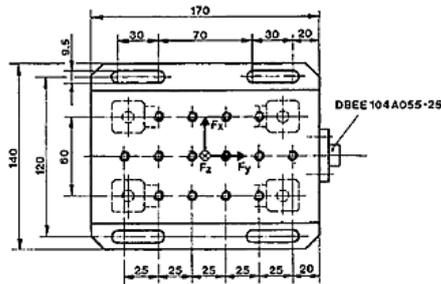


図3 テーブル式動力計測装置

Fig. 3 Table type cutting force dynamometer

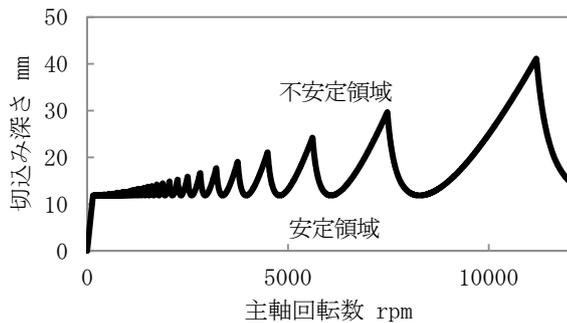


図4 安定限界線図

Fig. 4 Stability limit diagram for cutting

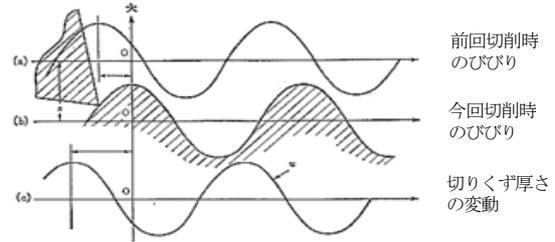


図5 再生びびりが生じる状況⁽¹⁾

Fig. 5 Schematic image of regenerative chatter

表1 加工条件(生材加工)

Table 1 Machining conditions (for row material)

	TRY 1	TRY 2	TRY 3	TRY 4
主軸回転数 rpm	3170	2960	2960	3170
切込み深さ mm	15	15	10	10
送り量 mm/rev	0.3			
切込み幅 mm	1.0			
被削材	S50C 生材			
クーラント	無し(乾式加工)			
切削方向	ダウンカット			
工具突出し長さ mm	30			
工具芯振れ	10 μm 以下			

3. 実験方法及び結果

< 3. 1 >加工条件の選定

正常な加工を行うため、びびりの無い安定な加工条件を選定した。加工条件は主軸回転数、送り量、切込み幅に着目し、このうち主軸回転数の選定には、機上に取り付けた状態で工具をハンマリングすることで振動解析ソフトCut Proから導出される、図4の安定限界線図を用いた。図は、本実験で用いたエンドミルの仕様をCut Proに入力して得られたものである。横軸は主軸回転数、縦軸は切込み深さとなっており、びびりの発生する条件を不安定領域、発生しない条件を安定領域と定義している。図5に再生びびりに関する模式図を示す。まず、前回の切削時に工具の固有振動数に基づくびびり振動が発生し、加工面形状が形成される。次に、今回の切削時には前回よりやや位相のずれたびびり振動のもとで削られるため、切りくず厚さが変動し、再生びびりが発生する。エンドミルの固有振動数に基づいて主軸回転数を選択すると前回の工具振動との位相差が無くなり、切りくず厚さを一定にできる。これによって、びびりの無い安定加工が可能となる。

この安定限界線図の有効性の確認と、主軸回転数の選定を行うため、表1の条件で加工を行った。図6に示すように、TRY 1は安定領域、TRY 2は不安定領域の主軸回転数を選択し、TRY 3、4はそれより切込み深さを小さくしている。

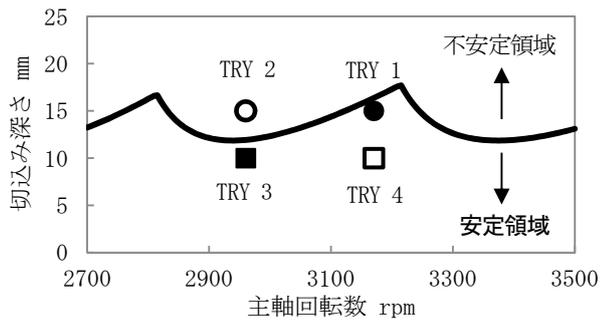


図 6 安定限界線図と加工条件の関係

Fig. 6 Relationship between stability limit diagram and machining conditions

実験機器の概要（生材加工）を図 7 に示す。加工は、被削材の側面を Y 方向に行った。切削力は、フライス盤のテーブルにテーブル式動力計測装置をクランプで固定し、動力計の上に被削材（S50C 生材 100×100×20 mm）をボルト 4 本で固定して測定した。ボルトの締め付けトルクはいずれも 10 Nm とした。また、加工振動は加速度ピックアップを主轴の X 方向に取り付けて測定した。

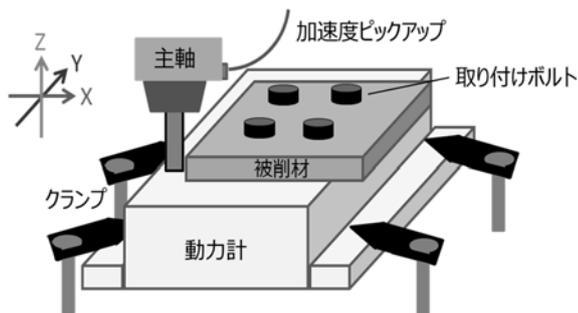
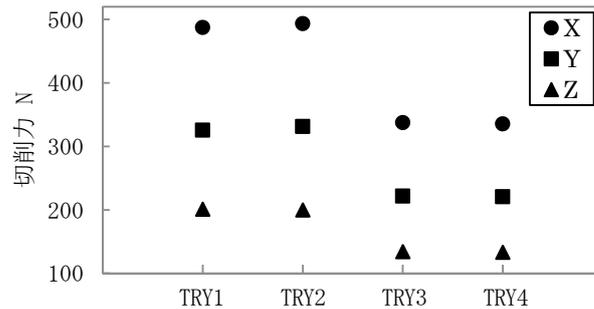


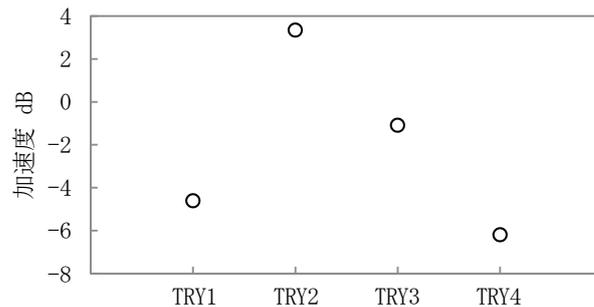
図 7 実験機器の概要(生材加工)

Fig. 7 Overview of the measuring equipments (for row material)

切削力、加工振動の測定結果を図 8 に示す。切削力は加工によって試料に力が作用する範囲の中間地点 2 秒間の値の絶対値をとり、これを平均した。また、加工振動は同じ方法でデータを得て、これを FFT 分析し、ピークが表れた 1700 Hz での加速度をプロットした（以下切削力のグラフは同様のプロット方法とした）。切削力・加工振動共に、安定限界線図の不安定領域（TRY 2）で最大となった。また、同じ安定領域内でも、主轴回転数を安定限界線図の山の中心近くに、かつ切込み深さを小さくする条件（TRY 4）で切削力・加工振動を最も小さく抑えられることが分かった。この結果から、主轴回転数を 3170 rpm とした。また、本測定結果から、安定限界線図の有効性も確認できた。



(a) 切削力



(b) 加工振動(1700 Hz)

図 8 主轴回転数、切込み深さの切削力、加工振動への影響

Fig. 8 Influence of rotation speed of a main spindle and cutting depth on cutting force and vibration

次に、送り量と切込み幅の選定を行った。加工条件を表 2 に示す。主轴回転数は選定した 3170 rpm に固定し、送り量・切込み幅をそれぞれ 3 水準として加工を行い、切削力・加工振動が小さくなる条件を選定することとした。

表 2 加工条件(焼き入れ材加工)

Table 2 Machining conditions (for quenching material)

主轴回転数 rpm	3170		
送り量 mm/rev	0.1	0.2	0.3
切込み幅 mm	0.1	0.2	0.3
切込み深さ mm	5		
被削材	S50C 焼き入れ材		
被削材突出し長さ mm	10		
クーラント	無し(乾式加工)		
切削方向	ダウンカット		
工具突出し長さ mm	30		
工具芯振れ	10 μm 以下		

実験機器の概要（焼き入れ材加工）を図 9 に示す。この加工から、実際の生産現場の製品に近い条件とするため、S50C の被削材の硬度を 25 HRC の生材から、58 HRC の焼き入れ材に変更した。また、焼き入れを被削材全体に均一に行うため、厚さを 20 mm か

ら 5 mm へと薄くした。被削材の硬度があがり、加工振動の増加が予想されたので、被削材を動力計に取り付ける際、被削材を上下から挟み、振動を抑える上治具、下治具(それぞれ 145×70 mm)を製作し、これらと一緒にボルトで取り付けた。ボルトの締め付けトルクは 10 Nm のままとした。また、加速度ピックアップを主轴に取り付けると、振動の信号が弱いため、被削材の X 方向に取り付け位置を変更した。

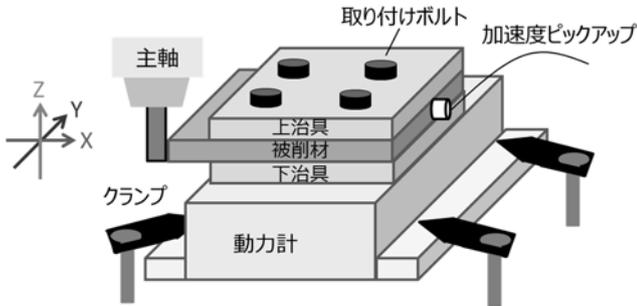
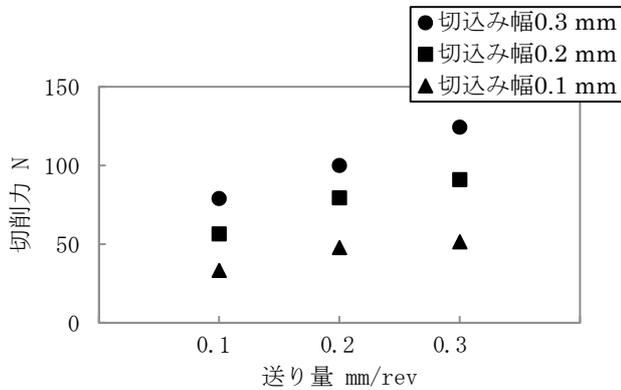
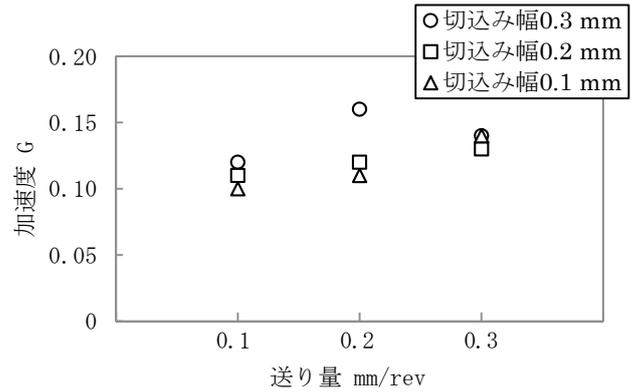


図9 実験機器の概要(焼き入れ材加工)
Fig. 9 Overview of the measuring equipments (for quenching material)

加工の際の X 方向の切削力、加工振動の測定結果を図 10 に示す。加工振動は、切削力と同じ方法で得たものである。切削力は送り量・切込み幅が小さくなるほど小さくなっている。それに対し、加工振動は送り量・切込み幅の変化による顕著な影響は見られない。そこで、切削力の測定結果から、送り量を 0.1 mm/rev、切込み幅を 0.1 mm に選定した。



(a) 切削力



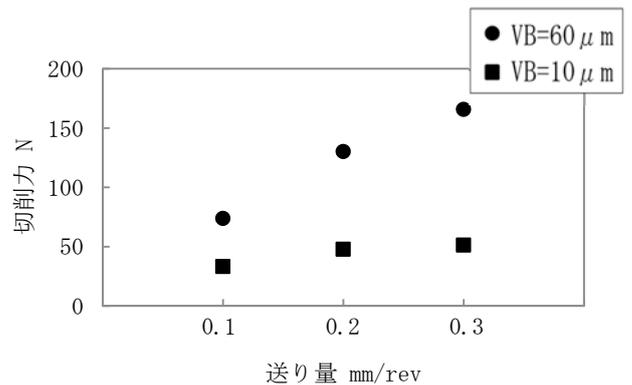
(b) 加工振動

図 10 送り量、切込み幅の切削力、加工振動への影響
Fig. 10 Influence of feed rate and cutting width on cutting force and vibration

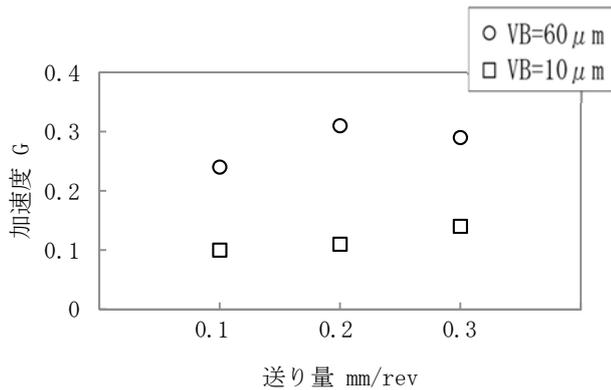
< 3. 2 > 工具摩耗による切削力・加工振動への影響

摩耗が小さい工具(逃げ面摩耗 $VB=10 \mu m$) と摩耗が大きい工具 ($VB=60 \mu m$) の 2 本の工具を用いて、X 方向の切削力・加工振動への工具摩耗の影響を調べた。加工条件は、表 2 の切込み幅を 0.1 mm として、送り量のみ 3 水準とした。切削力、加工振動の測定結果を図 11 に示す。この結果から、工具摩耗が大きいと、切削力、加工振動は共に増加することがわかる。すなわち工具摩耗は切削力、加工振動に影響を及ぼすと言える。

また、加工振動について、FFT 分析を行ったところ、図 12 のように、工具摩耗量により 10 kHz 付近で値に違いが見られた。そこで、10 kHz 付近の振動に着目し、より違いが明確に観測できる測定位置と、その振動要因について、検証を行うこととした。



(a) 切削力



(b) 加工振動

図 11 工具摩耗の切削力、加工振動への影響

Fig. 11 Influence of tool wear on cutting force and vibration

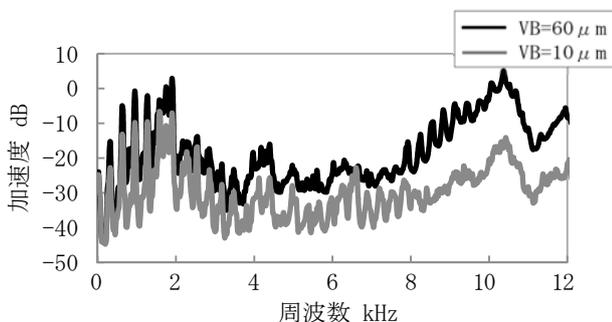


図 12 加工振動の FFT 分析結果

Fig. 12 Result of FFT analysis of vibration

< 3. 3 > 測定対象物及び測定方向による加工振動の違いの調査

図 13 に示すように、上治具・被削材・下治具それぞれに 7 mm 角のアルミブロックを貼り、各ブロックの X、Y、Z の 3 方向の面に加速度ピックアップを取り付け、合計 9 か所の加工振動を測定した。加工条件は表 2 の送り量を 0.1 mm/rev、切込み幅を 0.1 mm としたものである。以下の加工はすべてこの条件で行った。摩耗が大きい工具で加工を行ったときの、上治具、被削材、下治具の測定位置における X 方向の加工振動の FFT 分析結果を図 14 に示す。この結果から、上治具、被削材、下治具のいずれにおいても波形に大きな違いは見られないことが分かった。Y、Z 方向についても、X 方向と同様に、測定対象物による波形の大きな違いは見られなかったことから、加速度ピックアップの取り付けやすさを考慮して、上治具で加工振動を測定することとした。

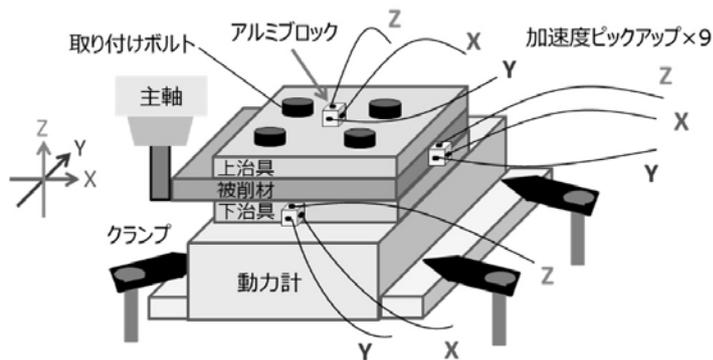


図 13 実験機器の概要(加工振動 3 方向測定)

Fig. 13 Overview of the measuring equipments (measuring vibration of 3 directions)

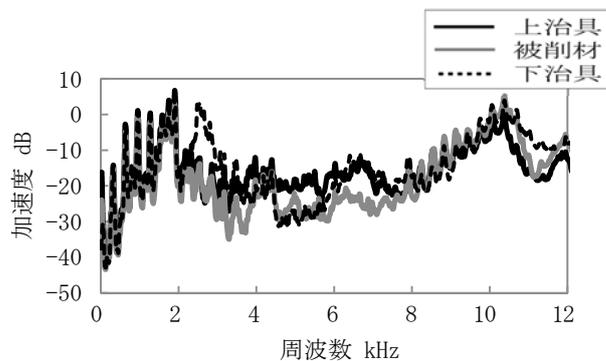
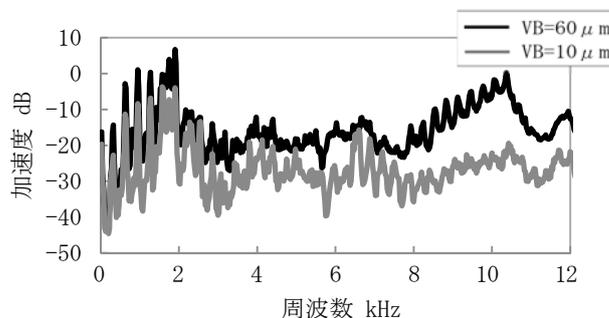


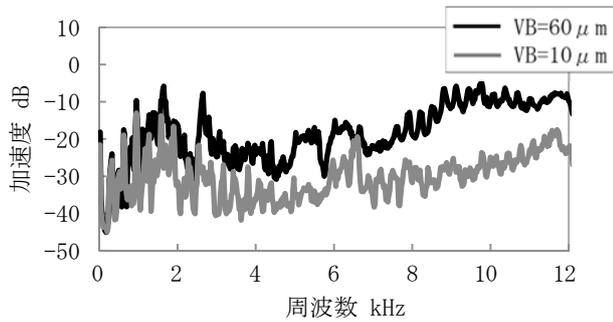
図 14 測定対象物による加工振動の違い

Fig. 14 Relationship between measurement point and vibration

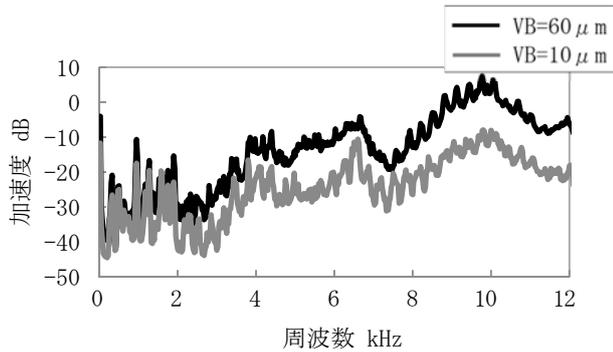
次に、上治具における加工振動の測定方向について検討した。図 15 はそれぞれ X、Y、Z の加工振動の FFT 分析結果を、工具摩耗量で比較したものである。図より、10 kHz 付近の加工振動が大きく表れ、かつ工具摩耗量による違いが明確に観測できるのは Z 方向であることから、この方向が測定方向として適していると思われる。



(a) X 方向



(b) Y方向



(c) Z方向

図 15 工具摩耗の加工振動への影響(上治具、XYZ方向)

Fig. 15 Influence of tool wear on vibration (XYZ directions of upper jig)

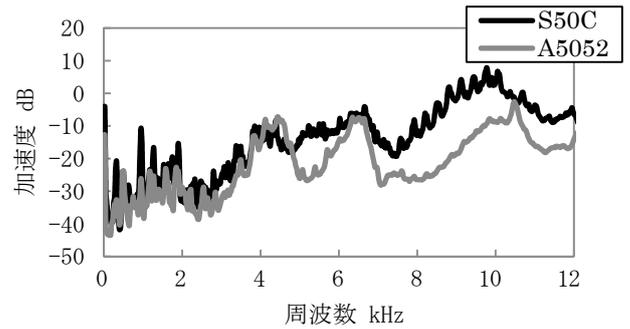
< 3. 4 > 振動要因の調査

10 kHz 付近の加工振動について、その要因を調査した。要因として考えられるのは、被削材・治具・工具であり、これらの条件を変更して加工を行い、10 kHz 付近のピークの周波数に変化が見られるか比較した。比較項目と変更点を表 3 に示す。また、それぞれの加工条件における上治具 Z 方向の加工振動の FFT 分析結果を図 16 に示す。なお、上治具を外したものについては、被削材上面の測定結果である。

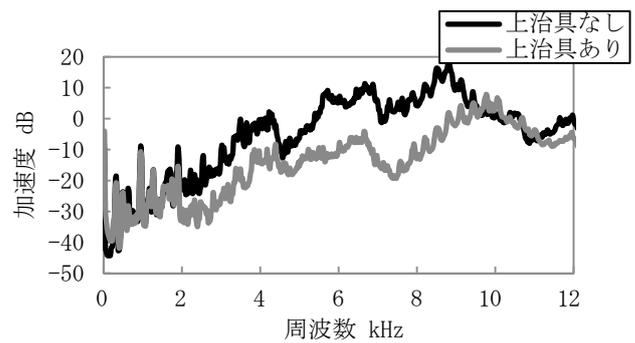
表 3 比較項目と変更点

Table 3 Comparison item and changed points

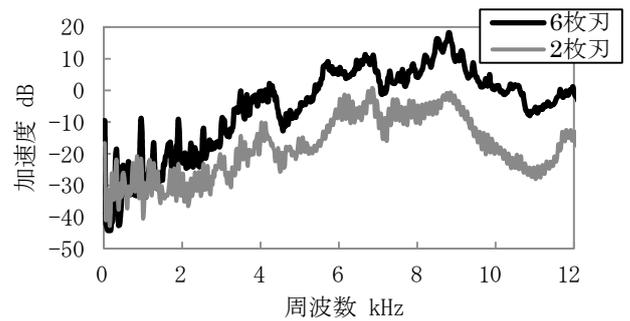
比較項目	変更前	変更後
被削材	S50C(鉄)	A5052(アルミ)
治具	上治具あり	上治具なし
工具	6 枚刃	2 枚刃



(a) 被削材



(b) 治具



(c) 工具

図 16 被削材、治具、工具の変更による加工振動の違い

Fig. 16 Difference of vibration with workpiece, jig and tool

図 16(a) のように、被削材を変更した時には 10 kHz 付近のピークの周波数に顕著な変化は見られなかったが、図 16(b) のように、上治具を外した時には 9 kHz 付近までピークの周波数が変化した。また、図 16(c) のように、上治具を外した状態で工具を変更しても、9 kHz 付近のピークの周波数に変化は見られなかった。これより、10 kHz 付近の加工振動は上治具の影響が大きいが分かった。

そこで、この上治具について、振動モード解析を行った。10 kHz 付近の治具の伝達関数の測定結果を図 17 に示す。加振点は、切削面に近い位置となる治具の上面の 1 点として、インパルスハンマにより Z 方向に加振した。図中の×印は加振点の位置を示す。応

答点は、治具の上面に縦横 10 mm 間隔で印を付けた位置（ボルト穴周辺を除く 84 か所）とし、そこに加速度ピックアップを取り付けて Z 方向の振動を測定した。

次に、実際の加工時の治具上面 Z 方向の加工振動の大きさを上記 84 か所の応答点で測定した。図 18 に、測定した振動から 10 kHz 付近の加速度を抽出した結果を示す。図 17 と図 18 から、治具の固有振動数における振動モードと実加工時の加工振動の大きさの分布は Z 方向においてほぼ同じ傾向を示しており、治具の中央付近で振動が大きくなることが分かった。このことから、10 kHz 付近の加工振動の要因は、治具の固有振動数によるものであると推測される。また、10 kHz 付近の加工振動が工具摩耗により大きくなるのは、工具の摩耗に伴い加工時の切削力が大きくなり、これが上治具の 10 kHz 付近の固有振動数の振動を励起することに繋がっているためではないかと考えられる。この結果から、加工振動で工具摩耗の違いをよく示す特徴的な周波数（この場合、10 kHz 付近）は、振動の測定対象（この場合、治具）の固有振動数から得られる可能性が見出された。

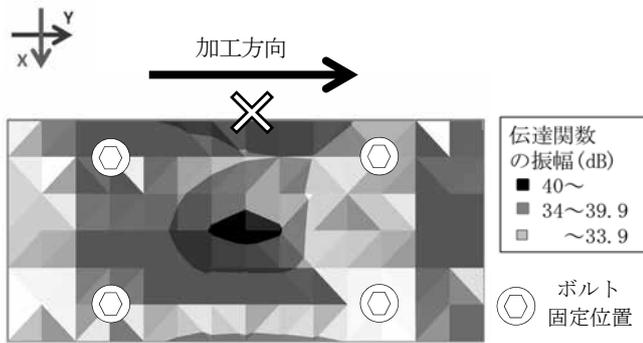


図 17 上治具の伝達関数の測定結果

Fig. 17 Measurement of FRF of upper jig

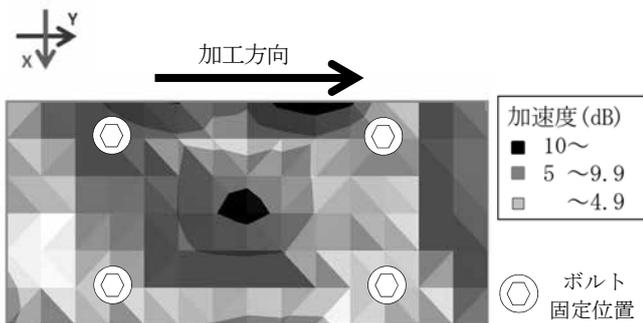


図 18 実加工時の加工振動の大きさの分布

Fig. 18 Distribution of vibration in machining

< 3. 5 > 工具寿命類推の試み

これまでの結果を踏まえ、工具寿命の類推のため、切削距離と切削力、加工振動、加工面粗さの関係を調査した。未使用の工具を用いて切削距離 80 m まで加工を行い、特定の切削距離ごとに切削力、加工振動、加工面粗さを測定した。

図 19、図 20 にそれぞれ切削力 (X 方向) 及び上治具中央での加工振動 (Z 方向) の 10 kHz 付近のピーク値と切削距離の関係を示す。また、図 21 には切削加工を行った試料の加工面粗さ (上下方向) と切削距離の関係を示した。切削力、加工振動、加工面粗さのいずれも、切削距離が長くなるにつれて増加する傾向が見られた。生産現場では加工面粗さが予め定められた値から外れた時点で工具寿命とされている。このため、図 19 から図 21 までの結果をもとに、加工中に測定可能な切削力、加工振動と (工具寿命の指標の) 加工面粗さの関係を調べた。図 22 に加工面粗さと切削力との関係を示し、図 23 に加工面粗さと加工振動の関係を示す。図より加工面粗さが増加すると、切削力、加工振動ともに増加する傾向が見られた。これより、切削加工中の 10 kHz 付近の切削力や加工振動のモニタリング結果からの加工面粗さ (さらには工具寿命) 類推の可能性を確認した。

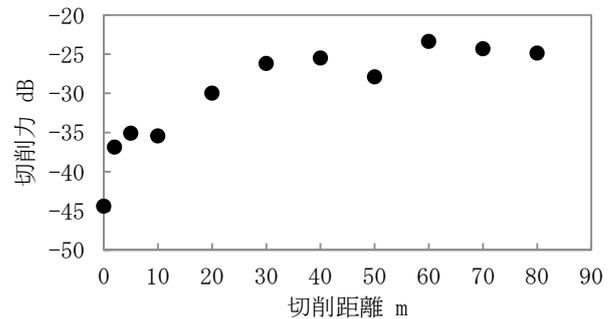


図 19 切削距離と切削力の関係

Fig. 19 Relationship between machining length and cutting force

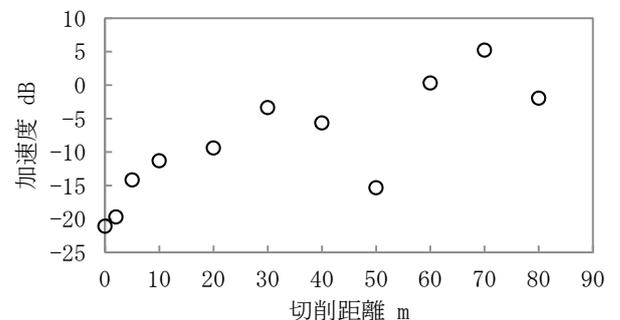


図 20 切削距離と加工振動の関係

Fig. 20 Relationship between machining length and vibration

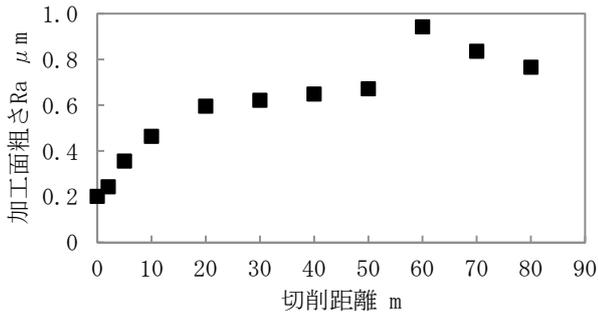


図 21 切削距離と加工面粗さの関係

Fig. 21 Relationship between machining length and surface roughness

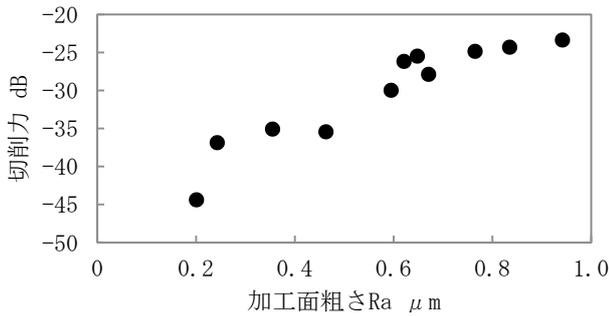


図 22 加工面粗さと切削力の関係

Fig. 22 Relationship between surface roughness and cutting force

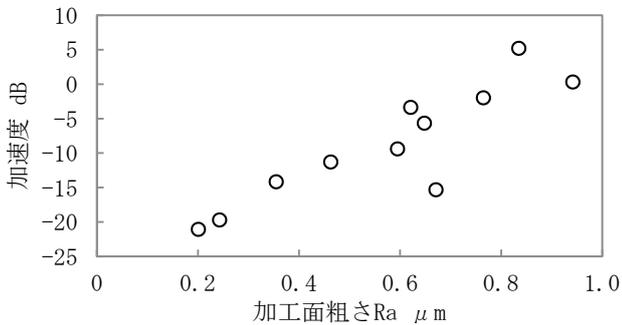


図 23 加工面粗さと加工振動の関係

Fig. 23 Relationship between surface roughness and vibration

4. 結言

エンドミル加工において、精度に影響する切削力と加工振動に着目し、加工現象の可視化を検証したところ、次の結果が得られた。

- (1) 主軸回転数を安定限界線図における安定領域の条件とし、送り量と切込み幅をできるだけ小さくすると加工中の切削力や加工振動は小さくなる。
- (2) 切削力、加工振動は工具が摩耗すると増加する。
- (3) 工具が摩耗すると、10 kHz 付近（特定周波数）の加工振動が

増加する。この特定周波数は、治具の構成によって変化する。

- (4) 10 kHz 付近の加工振動形態は、治具の固有振動数の振動モードとほぼ同じであった。
- (5) 10 kHz 付近の切削力（X方向）や加工振動（Z方向）と加工面粗さに相関が見られた。これより、加工面粗さを工具寿命の指標とする場合、切削加工中の切削力、加工振動から工具寿命類推の可能性が確認できた。

文献

- (1) 星鐵太郎,びびり現象-解析と対策,(1977)p19,工業調査会

VI. ウェアラブル電源の開発

Study on Wearable Power Supply

関口 貴彬 天野 久美子 坂井 友樹 寺澤 孝志 升方 康智
SEKIGUCHI Takaaki AMANO Kumiko SAKAI Tomoki TERASAWA Takashi MASUGATA Yasutomo
坂井 雄一 本保 栄治 関口 徳朗 杉森 博 岩坪 聡
SAKAI Yuichi HONBO Eiji SEKIGUCHI Noriaki SUGIMORI Hiroshi IWATSUBO Satoshi

Abstract

Organic thin-film Solar Cell (OSC) is attracting attention as a clean energy source aiming for a sustainable society. In this research, we have been developing OSC with aim of developing wearable compact power supply. P-type Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)(P3HT) and n-type [6,6]-Phenyl C₆₁ butyric acid methyl ester(PCBM) of organic semiconductor materials for active layer of OSC were adopted. The characteristics of the OSC were evaluated. As a result, we knew the element technology to manufacture the OSC. The key points to improving conversion efficiency were the formation of the separated phase and the homogeneous active layer. Next, in consideration of flexibility and a large area, the defects in the active layer decreased the efficiency. For the large area OSC of the glass substrate, the efficiency was measured. The maximum value was 0.35%. For the flexible substrate, the efficiency was 0.014%. To manufacture the OSC of the high efficiency, it was found that the process of homogeneous active layer with domain structure of nano-order was required.

1. 緒言

太陽電池は、持続可能な社会を目指すためのクリーンなエネルギー源として、注目が集まっている。中でも、導電性高分子やフラーレン誘導体などの有機薄膜を用いた有機薄膜太陽電池 (Organic thin-film Solar Cell : OSC) は、1990年代から開発が進められ、太陽電池開発の中でも後発のグループであるが、右肩上がりにエネルギー変換効率を伸ばしており、研究試作において 2015年には変換効率が11%台に達している⁽¹⁾。代表的なSi系太陽電池のアモルファスシリコンでは13%台である。

一方で、OSCは、フレキシブル、軽量、プリンタブル等の特性から、ウェアラブル機器の小型電源としての応用が期待されている。ウェアラブル機器は、身(頭、腕、胴、脚)に付けたまま使える情報処理や通信機能を持った機器である。用途は、GPS情報の利用や、毎日の運動量、消費カロリー、活動量等の記録である。すでに製品化されたものや試作中の機器には、腕時計型、メガネ型、衣服埋め込み型などがある。

本研究では、OSCの中で最も浸透している活性層材料(P3HT、PCBM)を用い、その基本性能の確認を行った。次いで大面積化、フレキシブル化の課題を検討した。さらにウェアラブル機器用の小型電源の可能性について検討した。

2. 実験方法

< 2. 1 > 有機薄膜太陽電池の構造と使用材料

有機薄膜太陽電池の構造を図1に、材料特性を表1に、それぞれ示す。OSCは、1組の電極で活性層を挟んだ構造であり、必要に応じて特性向上のために緩衝層を挿入する。構成要素は、①基板、②透明電極、③緩衝層、④活性層、⑤対向電極である。

基板は、ガラス基板 (glass : #7740、コーニング株)、ペット基板 (PET : VF-1E、コクヨ株)、ITO 透明電極付きペット基板 (PET-ITO : OTEC-110B-N125N、株トービ) を用いた。

透明電極は、インジウム錫複合酸化物 (ITO : 99.99%、株高純度化学研究所) を用いた。

緩衝層には、ポリ(3,4-エチレンジオキシチオフェン)-ポリ(スチレンスルフォナート) (PEDOT-PSS : 1.1wt%水溶液、739332、Sigma-Aldrich Co. LLC.) を用いた。

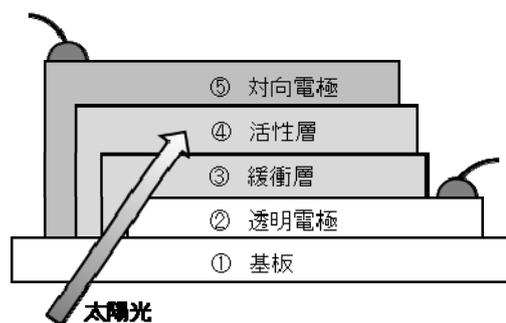


図1 有機薄膜太陽電池の構造

Fig. 1 Structure of organic thin-film solar cell

表1 材料特性

Table 1 Characteristics of materials.

要求 性能 材料	OSC特性			製造			ユーザ	
	光透 過度	導電 性	仕事関数 (eV)	耐熱 性	耐薬 品性	プロセス	軽量	フレキシ ブル性
① glass	◎			◎	◎		△	△
① PET	○				○		◎	◎
② ITO	◎	◎	4.7			△真空		○
③ PEDOT -PSS	○	○	5.1			120°C		◎
④ P3HT		△	LUMO: 3.3 HOMO: 5.0			120°C		◎
④ PCBM		△	LUMO: 3.7 HOMO: 6.1			120°C		○
⑤ Al		◎	4.3			△真空		△
⑤ Al導電 テープ		○	4.2					◎
⑤ C-Fiber		◎	4.4					○

活性層には、ポリ(3-ヘキシルチオフェン-2,5-ジイル) (P3HT : 698989) と、[6,6]-フェニル C61 醜酸メチルエステル (PCBM : 684430) を用いた。共に Sigma-Aldrich Co. LLC. 製である。

対向電極は、純アルミニウム (Al : 99.5%、(株)高純度化学研究所) とアルミ導電テープ (Al 導電テープ : 791、(株)寺岡製作所) を用いた。

< 2. 2 > 有機薄膜太陽電池の動作原理

有機薄膜太陽電池のエネルギー準位と活性層の構造を図2に示す。図2.(a)に示すように、P3HTは正孔を輸送するp型の有機半導体であり、PCBMは電子を輸送するn型の有機半導体である。P3HT層で光が吸収され、伝導帯(有機半導体ではLUMO)に電子が遷移し、価電子帯(有機半導体ではHOMO)には正孔が生ずる。電子-正孔対は励起子と呼ばれ、これがpn接合界面の電位差で電子と正孔に分離する。電子はPCBMのLUMO準位、Al電極を経て外部へ取り出される。一方、正孔はP3HTのHOMOからITO電極との界面に達し、電子を受け取る。このP3HTとITO電極との界面で電子の受け取りをスムーズにするために、緩衝層を挟むことがある。p型有機半導体のPEDOT-PSSが代表的な材料である。図2.(b)に示すように、活性層ではp型とn型の材料がpn接合を形成し、電子と正孔の分離を行う。活性層には、p型層とn型層を順次積層する積層型活性層と、p型とn型の材料を混合し数十nmオーダのp型ドメイン相、およびn型ドメイン相を混在させる相分離型活性層がある。相分離型活性層は、pn接合の接触面積が増加、および作製プロセスの簡略化の観点から優位と考えられている⁽²⁾。本研究では、OSCの活性層には相分離型活性層を用いた。

< 2. 3 > 有機薄膜太陽電池の作製手順

有機薄膜太陽電池の作製手順、および検討項目のフローチャートを図3に示す。

(基板洗浄) 基板は、アセトンで超音波洗浄した後、プラズマ

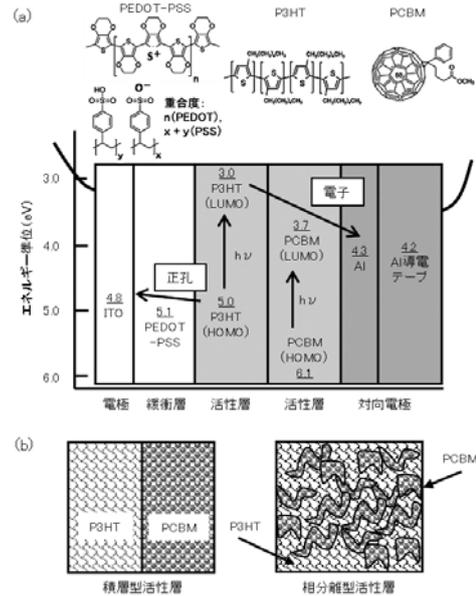


図2 (a)OSCのエネルギー準位、(b)活性層の構造

Fig. 2 (a) Energy level of OSC, (b) structure of active layer

	説明	評価OSC 変換効率(%)	大面積OSC 変換効率(%)
1. OSCの構造と使用材料	<2. 1>		
2. OSCの動作原理	<2. 2>		
3. OSCの作製手順			
・基板洗浄	<2. 3>		
・ITOの成膜	<2. 3>		
・PEDOT-PSSの成膜	<2. 3>		
・活性層の成膜	<2. 3>		
・Alの成膜(引出し電極)	<2. 3>		
・OSCの試作(実効面積)	<2. 4>		
・OSCの評価	<2. 5>		
4. 結果および考察			
・OSC構成材料の特性	<3. 1>	0.008	
・大気中での評価OSCの試作	<3. 2>		
・作製条件の検討	<3. 3>	0.09	
・グローブボックス	<3. 4>	0.12	
・ITO膜厚とOSCの効率	<3. 5>	0.16	
・PEDOT-PSS	<3. 6>	0.19	
・P3HT:PCBMの比率	<3. 7>	0.24	
・活性層の濃度	<3. 8>	0.35	
・評価OSCの高効率化	<3. 9>		
・フレキシブル基板	<3. 10>	0.014	0.005
・ガラス基板OSC(大型化)	<3. 11>		0.32
・ガラス基板OSC(集電極)	<3. 12>		0.15
・大型化の課題	<3. 13>		
・ウェアラブル小型電源	<3. 14>		

図3 OSCの作製手順、および検討項目のフローチャート

Fig. 3 Procedure for preparing OSC and flow chart of study items

リアクター (PR301、ヤマト科学株) で表面の残渣を除去して使用した。条件は、O₂流量 30 mL/min、電力 RF100W とし、処理時間は、ガラス基板は 5 分、PET 基板は 2 分とした。

(ITO の成膜) ITO 透明電極膜は、スパッタリング装置 (SH-250H-D04、日本真空技術株) で作製した。条件は、Ar 流量 15 mL/min、圧力 0.5Pa、電力 RF80W とし、成膜時間は 10 分とした。このときの膜厚は 330nm、シート抵抗は 7.5 Ω/sq.であった。

(PEDOT-PSS の成膜) PEDOT-PSS 膜は、PEDOT-PSS 溶液 (基板面積に応じた量: 0.04mL/cm²) を滴下後、スピンドコート (SC-200、

(有押鐘)で塗布した。条件は回転数 1500rpm、10 秒とした。塗布後 120°C に保った恒温槽で 10 分乾燥して作製した。

〈活性層の成膜〉相分離型活性層膜は、P3HT と PCBM の混合溶液 (基板の面積に応じた量: 0.04mL/cm²) を滴下後、スピンのコータ (同型機種使用) で塗布し、乾燥して作製した。

P3HT と PCBM の混合溶液は、クロロベンゼン (≧99%、032-07986、和光純薬工業株) を用い調整した。P3HT 溶液 (基準濃度: 15mg/mL) と PCBM 溶液 (基準濃度: 12mg/mL) を調整後、両者を 2:1、1:1、1:2、1:4 の体積比で混合した混合溶液 [P3HT(15mg/mL): PCBM(12mg/mL)=2:1、1:1、1:2、1:4] を準備した。以下、基準溶液 2:1、基準溶液 1:1、基準溶液 1:2、基準溶液 1:4 と表記する。条件は回転数 1500rpm、10 秒とした。

同様に、P3HT 溶液 (2 倍濃度: 30mg/mL) と PCBM 溶液 (2 倍濃度: 24mg/mL) を用いて、2 倍溶液 1:1、2 倍溶液 1:2、2 倍溶液 1:4 [P3HT(30mg/mL): PCBM(24mg/mL)=1:1、1:2、1:4] を、また、P3HT 溶液 (4 倍濃度: 60mg/mL) と PCBM 溶液 (4 倍濃度: 48mg/mL) を用いて、4 倍溶液 1:1、4 倍溶液 1:4 [P3HT(60mg/mL): PCBM(48mg/mL)=1:1、1:4] をそれぞれ調整した。調整溶液は、0.45 μm の PTFE フィルターで残渣をろ過して使用した。スピンのコートでは膜厚を調整するために、薄膜用の条件 (回転数 1500rpm、10 秒) と厚膜用の条件 (回転数 500rpm、10 秒) を使い分けた。乾燥は、活性層の硬化時間を調整するために、ホットプレート乾燥 (120°C、10 分) と自然乾燥 (25°C、40 分) を使い分けた。

〈Al の成膜〉Al 電極は、高真空蒸着装置 (VVS-31599K-03、アネルバ株) で作製した。条件は、真空到達圧力 3×10⁻³Pa、タングステンボートによる真空加熱、成膜レート 1.0nm/sec とし、膜厚 150nm 真空蒸着した。このときのシート抵抗は 0.27 Ω/sq. であった。

< 2. 4 > 有機薄膜太陽電池の試作

基板 (ガラス、PET、PET-ITO) は、目的により使い分けた。OSC の評価は、実効面積あたりの電流値 (mA/cm²) で行うため、面積の違う 3 種の電極パターンを準備した。特性評価用の評価 OSC、大面積用の大面積 OSC、さらに大面積高効率用の大面積集電 OSC (<3. 12>にて言及) である。実効面積は、それぞれ 0.50cm²、9.0cm²、7.2cm² である。変換効率は、PEDOT-PSS、P3HT、PCBM を用いた OSC でメーカー公表値が 3.2% であること⁽³⁾ と、有機半導体の特性は汚染等に敏感であることから、1.0% を開発目標とした。

< 2. 5 > 有機薄膜太陽電池の評価

図 4 に、AM1.5 の太陽光スペクトルを示す。日本の地上では、およそ 100mW/cm² のエネルギーが降り注いでいる。OSC の太陽電池出力測定は、ソーラーシミュレータ (CEP-25、分光計器株) を用いて行った。Xe 光源からの光を AM1.5 フィルターに通し、校正用検知器 (BS-520、分光計器株) で校正して使用した。

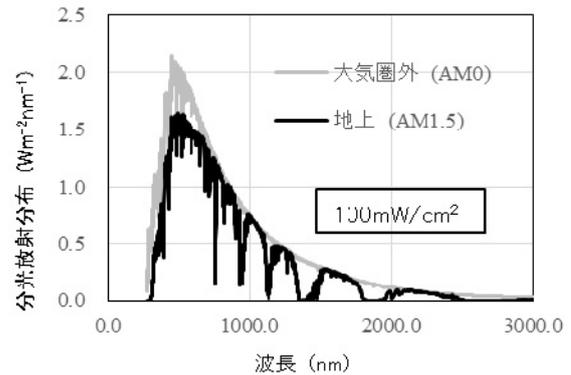


図 4 AM1.5 の太陽光スペクトル
Fig. 4 Solar spectrum of AM1.5

図 5.(a) に、太陽電池の J-V 特性を示す。J_{sc} (mA/cm²) は短絡電流密度で単位面積当たりの電流を、V_{oc} (V) は開放電圧を表す。最大出力点を与える J、V を J_{max}、V_{max} すると、曲線因子 FF は [(J_{max}・V_{max})/(J_{sc}・V_{oc})] で与えられる。100mW/cm² で標準化した変換効率 η_n (%) は、J_{sc}・V_{oc}・FF で与えられる。

図 5.(b) に太陽電池の一般的な等価回路を示す。回路は定電流源、並列ダイオード、並列抵抗 (R_{sh})、直列抵抗 (R_s) の組み合わせで表記される。

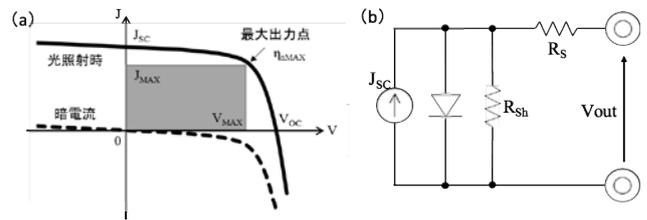


図 5 太陽電池の J-V 特性
Fig. 5 J-V characteristic of solar cell

3. 実験結果および考察

< 3. 1 > OSC 構成材料の特性

表 2 に、OSC 構成材料の特性を示す。膜厚、抵抗、光透過、熱特性を調べた。活性膜は、2 倍溶液 1:1、回転数 1500rpm-10 秒、乾燥 120°C-10 分の条件で成膜した。抵抗、光透過、熱特性は、OSC 材料として良好な結果であった。PET はガラス転移温度 (T_g) が 90°C であり、ITO 成膜時に熱膨張するため、厚みのある基板の使用と、基板温度が上がらない成膜条件の検討が必要であることが判った。

< 3. 2 > 大気中での評価 OSC の試作

緩衝層、および活性層 (2 倍溶液 1:1) を、大気中で塗布・乾燥

して作製した OSC の特性を表 3 に示す。フレキシブル化を睨んで基板 (ガラス、PET) の比較、及び PEDOT-PSS に ITO の機能を持たせることができるか (ITO の有無) を比較した。全て太陽電池の特性を示したものの、ITO 有りでは、基板による明確な優位差は見られず、 η_n も 0.01% 以下であったため、OSC の要素技術の検討を行った。また、ITO 無しの PEDOT-PSS 単独での使用は難しいことが判った。

表 2 OSC 構成材料の特性

Table 2 Properties of OSC component materials

材料	基板		透明電極	緩衝層	活性層	対向電極
	PET	glass	ITO	PEDOT-PSS	P3HT/PCBM	Al
膜厚	0.1mm	1.1mm	330nm	130nm	190nm	150nm
抵抗	$>10^{16} \Omega\text{cm}$	$>10^{15} \Omega\text{cm}$	7.5 Ω /sq.	36 Ω /sq.	5.8k Ω /sq.	0.27 Ω /sq.
光透過	350~2000nm	300~2000nm	400~2000nm	300~2000nm	335~670nm (1.9~3.7eV)	-
ガラス転移温度	Tg: 90°C	-	-	-	P3HT: Tm(234°C) PCBM: Tm(270°C)	-
融点	Tm: 256°C	-	-	-	-	-
耐熱温度	180°C	-	-	160°C	180°C	-

表 3 OSC の特性

Table 3 Characteristics of OSC

構造	電池構成		電池構成	
	①基板 ②透明電極 ③緩衝層 ④活性層 ⑤対向電極		①基板 ② - ③緩衝層 ④活性層 ⑤対向電極	
	基板		基板	
電池特性	glass	PET	glass	PET
開放電圧 V_{oc} (V)	0.36	0.43	0.22	0.32
短絡電流密度 J_{sc} (mA/cm ²)	0.123	0.167	0.001	0.001
曲線因子 FF	0.149	0.125	0.247	0.254
変換効率 η_n (%)	0.0066	0.0089	0.0001	0.0001

< 3. 3 > 作製条件の検討

表 3 の結果を受け、PEDOT-PSS の抵抗値をさらに下げるための薄膜化(スピコート)の条件を 1500rpm-10 秒から 3000rpm-10 秒)、活性層溶液の残渣除去 (溶液ろ過 PTFE フィルターを 0.45 μm から 0.20 μm)、および P3HT 単独の結晶成長を抑え相分離型活性層を形成するための乾燥条件 (120°C-10 分から 25°C-40 分) に変更した。その結果、活性層の厚さは 190nm から 50nm となり、膜質もより均質なものが得られた。図 6. に結果を示す。変更後の η_n は、0.092% に向上した。

< 3. 4 > グローブボックスでの評価 OSC の試作

η_n 低下の原因は大気中の酸素または水分によって発生しているという報告がある⁽⁴⁾。活性層の出来が OSC の変換効率に大きな影響を及ぼす可能性があるため、活性層の成膜を水分と酸素を除

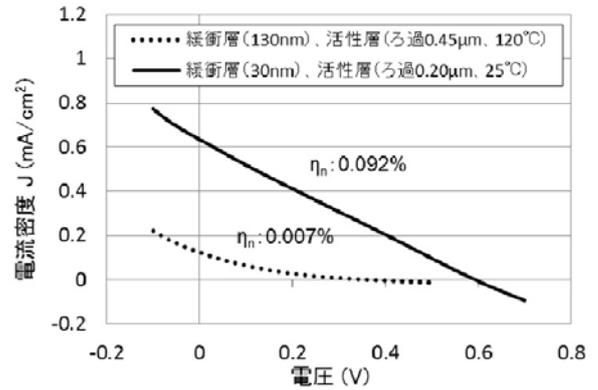


図 6 作製条件と OSC の変換効率の関係

Fig. 6 J-V characteristics (fabrication conditions and η_n of OSC)

去したグローブボックス (G-10N-MV-AV-1H、(株)高杉製作所)で行うこととした。グローブボックス中は、Ar 雰囲気、露点温度 -20°C (水分約 0.1%) 以下、酸素濃度は 1% 以下である。図 7. に評価 OSC の外観 (5cm \times 5cm、4 個取り、実効面積 0.5cm²) を、図 8. に作製雰囲気と OSC の変換効率の関係を示す。グローブボックスで作製した OSC で η_n は 0.12% に向上した。

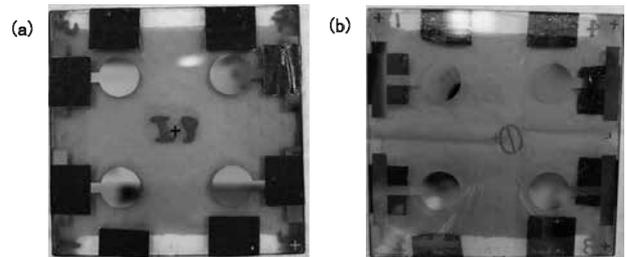


図 7 評価 OSC の概観 (a)大気中作製、(b)Ar 中作製

Fig. 7 Overview of evaluation OSC (a) preparation in air, (b) in Ar

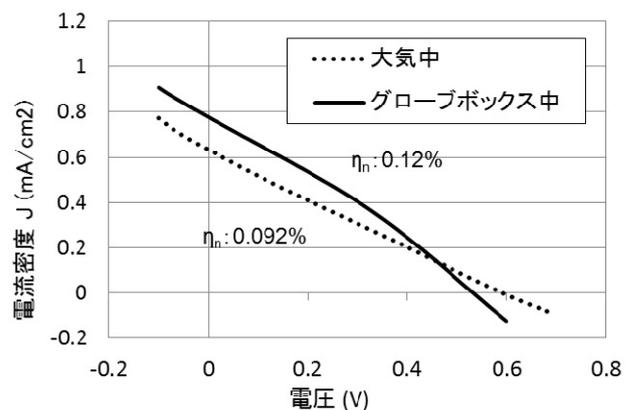


図 8 作製雰囲気と OSC の変換効率の関係

Fig. 8 J-V characteristics (production atmosphere and η_n of OSC)

< 3. 5 > 透明電極 (ITO 膜厚) と変換効率

ITO 膜が、OSC の変換効率に影響を及ぼすか確認するため、膜厚の違う ITO (330nm, 7.5Ω/sq.)、ITO (750nm, 5.6Ω/sq.) で、OSC の変換効率の違いを調べた。図 9 に ITO 膜厚と変換効率の関係を示す。 η_n は、共に 0.16% で変化は認められなかった。

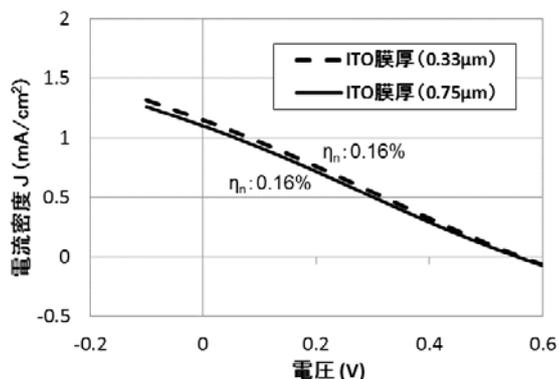


図 9 ITO 膜厚と変換効率の関係

Fig. 9 J-V characteristics (ITO film thickness and η_n of OSC).

< 3. 6 > 緩衝層 (PEDOT-PSS) と変換効率

次に、PEDOT-PSS の有無と変換効率の関係について調べた。PEDOT:PSS(A)は従来品であり、PEDOT:PSS (B) (483095, 1.3wt% 水溶液、Sigma-Aldrich Co. LLC.) は同様の製品であるが、若干導電性の向上が見込めるものである。結果を図 10 に示す。 η_n は PEDOT-PSS 無しが 0.19% で最も良かった。この原因を調べるために SEM 観察を行った。図 11 に ITO/PEDOT-PSS(B) /活性層上の SEM 画像を示す。活性層から、ITO 電極への正孔移動を促すための PEDOT-PSS 層が凝集物で波うち不均一であるため、OSC の変換効率が低下したと考えられる。なお、ITO 膜上に活性層のみの場合は均一であったことから、PEDOT-PSS 材料の劣化が原因と考え、以後 ITO 電極に直接、活性層を成膜することにした。

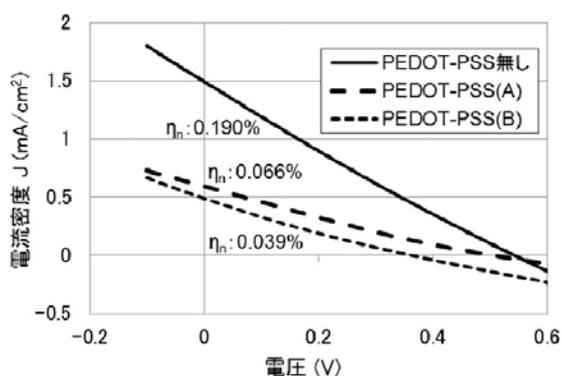


図 10 PEDOT-PSS の有無と変換効率の関係

Fig. 10 J-V characteristics (presence or absence of PEDOT-PSS and η_n of OSC)

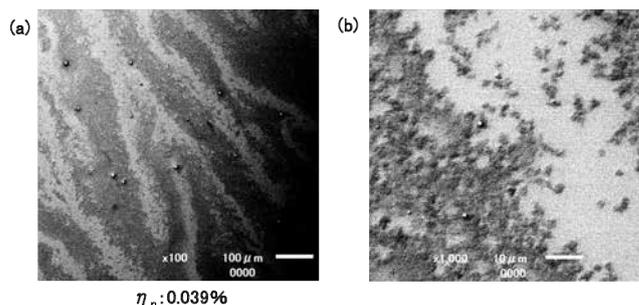


図 11 ITO/PEDOT-PSS(B) /活性膜上の SEM 画像 (a)100 倍、(b)1,000 倍
Fig. 11 SEM image (a)×100, (b)×1000 of ITO/PEDOT-PSS(B)/active-layer

< 3. 7 > 活性層 (P3HT と PCBM の比率) と変換効率

図 12 に示すように活性層溶液の比率 (基準溶液 2:1、1:1、1:2、1:4) と OSC の η_n との関係調べた。その結果、基準溶液 1:4 を用いたものが、 η_n は 0.24% で最も良かった。

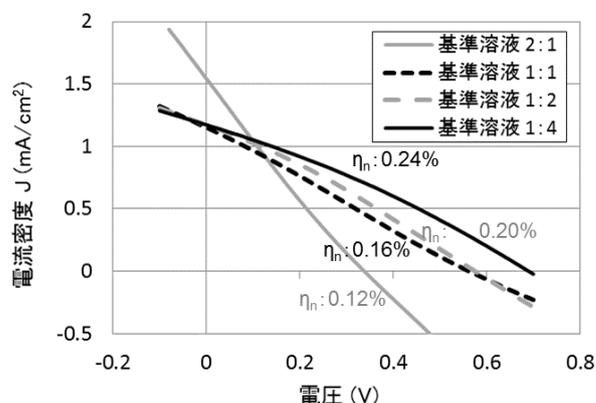


図 12 活性層 (P3HT と PCBM の比率) と変換効率の関係

Fig. 12 J-V characteristics (ratio of P3HT to PCBM and η_n of OSC)

図 13 に、活性層の SEM 画像を示す。基準溶液 1:1 に比べ、基準溶液 1:4 のほうが、黒っぽいナノドメインが明確になっていく。これは P3HT の平均数分子量が約 30,000、PCBM の分子量が 910 より妥当と考えられる。どちらの基準溶液も、P3HT 相と PCBM 相の相分離と考えられるナノドメイン構造が確認できた。

< 3. 8 > 活性層 (溶液の濃度) と変換効率

活性層溶液 (基準溶液 1:1、2 倍溶液 1:1) の濃度と OSC の η_n の関係を調べた。その結果を図 14 に示す。活性層の厚みと変換効率は、基準溶液 1:1 (50nm, 0.35%)、2 倍溶液 1:1 (190nm, 0.26%) で、基準溶液 1:1 の η_n が良かった。正孔の移動距離が短いと考えている。

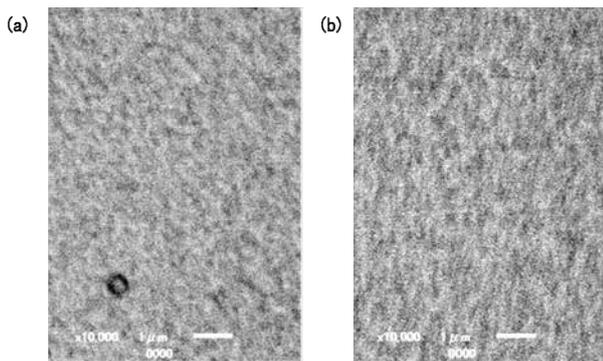


図 13 活性層 (a)基準溶液 1:1、(b)基準溶液 1:1 の SEM 画像

Fig. 13 SEM image of active layer (a) reference solution 1: 1, (b) reference solution 1: 4

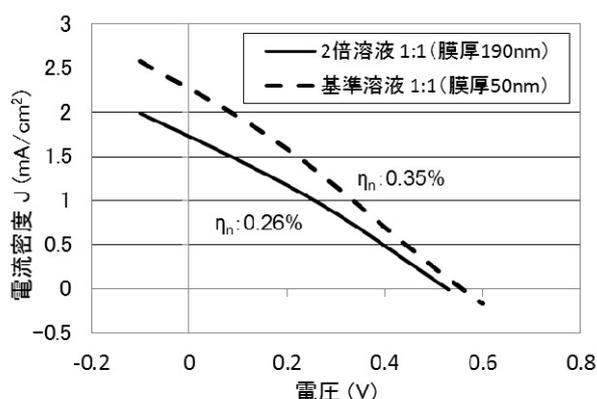


図 14 活性層の溶液濃度と変換効率の関係

Fig. 14 J-V characteristics (solution concentration and η_n of OSC)

< 3. 9 > 評価 OSC の高効率化

有機薄膜太陽電池 (OSC) の構成材料の検討を行い、評価用の OSC を試作、特性評価を行った。その結果以下のことが判った。

- (1) OSC 作製のための要素技術を検討した結果、緩衝層 (PEDOT-PSS) の薄膜化、活性層溶液のフィルターろ過、活性層の形成温度の制御が、変換効率の向上に有効であることが判った。
- (2) グローブボックス中で活性層を成膜した OSC の変換効率は、大気中で成膜したものに比べ向上した。
- (3) 透明電極の膜厚 (330nm-7.5Ω/sq.、750nm-5.6Ω/sq.) と変換効率の関係では、ある程度の導電性があれば変換効率に変化は見られず共に 0.16% であった。
- (4) 緩衝層は、凝集物により膜質が不均一となる。PEDOT-PSS の凝集 (劣化) と考えられる。凝集物が多いと変換効率の著しい低下 (使用しないものの 1/3 以下) を招いた。

- (5) 活性層 (P3HT と PCBM の比率) と変換効率との関係では、基準溶液 1:4 を用いた OSC の変換効率が 0.24% で最も良かった。
- (6) 活性層の SEM 観察から、P3HT 相と PCBM 相の相分離と考えられるナノドメイン構造を確認した。
- (7) 活性層 (溶液の濃度) と変換効率との関係では、低濃度溶液 (基準溶液 1:1) を用いた活性層の膜厚は 50nm で、変換効率は 0.35% を達成した。高濃度 (2 倍溶液 1:1) では、それぞれ 190nm、0.26% であった。pn 接合は形成されていると考えており、正孔移動の障害が問題とされている。

< 3. 10 > フレキシブル基板の検討

フレキシブル性のある PET 基板を用いて作製した OSC を、図 15 に示す。試作は、緩衝層無し、活性層には基準溶液 1:1 を用いて行った。図 16 に変換効率を示す。 η_n は、それぞれ、0.16%、0.014%、0.005% であった。PET 評価 OSC では、ガラス評価 OSC に比べ 1 桁低下した。これは、OSC 作製中の膨張・収縮 (力学的、熱的) が、活性層 (膜厚 50nm 程度) の機能低下を招くためと考えている。PET の Tg が 90°C であるため、耐熱性のある透明ポリイミド基板の検討が必要である。

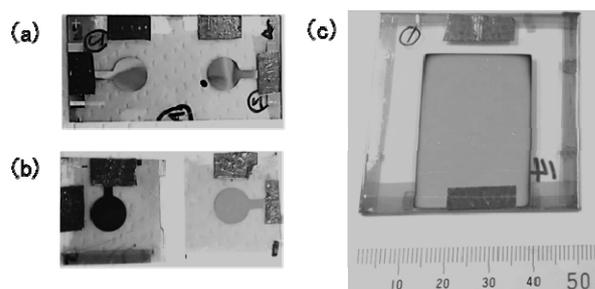


図 15 フレキシブル基板を用いた OSC (a) 比較用ガラス評価 OSC、(b) PET 評価 OSC、(c) PET-ITO 大面積 OSC

Fig. 15 OSC using flexible substrate (a) comparative glass evaluation OSC, (b) PET evaluation OSC, (c) PET-ITO large area OSC

< 3. 11 > ガラス大面積 OSC の検討

大面積化を目指し、活性層に基準溶液 1:1、基準溶液 1:4 を用いて、ガラス大面積 OSC (9.0cm²) を作製した。評価した結果、全て短絡状態であった。大面積化ではピンホールなどの欠陥の数が増えるため短絡しやすくなる。そこで、2 倍溶液 1:1、2 倍溶液 1:4 を用い、活性層を、塗布・乾燥した後、もう一度塗布・乾燥する 2 度塗りを行った。図 17 にガラス大面積 OSC の変換効率を示す。温度は活性層の乾燥温度を表す。2 倍溶液 1:1 (25°C)、2 倍溶液 1:1 (120°C) を用いて作製した OSC は共に、変換効率 0.32% を示した。OSC のダイオード特性の観点からは、2 倍溶液 1:1 (25°C) の方が望ましい特性であった。

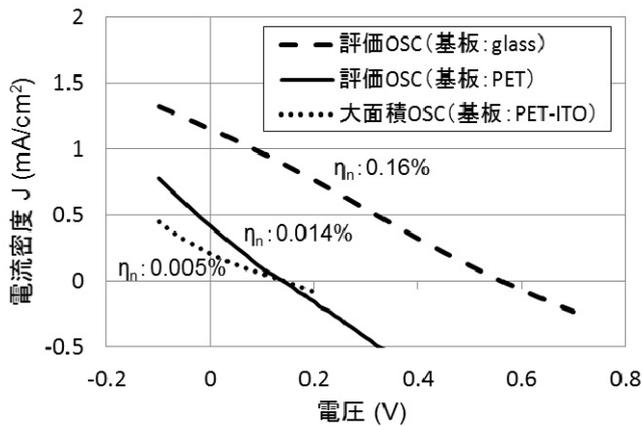


図 16 PET 基板を用いた OSC の変換効率

Fig. 16 J-V characteristics (η_n of OSC using PET substrate)

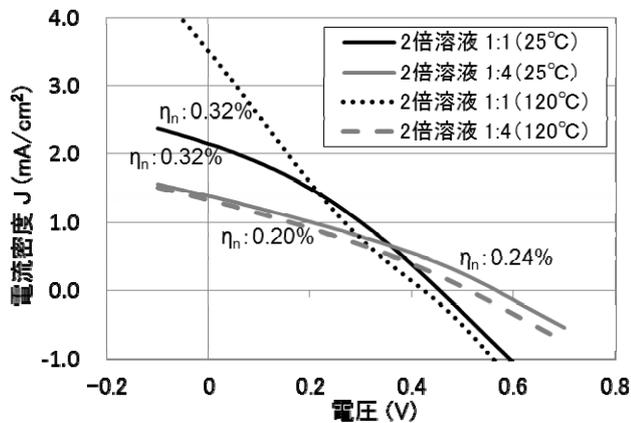


図 17 ガラス大面積 OSC の変換効率

Fig. 17 JV characteristic (η_n of glass large area OSC)

< 3. 1 2 > ガラス大面積 OSC への集電極の追加

ガラス大面積 OSC の検討では、活性層の 2 度塗りでの短絡を防止したが、< 3. 8 > で見たように活性層の膜厚が増し変換効率の低下を招いている可能性がある。また、緩衝層がないため、正孔移動が問題となっている可能性がある。そこで正孔と電子の授受をスムーズにするために、ITO 電極上に集電極を設けた。集電極は楕円形パターンの金属マスクを用い、スパッタリングにより金を 40nm 成膜して作製した。集電極の占める面積は、OSC の実効面積の 20% で設計した。< 3. 11 > と同様に OSC を作製し、測定した結果を、図 18. に示す。2 倍溶液 1:1 (25°C)、2 倍溶液 1:4 (25°C) では、それぞれ変換効率が 0.15、0.13% で集電極のないものに比べ低下した。楕円の集電極の 40nm の段差の影響で、活性膜の均一性が乱れたためではないかと考えている。< 3. 7 > の評価 OSC と同様、P3HT の比率が多いと電流密度が、PCBM の比率が多いと電圧が高くなる傾向を示した。120°C 乾燥では変換効率が極端

に低下した。相分離型の活性層がうまく形成されていないためと考えている。

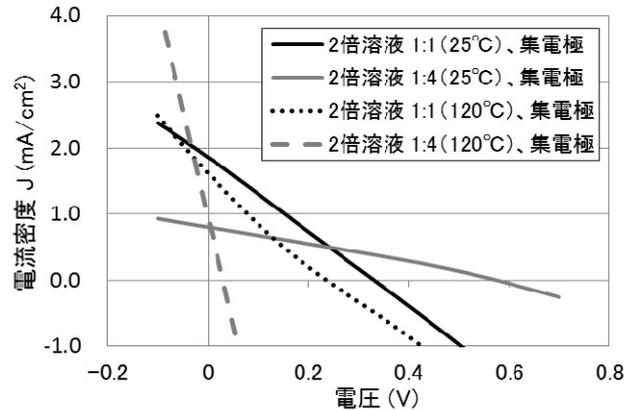


図 18 集電極付きガラス大面積 OSC の変換効率

Fig. 18 JV characteristic (η_n of glass large area OSC with collector electrode)

< 3. 1 3 > ガラス大面積 OSC の課題

OSC の効率向上のためには、活性層の均一化が重要である。活性層の状態を SEM 観察以外で確認するために、熱画像の撮影を試みた。その一例を、図 19.(a) に示す。逆方向に電圧 (DC10V) を印加し 1 分後の状態である。およそ 40mA の電流が流れ、所々発熱することを確認した。対応する部分の光学顕微鏡写真を図 19.(b)、(c) に示す。(b) は PCBM の凝集物と考えられ、(c) はピンホールである。PCBM は、溶媒揮発時に P3HT が先に硬化するため凝集しやすいと考えている。乾燥温度を制御することにより < 3. 7 > のナノドメイン構造のように、凝集物の発生を抑えることができる可能性がある。ピンホールは、溶媒の残存不純物を疑っており、純度の高い溶媒の使用を考えている。

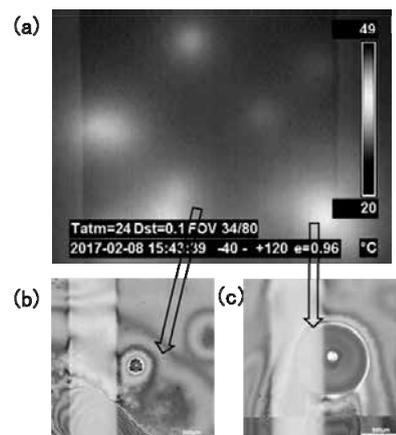


図 19 ガラス大面積 OSC の (a) 熱画像と (b)、(c) 光学顕微鏡写真

Fig. 19 (a) Thermal image and (b), (c) optical micrographs of glass large area OSC

< 3. 1 4 > ウェアラブル小型電源

ウェアラブル機器として、スマートウォッチを想定した。機能としてライフログ（運動量、消費カロリー、活動量等の記録）を持つものは健康志向を背景に需要が見込めるためである。搭載バッテリーの容量は100mAh程度である。現状のOSCは、2mA/cm²、0.5V程度である。材料メーカー発表の特性（8.9mA/cm²、0.56V）からすると電流値に改良の余地はある。一方、大面積化で対応するには、100cm²なら現状でも200mA、0.5Vとなり可能性が出てくる。ウェアラブル小型電源の場合、フレキシブル性も含むイメージなので、PET基板以外の透明ポリイミドやカーボンファイバーの検討も必要となる。図20.(a)に、カーボンファイバー（C-Fiber）に活性層を付け、透明電極としてPEDOT-PSSを用いたOSCの試作例を示す。図20.(b)に示す反物状にしたものに、OSCが作製できれば、ウェアラブル小型電源の可能性が高まる。

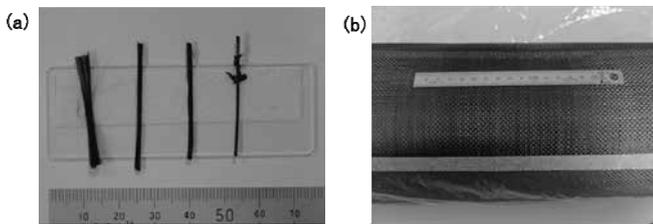


図 20 (a)C-Fiber OSC の試作と(b) C-Fiber シート

Fig. 20 (a) Prototype of C-Fiber OSC and (b) C-Fiber's sheet

4. 結言

小型ウェアラブル電源の開発を目的に、有機薄膜太陽電池（OSC）の開発を行った。活性層には、P3HTとPCBMの材料を用いた。評価用OSCにおいて、要素技術、および変換効率の向上に関する知見を得た。中でも相分離型の均質な活性層の形成が変換効率向上の要であることが判った。次いで、大面積化、フレキシブル化では、活性層の欠陥発生とその抑制に関する知見を得た。ガラス基板ではあるが、大面積OSCにおいても、評価OSCと同等の変換効率を得た。フレキシブル基板についても検討した。OSCは、まだ研究段階であるが、均質な活性層をクリアすれば変換効率が向上し、ウェアラブル小型電源の可能性が高まると考えている。

- (1) National Renewable Energy Laboratory(NREL), <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>
- (2) 小島優子、塗布型有機太陽電池のナノ構造解析、Spring-8 利用推進協議会 (2012)
- (3) Sigma-Aldrich Co. LLC.、材料科学の基礎第4号有機薄膜太陽電池の基礎 (2011)
- (4) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/results/past_presentation/2010/13Yamanari.pdf

「厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究-II」グループの研究活動風景



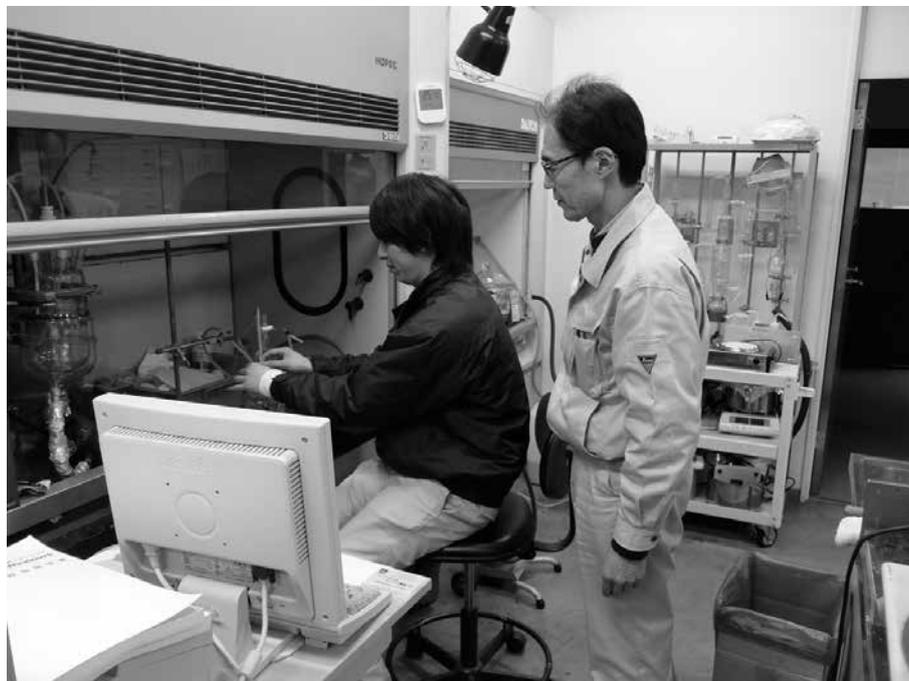
「振動の簡便な測定法・低減法の開発」グループの研究活動風景



「金属積層造形の基礎と造形物の評価に関する研究」グループの研究活動風景



「容器用実用アルミ材の耐食性および腐食反応の解析に関する研究」グループの研究活動風景



「エンドミル加工での工具寿命向上に関する研究」グループの研究活動風景



「ウェアラブル電源の開発」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

- 30年間の研究テーマ数：190テーマ（昭和62年度～平成28年度）
- 参加研究員延べ人数：361名（指導機関の研究員を除く）

☆昭和62年度（第1回）研究テーマと研究参加者（3テーマ、12名）

1. 複合材料の開発—金属粉末・樹脂複合材料による射出成形用簡易金型材料の開発
竹本要一（株タカギセイコー）、田上輝次（東洋化工株）、長柄 勝（長柄鉄工株）
◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）
2. 金属酸化物単結晶の作製とその応用開発～中高温用サーミスタの開発
岡崎誠一（北陸電気工業株）、加藤昌憲（日本鋼管株）、滝川義弘（燐化学工業株）、
堀田孝章（立山科学工業株）
◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）
3. フレキシブルハンドの開発～介護ロボット用アームの試作
石崎 浩・滝森幸浩（タカノギケン株）、茨木正則（北日本電子株）、西田信孝（株タカギセイコー）、
山田俊一（エルコー株、現コーセル株）
◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）

☆昭和63年度（第2回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、21名）

1. フレキシブルハンドに関する研究～ロボット用アームの試作（2）
石崎 浩・滝森幸浩（タカノギケン株）、茨木正則（北日本電子株）、
窪池義文（エルコー株、現コーセル株）、滝脇優治（株タナカエンジニアリング）
◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）
2. ZnO系セラミックス薄膜に関する研究～圧電薄膜音響素子の開発
小西孝浩（タカノギケン株）、小町秀彦（株タカギセイコー）、滝川義弘（燐化学工業株）、
平能 司（株和泉電気富山製作所）
◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）
3. Co-Metal系アモルファス軟磁性薄膜に関する研究
越浜哲夫（株不二越東富山製鋼所）
◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）
4. 樹脂・ファイバー複合材パネに関する研究
池田秀雄（株タカギセイコー）、上段一徳（東洋化工株）、長柄 勝（長柄鉄工株）、
柳原 潔（株黒田精型）
◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）
5. Pb系セラミックス薄膜に関する研究～光シャッター及び赤外線センサの開発をめざして
中溝佳幸（北陸電気工業株）、水谷里志（立山電化工業株）、山田義昭（東洋化工株）、
宮沢進一（吉田工業株、現YKK株黒部工場）、山本直樹（NKK（日本鋼管株）富山製造所）
◎指導機関：工業技術センター富山研究所（現機械電子研究所）
6. 障害者のための学習機能を有するマンマシンシステムの研究～機能的電気刺激のための上肢機能シミュレータの研究開発
古瀬正浩（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

☆平成元年度（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

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. ZnO系セラミックス薄膜に関する研究～圧電薄膜音響光学素子の開発

小西孝浩（タカノギケン㈱）、滝川義弘・煙田不二男（燐化学工業㈱）、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㈱）、吉田孝一（㈱タカギセイコー）、吉野正浩（吉田工業㈱、現YKK㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. Co-Nb-Zrアモルファス軟磁性薄膜に関する研究

越浜哲夫（㈱不二越）、西田達也（北陸電気工業㈱）、前坂昌春（エルコー㈱、現コーセル㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

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

古瀬正浩（㈱インテック）、堀井 孝（エルコー㈱、現コーセル㈱）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

6. 超音波メガネの研究

中村 亮（北日本電子㈱）、中山正明（㈱和泉電気富山製作所）

◎指導機関：富山大学工学部

☆平成2年度（第4回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、16名）

1. 磁性薄膜の応用に関する研究～倍周波型磁気センサの開発

越浜哲夫（㈱不二越）、高島 誠（エルコー㈱、現コーセル㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 仕上げ面粗さ自動測定装置の開発に関する研究

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

◎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（㈱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

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（燐化学工業㈱）、若林成喜（北陸電気工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 画像による寸法計測に関する研究

石黒哲也（㈱タナカエンジニアリング）、窪池義文（エルコー㈱、現コーセル㈱）、

西浦慎一・村井哲雄（㈱タカノギケン）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 超音波杖の研究

中村 亮（北日本電子㈱）、堀登紀男（㈱和泉電気富山製作所）

◎指導機関：富山大学工学部

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

土田隆一（立山科学工業株）

◎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

桜栄和則（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. 画像による円筒内面検査装置の開発

荒木満男（株タナカエンジニアリング）、西浦慎一（株タカノギケン）、

山本達生（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

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（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

5. 薄膜微細加工技術の研究

飴井俊裕（エルコー株、現コーセル株）、竹端精己（株不二越）

◎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（北日本電子株）、島野英明（株インテック）

◎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（立山科学工業株）

◎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. マイクロマシンの研究

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 薄膜微細加工技術の研究～トランスの試作

伊勢寿夫（コーセル株）、戸田雅規（株不二越）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 形状測定装置の開発に関する研究

野末昌朗（立山アルミニウム工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. 透明プラスチック製品の欠陥検査装置の開発

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 単音節認識による音声～点字変換

北喜靖規（北日本電子株）、島野英明（株インテックシステム研究所）

◎指導機関：富山大学工学部

6. 完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究

土田隆一（立山科学工業株）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成5年度（第7回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、12名）

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

伊東 守（コーセル株）、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. マイクロマシンの研究

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. 有機電子材料の研究

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の開発～Agイオン固体2次電池の試作

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（1）

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. リン酸系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

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. 電子回路用ウェットエッチング液の研究

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. 形状記憶合金膜を用いたマイクロポンプの開発

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(中越合金鋳工株)、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）、森田裕之（立山アルミニウム工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、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）、安田純子（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 高輝度蓄光性蛍光板の開発

佐野仁一（東洋化工株）、二見泰雄（三協アルミニウム工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、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）、田畑裕信（中越合金鋳工株）、野中義夫（有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）、渡辺暁信（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、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）、角谷哲哉（北陸電気工業株）、小島理敬（三協アルミニウム工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、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）、柳川 新（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

5. 局所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）、野上拓也（株タナカエンジニアリング）、山田浩美（東洋化工株）、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（株斉藤製作所）、高橋 聡（株タナカエンジニアリング）、藤木和幸（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

☆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）、渡辺暁信（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. コーティング工具の密着性向上に関する研究

野上拓也（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 生活環境用においセンサの開発（2）

星野昌則（コーセル株）、南 政克（北陸電気工業株）、山田浩美（東洋化工株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

4. 電気自動車の開発 (2)

坂本雅美 (株斉藤製作所)

◎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 (株斉藤製作所)、橋本 明 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

6. 電磁シールド材の基礎研究

高橋伸忠 (株タカギセイコー)、福田隆之 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成11年度 (第13回) 研究テーマと研究参加者 (8テーマ、14名)

1. エンジンの動弁機構における構造解析及び強度評価

島村和孝 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. コーティング工具の密着性向上に関する研究 (2)

高田智哉 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 深層水及び藻類を利用した太陽光発電の基礎研究

東堂浩次 (コーセル株)、坂本雅美 (株斉藤製作所)、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 (立山科学工業株)、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研究

小森一哉 (北陸電気工業株)、石川勝巳 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

6. 微細放電加工の研究 (2)

太田光則 (株斉藤製作所)

◎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

小中稔正 (YKK株)、山田浩美 (東洋化工株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

8. プラスチック上のハードコーティング技術の研究

高橋伸忠 (株タカギセイコー)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆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. エンジンの動弁機構における構造解析および強度評価 (2)

島村和孝 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. インテリジェントにおいセンサの研究 (2)

小森一哉 (北陸電気工業株)、谷口真也 (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

3. 高摩擦係数材料の研究

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の研究

酒井康弘 (株タカギセイコー)、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(着雪防止板)の開発

河井牧夫(田中精密工業株)、高橋伸忠(株タカギセイコー)、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の研究(2)

酒井康弘(株タカギセイコー)、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(株斉藤製作所)

◎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. 体質診断等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、J S T

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(株斉藤製作所)、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. 体質診断等DNAチップの開発(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（株齊藤製作所）、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. 小径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)斉藤製作所）

◎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)斉藤製作所）

◎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. 薄膜低温度特性抵抗器の開発（3）

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（4）

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：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

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関連遺伝子検出装置の開発

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・P J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・P J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P J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

8. 低域UHF帯用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・P J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：工業技術センター中央研究所、富山県立大学工学部

2. 肉盛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）

◎富山県工業技術センター中央研究所・P J推進担当、富山大学芸術文化学部

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・P J 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（燐化学工業株）、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）
◎富山県工業技術センター中央研究所・P J 推進担当、富山大学芸術文化学部
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技術の研究
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 (燐化学工業株)

◎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 (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・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

☆平成25年度 (第27回) 研究テーマと研究参加者 (6テーマ、7名)

1. 接着剤を用いない異種材料の超音波接合に関する研究

猪原 悠 (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、元工業技術センター

2. スイッチング電源における電磁界ノイズシミュレーション実用化の研究

野口 拓 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

3. 単層カーボンナノチューブに関する研究

大門貴史 (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、富山大学大学院理工学研究部

4. 極低容量水力発電システムの研究

住和大輔 (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. マグネシウム燃料電池の開発

安田 剛 (三協立山株)、山崎鉄平 (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、富山大学大学院理工学研究部

6. ナノインプリント技術による金属ナノドットパターン形成に関する研究

升方康智 (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・企画管理部、県商工労働部

☆平成26年度 (第28回) 研究テーマと研究参加者 (6テーマ、12名)

1. トイレからの漏えい音低減に関する研究

中村将士 (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. 切削加工シミュレーションに関する研究

水野輝章（田中精密工業株）、若林武司（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・中央研究所、元工業技術センター

3. 3Dプリンタを利用した簡易的なブロー成形樹脂型の製作に関する研究

黒田大輔（武内プレス工業株）、相馬 優（株斉藤製作所）、桑原浩一（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所・ものづくり研究開発センター

4. エネルギーハーベスター利用システムに関する研究

浦山陽平（コーセル株）、中田智康（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センターものづくり研究開発センター・中央研究所・機械電子研究所

5. 量子ドット増感太陽電池の研究

山本尚人（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、富山大学大学院理工学研究部

6. 接着剤を用いない異種材料の超音波接合に関する研究（2）

大浦秀剛（三協立山株）、山崎鉄平（株タカギセイコー）、林 達規（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、元工業技術センター

☆平成27年度（第29回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、9名）

1. トイレからの漏えい音低減に関する研究（2）

杉森雄平（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

2. 3Dスキャナーを用いた形状測定と変形解析への適用

山崎諭史（コーセル株）、内山 肇（三協立山株）、金山侑司（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. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究

山本貴之（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所・富山大学大学院理工学研究部

4. ハイブリッド樹脂粉末を用いた樹脂の特性改善

熊澤周士（株タカギセイコー）、黒河歩美（立山マシン株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

5. ドリル切削加工における精度向上に関する研究

石澤剛士（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. アルミ缶内面の腐食防食評価技術の高度化

筒井英明（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・中央研究所

☆平成28年度（第30回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、9名）

1. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究（2）

今井航平（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、富山大学大学院理工学研究部

2. 振動の簡便な測定法・低減法の開発

林 大清（コーセル株）

◎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. 金属積層造形の基礎と造形物の評価に関する研究

永田直也（三協立山(株)）、滝沢将史（コーセル(株)）

◎指導機関：工業技術センターものづくり研究開発センター・中央研究所

4. 容器用実用アルミ材の耐食性および腐食反応の解析に関する研究

深川裕之（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・中央研究所

5. エンドミル加工での工具寿命向上に関する研究

中嶋 謙（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. ウェアラブル電源の開発

関口貴彬（コーセル(株)）、天野久美子（北陸電気工業(株)）、坂井友樹（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

「若い研究者を育てる会」30周年記念講演会について

「若い研究者を育てる会」が共同研究形式による企業の若手技術者育成に取組みはじめて今年で30年を迎えた。これを記念して、「若い研究者を育てる会」30周年記念講演会が平成28年10月8日（土）、ホテルグランテラス富山で開催され、126名の方に参加いただいた。講師に(国研)宇宙航空研究開発機構でご活躍の富山県出身若手研究者の島明日香氏をお迎えし、「JAXAにおける宇宙開発と研究」と題してご講演いただいた。講演会終了後交流会が催され、84名の方に出席いただき、盛況のうちに記念行事を終えた。

【若い研究者を育てる会30周年記念講演会】

1. 開催日時 平成28年10月8日（土） 午後2時30分から午後4時15分まで
2. 開催場所 ホテルグランテラス富山
3. 参加人数 126名
4. 記念講演会

テーマ 「JAXAにおける宇宙開発と研究」

講師 島 明日香 氏 ((国研)宇宙航空研究開発機構・研究開発部門第二研究ユニット研究開発員)

概要 はじめに衛星の活動内容や衛星開発の話しを交えてJAXAの概要について説明があった。次に、衛星のエンジンや宇宙のゴミ（スペースデブリ）対策などJAXAの技術開発例の紹介があり、さらに宇宙環境や生命維持技術などの話しから有人宇宙活動に必要なことについて解説がなされた。最後に、島氏らが現在取り組んでいる将来の長期有人探査に向けた空気再生技術の研究内容について紹介があった。



武内会長挨拶



島氏講演



会場の様子



質疑応答の様子

○ 会 員 企 業

平成29年3月15日現在（50音順）

	企 業 名	代表者名	運営委員	電話番号
1	コーセル(株)	谷川 正人	安田 勲	076-432-8151
2	(株)斉藤製作所	齊藤 行男	相馬 優	076-468-2727
3	三協立山(株)	山下 清胤	宇野 清文	0766-20-2366
4	(株)タカギセイコー	八十島清吉	高橋 伸忠	0766-24-5522
5	タカノギケン(株)	高野 恵子	瀧森 幸浩	076-455-2525
6	武内プレス工業(株)	武内 繁和	駒井 義時	076-441-1856
7	立山科学工業(株)	水口昭一郎	森 喜代志	076-483-3088
8	立山マシン(株)	宮野 兼美	市川 吉晴	076-483-4123
9	田中精密工業(株)	長岡 隆	櫛田 孝隆	076-451-7651
10	東洋化工(株)	中田 守人	中田 守人	076-475-2125
11	長柄鉄工(株)	長柄 勝	長柄 大介	0766-22-3170
12	北陸電気工業(株)	津田 信治	小川 明夫	076-467-1125
13	燐化学工業(株)	大塚 肇	稻生 吉一	0766-86-2511

事務局：(公財) 富山県新世紀産業機構内 〒930-0866 富山市高田 529 TEL:076-444-5607 (二口友昭、片桐寛之)

○ 研 究 会 員

氏 名	所 属	役 職	学 位	電話番号
研究幹事				
石 黒 智 明	工業技術センター中央研究所	材料技術課長	博士(工学)	0766-21-2121
岩 坪 聡	工業技術センター中央研究所	評価技術課長	博士(工学)	0766-21-2121
佐 山 利 彦	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
杉 森 博	工業技術センター機械電子研究所	所 長	博士(工学)	076-433-5466
高 辻 則 夫	富山大学大学院理工学研究部	教 授	工学博士	076-445-6011
高 林 外 広	工業技術センター中央研究所	参事・加工技術課長	博士(工学)	0766-21-2121
土 肥 義 治	工業技術センター	次長・中央研究所長	博士(工学)	0766-21-2121
富 田 正 吾	工業技術センター企画管理部	部 長	工学博士	0766-21-2121
西 村 克 彦	富山大学大学院理工学研究部	教 授	理学博士	076-445-6011
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～平成24年度)	12代会長 田中 一郎 (平成25年度～平成26年度)
13代会長 武内 繁和 (平成27年度～)	

○名 誉 研 究 幹 事

谷野 克巳 (元工業技術センター所長)

○顧 問 (50音順)

- 海野 進 ((公財) 富山県新世紀産業機構・専務理事)
- 角崎 雅博 ((公財) 富山県新世紀産業機構・産学官連携推進センター長)
- 龍山 智榮 ((大) 富山大学・名誉教授)
- 東保喜八郎 ((公財) 富山県新世紀産業機構・参与)
- 鳥山 素弘 (工業技術センター所長・ものづくり研究開発センター所長)
- 堀田 裕弘 ((大) 富山大学・工学部長)
- 町野 利道 (クリアサウンドポート (株)・代表取締役社長)
- 松本三千人 ((大) 富山県立大学・工学部長)
- 米田 政明 ((大) 富山大学・名誉教授)

(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

(公財) 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 (公財)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 土肥 義治 杉森 博 (公財)富山県新世紀産業機構 片桐 寛之
発 行 年 月 日	平成29年3月15日
印 刷 所	富山スガキ株式会社

*無断転載を禁ずる。非売品。

