平成 29 年度 (第 31 回)

若い研究者を育てる会研究発表会

# 研究論文集

平成30年3月13日(火) 於:ホテルグランテラス富山

い研究者を育てる 若 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

#### 会長 齊藤行男

昭和 62(1987)年1月に「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」との趣旨により異業種交流団体とし て発足した「若い研究者を育てる会」の 31 年目の研究活動の成 果発表会が本日行われます。各企業から選抜され今後が期待され る若い研究者達が7つのテーマで1年間研究をしてきました。日 常業務とは違うテーマを選び1年間研究を継続するということは、 とても大変な事だった思います。研究の目的は何だったのか、ど の様な結果を想像していたのか、自分が思い描いた成果に繋がっ たのだろうか。今日、振り返るといろいろな事が脳裏を過ると思 います。



昨今、経営の現場でも「What if?」という言葉をよく使います。これは、「もし仮に~できるとすれば?」 という意味で、最初の目的設定の段階で、従来の思考の制約を超えた、斬新な「目的の問いだて」をする ということです。当然、「目的の問い」自体がイノベーティブなものでなければ、イノベーションを実現 するアイディアも意欲も生まれてきません。「若研」で挑戦する研究も、「もし仮に~が実現できるとし たら」という大きな夢、目的からスタートしているのではないでしょうか。イノベーションは、高度な技 術開発から生まれるのではなく、「注目」の対象を変化させることで実現します。私たちは往々にして、 「イノベーションを起こしたい」「イノベーティブな事業を作りたい」と、イノベーション自体を目的化 してしまいます。しかし、イノベーションはあくまで手段なのです。革新的、創造的な目的があるかどう かが大切なのです。経営学者ドラッカーは「The best way to predict the future is to create it. (未来を予 測する最良の方法は、自らそれを創り出すことだ)」と言っています。「未来を予測する」「自ら創り出 す」なんともワクワクし、ドキドキする夢のある言葉ではないでしょうか。参加してくださった皆様には、 今までの知識に「若研」で得た見識を足し、さらに胆識が備わった技術者として今後ご活躍されます様、 ご祈念いたしております。

結びに本年も技術者を出向させてくださいました企業様、熱心にご指導くださいました大学の諸先生方 や工業技術センターの方々、富山県新世紀産業機構、他会員企業の関係各位のご支援に深く感謝申し上げ ます。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、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31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)と会員企業の若手技術者が 7つの研究テーマについて、平成29年5月から富山県工業技術センターにおいて、7グ ループ(7企業参加)が実施してきた研究成果をまとめたものである。7テーマの内2テー マについては、富山大学大学院理工学研究部と富山県立大学工学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7テーマの研究概要を研究発表順に述べる。

富山県立大学工学部 博士(工学) 松田 敏弘

①「有機無機ペロブスカイト太陽電池の開発」の研究グルー プ(参加企業1社)。

代表的なクリーンエネルギーである太陽電池は、シリコン を用いたものが広く使われるようになってきている。本研究 では、より安価でフレキシブル基板にも対応可能な太陽電池 として注目されている「有機無機ペロブスカイト太陽電池」 について、基礎的な検討を行った。本太陽電池は、正負の2 電極の間にホール伝導層、ペロブスカイト層、電子受容・ ショート防止層を積層した構造である。まず、ガラス基板に ついて、熱処理工程の低温化のために反応性スパッタによる 電子受容層の成膜を行い、緻密または多孔質の膜となる条件

を示した。ペロブスカイト層については、高速結晶堆積法(FDC法)が結晶性の改善に寄 与することが分かった。プラスチック(PEN)基板を用いた試作でも光電流を確認してお り、今後、フレキシブルな太陽電池としての性能改善を目指したい。

#### 富山県工業技術センター中央研究所 博士(工学) 石黒 智明

②「複合化樹脂粉を用いたレーザ塗装」の研究グループ(参加企業1社)では、機能性レーザ塗装を行うために、バインダー特性、レーザ光の吸収、機能性、を有する複合化樹脂粉を作製しレーザ塗装を試みた。その一つとして、PA12粉末を母粒子、銅粉末を子粒子とした複合粉を調整した。この粉末では、PA12がバインダーとして、銅粒子は用いた半導体レーザ光(445nm)をよく吸収し、また、導電性も高いことから、導電性レーザ塗装用粉末としての特性を具備している。ベースプレートとしてPA12の板を使用しレーザ塗装を試みたところ、塗装が可能であり、また、導電性も得られることを確認した。また、ベースプレートの

樹脂成分がバインダーとして機能することを期待し、銅粉末のみの塗装を試みたところ、 塗装性、導電性ともに良好な結果が得られた。同様に蛍光粉末の塗装も試みたところ、レー ザ条件を選べば、塗装可能なことがわかった。



#### 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

③「X線CTの形状計測および変形評価への応用」の研究 グループ(参加企業2社)では、X線 CTの形状測定およ び変形評価への応用分野として、最も困難な課題の一つで ある電子機器の接合部におけるき裂の観察、および信頼性 評価(寿命評価)を目標とした。すなわち、実際に故障が 発生した直流安定化電源を対象として、その破壊の原因と 推定されるはんだ接合部の疲労き裂の状態を、マイクロ フォーカスX線 CTにより観察し、その CT 画像から信頼 性を評価することを試みた。その結果、はんだ接合部の CT 画像からき裂長さを計測し、疲労き裂を定量化することが 可能となった。さらに、き裂長さに基づいた評価により機



器の動作不良を判定し、その寿命評価などの信頼性評価を行うことができる可能性がある こと示した。今後、より多くの電子機器・デバイスへの適用を進めて行きたい。

#### 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

④「工具寿命の機上検出手法に関する研究」の研究グループ (参加企業1社)では、切削加工中に(リアルタイムで計測 可能な)工作機械の振動から工具寿命を推定する手法につい て検討した。切削加工時、工作機械の主軸から振動をモニタ リングし、その振動データから(加工に関連の少ない)特定 周波数成分をフィルタで除去し、MT(マハラノビス・タグチ) 法によって信号処理すると工具のチッピングの検出が可能と なった。その際、検出判定で曖昧な結果を示す場合は、信号 データを多くとることでロバスト性が向上した。本研究をさ らに発展させ、信頼性があがれば、工具交換時期の予測が可 能となり、生産現場のスマート化が期待される。



#### 富山県工業技術センター中央研究所 博士(工学) 石黒 智明

⑤「超音波接合における接合材の振動特性に関する研究」

の研究グループ(参加企業1社)では、超音波接合のほと んどが薄い軟質材を加振材としていることから、逆に、厚 物や硬い物の接合に利用できないか検討した。そして、加 振材がAl製リベット(全長31mm)やアルミナビーズ(直 径約4mm)で、固定材がAl板(A6063S-T5:2t×25W× 70L)の組み合せについて調べた。いずれも、常用のホー ンでは加振不能であり、それぞれに応じたホーンを試作し た。接合は、双方とも超音波出力が最も高い(加振材/固 定材の界面振動が最も良好と考えられる)、Al板長手方向 端部より10mmの位置に行った。その結果、リベットの場



合では、全面接合は生じなかったが、接合材の引張応力の最大は、リベット材の引張応力 相当であることがわかった。アルミナビーズでも、インサート材を挟むことで強度は弱い が接合できることがわかった。厚い材料、硬い材料の超音波接合の可能性を示すことがで きたことは、意義が大きい。

#### 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・Ⅱ」の研究グループ(参加企業2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。 有機薄膜太陽電池(OSC)の構成材料の検討、OSCの試作とその特性評価を行った。ポーラスな構造を持つITO(10Ω/sq.)を用いて作製した大面積OSC(10 cm<sup>2</sup>)の変換効率が0.55%で最も良かったこと、緩衝層材料として、従来のPEDOT-PSSに代わりPAnを使用したところ、3.2 mA/cm<sup>2</sup>の電流密度を得ることができた。さらに、OSC活性層の膜厚制御とアニーリング処理によっても変換効率の向上が見られ、フレキシブルなPET基板でも、ガラス基板に対して60%の変換効率をもつOSCが作製できる知見が得られた。



富山大学大学院理工学研究部 理学博士 西村 克彦

⑦「厚膜型圧電振動発電素子の開発に関する研究-Ⅲ」の研 究グループ(参加企業1社)。

モノのインターネット(IoT)は社会の中に急速に浸透し ており、それを支える通信およびセンサーネットワークシ ステムの基盤技術の構築は持続可能な社会形成に不可欠と いえる。本研究は、このシステムを構築する上で不可欠な 通信・センサー機器の駆動電力を、身近にある環境エネル ギーを利用したエネルギーハーベスティングで行い、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。本研究では、昨年度までの研究の結果を集大成し、 実際に通信・センサー素子を駆動する大型圧電膜振動素子



の作製に成功した。更に、製造プロセス研究にも取り組み、より簡潔で信頼性のある製造 工程の開発に成功している。発電性能を向上させるための問題点も明確であり、関連する 研究分野に大きく貢献する成果である。

今年度は、7つの研究テーマに9人の企業内若手技術者が参加した。これまでこの会で は31年間に197テーマの研究を実施しており、卒業生は370名となった。ここに参 加した企業にとっては、取り組んだテーマが必ずしも企業ですぐに役立つものではないか もしれないが、研究を遂行する過程で参加者が得たもの(開発の進め方、研究内容の表現 の仕方等)によって、本会会員企業の今後の技術開発力向上や発展に資するものと期待し 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 たことに深く感謝の意を表します。

### 研究グループの構成

I. 有機無機ペロブスカイト太陽電池の開発の研究グループ

研究担当者	宮崎	幸輝	(コーセル㈱)
	〇本保	栄治	(工業技術センター機械電子研)
	横山	義之	(工業技術センター機械電子研)
	高田	耕児	(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)
	☆松田	敏弘	(富山県立大学工学部)

Ⅱ. 複合化樹脂粉を用いたレーザ塗装の研究グループ

#### 研究担当者 島林 孝吉 (㈱斉藤製作所)

- ○高松 周一(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)
  - 清水 孝晃(工業技術センター中央研究所)
  - 氷見 清和(工業技術センターものづくり)
- ☆石黒 智明(工業技術センター中央研究所)

Ⅲ. X線CTの形状計測および変形評価への応用の研究グループ

研究担当者	朝野	剣太	(コーセル㈱)
	瀧田	諭	(㈱タカギセイコー)
	○釣谷	浩之	(工業技術センター機械電子研)
	金森	直希	(工業技術センター機械電子研)
	山本	貴文	(工業技術センター中央研究所)
	吉田	勉	(工業技術センター機械電子研)
	☆佐山	利彦	(工業技術センター機械電子研)

IV. 工具寿命の機上検出手法に関する研究の研究グループ

研究担当者	石澤	剛士	(田中精密工業㈱)
	○金森	直希	(工業技術センター機械電子研)
	羽柴	利直	(工業技術センター機械電子研)
	☆杉森	博	(工業技術センター)

V. 超音波接合における接合材の振動特性に関する研究の研究グループ

- 研究担当者 盤若 秀明(三協立山㈱)
  - ○羽柴 利直(工業技術センター機械電子研)
    - 金森 直希(工業技術センター機械電子研)
  - ☆石黒 智明(工業技術センター中央研究所)

Ⅵ. ウェアラブル電源の開発-Ⅱの研究グループ

研究担当者
 林 大志 (コーセル(株))
 渡辺 涼太 (立山マシン(株))
 ○寺澤 孝志 (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)

Ⅲ. 厚膜型圧電振動発電素子の開発に関する研究-Ⅲの研究グループ

研究担当者 櫻井 雅崇(北陸電気工業㈱)

- ○坂井 雄一(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)

註:○印は各研究グループのチーフ ☆印は研究幹事

# I. 有機無機ペロブスカイト太陽電池の開発 1 1. 緒 言 1 2. 実験方法 1 3. 実験結果および考察 3 4. 結 言 6

次

目

# I. 緒 言 7 1. 緒 言 7 2. 銅粉末を用いた複合化樹脂粉のレーザ塗装 7 3. 銅粉末のレーザ塗装 10 4. 蛍光剤を用いたレーザ塗装 12 5. 結 言

# **Ⅲ. X線CTの形状計測および変形評価への応用** 14 1.緒言 14 2. X線CT装置について 14 3. X線CTによるき裂検出の可能性 15 4. はんだ接合部における信頼性評価への適用 17 5. 結言 20

IV.	工具	【寿命の機上検出手法に関する研究	2 1
	1.	緒 言	2 1
	2.	工具破損の検出方法	2 1
	3.	実験装置	2 1
	4.	加工実験	2 2
	5.	ワーク側の振動によるチッピング検出	2 2
	6.	切削の基本周波数によるチッピング検出	23
	7.	統計的手法によるチッピング検出	23
	8.	ワーク側の切削振動へのMT法の適用	24
	9.	主軸 X 方向の切削振動によるチッピング検出	24
1	0.	チッピング検出法のロバスト性	25
1	1.	判定手法の検証	26
1	2.	結 言	27

V.	超音	<b>f波</b> 接合	合におけ	ナる接合材の振	動特性に関する研究	 28
	1.	緒	言			 28
	2.	超音测	支接合い	こついて		 28
	3.	アル	ミリベッ	ット接合		 29
	4.	セラ	ミックス	スビーズ接合		 32
	5.	結	言			 35

# Ⅵ. ウェアラブル電源の開発-Ⅱ 1. 緒 言 2. 実験方法 3. 実験結果および考察 4. 結 言

VI.	厚胆	莫型圧電	<b>፤振動</b> 夠	発電素子の開発に関する研究-皿	43
	1.	緒	言		43
	2.	実験力	7法		43
	3.	実験結	宇果		45
	4.	結	言		49

○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」31年間の研究活動の足跡	付— 8
○会員企業および研究幹事名簿	付—24
〇入会申込書	付—25

# I. 有機無機ペロブスカイト太陽電池の開発

Development of Organic-inorganic Perovskite Solar Cells

宮崎 幸輝	本保 栄治	横山 義之
MIYAZAKI Koki	HONBO Eiji	YOKOYAMA Yoshiyuki
高田 耕児	寺澤 孝志	松田 敏弘
TAKATA Koji	TERASAWA Takashi	MATSUDA Toshihiro

#### Abstract

The photovoltaic generation is attracting an attention as clean energy for a sustainable society. Recently, solar cells with organic-inorganic hybrid perovskite materials were developed, and its conversion efficiency is improving rapidly. Furthermore, low-temperature fabrication process of perovskite solar cells allows flexible structures, which are advantageous to wearable devices.

In this study, organic-Inorganic perovskite solar cells were fabricated by low temperature process. The cell on glass or plastic substrates had a 5 layer structure of ITO bottom electrode, TiO<sub>2</sub> electron collector layer, perovskite layer, hole transporting layer and Au upper electrode. Fast deposition–crystallization method for the perovskite layer and sputtering for the porous TiO<sub>2</sub> layer improved conversion efficiency.

#### 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 ギー源として注目されている。中でも、有機無機ハイブリッド構 造のペロブスカイト結晶を光吸収に用いる太陽電池の研究開発 の進展は著しく、2009年の発明以降エネルギー変換効率が急速に 向上しており、2015年にはシリコン太陽電池に迫る20.2%の効率 となっている<sup>(1)</sup>。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。

ー方で、フレキシブル、軽量、プリンタブル等の特性を持つ太 陽電池は、ウェアラブル機器の小型電源等の多様な用途での応用 が期待されている。

本研究では、太陽電池の中でも研究が盛んで急速に性能を向上 させている有機無機ペロブスカイト太陽電池について、フレキシ ブル化に有用である、低温での各層の成膜方法とその成膜方法に よる太陽電池特性への影響を検証した。また、実際に樹脂基板上 に有機無機ペロブスカイト太陽電池を作製し、フレキシブルな太 陽電池の試作を行った。

#### 2. 実験方法

<2.1> 有機無機ペロブスカイト太陽電池の構造と使用材料 有機無機ペロブスカイト太陽電池の構造を図1に示す。構成要 素は、①基板、②負電極、③電子受容・ショート防止層、④ペロ ブスカイト層、⑤ホール伝導層 Hole Transporting Layer(以降 HTL)、 ⑥正電極である。基板と負電極は、ITO 膜付きガラス基板(シート 抵抗値:10Ω/sq)、またはITO 膜付き PEN 基板(シート抵抗値:10 Q/sq)を用いた。電子受容層はTi(3N、㈱高純度化学研究所)をタ ーゲットとして、反応性スパッタ成膜したTiO2膜を用いた。ペロ ブスカイト層はDMF(N,N-ジメチルホルムアミド)とDMSO(ジメ チルスルホキシド)の混合溶媒(3:1)に、PbL(よう化鉛(Ⅱ)99.999%) とCH3NH3I(よう化メチルアンモニウム)を溶かした溶液を用いて (全て和光純薬工業㈱製)、スピンコートで成膜した。ホール伝 導層には、p,m-Spiro-OMeTAD(和光純薬工業㈱)とトリスコバルト (Ⅲ)トリスイミド(和光純薬工業㈱)、4-tert-Butylpyridine(東京化成 工業㈱)、ビススルホンイミドリチウム(Sigma-Aldrich Co.LLC.)の 混合溶液を用いて、スピンコートで成膜した。ペロブスカイト層、 およびホール伝導層の溶液調整と成膜は、グローブボックス内 (露点温度 -30℃未満)で行った。正電極にはWボートを用い た抵抗加熱真空蒸着によるAu 膜を用いた。



Fig.1 Structure of organic-inorganic hybrid perovskite sola cell.

<2. 2> 有機無機ペロブスカイト太陽電池の動作原理

有機無機ペロブスカイト太陽電池はペロブスカイト結晶を光 吸収層として使用する。光吸収により生じた光電子はn型半導体 である TiO<sub>2</sub>層、ITO を経て外部へ取り出され、正孔はp型半導体 である HTL から Au 電極に達し、電子を受け取る。また、ペロブ スカイト層は光吸収のみでなく、光電子、正孔の輸送層としても 働く。



図2 有機無機ペロブスカイト太陽電池の動作原理



#### <2. 3> TiO2層成膜方法

TiO<sub>2</sub>層はペロブスカイト層で発生した光電子を受容する多孔 質な層とショート防止のための緻密な層を成膜する。従来の研究 では緻密な層はスパッタ等にて成膜されているが、多孔質な層に ついてはペースト塗布・焼成による成膜が行われている<sup>(2)</sup>。本研 究ではスパッタ時のガス圧、スパッタ時間を変えることで、緻密 および多孔質の両方のTiO<sub>2</sub>層をスパッタにて成膜する。スパッタ 成膜にはスパッタ装置 (SPF-332H、日電アネルパ㈱)を使用した。 多孔質層の成膜を基板非加熱のスパッタとすることで、低温成膜 が可能となり、樹脂基板上に太陽電池を構成することが容易にな る。これにより、フレキシブルな太陽電池の作製が期待できる。

ガス圧、スパッタ時間等の条件を変えることによって緻密層と 多孔質層が作り分けられているかの確認には、走査型プローブ顕 微鏡(以降 SPM)を用いた形状解析を行った。また、TiO2の結晶構 造についても、ルチル型、アナターゼ型によって効率に変化があ ることが過去の研究<sup>(3)</sup>から判っているため、結晶型をX線回折(以 降 XRD)で解析した。

#### <2. 4> ペロブスカイト層成膜方法

ペロブスカイト層の成膜には、DMF(ジメチルホルムアミド)と DMSO(ジメチルスルホキシド)の混合溶媒(3:1)に、Pbl2(ヨウ化鉛) と CH3NH3I(ヨウ化メチルアンモニウム)を溶かした溶液を用いた。 溶液の作成方法としては、70℃に加熱した DMF:8mlに、Pbl2: 4.89g(1mol/l)と CH3NH3I:1.69g(1mol/l)を溶かし、この溶液に DMSO:2.6mlを加え70℃で加熱する。また、溶液はフィルター(孔 径:0.22um)で残渣を濾過して使用した。スピンコートは500rpm: 5sec の後に 3000rpm: 10sec で行った。また、スピンコートの際に 高速結晶堆積法(以降 FDC 法)を用いた<sup>(4)</sup>。FDC 法は溶液のスピ ンコート中に貧溶媒を滴下することで急速な結晶化を促し、より 緻密で平滑な結晶を得る手法である。今回は FDC 法に用いる貧 溶媒として、トルエンを使用している。スピンコート後、40℃で 5min 乾燥し、その後 100℃で 30min アニールする。作製したペロ ブスカイト層について、ペロブスカイト結晶構造ができているか を XRD で確認した。

#### <2. 5> HTL 成膜方法

HTLの成膜には、多くのペロブスカイト太陽電池の論文にて使用されている Spiro-OMeTAD を使用した。塗布する溶液は、 p,m-Spiro-OMeTAD: 61.3mg(0.05mol/l)、トリスコバルトトリスイ ミド:11.3mg(0.0075mol/l)、4-tert-ブチルピリジン:24.4ul(0.165mol/l)、 ビススルホンイミドリチウム塩: 7.6mg(0.027mol/l)を 1ml のクロ ロベンゼンに溶解させた後、30min マグネチックスターラーを用 いて攪拌し、フィルターで残渣を濾過して使用した。スピンコー トでは膜厚の太陽電池特性への影響を検証するために、薄膜用の 条件(回転数 2000rpm)と厚膜用の条件(回転数 1000rpm)、また、HTL スピンコートなしの 3 条件で実験を行った。スピンコート後に 70℃で 30min アニールする。

#### <2. 6> 有機無機ペロブスカイト太陽電池の試作

有機無機ペロブスカイト太陽電池は、薄膜を積層した構造となっているため、負極と正極を取り出すためのパターニングが必要となる。負極となる ITO については設計したパターンとなるよう に 50mm 角の ITO 膜付き基板にテフロンテープでマスキング(図 3(a))し、40℃の王水に 10min 浸すことでエッチングを行う。その後、TiO<sub>2</sub>のスパッタまでは 50mm 角の基板で行い、ペロブスカイト層から Au 電極の成膜までは、50mm 角の基板を 4 つの 25mm 角の基板に分けて行う。正極となる Au 電極については設計したパターンとなるように 25mm 角の基板に対してフィルム基板でマスキング(図 3(b))し、真空蒸着を行う。





ガラス基板にて各層の成膜条件と特性を確認し、その後フレキ シブルな太陽電池への応用として樹脂基板を用いて試作を行っ た。太陽電池セルの評価において、今回は実効面積 10mm 角のセ ルとなるように設計した。

#### <2. 7> 有機無機ペロブスカイト太陽電池の評価

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/cm<sup>2</sup>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㈱) 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㈱)で校正して使用した。



図 5.(a)に、太陽電池の J-V 特性を示す。Jsc (mA/cm<sup>2</sup>) は短絡 電流密度で単位面積当たりの電流を、Voc (V) は開放電圧を表す。 最大出力点を与える J、V を Jmax、Vmax すると、曲線因子 FF は [(Jmax·Vmax)/(Jsc·Voc)]で与えられる。100mW/cm<sup>2</sup>で標準化 した変換効率  $\eta_n$  (%) は、Jsc·Voc·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(Rsh)、直列抵抗(Rs)の組み合わせ で表記される。



図5 太阪竜池特性と寺恤凹崎 Fig.5 J-V characteristics of solar cel.

#### 3. 実験結果および考察

<3. 1> スパッタ条件による TiO<sub>2</sub>の構造への影響 ガス圧(Ar:O<sub>2</sub>比、全圧)を調整することで、緻密と多孔質 TiO<sub>2</sub> の作り分を行った。表1にスパッタ成膜条件を、図6に SPM で 表面構造解析した結果を示す。

#### 表1 TiO2 膜のスパッタ成膜条件

Table 1 Sputtering conditions of TiO<sub>2</sub> films.

	ガス圧が低い条件	ガス圧が高い条件
Arガス圧/Pa	0.13	0.45
O₂ガス圧/Pa	0.034	0.68
投入電力/W	150	150



(a)ガス圧が低い条件での構造



(b)ガス圧が高い条件での構造
 図6 スパッタ条件による TiO2 膜の表面構造
 Fig.6 Surface structure of TiO2 at the sputtering condition.

ガス圧が低い条件と高い条件では、高い条件の方が、サンプル 表面構造に大きな凹凸が見られ、多孔質な構造ができやすいこと が判る。よって、緻密な TiO2層の成膜時はガス圧を低くし、多孔 質な TiO2層の成膜時はガス圧を高くすることで、緻密と多孔質な TiO2層をスパッタで作り分けることができる。また、膜厚の構造 への影響についても確認を行った。膜厚は成膜時間を変えること で調整し、ガス圧が低い条件と高い条件それぞれで膜厚が200nm、 400nm のもので実験を行った。ガス圧が低い条件では膜厚による 構造への影響は確認されなかった。

ガス圧が高い条件では膜厚が厚いほど、粒径が大きくなり、表 面の凹凸が大きくなっていることから、多孔質な構造になりやす いことが判る。膜厚を厚くすると、光電子の移動距離が長くなり 損失が増加するため、適切な膜厚を検証する必要がある。

次に、ガス圧が高い条件と、低い条件における、XRD 解析による結晶構造の比較を示す。ガス圧が高い条件ではルチル、アナターゼの混合になるのに対し、ガス圧が低い条件ではルチルの単相となった。



図9 スパッタ条件による  $TiO_2 膜の結晶構造$ Fig.9 Crystal structure of  $TiO_2$  films at the sputtering condition.

#### <3. 2> ペロブスカイト層解析結果

フレキシブルな太陽電池を実現するにあたり、加熱工程が問題 となる可能性があるためペロブスカイト層の成膜における、スピ ンコート後の加熱の必要性を検証した。XRD 解析により、ペロブ スカイト結晶構造ができているか確認した結果を図 10 に示す。



加熱有りのサンプルはペロブスカイトのピークが大きいのに 対し、加熱無しのサンプルはペロブスカイトのピークが小さく、 Pbl2のピークが大きい。加熱無しのサンプルは過熱による反応が 進まず、ペロブスカイト結晶化に不利であったと考えられる。よ って、ペロブスカイト結晶を作るために加熱は必要であることが 判った。

また、FDC 法の効果の確認を行った。FDC 法はスピンコート 回転数が500rpm から2000rpm に移行した5sec 後にトルエン100ul を滴下することで行った。その XRD 解析の結果を図 11 に示す。 FDC 法有りの場合、無しの場合と比べて TiO<sub>2</sub>のピークが小さく なっていることが確認された。FDC 法を用いることで、より緻密 で平滑なペロブスカイト結晶ができるため、下層のTiO<sub>2</sub>層のピー クが小さくなっていると考えられる。



図11 ペロブスカイト層の FDC 法の有無による結晶構造 Fig.11 Crystal structure of Perovskite layer by FDC. また、光学顕微鏡、SPM を使用して表面構造についても確認を 行った。図12の示すように、FDC 法無しでは、FDC 法有りに比 べて不均一で、粗い表面構造となっていることが判った。



190um 2um (a)FDC 法無し (b)FDC 法有り 図12 ペロブスカイト層の FDC 法の有無による表面構造 Fig.12 Surface structure of Perovskite layer by FDC.

以上より、FDC 法を用いることで、緻密で平滑なペロブスカイト 層の成膜が可能であることが判った。

FDC 法無しの場合は結晶性が悪いため、多孔質な TiO<sub>2</sub>層にペロブスカイトを入り込ませることで接合を良くする必要があったが、FDC 法を用いた場合は、緻密な TiO<sub>2</sub>層のみで良いと考えられる。このことから、緻密な TiO<sub>2</sub>層のみスパッタし実験を行うこととした。

#### <3.3> 有機無機ペロブスカイト太陽電池の試作

ITO 膜付きガラス基板に TiO2層をスパッタし、ペロブスカイト層 および HTL をスピンコーティング、Au 電極を真空蒸着したサン プルの各層の成膜条件を表2に、太陽電池特性を図13に示す。

光照射ありでは太陽電池として発電しており、変換効率は 0.110%であることを確認した。また、光照射なしではn型半導体 である TiO<sub>2</sub>層とp型半導体である HTL による、ダイオードの特

#### 表2 試作太陽電池の各層の成膜条件

Table 2 Film-forming conditions of each layer.

項目構成層	膜厚	成膜条件	
Au電極	100nm	・8.0Å/sで真空蒸着	
HTL	数nm	・溶液 : 100ul ・スピンコート回転数 : 1000rpm、20sec ・加熱 · 70℃ : 30min	
ペロブスカイト層	1 <i>µ</i> m	<ul> <li>DMF溶液:100ul</li> <li>・スピンコート回転数:3000rpm、10sec</li> <li>・FDC用トルエン:スピンコート5sec後に</li> <li>200ul</li> <li>・乾燥:40°C、5min</li> <li>・加熱:100°C、30min</li> </ul>	
多孔質TiO <sub>2</sub>	-	_	
緻密TiO2	10nm	反応性スパッタ成膜 Ar圧 1.8×10 <sup>-1</sup> Pa O2圧 3.0×10 <sup>-2</sup> Pa	
ITO	250nm	いつけきガラス其振	
基板	1mm		



図13 試作太陽電池の特性 Fig.13 J-V characteristics of solar cell

性を示しており、各層の成膜ができていることを確認した。開放 電圧は高い値を示しているが、電流密度が小さいことから、抵抗 値が大きいと考えられる。

<3. 4> HTL 膜厚の太陽電池特性への影響

HTL 成膜時のスピンコート回転数を変えることで、HTL 膜厚 の太陽電池特性への影響を確認した。HTL の膜厚が厚い方が、効 率が良くなる結果が得られた。また、HTL 無しの場合は、短絡状 態の特性が得られた。これはp型半導体がなくなったことで、正 極側にも電子が移動できるようになったためと考えられる。





#### <3.5> 変換効率の改善

試作した太陽電池の変換効率向上のため、SEM による断面観察 を行った。図 15 に断面 SEM 像を示す。1000nm の厚みの層は、 ペロブスカイト層と考えられる(他の層は成膜レートから計算す ると、より薄くなる)。ペロブスカイト層の狙い厚みとしては、250 ~500nm であるため、過剰に厚い膜となっている。また、FDC 法 を用いることで、緻密な層を狙っているが、粗い層となっている。 以上より、ペロブスカイト層が過剰に厚いことで光電子、正孔の 移動距離が長くなり、損失が増加していると考えられる。また、 ペロブスカイト層が粗い層となっていることで、HTL が多孔質な 層になっている可能性がある。



図15 試作した太陽電池の SEM による断面観察 Fig.15 SEM image of cross-section observation.

<3. 6> ペロブスカイト層の薄膜化

太陽電池の変換効率向上のため、ペロブスカイト層成膜時のス ピンコート回転数を高くすることで、ペロブスカイト層を薄くし た。スピンコート回転数:3000rpm と 5000rpm での太陽電池特性 を図 16、表3に示す。

スピンコート回転数を高くし、ペロブスカイト層を薄くするこ とで、開放電圧はほぼ同等、短絡電流密度が倍程度になり、変換 効率が向上し、0.25%となった。ペロブスカイト層の抵抗が小さ くなったことが要因と考えられる。



図16 ペロブスカイト層厚みによる太陽電池特性への影響 Fig.16 J-V characteristics by Thickness of perovskite layer.

#### 表3 ペロブスカイト層厚みの太陽電池特性への影響

Table 3 J-V characteristics by Thickness of perovskite layer.

スピンコート条件 特性	500rpm:5sec 3000rpm:10sec	500rpm:5sec 5000rpm:10sec
短絡電流密度[mA/cm <sup>2</sup> ]	0.26	0.62
開放電圧[V]	0.89	0.93
曲線因子	0.47	0.43
変換効率[%]	0.11	0.25

#### <3.7> フレキシブルな太陽電池の開発

フレキシブルな太陽電池の開発を目指し、基板をガラス基板から樹脂(PEN)基板に変更し、太陽電池を作製した。ガラス基板と 樹脂基板の太陽電池特性の比較を表4に示す。

表4 樹脂基板における太陽電池特性

基板 特性	ガラス基板	樹脂基板(PEN)
短絡電流密度[mA/cm <sup>2</sup> ]	0.62	0.95
開放電圧[V]	0.93	0.79
曲線因子	0.43	0.38
変換効率[%]	0.25	0.29

樹脂基板においても変換効率0.29%出ることが確認できた。ガ ラス基板に比べて開放電圧は小さくなっているが、短絡電流密度 が大きい結果となった。また、スパッタ成膜時、およびペロブス カイト層、HTLの成膜時の加熱工程において、基板の変形等は見 られなかった。今回は緻密なTiO2層で実験を行ったが、多孔質な TiO2層についてもスパッタでの成膜が可能であることが判って いる。本研究のペロブスカイト層作製工程により、熱に弱い樹脂 基板上にフレキシブルな太陽電池を作製できることを示すこと ができた。

<3. 8> 多孔質な TiO<sub>2</sub>の効果検証

ペロブスカイト層のスピンコート時にFDC 法を用いることで、 緻密で平滑な層を成膜できることから、多孔質な TiO<sub>2</sub>層は無しで 実験をおこなってきたが、 緻密な TiO<sub>2</sub>層を多孔質な TiO<sub>2</sub>層で置 き換えることで、TiO<sub>2</sub>層とペロブスカイト層の接合表面積を増や し、変換効率の向上を目指すことを試みた。ショート防止層(電 子受容層)として緻密な TiO<sub>2</sub>層のみのセルと、多孔質な TiO<sub>2</sub>層 のみのセルの太陽電池特性比較を表5 に示す。

表5 ショート防止 TiO2層のスパッタ条件による変換効率

Table 5	J-V characte	eristics on	11O <sub>2</sub> layer	by sputte	ering condition.
---------	--------------	-------------	------------------------	-----------	------------------

TiO2層 特性	緻密	多孔質
短絡電流密度[mA/cm <sup>2</sup> ]	0.62	2.64
開放電圧[V]	0.93	0.90
曲線因子	0.43	0.18
変換効率[%]	0.25	0.43

TiO<sub>2</sub>層を緻密なものから多孔質なものにすることで、変換効率が0.43%と向上した。開放電圧はほとんど変わらず電流密度が大きくなっている。TiO<sub>2</sub>層が多孔質となることで、ペロブスカイト層との接合表面積が大きくなり、光吸収により発生した光電子がよりTiO<sub>2</sub>層に渡りやすくなったことで損失が低減したと考えら

れる。この結果から、TiO<sub>2</sub>層については緻密よりも多孔質な層と する方が良いと考えられる。本研究では、緻密、多孔質な TiO<sub>2</sub> 層がスパッタ条件によって変化することと、その特性が判ったた め、より最適で効率の高い太陽電池の開発が期待できる。

#### <3. 9> 今後の課題

スパッタの条件を変えることで、緻密、多孔質な TiO<sub>2</sub>層の作り 分けが可能であることが判ったが、最適な条件を検証することが できていない。今後さらに高効率な太陽電池とするために TiO<sub>2</sub> 層の最適化が必要である。

本研究ではガラス基板にて太陽電池特性の改善を行い、樹脂基 板に応用することで、ガラス基板でのサンプルと同程度の変換効 率を得ることに成功したが、樹脂基板で作製したサンプルはガラ ス基板のサンプルに比べて開放電圧が 0.1V 程度低くなる結果と なった。樹脂基板ではITO パターン部が先行して変色し始めてい たことから、熱伝導率の高いITO パターンとそれ以外の部分で、 不均一な温度分布の熱処理となっていることが考えられる。その ため、ペロブスカイト結晶が多孔質になり開放電圧が低下した可 能性がある。このことから、樹脂基板等の薄い基板上にペロブス カイト太陽電池を形成するためには、より均一に熱を加える等の 加熱方法の検討が必要である。また、さらに高い変換効率を得る ためには、用いる試薬の純度を極めて高くする必要がある<sup>(5)</sup>。

#### 4. 結言

携帯用デバイスの発展に有用である、軽量でフレキシブルな太 陽電池の開発を目的に、有機無機ペロブスカイト太陽電池の開発 を行い、変換効率の向上に関する知見を得た。ペロブスカイト層 の成膜時に FDC 法を用いることで緻密で平滑なペロブスカイト 層が得られるため、多孔質な TiO2層は不要と考えていたが、ショ ート防止層として緻密よりも多孔質な TiO2層を用いることによ り変換効率が高くなることが判った。従来は多孔質な TiO2層はペ ーストを焼成することで成膜していたため、樹脂基板上への太陽 電池形成は熱が懸念材料となっていた。しかし、本研究でスパッ タ条件を変えることによって緻密層と多孔質層を作り分けるこ とが可能となったため、多孔質な TiO2層を成膜する際に熱を加え る必要がなくなった。この技術を活用することで、フレキシブル な太陽電池の可能性が高くなると考えられる。

文 献

(1)	National Renewable Energy Laboratory(NREL),
	https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png
(2)	A.Kago, S.Iwasaki, M.Ikegami, T.Miyasaka, Chemm. Lett., 46, 530 (2017)
(3)	平成26年度若い研究者を育てる会研究発表会研究論文集P31

- (4) 若宮淳志、廣瀬由美、嶋崎愛: PCT/JP2016/087529.
- (5) 若宮淳志、応用物理 第87巻,第1号,P34(2018)

### Ⅱ. 複合化樹脂粉を用いたレーザ塗装

#### Laser Coating using Composite Resin Powder

島林 孝吉 SHIMABAYASHI Takayoshi 清水 孝晃 SHIMIZU Takaaki 高松 周一 TAKAMATSU Shuichi 氷見 清和 HIMI Kiyokazu 住岡 淳司 SUMIOKA Junji 石黒 智明 ISHIKURO Tomoaki

#### Abstract

As a thing required for functional laser coating, laser optical absorption material, a binder and a functional material are mentioned. However, about a functional material, it is possible that the characteristic cannot be demonstrated according to the state of coating. Therefore, the laser coating which improved functionality and was excellent in efficiency and economical efficiency by hybridization in a functional material was tried.

At first, laser coating was performed using the composite resin powder made from resin powder and copper powder for the purpose of giving conductivity on a resin plate. As a result, it succeeded in coating on a resin plate, and conductivity was also acquired. Moreover, it was shown as compared with the result which carried out laser coating only using copper powder that comparable conductivity is acquired. Furthermore, it was confirmed that laser coating with lower power is possible by using composite resin powder.

As functions other than conductivity, laser coating of a fluorescent substance was performed for the purpose of giving fluorescence. As a result, it was shown that laser coating is possible if only the fluorescent substance is used. However, it was not possible to coat with composite resin powder made from LDPE and a fluorescent substance, and it was necessary to consider the mixture.

#### 1. 緒言

レーザを利用した機能性塗装に用いる材料として、レーザ光吸 収材料・バインダー・機能性材料が挙げられる。しかし、機能性材 料についてはレーザによって酸化・分解することやコーティング の状態により特性を発揮できないことがある。そのため、素材の まま用いるよりも事前に複合化することで、効率性・経済性に優 れたレーザ塗装を行える可能性がある。

複合化の方法の1つとして、ハイブリダイゼーション処理がある。<sup>1,2)</sup> ハイブリダイゼーションとは、母粒子(樹脂粉末等)の 表面を子粒子(機能性材料)で覆うことで表面改質・複合化する 技術である。母粒子の表面のみに機能性材料を付着させることで 機能性を高めることができ、その使用量を削減し、製造コストを 抑制できる。

そこで本研究では、ハイブリダイゼーション処理を施した材料 を用いて従来の手法よりも優位なレーザ塗装を試みることを目的 とした。

#### 2. 銅粉末を用いた複合化樹脂粉のレーザ塗装

対象物に導電性を付与することを目的として、導電性に優れた 銅粉末を用いてレーザ塗装を行った。 <2. 1> 実験材料

複合化樹脂粉の母粒子には平均粒径 50µm の市販ナイロン 12 (以下、PA12)を用いた。また、子粒子には株式会社高純度化学 研究所製の平均粒径 1µm および 5µm の銅粉末を使用した。

<2.2> 銅粉末を用いた複合化樹脂粉の作製

母粒子と子粒子の配合比(重量比)については下式を用いて算 出した。

母粒子:子粒子 = 100 : 
$$\frac{400(D+d)^2 d}{D^3} \times \frac{Y_d}{Y_d}$$

ここで、D: 母粒子径、d: 子粒子径、 $Y_D$ : 母粒子の密度、 $Y_d$ : 子粒子の密度であり、複合化樹脂粉のモデルを図1に示す。

母粒子が PA12 であることから、 $D=50[\mu m]$ 、 $Y_D=1.01[g/cm^3]$ 、子粒子が銅であることから、 $Y_d=8.92[g/cm^3]$ である。

鋼1μmの場合は d=1[μm]となり、上式から配合比を算出する と PA12: Cu=100: 73.5 となる。これを理論値とし、比較のため、 この配合比の複合化樹脂粉のほか、銅の割合を半分として PA12: Cu=100: 38 としたもの、銅の割合を2倍として PA12: Cu=100: 148 とした3 種類の複合化樹脂粉を作製した。

また、銅5µmの場合は *d*=5[µm]で、PA12: Cu=100: 427.5 となり、この配合比の複合化樹脂粉のみを作製した。



ここで、銅1 $\mu$ mの配合比を理論値の半分とした複合化樹脂粉、 銅1 $\mu$ mの配合比を理論値とした複合化樹脂粉、銅1 $\mu$ mの配合比 を理論値の2倍とした複合化樹脂粉、銅5 $\mu$ mの配合比を理論値 とした複合化樹脂粉をそれぞれ、Cu1 $\mu$ m(1/2倍)、Cu1 $\mu$ m(1倍)、 Cu1 $\mu$ m(2倍)、Cu5 $\mu$ m(1倍)と以後、表記する。

複合化樹脂粉の作製には振動ミルを使用した。振動ミル容器内の粉砕媒体のボール径は直径 5mm および 10mm のものを混合して使用した。複合化処理の時間は40 分間である。

図2に作製した複合化樹脂粉を示す。Cu1µm(1/2倍)、Cu1µm (1倍)、Cu1µm(2倍)については銅の配合量が増加するにつれ て母粒子表面に付着した銅が多くなることが確認できた。しかし、 銅の割合が大きい複合化樹脂粉ほど母粒子に付着しなかった銅粉 末も多く見られた。



図2 複合化樹脂粉 Fig.2 Composite resin

<2. 3> 成形条件

レーザ塗装には卓上型半導体レーザ加工機を用いた。表1に装置の仕様を示す。なお、銅粒子の酸化対策としてレーザ照射部を 窒素雰囲気にした。

表1 卓上型半導体レーザ加工機の仕様 Table 1 The specification of the laser processing equipment

メーカー	株式会社 smartDIYs
レーザ波長	445nm(レーザダイオード)
最大出力	3.5W
加工エリア	300×230mm

複合化樹脂粉の造形層厚さは  $100 \mu m$ 、レーザスキャン速度は 250mm/min、レーザ出力は最大 3.5W 中の  $10 \sim 50\%$  (0.35W  $\sim 1.75W$ ) とした。また、レーザの移動経路は図 3 のとおりで、レーザ間隔 は 57  $\mu m$  である。ベースプレートには PA12 を用いた。



ここで、図4に波長と金属の反射率の関係<sup>3)</sup>を示す。半導体レ ーザ加工機のレーザ波長である445nmの時、銅の反射率は他の金 属よりも低く、50%以下となっていることがわかる。したがって、 本研究で使用する半導体レーザ加工機で銅粒子を含む複合化樹脂 粉をレーザ塗装できると予想される。つまり、銅はレーザ光を吸 収し、銅自身が発熱することで母粒子の樹脂を溶融させ、ベース プレート上に定着すると考えられる。したがって、銅がベースプ レート上で連続層を形成し、導電性のあるコーティング膜が得ら れる可能性が高い。

<2. 4> 実験結果

図5にレーザ塗装後のコーティング膜を示す。

レーザの出力により表面の状態に相違があることが確認できた。 出力 10~15%では、全てのコーティング膜が剥離した。出力 20% では、剥離したものと表面に定着したものがあり、定着したコー ティング膜の表面は縞状となっていた。出力 25%以上では、全て のコーティング膜が定着したが、その表面は縞状のものや荒れた 状態のものが見られた。出力 35%以上になると、ほぼ全てのコー ティング膜が良好な状態となっており、出力 40%程度まで高める と複合化樹脂粉を溶融させるだけの十分な熱量が得られていると 推測される。



図4 波長と金属の反射率の関係 Fig.4 Relationship between wavelength and reflectivity of metal



図5 複合化樹脂粉のコーティング膜 Fig.5 Coating film of composite resin

<2.5> コーティング膜の特性評価

コーティング膜について、表面抵抗値の測定、コーティング膜 の表面および断面状態の観察を行った。

#### (1) 表面抵抗値の測定

導電性評価のため、各コーティング膜の表面抵抗値(実測抵抗値)を測定した。測定は株式会社三菱化学アナリテック製のポー タブル表面抵抗率計で行った。測定範囲は10<sup>-3</sup>~10<sup>7</sup>Ωである。探針は4端子プローブを使用した。測定は4端子の方向がレーザ移動経路に対して平行方向および垂直方向について行った(図3)。

図6に表面抵抗値の測定結果を示す。Cu1 $\mu$ m (1/2 倍)のコー ティング膜については抵抗値を測定できなかった。Cu1 $\mu$ m (1 倍) とCu1 $\mu$ m (2 倍)のものは出力40%から測定可能であった。 また、平行方向・垂直方向共に出力が高いほど抵抗値が低下す ることがわかった。これは銅がより多くの熱量を得て定着し、連 続層を形成しているためだと考えられる。また、平行方向と垂直 方向を比較しても抵抗値・傾向共に大きく変わらず、コーティン グ膜の表面抵抗値には異方性が無かった。





(2) コーティング膜の表面および断面の観察

図7にCu1µm(1倍)の複合化樹脂粉を出力25%でレーザ塗装した表面の電子顕微鏡観察結果を示す。

SEM 像と組成像を比較すると、樹脂が溶融している部分は他の 部分より比較的表面に剥き出しになっている銅が少ない。これは 溶融した母粒子中に銅が取り込まれたためだと考えられる。また、 出力が低いため樹脂が十分溶融せず、隣接するレーザ移動経路上 の樹脂同士が一部でのみ結合したため、表面が縞状になったと考 えられる。

次に、図8にCu1µm(1倍)の複合化樹脂粉を出力50%でレ ーザ塗装した表面の電子顕微鏡観察結果を示す。出力25%時と異 なり、表面の銅が全体的に少ないことが確認できる。これはレー ザの出力が高く、母粒子の樹脂が十分溶融し、銅を取り込んだ状 態でベースプレートに定着したためと考えられる。また、高倍率 の観察から、銅粒子自体は溶融していないことが確認できた。母 粒子の樹脂が溶融し、バインダーの役割を果たすことで銅が表面 に定着したと考えられる。

図9にCu1µm(1倍)のコーティング膜の断面の電子顕微鏡観 察結果を示す。表面抵抗値が測定可能であったのは出力40~50%、 測定不能であったのは出力25~35%となっている。

レーザ出力が不十分であると母粒子の形状が完全に崩れないこ とがこの図から確認でき、銅粒子が離散していると思われる。レ ーザ出力が十分であると、母粒子が溶融し、銅が沈下して連続層 を形成し、導電性が得られたのではないかと考えられる。



(a) SEM 像 (b) 組成像 (a) SEM image (b) Compositional image 図7 複合化樹脂粉のコーティング膜の表面状態(出力 25%) Fig.7 Surface state of coating film of composite resin (power 25%)





(a) SEM 像 (a) SEM image (b) 組成像 (b) Compositional image



(c) 組成像 (c) Compositional image 図8 複合化樹脂粉のコーティング膜の表面状態(出力 50%) Fig.8 Surface state of coating film of composite resin (power 50%)



図9 複合化樹脂粉のコーティング膜の断面 Fig.9 Cross section of coating film of composite resin

#### 3. 銅粉末のレーザ塗装

複合化樹脂粉を用いたレーザ塗装の結果から、銅は溶融してい ないことがわかった。樹脂製母粒子が溶融してバインダーとなり、 ベースプレート上に定着しているのであれば、樹脂製母粒子を使 用せずともベースプレートの樹脂のみでレーザ塗装が可能なので はないかと考えた。また、母粒子の樹脂が無い方が高い導電性が 得られる可能性もあるため、複合化樹脂粉ではなく、銅粉末のみ でレーザ塗装を行った。

#### <3.1> 実験材料

ベースプレートには同じく PA12 を材料としたものを使用し、 銅粉末は平均粒径 1  $\mu$  m および 5  $\mu$  m のものを使用した。

#### <3. 2> 成形条件

銅粉末の粒径を考慮し、造形層厚さは $10 \mu m$ とした。レーザス キャン速度は250mm/min、レーザ出力は最大3.5W中の $40 \sim 80\%$ ( $1.4W \sim 2.8W$ )とした。また、レーザの移動経路は複合化樹脂粉 の場合と同様に図3のとおりである。

#### <3.3> 実験結果

図10にレーザ塗装後のコーティング膜を示す。銅粉末のみでも ベースプレートにレーザ塗装することが可能であった。これはベ ースプレートの樹脂が溶融してバインダーとなったためだと考え られる。また、出力が高くなるにつれ表面に定着している銅が多 くなっていることも確認できた。

#### <3. 4> コーティング膜の特性評価

(1) コーティング膜表面の観察

図11に銅1µmのコーティング膜表面の電子顕微鏡観察結果を 示す。出力が高いほど表面のクラックが明確に確認できる。また、 クラック周辺やコーティング膜の端付近では図12に示すような 銅粒子の溶融が確認できた。この原因は、熱の逃げ場が無いため に熱がこもったため、部分的に溶融したと考えられる。したがっ て、熱がこもる場所では銅の熱膨張が大きく、比較的熱を得てい ない銅との間で応力が発生し、クラックが生じたと推察される。

#### (2) 表面抵抗値の測定

図13に表面抵抗値の測定結果を示す。測定はレーザ移動経路に 対して平行・垂直方向に測定した。

銅粉末のみのコーティング膜においても平行・垂直方向の抵抗 値・傾向に大きな差異は無く、異方性は見られなかった。

銅1μmの場合、出力50%未満では抵抗値を測定できなかった。 測定結果のばらつきは大きいが、出力が60%前後で最も抵抗値が 低下すると推察される。一方、出力を上げても特に低い抵抗値は 得られなかった。



(a) Cu 1 µm



(b) Cu 5 µm 図10 銅粉末のコーティング膜 Fig.10 Coating film of copper powder



図11 銅粉末(1 µm)のコーティング膜の表面状態 Fig.11 Surface state of coating film of copper powder (1µm)



Fig.12 Melted copper particles

 $銅5 \mu m$ の場合、出力70%未満では抵抗値を測定できなかった。  $銅1 \mu m$ の場合と比較し、同程度の抵抗値を得るためには、70%以 上のレーザ出力が必要という結果となった。これは銅1 $\mu m$ と比 較し、銅 $5 \mu m$ は粒径が大きいため、熱の吸収および伝達の効率 が悪く、母粒子を効率的に溶融させることができなかったためだ と考えられる。したがって、レーザ出力を高めた場合に一定量の 銅粉末が定着することで抵抗値が低下したと推察される。





#### (3) 表面抵抗値の比較

複合化樹脂粉および銅粉末のみのコーティング膜の表面抵抗値 の測定結果を纏めたグラフを図14に示す。レーザ移動経路に対し て平行・垂直方向の測定結果を総合して平均値を算出した結果を 示した。出力 50%を境に複合化樹脂粉と銅粉末の結果に分かれて いる。

結果を比較すると、銅粉末の場合の抵抗値は複合化樹脂粉の場合と同等である。さらに、 $Cu1\mum(1/2 \oplus)$ の複合化樹脂粉では高抵抗値であったが、 $Cu1\mum(1 \oplus)$ および $Cu1\mum(2 \oplus)$ の場合では銅粉末の場合と同程度の表面抵抗値であることが確認できる。よって、銅の配合比は理論値の1~2 倍が最適であると言える。また、複合化樹脂粉を用いた場合では銅粉末を用いた場合より低出力でのレーザ塗装が可能であると確認できた。



図14 出力と複合化樹脂粉および銅粉末のコーティング膜の表面抵抗値の関係 Fig.14 Relationship between power and surface resistivity of coating film of composite resin and copper powder

#### 4. 蛍光剤を用いたレーザ塗装

導電性以外の機能として、蛍光剤を用いて蛍光性を付与することを試みた。蛍光剤は株式会社デー・シー取扱の「ルミコール」を使用した。色はGreen・Red・Blueの3色を用いた。平均粒径は4~5 $\mu$ mである。

蛍光剤はレーザ照射により分解すると、蛍光性を失う可能性が あるため、レーザ塗装の前に蛍光剤の分解温度を熱分析により確 認した。

図 15 に各蛍光剤の熱分析結果を示す。各色 200~250℃付近で 重量減少が急激になり、300℃を超えたところで変化が小さくなっ た。よって、温度が 200℃を超え始めると分解が急速に進むため、 分解を防ぐには 200℃を超えないようレーザ塗装を行う必要があ る。

<4.1>蛍光剤のレーザ塗装

蛍光剤のみを用いてレーザ塗装を行った。

#### (1) 成形条件

ベースプレートは PA12、造形層厚さは 10 µm、レーザスキャン 速度は 250mm/min、レーザ出力は最大 3.5W 中の 10~26% (0.35W ~0.91W) とした。また、レーザ移動経路は図 3 のとおりである。

#### (2) 実験結果

レーザ塗装を行った結果を図 16 に示す。Blue はベースプレート 上に定着させることはできず、粒子およびベースプレートの溶融 が確認できなかった。したがって、蛍光剤がレーザを吸収しなか ったと推察される。

Green・Red は同様の結果となり、コーティング膜は、出力 10~ 14%では定着が不良であったが、出力 16%以上では良好に定着で きた。しかし、出力 22%以上では黒く変色していることが確認で きた。 ブラックライトによるコーティング膜の蛍光結果を図 17 に示 す。蛍光性を確認したところ、出力が高まるにつれ、蛍光性の低 下が確認できた。これは蛍光剤が分解したためだと考えられ、蛍 光剤のレーザ塗装は可能な限り低出力で行う必要がある。よって、 コーティング膜の定着具合と蛍光性から最適な出力は 16~20%で あることがわかった。



Fig.15 TG-DTA curves of fluorescent agent



(a) Green (b) Red 図16 蛍光剤のコーティング膜 Fig.16 Coating film of fluorescent agent



(a) 照射前
 (b) 照射後
 (a) Before irradiation
 (b) After irradiation
 図17 ブラックライトによる蛍光結果(Red)
 Fig.17 Fluorescence result by black light (Red)

#### <4.2> 蛍光剤を用いた複合化樹脂粉のレーザ塗装

皮膜はレーザ出力が高いほど蛍光性が低下するため、母粒子と して LDPE を用いて複合化樹脂粉を作製し、蛍光剤を分解させる ことなくレーザ塗装を行うことを試みた。LDPE の融点は約 120℃ であるため、蛍光剤が分解する前に溶融して蛍光剤を定着させら れる可能性がある。

#### (1) 蛍光剤を用いた複合化樹脂粉の作製

複合化樹脂粉は「LDPE:Green=1:1」、「LDPE:Green:Red= 1:0.5:0.5」、「LDPE:Green:Red:Blue=1.5:0.5:0.5:0.5」の 配合比(重量比)で3種類作製した。複合化処理は振動ミルを用 いて40分間行った。LDPEの平均粒径は20µmである。

#### (2) 成形条件

成形条件は造形層厚さを約20µmとし、レーザ条件・ベースプレートは蛍光剤のみの場合と同様とした。

#### (3) 実験結果

レーザ塗装ではベースプレート上へ複合化樹脂粉を定着させる ことができなかった。レーザ塗装後には複合化樹脂粉より粒径が 大きな粒子が確認できた。これは溶融した LDPE がベースプレー トに定着せず、纏まりとなったためだと考えられる。したがって、 LDPE は溶融したが、PA12 との相溶性が悪く、ベースプレート上 に定着しなかったと推察される。そのため、相溶性も考慮し、ベ ースプレートと母粒子材料を再検討する必要がある。

#### 5. 結言

卓上型半導体レーザ加工機を用いて各種機能性材料のレーザ塗装を行ったところ、以下の結果が得られた。

- (1) 銅粉末を用いたレーザ塗装
- ・レーザ塗装を行って得られたコーティング膜の表面抵抗値は 銅粉末と PA12 を混合した複合化樹脂粉を用いた場合と銅粉 末だけを用いた場合では大きな差が無かった。
- ・Cu 1 µm(1倍)および Cu 1 µm(2倍)のコーティング膜では銅粉末のみの場合と同程度の表面抵抗値が得られたことから、銅の配合比は理論値の1~2倍が最適である。
- ・複合化樹脂粉のレーザ塗装では銅粉末のみの場合より低出力 で行うことが可能である。
- (2) 蛍光剤を用いたレーザ塗装
  - ・ 蛍光剤は樹脂ベースプレート上にレーザ塗装を行うことができ、低出力であるほど強い蛍光性を示すことが確認できた。
  - ・蛍光剤とLDPEの複合化樹脂粉を用いてレーザ塗装を行った が、コーティングすることができず、ベースプレートと混合剤 の再検討が必要である。

文 献

- (1) 小野憲次編著: 実用表面改質技術総覧, 材料技術研究協会(1993)
- (2) 熊澤周士 黒河歩美 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.23
- (3) 一般社団法人 日本溶接協会 溶接情報センター, http://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg\_no=0110010050

# Ⅲ. X線CTの形状計測および変形評価への応用

Application of X-Ray Tomography for

Shape Measurement and Deformation Evaluation

朝野	剣太	瀧田	諭	釣谷	浩之	金森	直希
ASANC	) Kenta	TAKIDA A	Satoshi	TSURITAN	II Hiroyuki	KANAMO	ORI Naoki
	山本	貴文	吉田	1 勉	佐山	利彦	
	YAMAMOT	O Takafumi	YOSHIL	DA Tsutomu	SAYAMA	Toshihiko	

#### Abstract

In recent years, the industrial X-ray CT apparatus has been widely applied due to its powerful features; namely the non-destructive observation of the internal structure of the object, the measurement of the internal dimensions of the object, the *in situ* observation of internal changes of the object, and the continuous observation of changes in the same object. In this research, the X-ray CT was applied for evaluating the reliability of solder joints in a switching regulator packaged by rubber. At first, normal and failure specimen loaded by accelerated thermal cycle tests were compared. Some cracks were detected in all observed solder joints in both specimens. As a result, qualitative judgment of normal or failure by only observing the cracks with X-ray CT is considered impossible. Next, for quantitative evaluation of the crack propagation process, the fatigue crack length was measured from the CT images. Consequently, the possibility was showed to judge malfunction of electronic equipment and to evaluate the reliability such as fatigue lifetime estimation.

#### 1. 緒言

近年、X線CT装置は、医療にとどまらず、産業分野において も急速に利用が広がっており、例えば、樹脂製の部品形状をX線 CT により計測し、実測データに基づく CAE 解析を試みたもの(1) や、ガスタービンの形状計測に応用したもの<sup>(2)</sup>など、さまざまな 応用研究が盛んに行われている。また、自動車部品の形状計測に 特化した X線 CT システムの開発<sup>(3)</sup>なども行われている。このよ うな利用の広がりは、(1) 非破壊で内部の状態や構造を観察でき る、(2) 内部寸法の計測が可能である、(3) 内部の状態の変化をそ の場観察することができる、(4)同一の対象における、内部の時 系列的な変化を継続観察することが可能である、などの特徴によ るものである。本研究では、製品や部品の接合部が、破損に至る までの過程を実際の CT 観察により明らかにして、これを製品の 信頼性設計に応用することの可能性について検討した。例えば、 エレクトロニクス産業界においては、はんだ接合部などの電子基 板接合部の信頼性評価が大きな課題となっている。しかし、電子 基板のはんだ接合部は、X線が透過し難いこと、電子基板そのも のが様々な材料の複合体であることから、産業用のX線CTによ る定量的な評価は、一般に困難と考えられている。そこで本研究 では、一例として、実際に故障が発生した直流安定化電源を対象 とし、その接合部を非破壊で観察して、損傷状況の評価、き裂進 展過程の定量化、およびその信頼性評価を試みた。

#### 2. X線CT装置について

<2. 1> マイクロフォーカス X 線 CT 装置の概要

研究に使用した X線 CT 装置は、物体の内部構造をマイクロメ ートルオーダーの空間分解能で可視化することが可能である。 図1は、本研究に用いたマイクロフォーカス X線 CT 装置((株) 島津製作所製 inspeXio SMX-225CT FPD HR)を示す。最大管電圧 225 kV、焦点サイズ4 µm であり、コーンビームスキャン方式を 採用している。得られた CT 画像においては、内部の材質の X線 吸収量の違いがコントラストの明暗として断層画像に表される



図1 マイクロフォーカス X 線 CT 装置 Fig.1 Microfocus X-ray CT.

ため、内部の複雑な形状や部品の勘合状態、介在物やき裂などの 欠陥を非破壊で観察することが可能である。また、同一物体を非 破壊で観察できることから、対象物の時系列的な変化を継続的に 観察、計測することが可能である。

#### <2. 2> CT 画像の取得方法

図2は、X線CT装置の構成を模式的に示す。X線CT装置に おいては、タングステンのターゲットに電子ビームを照射するこ とで、X線を発生させる。このX線を点光源として用いることか ら、原理的には、X線が発生する点の焦点サイズが判別できる物 体の最小サイズ、すなわち空間分解能となる。このX線光源から 円錐状に広がる X線 (コーンビーム)を試験体に照射する。さら に、物体を透過した X 線をフラットパネル検出器を用いて撮影す ることで透過画像が得られる。図2に示すように、試験体は、回 転ステージに固定されており、試験体を 360°回転させながら、 透過画像を撮影する。こうして撮影された 360°分の透過画像を コンピュータを用いた計算により再構成することで、試験体の断 層画像を得ることができる。コーンビームの場合、ファンビーム の場合と異なり、ビームの中心断面以外では、各透過画像は、別々 の平面を反映しており、ビームの中心断面から上下に離れるほど コーン角が大きくなるため再構成の誤差が大きくなる。そこで、 FDK(Feldkamp, Davis, Kress)法<sup>(4)</sup>により近似的に再構成を行うのが 一般的である。回転ステージは、x、y、z の各軸方向に可動する ようになっており、試験体をX線源に近づけることで、拡大撮影、 遠ざけることで広角撮影を行うことができる。空間分解能は、前 述した X 線の焦点サイズのほかに、試験体を X 線源に近付ける ことができる距離によって制限される。



図2 X線CTによる撮影 Fig.2 A schematic view of X-ray CT set up.

#### <2. 3> 形状計測および変形評価の実際

X線 CT を形状計測や変形評価に応用する試みは広く行われている。例えば、X線 CT による、実測データに基づく CAE 解析を

試みた例<sup>(1)</sup>では、樹脂製の循環パイプアダプタを対象とし、X 線 CTを用いた形状計測データからFEMによる強度解析を行ってい る。CT 画像は、いわば連続した輝度分布を持つ三次元画像であ り、形状計測を行う際には、この画像を基に物体表面や材質の境 界を定義する必要がある。しかし実際には、理想的な画質の CT 画像が得られることはほとんどなく、単純に等値面を定義するだ けでは、実際の形状を正確に反映できない場合がほとんどである。 この例でも、最終的には、手作業でノイズの除去を行っており、 X 線 CT による形状測定は、手間のかかるものとなることが多い のが現状である。このようなことから、X 線 CT による形状計測 を行う上では、単一の材料でかつ、X 線が十分透過するものが対 象として適している。

#### 3. X線CTによるき裂検出の可能性

<3. 1> X線CTによるき裂検出のニーズと現状

近年の電子基板の実装の高密度化により、はんだなど接合部の 信頼性が、電子基板の信頼性に大きな影響を与える要因となって いる。このため、はんだ接合部に発生する熱疲労き裂を非破壊で 観察し、信頼性評価を行いたいというニーズが高まっている。は んだそのものが、X線を透過し難いSn,Cu,Ag などの材料で構成 されていること、電子基板は、様々な材質の部品から構成される 複合体であり、X線の吸収が極端に異なる材料を良好な画質で撮 影することが困難であることなどから、放射光光源を用いたX線 CTの応用例が一部ある<sup>(5)</sup>のみで、産業用X線CTを用いてはんだ 接合部の熱疲労き裂の定量評価を試みた例は少ない。

#### <3. 2> き裂検出のための CT 技術

本研究で使用したマイクロフォーカス X線 CT 装置では、フラ ットパネル検出器の採用により、透過画像撮影の際に高いダイナ ミックレンジを実現しており、これにより複数の材料で構成され た対象を従来よりも高画質に撮影することが可能である。また、 このフラットパネルは、従来と比較して画素数が多いことから、 ある程度大きさのある対象を撮影する際も、従来より高い空間分 解能での撮影が可能である。

#### <3.3> き裂検出の評価用試験体

図3は、き裂検出の性能評価に用いたチップ抵抗試験体を示す。 試験体は、幅0.8 mm×長さ1.6 mmのチップ抵抗を、FR-4 基板上 に鉛フリーはんだによって接合したものを、幅1 mm×長さ10 mm に加工したものである。この試験体は、観察対象以外の余分な部 品が無く、アーティファクトの発生を抑えることができる。また、 サイズも小さいので、X線源に近づけて、大きな拡大率を得られ ることから、マイクロフォーカスX線CTの性能限界近くでの観 察が可能である。この試験体に図4に示すような高温さらし温度 125℃、低温さらし温度-40℃、それぞれのさらし時間 30 min の熱 サイクル試験を1500 サイクル実施した後に、CT による観察を行





った。図5は、チップ抵抗試験体のはんだ接合部を側面から撮影 した顕微鏡写真を示す。試験体のはんだ接合部において、き裂が 発生していることが、外部から確認できる。 マイクロフォーカ スX線CTの性能限界で試験体を観察するために、管電圧225 kV、 管電流 70  $\mu$ A の条件で、360° で 4800 枚の透過画像を撮影した。 透過画像を再構成して得られる CT 画像のボクセルサイズは、3  $\mu$ m であり、装置の性能限界である焦点サイズ 4  $\mu$ m の空間分解能 があると考えられる。

#### <3. 4> CT 画像によるき裂検出の評価

図6は、チップ抵抗試験体のCT画像の一例を示す。いずれの 画像も基板に垂直な断面である。図6(a)は、チップ抵抗の長手方 向と平行な断面、図6(b)は、チップ抵抗の長手方向と垂直な断面 であり、図6(b)①~⑥は、図6(a)に①~⑥の点線で示した切断位 置と対応している。これらの図より、チップ抵抗、はんだ接合部、 基板などの部材が、コントラストの違いとして明瞭に識別できる。 また、はんだ接合部においては、内部のボイドやき裂、それらが 連結している状況が確認できる。これらのCT画像から、どの程 度までの開口量のき裂を検出可能かについて評価する。図6(b) ②においては、はんだ接合部の外側(図の左側)に開口したき裂 が、内部に向かって進展しているのが確認できる。き裂の存在を 確認できる最小の開口量を図から計測したところ12 µm であった。 これより、試験に用いたマイクロフォーカス X線 CT においては、 装置の空間分解能の4 µm の3 倍以上の開口量を有するき裂を認 識できるといえる。



Fig.4 Thermal profile for thermal cyclic tests.



図5 はんだ接合部の拡大写真

Fig.5 A microscope view of a solder joint in the chip resistor specimen.



(a) チップ抵抗の長手方向と平行な断面

(b)チップ抵抗の長手方向と垂直な断面 図6 チップ抵抗試験体におけるはんだ接合部の CT 画像 Fig.6 CT images of a solder joint in the chip register specimen.

#### 4. はんだ接合部における信頼性評価への適用

#### <4.1> 試験体および熱サイクル試験

試験体には、実際に故障の発生が確認された直流安定化電源を 用いた。図7は、使用した試験体の外観写真を示す。試験体は、 図8に示す構造の基板をゴムによって封止し、縦26.6 mm×横 36.2 mm×高さ16.5 mmの寸法に成形したものである。試験体の 直流安定化電源は、入力に交流100Vもしくは、直流141Vを加 えた際に、直流12Vを出力する。この試験体に3章の図4で示 したものと同じ熱サイクル負荷を加えた場合、800サイクルを越 えた時点で、電気的特性が正常動作の範囲外となる試験体が、一 定数発生する。この試験体を分解しての目視検査を実施したとこ ろ、不具合品が発生する原因は、トランスのリードと基板との、 はんだ接合部の破壊によるものと推定された。図8に示す基板で は、トランスの片側に4か所、両側で計8か所でリードを介して トランスがはんだ接合されている。この試験体を観察するために、 管電圧 200 kV、管電流 70 μA、で、360°で 2400 枚の透過画像を 撮影した。透過画像を再構成して得られる CT 画像のボクセルサ イズは、12 μm である。



図7 試験体外観写真 Fig.7 An overview of the observed specimen.



図8 試験体内部に封止されている基板 Fig.8 Substrate sealed inside the specimen.



図9 電気特性試験 Fig.9 Measurement test of electric characteristics.

#### <4. 2> 電気特性試験

熱サイクル試験の経過にあわせて、試験体の正常動作を確認す るために、電気特性試験を実施した。図9は、電気特性試験の状 況を示す。電気特性試験においては、試験体の入力側に直流電源 を接続して、141 V を印加し、出力側には、15.01 Ωの一定抵抗負 荷を与えた。この状態で、入力側、出力側のそれぞれの電流、電 圧をデジタルマルチメータにより計測し、入力に対する出力の電 力比を算出した。電力比が、85%を下回った場合は、正常動作の 範囲外となったものと判定した。

#### <4. 3> 初期状態との比較による損傷評価

まず、熱サイクル負荷をかけていない初期状態の試験体、およ び熱サイクル試験を800 サイクル実施した後の試験体において、 はんだ接合部の CT 観察を行った。図10は、両者のはんだ接合 部における CT 画像の一例を示す。図10(a) および (b) は、初 期状態のはんだ接合部の CT 画像であり、基板に垂直でリードに 平行な断面、および基板に平行な断面をそれぞれ示す。図10 (c) および (d) は、別の試験体の 800 サイクル負荷後の CT 画像であ り、図10(a) および (b) と同様に、基板に垂直でリードに平行 な断面、基板に平行な断面を示す。ともにリードのかかと部分に おいて、大きなボイドが確認できる。また、リードのはんだ接合 部では、比較的小さなボイドが多数確認できる。以上より、これ らのボイドは、はんだ付け時から初期ボイドとして存在したもの であると推定された。さらに、き裂については、800 サイクル後 の図10(c)では、リードのかかと部分やリード下にき裂が確認で きるのに対し、初期状態の図10(a)および (b) では、き裂は全 く確認できない。すなわち、初期状態のはんだ接合部では、き裂 は発生しておらず、き裂は熱サイクルが進むに従って発生した熱 疲労き裂であると結論づけられる。

そこで次に、熱疲労き裂の発生と電気特性の変化との関係を調 べる。熱サイクル試験を800サイクル実施後において、電力の入 出力比が規定の値に達しない状況が一部の試験体で認められた。



(c)800 サイクル・基板と垂直

(c)800 サイクル・基板と平行 図10 初期状態と800 サイクル負荷後の CT 画像の比較

Fig.10 Comparison of CT images between initial state and after 800 cycles loading.





(a) 基板と垂直でリードと平行な断面 (b)リード先端と垂直な断面



#### (c) 基板と平行な断面

図11 入出力電力比が 85%よりも低下した試験体の CT 画像 Fig.11 CT images of a failed specimen with output to input power ratio lower than 85%.



(a) 基板と垂直でリードと平行な断面 (b)リード先端と垂直な断面 図12 入出力電力比が 85%以上の試験体の CT 画像 Fig.12 CT images of normal specimen having output to input power ratio higher than 85%.

しかし、800 サイクルの熱サイクル試験後も電気特性がほとんど 変化しない試験体も存在することから、両者のはんだ接合部のCT 画像において違いが認められないかを確認した。

図11は、電力の入出力比が85%よりも低下した試験体のCT 画像を示す。図11は、同一の試験体の互いに直交する3断面を 示す。図11(a)-(c)は、基板と垂直なリードに平行な断面、基板 と垂直なリード先端部に垂直な断面、および基板と平行な断面を それぞれ示す。図11(a)および(b)では、はんだ、リード、基板な どがコントラストの違いとして明瞭に確認できる。また、図11 (a)では、リードのかかと部分や、リード下にき裂が発生している のが確認できる。図11(b)では、リード側面にき裂が確認できる。 さらに、図11(c)では、小さなボイドが多数確認できる。この他 にも、リードかかと部分やリード先端部分に図11(c)のボイドと 比較してやや大きめのボイドが存在する接合部も確認できた。次 に、比較のために、図12は、電力の入出力比が85%以上で変化 が小さい試験体の CT 画像の一例を示す。図の表示は、図11と 同様である。この場合、リードのかかと部分、リード下部、およ びリード側面にき裂が確認できる。図11および図12のCT画 像を比較する限りでは、き裂の発生状況に大きな違いは見られず、 両者の違いを明確にするのは困難であった。また、1つの試験体 につき、トランスのはんだ接合部が6か所存在するが、個々の接 合部でき裂の状態にやや違いは見られるものの、接合部の位置に よる規則性を見出せなかった。

#### <4. 4> き裂の進展過程の観察

はんだ接合部におけるき裂の進展過程を明らかにするために、 同一の試験体に熱サイクル負荷を継続的に加え、任意のサイクル 数で、マイクロフォーカス X線 CT によりき裂の観察を行った。 図13および図14は、き裂の進展過程の一例をCT画像で示す。 図15は、図13および図14での断面の方向を示す。図13お よび図14は、いずれも基板に垂直で、かつリード先端に垂直な 断面である。リードは先端部で直角に折り曲げられており、その 屈曲点付近の断面である。図13(a)~(d)は、熱サイクル負荷を 100、180、550、および 700 サイクル加えた後に取得した画像で あり、同一の接合部のほぼ同一の断面を示す。100 サイクル負荷 後では、図の左下付近に初期ボイドが確認できるが、き裂は確認 できない。180 サイクル負荷後は、リード右下の角付近に長さ110 µm のき裂の発生が認められ、550 サイクル、700 サイクルと熱サ イクル負荷が進行するに伴って、き裂が大きく進展していること が確認できる。図14は、別の試験体のき裂の進展過程の例をCT 画像で示す。この試験体は、600 サイクル負荷後の時点で、電気 特性試験で出力が得られなくなっており、図14(a)~(d)は、熱サ イクル負荷を 100、180、300、500 サイクル加えた後に取得した 画像である。180 サイクル負荷後では、確認できなかったき裂が、 300 サイクル負荷後の時点で急速に進展していることが確認でき る。



(a) After 100 cycles



(c) After 550 cycles



(d) After 700 cycles

#### 図13 き裂進展過程

Fig.13 Crack propagation process in a solder joint due to thermal cyclic loading.



(a) After 100 cycles







(b) After 180 cycles (c) After 300 cycles (d) After 500 cycles 図14 き裂進展過程(600 サイクルで電圧出力せず)

Fig.14 Crack propagation process in a broken solder joint after 600 cycles due to thermal cyclic loading.



図15 図13および図14の断面方向 Fig.15 Cross section of CT images in Fig.13 and Fig.14..

き裂進展過程を観察した2つの試験体について、観察サイクル 毎に、電気特性試験も併せて実施した。表1は、各試験体のサイ クル毎の入出力電力比を示す。試験体1については、計測した範 囲では入出力電力比が、全て85%を超えており、正常動作を確認 できた。試験体2については、600サイクル負荷の時点で、出力 が得られなくなり故障に至ったことが確認された。

表1 電気特性試験結果(入出力電力比) Table 1 Results of output to input power ratio.

サイクル数	試験体 1	試験体 2
300	87.50%	87.55%
400	87.54%	86.77%
500	87.47%	87.36%
550	87.09%	87.45%
600	87.39%	出力せず
700	87.60%	-

#### <4.5> き裂の進展過程の定量化および信頼性評価

CT 画像の直接の比較からは、正常動作するか否かの判定は困 難であった。そこで、き裂の進展が他の断面と比較して明瞭に確 認できるリードの屈曲点付近の断面で、き裂長さを計測し、き裂 の進展過程の定量化を試みた。図16は、サイクル数とき裂長さ との関係を示す。試験体1、および試験体2は、それぞれ表1に 示した試験体と対応しており、1試験体あたり6か所あるはんだ 接合部のうち、き裂が最も明瞭に確認できる接合部について計測 を行った。いずれも熱サイクルの進行に伴ってき裂長さが大きく なっており、疲労き裂が進展していることが定量的に確認できる。 また、電気特性試験で不合格となった試験体2の方が、試験体1 よりもき裂の長さが全サイクルにわたって長くなっている。さら に、600 サイクル以上の負荷では、CT 画像の全断面においてき裂 の存在が確認できることから、リードの下部では、はんだ接合部 をき裂が貫通している状況であることがわかる。このような、き 裂の定量化により、電源の動作不良および、寿命評価ができる可 能性があるといえる。



Fig.16 Crack propagation process in the solder joints.

#### 5. 結言

本研究では、製品や部品の接合部が、破損に至るまでの過程を 実際の CT 観察により明らかにして、これを製品の信頼性設計に 応用することの可能性について検討を行った。一例として、実際 に故障が発生した直流安定化電源を対象として、その破壊の原因 と推定されるはんだ接合部の疲労き裂の状態を、マイクロフォー カスX線CTにより観察し、CT画像によるき裂長さの計測から、 信頼性を評価することの可能性について検討を行った。その結果、 はんだ接合部の CT 画像だけの比較では、動作不良をおこす試験 体を明確に判別することはできなかったものの、取得した CT 画 像からき裂長さを計測することが可能であり、定量的な疲労き裂 の評価により動作不良を判定し、製品の寿命評価などの信頼性評 価を行うことができる可能性があることが分かった。しかし、定 量化は、特定の断面におけるき裂長さの計測にとどまっており、 計測した試験体も少ないことから、直ちに実際の製品の信頼性評 価を行える段階にはない。今後は、き裂表面積などき裂全体を評 価できる指標による定量化や、より多くの試験体の計測を行って いく必要がある。課題は残ったものの、X線CTによりはんだ接 合部のき裂を明瞭に観察することができ、き裂長さを計測し定量 化することができた。これは、X線CT装置による形状測定およ び変形評価の有効性を示すものである。

文 献

(1)	細川修宏ほか, 平成21年度若い研究者を育てる会研究論文集,
	pp. 15-22.
(2)	定岡紀行,日本ガスタービン学会誌,33,2(2005),pp.86-91.
(3)	石井博行ほか,精密工学会誌,89,4(2003),pp.473-476.

(4) Feldkamp L, et. al, J. Opt. Soc. Am. A , 1, 6(1984), pp. 612-619.

(5) 釣谷浩之ほか, 機械学会論文集 A, 75, 755(2009), pp. 799-806.

### Ⅳ. 工具寿命の機上検出手法に関する研究

Study on Method of In-Process Tool Life Detection

石澤 剛士	金森 直希	羽柴 利直	杉森 博
ISHIZAWA Tsuyoshi	KANAMORI Naoki	HASHIBA Toshinao	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, the vibration signals during cutting were measured and those signals were processed to detect the tool life. As a result, there was a possibility to detect the chipping of cutting tool by the following procedure. First of all, the frequency components of signals which were not caused by cutting, were removed from machining vibration signal. After that, the signals were processed by the Mahalanobis-Taguchi (MT) method.

#### 1. 緒言

機械加工において、一定以上の加工品質を保つには、工具寿命 を正確に把握し適切な時期に工具交換する必要がある。主要な切 削加工の一つであるエンドミル加工における工具寿命には、従来、 加工物の表面粗さが規格外となるまでの加工回数を基にしてこれ に工具のバラつきやチッピングと呼ばれる工具破損を考慮にいれ た安全率が見込まれている。このようにして決められた寿命に基 づいて工具交換が実施されるため、規格内の製品加工が可能であ るにもかかわらず工具が交換され得る。使用中の工具の寿命を高 い精度で検出できれば、加工時間および工具にかかる経費の大幅 な削減が期待できる。そこで、本研究では、工具寿命を実時間で 機上検出する装置の開発を目指し、比較的安価なセンサを使って エンドミルの工具寿命を検出する手法を検討した。

#### 2. 工具破損の検出方法

本研究では、加工面の表面粗さに大きな影響を及ぼすチッピン グに着目し、これを機上検出する方法を検討した。まず、高速回 転する工具に発生するチッピングを、どのような物理量で検出す れば良いか比較検討した。表1に、検討した物理量を定性的な項 目で評価した結果を示す。加工中にリアルタイムに測定が可能で あること、既存の量産機への取り付け性、センサを取り付けた際 の治具剛性の変化、エアブローやクーラントによるノイズの影響 について比較検討した。その結果、切削振動が最も適していると 判断した。

表1 チッピングの検出に使用する物理量の比較検討
Table1 Comparison of physical quantities used for chipping detection.

	リアルタイム 測定の可否	既存量産機へ の取り付け性	治具剛性 の変化	ブローやクーラントに よるノイズ影響	総合評価
切削抵抗力	0	Х	変化する	小	Х
切削振動 (加速度)	0	0	変化なし	小	0
音圧	0	0	変化なし	大	Δ
工具摩耗量	Х				×
切りくず形状	Х				×
加工面粗さ Ra	X				×

#### 3. 実験装置

<3. 1>エンドミル加工システム

加工機として CNC フライス盤(エンシュウ製 VF-Center)を使 用し、NC プログラムにより加工を行うこととした。エンドミルを 固定するツールシャンクには BT50 規格のものを用いた。図1に、 加工レイアウトを示す。上下から2枚の鉄板で挟まれたワークが、 加工機上に設置された切削動力計の上にボルト固定されている。 ワークの側面をエンドミルでY軸方向に図中の手前側の端から奥 側の端に向かって直線状に加工を行った。これを1カット分の加 工として、エンドミルにチッピングが発生するあたりまで繰り返 した。表2に、加工条件を示す。1カットの長さは100mm である。 チッピングのしやすさを考慮して、ワークには SKD11 にずぶ焼き 入れをほどこした高硬度材料を使用した。



図1 加エレイアウト Fig.1 Schematic view of machining equipments.

Table2 Cutting conditions.			
	型番	住友電工製 GSH6100SF	
	直径	10mm	
工具	刃数	6枚	
	突き出し長さ	30mm	
	工具芯ぶれ	10µm 以下	
	材質	SKD11(ずぶ焼き入れ材	
ワーク		HRC58)	
	寸法	100 mm  imes 100 mm  imes 5 mm	
主軸回転数	3170rpm		
送り量	0.1mm/rev		
切り込み幅	0. 1mm		
切り込み深さ	5mm		
クーラント	なし(乾式加工)		
切削方向	ダウンカット		

### 表2加工条件

#### <3. 2>測定システム

切削振動の測定には、将来の量産設備への適用を考慮し、比較 的安価なセンサであるプリアンプ内蔵型の超小型1軸加速度ピッ クアップ(小野測器製 NP-3211)を採用した。このセンサを、ワ ーク側および加工機の主軸頭に設置した。ワーク側では、ワーク 固定板の上部中央付近のZ方向の振動を検出できるようにし、加 工機の主軸頭では、図1に示すようにX、YおよびZ軸方向の振 動を検出できるようにした。検出した振動信号は、センサアンプ・ ロガー(小野測器製 DS-3000)を通してPCに保存される。サンプ リング周波数は、6.4kHzとした。

#### 4. 加工実験

加工実験では、25 カット(2.5m)間隔でマイクロスコープを 使って工具のチッピングを確認した。また、削りしろがなくなる ため、200 カット(20m)毎に新品のワークに交換した。図2 に、加工面粗さ(Ra)と切削距離の関係を示す。図より、切削距 離が延びるにしたがって加工面粗さが徐々に悪化していることが 分かる。また70m 地点で加工面に大きな凹凸が発生したため加 工面粗さが急激に悪化した。図3に、70m まで加工した後の工具 の拡大写真を示す。工具の刃先が大きく欠損していることが分か る。このことから、工具にチッピングが発生し、加工面粗さが大 きく悪化したと言える。加工実験は、チッピング後77.5m まで続 けて行なった。



図2加工面粗さと切削距離の関係 Fig.2 Relationship between surface roughness and cutting distance.

#### 5. ワーク側の振動によるチッピング検出

工具のチッピングをワーク側の加工振動で捉えられるかもっと も簡易的な手法で検討を行った。ワーク側から評価する理由とし ては、主軸頭に取付けたセンサよりワーク側のセンサの方が加工 点から近く、SN 比の高い信号が得られると考えたからである。 図4にワーク側の切削振動と切削距離の関係を示す。ワーク側の 切削振動は、1カット毎に切削振動のデータを絶対値にし、その 平均値を算出した値をプロットしている。切削距離が長くなるに したがって徐々に切削振動が大きくなっていることが分かる。



図 3 切削工具のチッピング Fig.3 Chipping of a cutting tool.



またチッピングを確認した 70m 付近から急激に切削振動が大き くなっていることから、工具のチッピングによる影響を捉えてい ると考えられる。しかし、ワーク交換後に加工振動が急激に下が ったり、機械の運転停止後の加工再開時に急激に加工振動が大き くなる等の外乱の影響が確認された。ワーク側の切削振動の大き さだけでは、外乱の影響を非常に受けやすく正確にチッピングを 捉えられないことが分かった。

#### 6. 切削の基本周波数によるチッピング検出

次に切削の基本周波数の切削振動のみを取り出しチッピングを 検知できるか検討を行った。切削の基本周波数とは、単位時間あ たりの工具切れ刃による加工回数であり、本加工実験においては 6 枚刃の工具を 3170rpm で回転させているため 317Hz となる。図 5 にワーク側の基本周波数(317Hz)の振動と切削距離の関係を示す。 ワーク側の切削振動は、基本周波数におけるパワースペクトル密 度を算出した結果である。切削距離 5m まで急激に切削振動が上 昇するが、それ以降は漸増傾向を示すもののチッピングが発生し ていた 70m 以降は変化がみられない。これより、この方法ではチ ッピングの検知は難しいことが分かった。図6に工具の逃げ面摩 耗幅と切削距離の関係を示す。切削距離 5m までは初期摩耗によ って急激に逃げ面摩耗が増加し、それ以降 70m までは緩やかに摩 耗がすすんでいる。以上のことから、ワーク側の基本周波数の振 動と工具の逃げ面摩耗とは相関関係が認められるものの、工具の チッピングとは相関が見られないことがわかった。よって、切削 振動の平均値や切削の基本周波数を算出するような簡易的な手法 ではチッピングを捉えることは困難だと分かった。そのため、切 削振動の特徴を捉えられる統計的手法を取り入れてデータ解析を 行うこととした。

#### 7. 統計的手法によるチッピング検出

切削振動信号の特徴を捉えるため、本研究で選択したのは統計

解析に品質工学を融合させた MT 法(Mahalanobis Taguchi Method)<sup>(1)</sup> である。一般的なパターン認識手法では、想定される異常パター ンのデータが多ければ判別精度が向上すると言われている<sup>(2)</sup>。し かし、生産現場の量産設備からデータを採取する場合、良品デー タは多く収集できるものの、多種多様な異常データを数多く収集 するには異常項目毎にデータ整理が必要で、多大な時間が必要な ことから、データ収集に困難をきわめる。その点、MT 法は良品デ ータ群と判定するデータとの離れ具合(マハラノビスの距離)を 評価する手法であり、様々な異常パターンに対応でき、かつデー タ収集も容易である<sup>(3)</sup>。よって、本研究では MT 法を採用すること とした。

この MT 法の概要を図 7 に示す。まず設備から様々な製造デー タを計測しデータベース化を行い、その中から良品データを収集 し、良品データ群(基準データ集団)を作成する。そして良品デ ータ群を基に被判別データの良品か不良品かの判定を行う。診断 の際に、マハラノビスの距離(MD値)と呼ばれる良品データ群 からの判定データの離れている距離を算出する。この MD値が大 きいほど異常度が高いという指標となり、この値に闘値を設定す ると対象の異常判定が可能となる。波形データの特徴を得る方法 として、MT 法では波形形状から変化量と存在量を抽出する手法 が一般に用いられている。











図7 MT 法の概要 Fig.7 Overview of the MT method.

図8に、変化量・存在量の抽出方法の概要を示す。波形データ に、標本線と呼ばれる線を引き波形データとの交点の数を変化量 とし、交点から交点までの距離の総和を存在量として算出する。 標本線が5本であれば、波形データから10項目の特徴(それぞ れ5つずつの変化量と存在量)を取り出すことになる。取り出し た特徴データは式(1)を利用することで MD 値を算出することが できる<sup>(1)</sup>。

$$MD \, \not ll = \frac{1}{k} Y^T R^{-1} Y \qquad \dots \dots (1)$$

k : 測定項目数(次元数)
R <sup>-1</sup> :正常品を規準化した値の逆行列
Y:規準化した判別したいデータ
Y <sup>T</sup> :Yの転置行列



図8 変化量・存在量の抽出 Fig.8 Extraction of the amount of change and abundance.

#### 8. ワーク側の切削振動への MT 法の適用

ワーク側の切削振動の加工開始後2秒間の信号データに標本線 を引き、変化量と存在量を算出した後、MT法でチッピング検出 の検討を行った。図9にMT法を利用したワーク側の切削振動に よるチッピング検知の結果を示す。図中では工具が正常である正 常域(切削距離0~67.5mの間)を白色の棒で示している。また 連続して加工を行った後、工具のチッピングを確認した切削距離 67.6~69.9mの区間を境界域とし灰色の棒で示した。さらに切削 距離70m以降をチッピング確認後の異常域として黒色の棒で示 した。正常域では、MD値は小さい値になっているが、境界域で は徐々に MD値が増加し、69m地点で MD値が249と急激に増 加していることが分かる。このことから69m地点で刃具のチッ ピングと思われる異常を検知している可能性が示された。



図 9 MT 法を利用したワーク側の切削振動によるチッピング検知 Fig.9 Chipping detection by vibration from workpiece using MT method.

#### 9. 主軸 X 方向の切削振動によるチッピング検出

< 9.1>生波形によるMT法を利用したチッピング検出 主軸のXYZ 方向の中で一番切削振動が大きく計測されたX方 向の切削振動からチッピング検知を行えるか検討を行った。まず ワーク側の切削振動と同様に、生波形に標本線を引き、特徴デー タを取り出しMT法でチッピング検出を試みた。図10にMT法 を利用した主軸のX方向の切削振動によるチッピング検知の結 果を示す。棒グラフの各棒の色は、図9と同様である。境界域の 前半部分でMD値が僅かに大きくなっているが、異常域では正常 域と同等のMD値であり、チッピングを検知できていない。

<9.2>切削加工に関連しないと考えられる振動を除去した信号によるチッピング検出

図11に、主軸のX方向の切削振動のスペクトログラムを示 す。図は、横軸を時間、縦軸を周波数としており、色の濃淡でパ ワースペクトル密度の大きさを表している。色が薄くなるにした がってその周波数帯域の振動が大きくなることを表現している。 図中、1秒から20秒までが切削加工区間でその前後は、(助走区 間で)非切削加工区間である。切削加工区間、非切削加工区間の 信号変化が少なく、いずれの区間でも振動が大きい例えば1.4~ 1.9kHzの帯域は、切削に関連しない信号と考えられ、解析に悪影 響を及ぼすことが想定された。そこで、この周波数帯域や同様に 切削に関連しないと考えられる周波数帯域をフィルタ処理で切削 振動から除去することとした。



図 10 MT 法を利用した主軸 X 方向の切削振動によるチッピング検知 Fig.10.Chipping detection by vibration in X-axis direction from spindle head using MT method.





図 12 に、フィルタ処理後 MT 法で解析した結果を示す。図よ

り、正常域では MD 値が小さいが境界域から大きくなり異常域で も MD 値が大きいことが分かる。このことより主軸の切削振動で は、切削に関連しない振動をフィルタ処理で除去することでチッ ピングと思われる異常を検知可能であると思われる。



図 12 MT 法を利用したフィルタ処理をした主軸 X 方向の切削振動による チッピング検知

Fig.12. Chipping detection by vibration in X-axis direction from spindle head using the MT method with filtering.

#### 10. チッピング検出法のロバスト性

<10.1>センサ貼付位置に関するロバスト性

主軸のX方向の切削振動からチッピング検知が可能だと分かっ たので、主軸のZ、Y方向の切削振動でもチッピング検知が可能 であるか確認を行った。Z、Y方向共に切削加工に関連しないと考 えられる振動を除去している。図13に主軸Z方向の切削振動によ るチッピング検知の結果を示す。図より、主軸Z方向の振動は、 正常域と境界域との差は小さいが異常域との差はあるためチッピ ングを検知できる可能性がある。図14に主軸Y方向の切削振動 によるチッピング検知の結果を示す。正常域から境界域に移ると 大きな差が現れ、異常域にいたるとその差がさらに大きくなって いる。主軸のX、Y、Z方向いずれもチッピング検知の可能性があ ることから、切削加工に関連しない振動をフィルタ処理で除去す れば、主軸のどの方向の振動でもチッピングを判別可能と考えら れる。なお、Y方向の切削振動を選択した方が正常時との差が顕 著に現れたため、チッピングを容易に検知するにはこの方向の信 号を扱うことが望ましいと思われる。



図 13 主軸 Z 方向の切削振動によるチッピング検知 Fig.13.Chipping detection by vibration in Z-axis direction from spindle head.





<10.2>ワーク交換・機械停止前後のセンサ値の変動に対す るロバスト性

作成した基準データのロバスト性を検証するため、これまでの 切削区間(切削開始1秒後からの2秒間)のデータを使って作成 した基準データを使って、別の切削区間(切削開始2秒後からの 2秒間)のデータを判定させた場合に、チッピングを正しく検知で きるか検討した。図15にロバスト性の確認結果を示す。図15よ り、概観すると境界域で徐々に MD 値が大きくなっているのがわ かる。しかし、正常域の切削距離5.1m、20.2m、30.1m、52.0m 地 点の4箇所(特異な値を示す切削距離)で MD 値が大きい値にな っており、チッピングを正確に判定できていない。これに対応す るため、基準テータを増やし判定精度をあげることを考えた。本 来、切削距離全域にわたって別の切削区間のデータを多く採取す るべきであるが、ここでは(計算時間短縮のため簡易的に) MD 値 が局所的に大きくなる特異な値を示す 4 つの切削距離近傍の別の 切削区間(切削時間 2 秒間分)の切削振動のデータを基準データ 作成の際に加えた。



図16に基準データ修正後のMT法の計算結果を示す。図16よ り、局所的にMD値が大きくなっていた5.1m、20.2m、30.1m、 52.0m地点のMD値が小さくなり正しく判別できていることが分 かる。また基準データの精度が高くなったことで、境界域と異常 域のMD値の値もさらに大きい値となり、より工具のチッピング を容易に検知できるようになった。よって本判定手法のロバスト 性を高めることが出来た。





Fig.16.Analysis results by MT method using revised reference data.

#### 11. 判定手法の検証

前章で作成したロバスト性を向上させた基準データを使い、再
度新品の工具がチッピングするまで加工実験を行い、その切削振 動データでチッピングが判定できるか検証を行った。図17に本判 定手法の検証結果を示す。図17より、境界域の68.9m地点でMD 値が741となった。工具がチッピングしていない正常域0~1m、 15.2m、35.1m、55.1mでMD値は大きい値を示すが、境界域のMD 値を下まわっていることからチッピングの判定に支障はないと考 える。また局所的なMD値の増加には前章で示した方法で対応可 能と考える。以上のことから本手法によって工具のチッピング検 出が可能であると考える。





## 12. 結言

エンドミル加工の切削振動を測定し、その信号のデータ処理に よって工具寿命の機上検出手法の検討を行なった。その結果以下 のことが分かった。

- (1) 切削振動の絶対値の平均値では外乱の影響が大きく、チッピ ングを検知できなかった。
- (2) 切削加工の基本周波数の切削振動では、工具摩耗量の推移を 捉えられたものの、チッピングは検知できなかった。
- (3) ワーク側の切削振動に MT 法を適用するとチッピング検知が 可能であった。
- (4) 主軸側の切削振動では、(切削加工に関連しない周波数帯域振 を除去する)フィルタ処理後 MT 法を適用するとチッピング 検知が可能性であった。
- (5) 主軸側の3方向の切削振動いずれも(切削加工に関連しない 周波数帯域を除去する)フィルタ処理後MT法を適用すると チッピング検知が可能であった。
- (6) 主軸側の切削振動では、送り方向の切削振動が(3 方向のうちで最も)顕著に工具のチッピングを検知した。
- (7) MT 法を利用した工具寿命の検知では、判定が曖昧な部分の 基準データを増やすと、ロバスト性を向上できた。

文 献

(1) 立林和夫, 手島昌一, 長谷川良子; "入門 MTシステム", (2008), pp. 65-68, 日科技連.

(2)神生直敏,飯田健一,畑沢賢一,鶴谷知洋;"パターン認識技術を用いた設備保全診断システムの開発",北海道立総合研究機構工業試験場報告,(2010), No. 309, pp. 97-103.

(3) 西岡賢人, 是澤宏之, 楢原弘之, 鈴木裕; "MTシステムによる切削 加工時の加工状態の評価 (MTシステムを用いたびびりの判別)", 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2013), pp. 721-722.

# V. 超音波接合における接合材の 振動特性に関する研究

## Study on Vibration Characteristics of Ultrasonic Welding

羽柴 利直 HASHIBA Toshinao 盤若 秀明 HANNYA Hideaki 金森 直希 KANAMORI Naoki

石黒 智明 ISHIKURO Tomoaki

#### Abstract

The joining technique of metal can be carried out in many different ways, such as welding. When joining especially solids, solid state bonding is used. There are ultrasonic welding, diffused junction, etc. in solid state bonding. Ultrasonic welding is joinable in a short time, and the technique has an advantage which can carry out junction directly, without using adhesives, a binder, and so on.

Ultrasonic welding is mainly used for joining soft metal sheets each other. We investigate practical techniques of ultrasonic welding for thick materials and hard materials in order to expand the application range of it. In this report, we examined shape of welding horn for vibrating these materials. In addition, basic joining techniques to join aluminum rivet and ceramics bead to aluminum alloys for housing material were investigated. As a result of research, it became clear that proper joining system was required to make these materials joinable. Aluminum rivets could be joined directly to the aluminum plate, and ceramic bead could be joined with insert material.

## 1. 緒言

材料を接合する方法には、機械的接合や接着など様々な手法が あり、対象物に要求される性能や設計によって、いずれの方法を 採用するかを検討する必要がある。特に、金属固体同士を直接接 合する手法には、超音波接合や拡散接合などの固相接合がある。 中でも超音波接合は低コスト、短時間接合、自動ラインに組み込 み可能などの利点がある。

現状として、超音波接合の実用例のほとんどが薄物形状(金属 箔や板、細線)、軟質金属同士の接合という比較的限定された範 囲での利用に留まっている。これは、超音波接合では、ホーンに より加振材を固定材に押し当てて超音波加振することで接合が 行われるため、素材同士の接合性に加えて、以下の形状の要因と 材質の要因による制約を受けるためである。

- (1) 接合時には、加振材はホーンの加振により、固定材に対して水平に摺動する。このため、材料同士が平滑に面接触していることが理想的であること
- (2) ホーンと加振材の間に滑りを生じさせないため、少なくと も加振材はホーンチップ部のローレットに食い込み易い硬 さであることが望ましいこと

超音波接合の更なる用途拡大のためには、多様な形状、材質に 対応できる必要がある。本研究では、加振材を厚物部品形状や硬 質材料とした場合のホーン形状を含む接合方法を検討し、接合の 可能性について調査した。特にここでは、アルミニウム押出し材 をベースに様々な部品が複合化し、多様な性能を要求される建材 に注目し、建材分野において表面処理アルミニウムとして多用さ れている Al-Mg-Si 系合金 A6063S-T5 を固定材とした以下の同種 材料接合および異種材料接合を検討した。(以下、加振材/固定 材のように示す。)

- ① アルミニウム(厚物部品)/アルミニウム(A6063S)
- ② セラミックス/アルミニウム (A6063S)

## 2. 超音波接合について

- <2.1> 超音波接合とは
- 超音波接合の概要を図1に示す。

超音波発振器から出力された電気エネルギーが超音波振動子で 振動エネルギーに変換され、ホーンによって所定の振幅まで拡大 される。この振動を、ホーン先端のホーンチップ部で加振材を固 定材に押し付けながら印加することにより、材料界面間で摩擦が 生じ、材料表面に存在する酸化皮膜や有機皮膜等の介在物を破壊、 排斥し、清浄な金属表面(新生面)が露出する。同時に発生する 摩擦熱によって、加振材と固定材の間に接合が生じる。ホーンチ ップ部は加振材への振動の伝達をより確実にするため、一般的に ローレット形状になっている。



Fig.1 Over view of ultrasonic welding

<2. 2> 超音波接合の特長

超音波接合は、特殊な環境でなくても容易に接合でき、かつ、 大量生産への適用が可能であることから、様々な分野で用いられ ている。超音波接合の特長は、次のとおりである<sup>1)</sup>。

- (1) ほとんどの同種金属材料の接合が可能である
- (2) 溶融温度の異なる異種金属間の接合が可能である
- (3) 融点よりかなり低温での固相接合なので、熱の発生による組 織変化が生じにくい
- (4) ハンダやフラックス、樹脂などの消耗品がない為、環境に優しく、コストダウンに対応できる
- (5) 自動生産ラインなどへの組み込みが容易である
- (6) 短時間接合が可能である
- (7) 接合の電気消費量が少なく、ランニングコストが下げられる

## 3. アルミリベット接合

スタッド溶接は、鉄、ステンレス、アルミニウムなど数種のス タッド(リベット類似形状部品)を同種または異種材質の部材に 瞬時に溶接する手法であるが、溶接である以上、少なからず熱に よる金属組織変質やひずみ、焼け等の品質上、意匠上の問題が伴 う場合がある。これらの点において、<2.2>(3)に示したよう に超音波接合に優位性があり、改善の可能性がある。

一方で、部品形状としては、接合面となる部品端面に対して、 加振材の厚さに相当する軸長さが非常に大きいことから、接合面 の反対側の端面をホーンにて加振した際に接合面までホーンの 振動が伝わらず、接合界面がほとんど摩擦しないことが想像でき、 接合が困難になると考えられる。

このような接合上の問題点に対して、部品がホーンと一体となり振動するような接合系を構築することで、振動の減衰なく理想的に接合に至るのではないかと考えた。ここでは、部品をアルミリベットとし、ホーンの形状変更と合わせて A6063S 平板への接合を検討した。

## <3. 1>接合材料および接合方法

接合材には、表1に示す材料を用いた。接合試験機は、超音波

工業(株)製のUSW0620G3X(出力600W、周波数19kHz)を用い、ホーン直下部にマグネットを用いて治具を固定し、その治具 上に固定材 A6063S 平板を水平に静置し、クランプゴムによって 片端を固定した。

表 1 リベット接合用材料 Table 1 Materials for rivet joining

接合材	形状	材質	寸法(mm)	
加振材	リベット	A1070W (JIS H 4040 引抜線 普通級)	頭部:径6 × 高さ 1 軸部:径3 × 長さ30	
固定材	平板	A6063S-T5 生地材	2.0t × 25W × 70L	

リベット接合には、図2に示すホーン(振幅設計値:28µm p-p) を作製し、これを用いた。ホーンチップ部に該当する部分は、ホ ーン内側に穴径 $\phi$ 6mm×深さ8mmの円柱空間を有している。ア ルミリベットと鉄製ホーンの直接接合を抑制するため、ホーンの 鉄に固溶し難い銅の合金である黄銅(C3604)製の中空ロッド(外 径 $\phi$ 6mm、内径 $\phi$ 3mm×長さ9mm)にリベット軸部を挿入した うえで、リベットをこのロッドとともに加振した。



Fig.2 Shape of welding horn for rivet joining

<3. 2>固定材上の接合位置と接合エネルギーの変化

超音波接合に用いるホーンは、ホーンチップ部で所定の振幅に なるように振動設計がなされている。この振動が加振材に伝達さ れるが、固定材の振動特性により、加振時に固定材固有の振動が 固定材に励起されると、加振材と固定材の相対運動に変化が生じ、 摩擦状態が変わる可能性がある。固定材の振動はその位置により 異なると考えられることから、A6063S 平板上の接合位置を変化 させ、摩擦状態が反映される接合エネルギーについて調査した。 尚、接合位置はクランプが無い端部からの距離で表すものとし、 リベット頭部面が板上に全面接触しない端部 0mm および板中央 に対して線対称となる 35mm を超える位置での評価は省略した。

図3は、加圧力800N、加振時間8sにおけるA6063S平板上の リベット接合位置と接合エネルギーの関係を示した結果である。 接合エネルギーは、平板端部から10mmの位置において最大値 を示し、それ以降は、固定材中央部にかけて低下傾向を示した。 このことから、固定材上には加振時に図4に示す振動モードが 存在すると推測される。

固定材上の「節」の位置では固定材がほとんど振動しないため 接合材間に摩擦が生じ易く、「腹」の位置では加振材の振動に同 期して固定材が振動するため摩擦が生じ難いと考えられる。少な くとも、端部から10mmの位置は節に相当すると推測される。

本接合系においては端部から10mmの位置が接合条件として最 適であると判断し、以降のリベット接合試験はこの位置で行った。





図4 固定材に存在すると考えられる振動モード Fig.4 Expected view of vibration mode on Al plate

<3.3>試作ホーンによる接合可否の調査と接合系の評価 接合条件を加圧力 100N、200N、400N、800N(4条件)、加振時 間 1s、2s、4s、8s、12s(5条件)の組み合わせとして、各条件 N=5 の接合試験を実施した。

図5に接合数N=5に対する各加圧力、加振時間での接合可であった試料数を示す。ここでの接合可とは、A6063S 平板面よりリベットが接合試験後に分離していないことを基準に判断した。



結果から、加振時間が長くなるほど接合可となり易く、一方で、

加圧力が高くなるほど接合不可となり易い傾向を示した。特に、 800N では一部の加振時間条件を除きほとんど接合には至らなかった。

図6に、このときの加振時間と平均出力の関係を示す。平均出 カ(W)は、接合エネルギー(J)を加振時間(s)で割って求め、 平均化したものである。

100N および 200N では、加振時間 8s で出力は最大値を示し、以降は低下を示した。また、相対的に 100N より 200N の方が出力は大きくなる傾向が見られた。図5 に示したとおり、接合可となった数も概ね 8s で最大となり、12s でその数に変化がないことから、本接合系の界面接触状態については、加振開始から 8s 時点で一定の接合に至っており、8s~12s の間については接合箇所が接合材料間の相対運動を規制し、摩擦が生じ難くなっているのではないかと予想される。加振時間中に摩擦が生じ難い区間が含まれる場合、時間に対する接合エネルギーの総和は減少方向に変化するため、平均出力としては低下したと推測される。

400N および 800N では、明確な最大値は確認されず、いずれも 加振時間に対して平均出力が緩やかに低下する傾向を示した。ま た平均出力は僅かに 400N の方が大きくなる傾向が見られた。図 5 に示すとおり、結果としては接合に至った水準もあるが、100N、 200N と比較して接合に至り難い方向に転じていることが分かる。 これは、高加圧によって接触界面における摩擦力が大きくなり、 界面摺動が生じ難くなっているためと考えられる。ただし、本接 合系での加圧力 0N (無負荷)のホーン単独出力は 34~39W であ り、これに対しては高い値を示しているため、接合界面における 摩擦振動が小さくなったことに加え、接合系内における別の界面 (ロッドとホーンの界面など)に摩擦が発生していることが疑わ れる。



図6 加振時間と平均出力の関係

Fig.6 Relationship between weld time and average output

<3. 4>接合評価

接合可であった水準について、平面引張試験により接合力を、 試験後の接合面観察によって接合面積を測定した。そして、接合 力を接合面積で割って接合強度を求め、評価した。

## <3.4.1>接合力と接合面積

接合力は精密万能試験機(㈱島津製作所製AUTOGRAPHAG-X plus 100kN)によって、図7に示す方法でリベット接合力(平面引張最大荷重)を測定した。引張速度は1mm/minとした。

図 7 リベット接合力の測定方法 Fig.7 Measuring method of rivet joining force

図8に、接合条件と接合力の関係を示す。

接合力は、加振時間の増加に伴い上昇傾向を示すが、加圧力に 対しては大きな違いはなく、接合時間 12s において最大 150N 程 度の接合力が得られた。



Fig.8 Measurement result of rivet joining force

次に、試験破断後の A6063S 平板を、光学顕微鏡 (OLYMPUS 社製 DSX500)を用いて静止画像撮影し、画像編集アプリケーシ ョンソフトウェア (Adobe 社製 Photoshop CS2) によって図9の 例に示すように画像を2 階調化し、接合面積を評価した。

撮影画像全体は8.114mm×8.114mm(面積約65.8mm<sup>2</sup>)であり、 ここではA6063S 平板表面に存在する押出し材固有のダイスマー クが摩擦によって消失した部分(図9黒色部)を接合に寄与した 面積と推定し、画像全体に対する黒色画素比率を撮影画像面積に 掛け、接合面積を求めた。

図10に、接合条件と接合面積の関係を示す。

加圧力 100N、200N においては加振時間の増加に伴い面積が増加する傾向があり、一方で、400N、800N における面積は加振時間に対してほとんど変化しないことが分かった。また、リベット頭部(径 6mm)の全面(約28.3mm<sup>2</sup>)で接合に至った水準は確認されなかった。



5

加振時間(s)

図 10 リベット接合面積の測定結果 Fig.10 Measurement result of rivet junction area

10

## <3.4.2>接合強度

0.0

0

図11に、接合条件と接合強度の関係を示す。

加圧力 100N および 200N では、加振時間に対して強度変化は小 さく、概ね 10~20MPa で推移している。一方、加圧力 400N、800N では、加振時間に対し強度が大きく増加する傾向がみられ、一部 の加振時間条件においては A1070 引抜線の引張強さ規格値 (55MPa 以上 95MPa 以下<sup>2</sup>)に近い値または同等値を示した。

これらのことから、本接合系での接合においては、高い加圧力、 長い加振時間が強固な接合を生み出すことが分かった。高加圧領 域での接合安定性を改善し、接合面積を広げることができれば、 実用的な接合力が得られると予想される。



Fig.11 Measurement result of rivet joining strength

## 4. セラミックスビーズ接合

近年、異種材料接合に対する技術開発ニーズは自動車産業をは じめ、様々な分野で高まりを見せている。特にセラミックスは耐 熱性や耐摩耗性、電気的性質、軽量性などから電子半導体分野に おいて金属との接合需要が高く、超音波接合を用いたセラミック ス平板固定材と金属平板加振材との基礎研究が報告されている<sup>3</sup>。

建材製品においても摺動摩耗等に対し、セラミックス接合によるアルミニウム材料への特性付与が活用できると考え、A6063S 平板へのセラミックスの超音波接合を検討した。ただし、セラミ ックスを加振する場合、ホーンのローレットの加振材への食い込 みが期待できず、ホーンの破損にも繋がる可能性が高いことから、 加振材の形状選定とホーンの設計の検討が必要である。リベット 接合においては、加圧力が大きい条件で接合面積が小さくなる一 方で、局所的に加圧力がかかり、接合強度が大きくなったことか ら、加振材の形状については、接合界面において点接触による加 圧力の集中が期待できるビーズ(球体)を用いた接合を検討した。

<4.1>接合材料および接合方法

表2に示す材料について、セラミックスビーズ/アルミニウム 合金平板での接合を検討した。加振材の材質には、代表的なファ インセラミックスであるアルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)とジルコニア(ZrO<sub>2</sub>) の2種類を選定した。

表 2 セラミックスビーズ接合用材料 Table 2 Materials for ceramics bead joining

接合材	形状	材質	寸法(mm)
+n+= ++	ビーズ	アルミナ(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Ф3.97(5/32inch)
加振的	(球体)	ジルコニア(ZrO <sub>2</sub> )	Ф3.97(5/32inch)
固定材	平板	A6063S-T5 生地材	2.0t × 25W × 70L

接合試験機および固定材の固定方法は、<3.1>に記載した方法 と同様である。本検討においては、図 12 に示す形状(振幅設計 値:28μm p-p)のホーンを使用した。



Fig.12 Shape of welding horn for bead joining

<4.2>固定材上の接合位置と接合エネルギーの変化

ビーズ接合における接合位置と接合エネルギーの関係を調査した。接合条件は、加圧力 800N、加振時間 8s および 1000N、8s の2条件とした。

図 13 に、A6063S 平板上のビーズ接合位置と接合エネルギーの 関係を示す。

800N、8sの条件において、接合エネルギーはアルミナでは接合 位置による変化を示さず、ジルコニアでは10mmの位置において 僅かに高くなる傾向を示した。10mm位置およびその近傍(5、15、 20mm)について、加圧力を1000Nに変更し評価した結果、アル ミナは10~15mm、ジルコニアは10mmの位置において最大値を 示した。このことは、同じ固定材を使用したリベット接合での結 果と傾向が合致しており、固定材の振動特性によるものと推測さ れる。

よって、ビーズ接合における接合位置は、リベット接合と同様 に、端部から10mmの位置に設定した。



<4. 3>ビーズ単体による接合可否の調査

接合条件を加圧力 200N、400N、600N、800N、1000N、1200N (6条件)、加振時間 1s、2s、4s、8s(4条件)の組み合わせとし て、ビーズ2種類の接合試験を実施した。試験数は、1条件に対 しN=3とした。結果として、これらの接合条件内でA6063S平板 との接合はアルミナ、ジルコニアともに確認されなかった。

図 14 に、各加圧力における平均出力の結果を示す。加圧力 0N の出力値は、無負荷状態においてホーン単独で振動させたときの 平均出力である。

アルミナ、ジルコニアはともに、600N以下では、無負荷状態と 比べて、平均出力に大きな差は見られなかった。800N以上では 上昇傾向に転じ、加圧力に比例して平均出力も増加した。

本接合系においては、試験後のビーズ表面にホーン鉄材の条痕 が認められたことから、エネルギーが無負荷状態とほぼ等しい場 合、ビーズと A6063S 平板表面間でほとんど摩擦せずに、ホーン の円錐穴の中でビーズが回転した可能性が高く、適切に摩擦を生

じさせるためには800N以上の加圧力が必要と考えられる。



Fig.14 Average output of bead joining (a)alumina (b)zirconia

#### <4.4>球面の平面加工による接合の改善の検討

<4.3>に示すとおり、加振時にビーズがホーン内で回転し、接 合界面の摩擦が抑制される現象が生じたと考えられることから、 加振材を研磨により平面加工し、この面を接合面として摩擦状態 の改善を試みた。加振材と固定材が平面で摩擦することにより、 低加圧条件では回転抑制として、高加圧条件では摩擦面積増加に よって接合に有利に働くことが期待される。

ビーズは、均一に研磨できるよう、樹脂リング底面にビーズを 静置したうえでエポキシ樹脂により包埋し研磨した。研磨後、エ ポキシ樹脂を焼却し、ビーズを取り出した。研磨により得られた 平面の面積の測定結果は表3に示すとおりであり、5~6mm<sup>2</sup>程度 の平面が得られた。

表 3 加工によって得られた平面の面積 Table 3 Measuerment result of flat area on bead by polishing

单位(mm <sup>2</sup> )							
試料	N=1	N=2	N=3	平均			
アルミナ	5.36	5.20	5.11	5.2			
ジルコニア	6.31	6.50	6.24	6.3			

接合条件を加圧力 400N、800N、1200N(3条件)、加振時間 1s、 2s、4s、8s(4条件)とし、N=3の接合試験を実施した。結果と して、いずれの接合条件においても接合には至らず、接合改善と はならなかった。

次に、各加圧力における平均出力を比較した。結果を図 15 に示 す。

結果から、いずれの加振材においても、平均出力は加圧力に対 し比例的に増加し、平面加工なしの加振材と比較すると、加圧力 800N以下での上昇率が高いことが分かった。このことから、ビ ーズに平面加工を行うことにより、低加圧条件において、加振時 にビーズの回転を抑制し、接合界面での摩擦状態の改善に高い効 果が得られるものと推察される。



図 15 平面加工したビーズ接合の平均出力

Fig.15 Average output of processed bead joining (a)alumina (b)zirconia

#### <4. 5>インサート材による接合改善

ビーズ単独では A6063 平板と接合には至らなかったため、加振 材と固定材の間~インサート材を挿入することによる接合改善 の可能性を調査した。ビーズの平面加工については、加工なし、 加工ありの2条件とした。

インサート材は純度 99%以上のアルミニウム箔(幅 5mm×長さ 5mm)、厚さ 25µm、50µm、75µm (3 水準)とした。

接合条件を加圧力 400N、800N、1200N (3 条件)、加振時間 8s (1 条件) として、インサート材を挟み込んだ状態で N=1 のビー ズ接合を実施し、接合試験後に A6063 平板およびアルミニウム箔 よりビーズが分離していないものを接合可とした。また、接合強 度は、せん断強度 (MPa) により評価した。

試験方法を図16に示す。補助冶具の穴あけ加工部にビーズを引っ掛け、引張速度1mm/minにて引張りせん断試験を行った。



図 16 ビース接合力の測定方法 Fig.16 Measuring method of bead joining force

接合強度を算出するために必要な接合面積は、<3.4.1>に記載 の手法を用いて、ビーズ表面に移着したインサート材の面積によ り評価した。

表4に、各接合条件における接合可否および接合強度を示す。

結果から、接合に至る水準が確認され、インサート材が厚いほ ど接合可であった場合の強度が高くなる傾向が見られた。特にジ ルコニアでは、加圧力 1200N において 75µm インサート材と平面 加工ありの加振材を組み合わせた条件が最も効果が高く、本接合 条件内では最大となる約 20MPa を示した。

固定材 A6063 平板に対するビーズ接合において、ビーズの平面 加工のみでは接合には至らなかったことから、セラミックスビー ズの接合改善としては純アルミニウムインサート材の使用がよ り有効といえる。ただし、インサート材を用いても平面加工しな ければ強度が低いことや、アルミナが接合し難いことは変わらな いため、強度の向上や接合の安定化のためには、加振材の形状や インサート材の材質の検討が必要と考えられる。

## 表 4 インサート材を用いたビーズの接合結果 Table 4 Result of bead joining with aluminum insert

〇:接合可 ×:接合不可 -:未実施 (数値):接合強度(MPa)								
平面力	ΠI	なし			あり			
インサート材厚さ		25µm	50µm	75µm	25µm	50µm	75µm	
	1200N	×	O(1.8)	×	O(0.6)	O(2.0)	O(4.2)	
アルミナ	800N	×	O(1.3)	×	—	—	—	
	400N	×	×	×	-	—	—	
	1200N	O(1.5)	O(1.6)	O(10.9)	O(1.9)	O(4.4)	O(21.5)	
ジルコニア	800N	O(2.4)	O(2.5)	O(8.2)	—	—	—	
	400N	×	×	×	_	_	_	

#### <4. 6>セラミックス/金属の接合メカニズムの調査

金属/セラミックスの直接接合が可能であることは報告されて いるが、セラミックスと金属がどのようなメカニズムで接合して いるかは明確ではない。本研究において、アルミナビーズ/アル ミニウム合金平板の接合が困難であったことから、この組み合わ せにおける接合性の改善のため、XPS 分析による接合界面の深さ 方向の元素分析を行い、接合のメカニズムの調査を試みた。

<4.6.1>分析用試料作製および分析方法

接合には、表5に示す接合材を用い、アルミニウム/アルミナ 接合系で分析試料を作製した。

アルミニウムの材種については、薄板の入手のしやすさ、およ び軟らかい加振材の使用による接合のしやすさの観点から、 A6063Sの替わりにA1050材を用いることとし、安定的に強固に 接合された接合界面を得るため、アルミナの平面部に接合した。 アルミニウム合金系は異なるが、前述のアルミナビーズ/アルミ ニウム接合系と界面で起きている現象は同じと考えられる。

#### 表5 セラミックスと金属の接合メカニズム分析用材料

Table 5 Materials to analyze joining mechanism of ceramics and metal

接合材	形状	材質(※前処理 等)	寸法(mm)	
加振材	平板	A1050 ※接合直前に水酸化ナト リウムエッチング処理	0.2t × 10W × 50L	
固定材	ワッシャ (平面部)	アルミナ(純度96%) ※EDS分析結果 Al:49wt.% O:49wt.% Si:2wt.% ※表面調整Ra=81nm	3t × 外径20-内径6	

A1050 平板は接合前に水酸化ナトリウム溶液にてエッチング処 理を行い、酸化被膜を除去した。これを、ローレット形状(面4mm ×4mm)のホーンで固定材に対して加圧、加振して接合した。尚、 加圧力が大きすぎる場合、ローレットが加振材を貫通しセラミッ クスと直接接触して接合できなかったため、ここでは加圧力100 ~200N、加振時間2~8s で接合した。

接合の結果として得られた試料を図17に示す。接合条件によっては、あまりに強固で加振材を剥離した際にA1050平板が断裂またはアルミナ表面上に多く残存してしまい、接合界面の分析が困難であったため、アルミナ表面にA1050が薄く、均一に移着していた加圧力100N、加振時間8sの接合界面を分析対象とした。



図 17 超音波接合試験後の試料 Fig.17 Sample after ultrasonic welding test

セラミックス表面の分析にはマイクロX線光電子分光装置(ア ルバック・ファイ(㈱製 Quantum 2000)を用いた。分析においては、 直径 100µm を分析領域とし、エッチング速度(SiO<sub>2</sub>において) 5.18nm/min の条件でアルミナ表面上の A1050 移着面からアルミ ナ側へ向かって原子濃度変化を確認した。

比較試料として、表 5 に示すアルミナワッシャ表面に厚さ 200nm でアルミニウムを蒸着した試料を作製し、同じ分析条件に て、アルミニウム蒸着面からアルミナ側へ向かって原子濃度変化 を分析した。

#### <4.6.4>分析結果と考察

アルミナ表面における A1050 超音波接合界面の原子濃度変化を 図 18(1)に、この図の所定のエッチング時間ごとの Al2p のスペク トルを同図(2)に示す。また、アルミニウム蒸着界面の原子濃度変 化を図 19 に示す。尚、原子濃度変化の図では、いずれもアルミ ナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) とアルミニウム (Al) の組み合わせにつき、Al と O に着目した。

図18(1)より、超音波接合界面では、O 濃度が一旦減少し再び緩 やかな増加に転じたことが分かる。Al についてはこの逆の変化を 示した。初期に酸素濃度が高かったのは、移着した A1050 表面に 自然生成した酸化被膜層を測定したものと考えられる。60min か ら160minにおいては、O 濃度60% - Al 濃度40%で定常となった。 分析終点(160min)の図18(2)(e)においては、金属状態の Al のピ ークは消失し、ほぼ酸化物のピークのみになっていたことから、 固定材であるアルミナ表面にエッチングが達したものと考えら れる。また、移着物中には常に酸化物が存在していた。



一方、アルミニウム蒸着界面は表面にOがほとんど存在しない AI層が現れたのち、超音波接合界面においてアルミナに達したと 判断したときと同濃度であるO濃度 60%-AI濃度 40%に急激に 変化して定常となった。



これらの結果から、超音波接合界面は純粋なアルミニウムを蒸着(密着)させた界面とは明らかに異なっており、接合に酸素が 関係している可能性が高い。アルミニウムとアルミナの超音波接 合において、接合界面近傍で金属 AI が O と反応し、化学結合が 生じて接合されたとする報告<sup>4)</sup>があり、本研究でも超音波接合界 面の分析結果において、O 濃度が深さ方向に緩やかに上昇する領 域が確認されたことから、この領域では加振材の A1050 中の金属 AI にこのような反応が生じたと推測される。ただし、A1050 はエ ッチング処理を行っているが、接合までの間に再度生成された酸 化皮膜や、移着物層の厚さが均一でないために部分的に露出した アルミナの0が分析結果に含まれている可能性もある。

加振材をアルミナ、固定材をアルミ合金とした場合にも、接合 界面での反応は同じ原理と推測されることから、このような反応 を生じるための接合界面での摩擦が行われるのに適した接合条 件を設定することにより、この組み合わせにおいても強固な接合 が実現できると推測される。

## 5. 結言

超音波接合実績のない形状の部品や硬質材料を加振材とした接 合系において、建材分野で多用される Al-Mg-Si 系合金 A6063S-T5 を固定材とし、アルミリベット接合、セラミックスビーズ接合の 可能性を調査した。以下に得られた主な知見を示す。

① アルミリベット接合

- 接合面に振動を伝達可能なホーンを作製し、A6063S 平板 への接合を試みた結果、固定材上の接合位置により、固定 材の振動モードによると推測される接合エネルギーの違いが確認された。
- 高加圧力の条件において接合強度が大きくなり、アルミリベットと同程度の強度が得られた。
- ② セラミックスビーズ接合
  - 接合界面での局所的な接触による接合の可能性を調査するため、セラミックスビーズのA6063S 平板への接合を試みた結果、接合可となる接合条件は見出せなかった。
  - 加振材の回転抑制と接合面積の改善のため、平面加工を行い、A6063S平板への接合を試みた結果、接合可となる接合条件は見出せなかったが、接合エネルギーは改善した。
- 純アルミ箔をインサート材として用いた接合を試みた結果、接合可となる接合条件を確認した。
- ③ セラミックス/金属の接合メカニズム
  - A1050 平板を加振材とし、アルミナの平面部に接合を行った界面を深さ方向に分析した結果、接合時に加振材のA1050 中の金属 AIが Oと反応し、化学結合が生じたと推測される領域が確認された。このような反応を生じるための接合界面での摩擦が行われるのに適した接合条件を設定することにより、加振材と固定材を逆にした組み合わせにおいても強固な接合が実現できると推測される。

文 献

(1) 社団法人日本塑性加工学会 超音波応用加工(2004)
(2)JIS H 4040:2006 アルミニウム及びアルミニウム合金の棒及び線
(3)今井久志、松岡信一:日本機械学会論文集(A 編)、71 巻 709 号 (2005-9)、PP.1270-1275.

(4)渡辺健彦 他:軽金属、第52巻第3号、(2002)、pp.122-125.

# Ⅵ. ウェアラブル電源の開発Ⅱ

Study on Wearable Power Supply II

林 ナ	志	渡辺	涼太	寺澤	孝志	坂	井 雄一
HAYA	SHI Daish	i WATAN	VABE Ryota	TERAS	AWA Taka	shi SAI	KAI Yuichi
本保	栄治	関口	徳朗	杉森	博	岩坪	聡
HONBC	) Eiji	SEKIGUCH	II Noriaki –	SUGIMOR	l Hiroshi	IWATSL	IBO 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 developed the OSC for wearable compact power supply. The characteristics of the OSC were evaluated. As a result, we knew the element technology to manufacture the OSC and to improve of the conversion efficiency. The key points to improve the conversion efficiency were as follows: ITO with porous structure, PAn as buffer layer to transport holes, and the film thickness of the active layer is set to an appropriate thickness. Next, it was found that the annealing of the active layer changed the J-V characteristics of OSC. For the large area OSC on the glass substrate, the maximum value of the efficiency was 0.55%. For the flexible substrate, the efficiency was 0.34%. To evaluate the performance of the power supply, the smart watch of the wearable equipment was charged using a low voltage DC-DC converter and the PET-OSC.

#### 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は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、研究試作おいて2015年には変換効率が11%台に達している<sup>(1)</sup>。一方、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。

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、身体(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、活動量などの記録で 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、OSC の高効率化について検討した。また、緩衝 層材料として新たに PAn の特性を調べ、OSC の大面積化とフレキ シブル化の課題、さらに、ウェアラブル機器用の小型電源の可能 性についても検討した。

#### 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、材料の特性を表1に示す。

OSCは、1組の電極に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。



図1. 有機薄膜太陽電池の構造 Fig.1. Structure of organic thin-film solar cell.

構成要素は、①基板、②ITO 透明電極、③緩衝層、④活性層、⑤ Al 対向電極である。

基板は、ガラス基板 (#7740 コーニング(㈱)、ITO 付きガラス 基板 (10Ω/sq.、ジオマテック(㈱)、ITO 付きペット基板 (20Ω/sq.、 (㈱トービ) を用いた。

透明電極は、ガラス基板上にインジウム錫複合酸化物(Indium Tin Oxide (ITO): 99.99%、(㈱高純度化学研究所)と、スパッタ リング装置(SH-250、日本真空技術㈱)を用いて成膜した。

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**: 1.3wt%水溶液、 Sigma-Aldrich Co. LLC.)、およびポリアニリン (**PAn**: 還元脱ド ープ状態可溶性ポリアニリン粉末、日東電工㈱)を用いた。 活性層には、ポリ(3-ヘキシルチオフェン-2,5-ジイル) (**P3HT**) と、[6,6] -フェニル C61 酪酸メチルエステル (**PCBM**) を用いた。 共に Luminescence Technology Corp.製である。

対向電極は、純アルミニウム(Al: 99.5%、(㈱高純度化学研究所)とアルミ導電テープ(No.791、(㈱寺岡製作所)、カーボンペースト(Dag580、日本チアゾン(㈱)を用いた。

## 表1. 材料特性

Table 1. Characteristics of materials.

要求	OSC特性		製造			ユーザ		
性能 材料	光透 過度	導電 性	仕事関数 バンドギャッ プ (eV)	耐熱 性	耐薬 品性	プロセス	軽量	フレキシ ブル性
①ガラス	0			O	0		$\triangle$	Δ
1)PET	0			0	0		0	0
(2)ITO	0	0	4.8			△真空	0	$\triangle$
③PEDOT —PSS	Δ	0	2.3 ~5.2	Δ		◎スピン コート	0	Ø
③PAn	Δ	Ø	3.0 ~5.3	0	0	◎スピン コート	0	Ø
④P3HT	Δ	Δ	3.0 ~5.3	Δ		◎スピン コート	0	0
<pre>④PCBM</pre>	Δ	Δ	3.8 ~6.1	Δ		◎スピン コート	0	0
(5)Al	×	0	4.3	$\triangle$		△真空	0	Δ
⑤AI導電 テープ		0	4.2					0
⑤カーボン ペースト		Ø	4.5					×

◎:良い、 O:どちらかというと良い、 △:どちらかというと悪い、 ×:悪い

## <2. 2> 有機薄膜太陽電池の動作原理

緩衝層、および活性層に使用した材料を図2(a)に示す。 PEDOT-PSS は、代表的な正孔輸送材料である。PAn も正孔輸送材 料であるが、導電率の調整(アニオンのドーピング)が必要なこ とと導電機構が複雑(正孔のポーラロン伝導)のため、OSC の正 孔輸送層としての用途開発は少ない<sup>(2)</sup>。本研究では、PEDOT-PSS の代替材料としての検討を行った。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。OSC のエネルギー準位を図2(b)に示す。P3HT、PCBM 層で光が吸収され、伝導帯に電子が遷移し、価電子帯には正孔 が生ずる。これが pn 接合界面の電位差で電子と正孔に分離され る。電子は PCBM、AI 電極を経て外部へ取り出される。一方、 正孔は PCBM、P3HT から ITO 電極に達し、電子を受け取る。緩 衝層は、ITO 電極と P3HT の界面で電荷の授受をスムーズに行う ために挿入する。図 2 (c) 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 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 の p 型相と n 型相を混在させるバルクへ テロ型活性層がある。バルクヘテロ型活性層は、電荷キャリア が失活する領域もあるが、OSCの変換効率の観点からは、積層型 活性層と遜色のないものと成っている<sup>(3)、(4)</sup>。本研究では、OSC の活性層はバルクヘテロ型活性層とした。



図 2. (a) 緩衝層、活性層材料、(b) OSC のエネルギー準位、 (c)活性層の構造

Fig. 2. (a) Materials of buffer layer and active layer,

(b) Energy level of OSC, (c) Structure of active layer.

#### <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、アセトンで洗浄した後、プラズマリアク 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、酸素流量 30 mL/min、RF 電力 100W 、処理時間 5 分とし た。

(ITO の成膜) スパッタリング条件は、アルゴン流量 15 standard cc/min、RF 出力 80W とした。作製した ITO 付きガラス基板は、5 Ω/sq.のものと、30Ω/sq.のものである。他に市販品の ITO 付きガ ラス基板 10Ω/sq.を使用した。

(緩衝層の成膜) PEDOT-PSS は、溶液(基板面積に応じた量: 0.04mL/cm<sup>2</sup>)を滴下後、スピンコータ(SC-200、(補押鐘)で塗布 した。条件は、回転数 2500rpm、回転時間 10 秒とした。乾燥は 恒温槽で90℃、10 分行った。

PAn 溶液は、1.5wt%NMP 溶液を 0.22 µ m の PTFE フィルターで ろ過して調整した。塗布、および乾燥条件は、PEDOT-PSS と同じ とした。

PAn 膜はこのままでは、還元脱ドープ状態(絶縁性)であるため、 導電性を発現させるためにドーピングを行う必要がある。

気相ドーピングは、25℃、大気圧下で、密閉容器(1L)によう素 (0.02mol) を入れ 5 分間行った。このときの、抵抗率は  $1.3 \times 10^{-1}\Omega cm$ 、移動度は  $4.6 \times 10^{-1} cm^2/Vs$  であった。

項目	説明					
1. 0SCの構造と使用材料	<2.1>					
2. 0SCの動作原理	<2.2>					
3. 0SCの作成手順						
・基板洗浄	<2.3>					
・ITOの成膜	<2.3>					
・緩衝層 (PAn, PEDOT-PSS) の成膜	<2.3>					
・活性層の成膜	<2.3>					
・A1の成膜(引き出し電極)	<2.3>					
<ul> <li>• 0SCの試作(面積)</li> </ul>	<2.4>					
・OSCの評価方法	<2.5>					
4. 結果および考察						
・ITOの抵抗値 Ψ	<3.1>					
・緩衝層の材料	<3.2>					
・活性層の膜厚Ψ_	<3.3>					
<ul> <li>・活性層の乾燥温度</li> </ul>						
・OSCの特性劣化	<3.5>					
・フレキシブル基板 (PET)	<3.7>					
・ウェアラブル小型電源	<3.8>					

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.

(活性層の成膜) バルクヘテロ型活性層は、P3HT と PCBM の 混合溶液(基板の面積に応じた量:0.04mL/cm<sup>2</sup>)を滴下後、スピ ンコータで塗布し、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%、和光純薬工業㈱)を溶媒として 用いた。溶媒 1mL に、P3HT (15mg) と PCBM (12mg) を溶解 し混合溶液を調整した。混合溶液は、0.22µmのPTFEフィルター で残渣をろ過して使用した。塗布条件は、回転数3500rpm、10秒 とした。乾燥は自然乾燥25℃、30分とした。

(Alの成膜) Al 電極は、高真空蒸着装置(VVS-31599K-03、ア ネルバ㈱) で作製した。条件は、到達圧力 1×10-3Pa、タングステ ンボートによる抵抗加熱、成膜レートは 1nm/秒とし、膜厚は 200nm とした。電極の引き出しは、AI 導電テープを貼り、カーボ ンペーストを塗布することにより行った。

#### <2. 4> 有機薄膜太陽電池の試作

基板(ガラス、PET)は、目的により使い分けた。OSCの評価 は、面積あたりの電流 (mA/cm<sup>2</sup>) で行うため、面積の違う2種の 電極を準備した。試作した OSC の写真を図 4 に示す。面積は、 (a)の特性評価 OSC は 0.50 cm<sup>2</sup>、(b)の大面積 OSC は 10 cm<sup>2</sup> である。変換効率は、PEDOT-PSS、P3HT、PCBM を用いた OSC

(4mm<sup>2</sup>) で 3.2%であること<sup>(3)</sup>と、大面積化では変換効率が低 下する傾向にあることから、大面積 OSC (10cm<sup>2</sup>) で変換効率 1.0% を開発目標とした。



0.5cm<sup>2</sup>

10cm<sup>2</sup>

図 4. 試作した OSC Fig. 4. Prototype OSC.

<2. 5> 有機薄膜太陽電池の評価方法

図 5.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/cm<sup>2</sup> 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㈱)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 5. AM1.5 の太陽光スペクトル Fig. 5. Solar spectrum of AM1.5.

図6(a)に、太陽電池のJ-V 特性を示す。Jsc (mA/cm<sup>2</sup>) は短絡 電流密度、Voc(V)は開放電圧を表す。最大出力点を与えるJ、 VをJmax、Vmax すると、曲線因子 FF は [ (Jmax・Vmax)/(Jsc・ Voc)]で与えられる。100mW/cm<sup>2</sup>で標準化した変換効率 η<sub>n</sub>(%) は、Jsc・Voc・FF で与えられる。

図6(b)に太陽電池の一般的な等価回路を示す。定電流源(Jsc)、 並列ダイオード、並列抵抗 (Rsh)、直列抵抗 (Rs) で表記され る。



#### 3. 実験結果および考察

#### <3. 1> ITO の抵抗値

ITO の抵抗値が 5Ω/sq. (内製品)、10Ω/sq. (市販品)、30Ω/sq. (内 製品)のITO ガラス基板を用いて、大面積 OSC (10cm<sup>2</sup>) [構成: ITO / PAn / 活性層 / Al] を作製し、変換効率を測定した。図 7 に OSC の J-V 特性を、図 8 に <u>ITO の抵抗値と変換効率の関係</u>を 示す。ITO ガラス基板の抵抗値が 10Ω/sq.のとき、変換効率が 0.55% と最も良かった。



図 7. ITO の抵抗値とOSC の J-V 特性 (5Ω/sq.,10Ω/sq.,,30Ω/sq.)

Fig. 7. Resistance of ITO and J-V characteristics of OSC.



図 8. ITO の抵抗値とOSC の変換効率

Fig. 8. Resistance of ITO and conversion efficiency of OSC. この原因を調べるために、ITO 基板の SEM 観察を行った。図 9 に結果を示す。 $10\Omega/sq.$ (市販品)の表面はポーラスな状態であり、  $5\Omega/sq.$ (内製品)、 $30\Omega/sq.$ (内製品)の表面は平坦であった。



ITOの表面状態が、OSCの変換効率に大きな影響を及ぼすことと、 ITO がポーラスな構造となるスパッタリング条件の選択が必要であることが判った。

#### <3. 2> 緩衝層の材料

一般的な緩衝層材料である PEDOT-PSS と、代替材料として検 討する PAn を比較するため、大面積 OSC (10cm<sup>2</sup>) [構成:ITO/ PEDOT-PSS/活性層/Al、および ITO/PAn/活性層/Al] を作 製し変換効率を測定した。図 10 に、緩衝層の SEM 観察結果を示 す。共に 10 $\Omega$ /sq.の ITO 上での画像である。PAn-NMP 溶液は 0.22 $\mu$ m の PTFE フィルターを通過し、均質な膜となった。一方 PEDOT-PSS は、内容物の凝集が見られ PTFE フィルターを通過できなかった。 結果として OSC の特性も良くなかった。分散剤等の添加は不明 であるが取り扱いに注意を要することが判った。



図 10. SEM 画像(PAn、PEDOT-PSS) Fig.10. Images of SEM (PAn, PEDOT-PSS).

図11にOSCのJ-V特性を示す。PAnは成膜後、<2.3>で示したよう素ドーピングを5分間行ったものを用いた。PAnを緩衝層に用いたOSCは、短絡電流密度、開放電圧共に大きく、変換効率は0.55%であった。これは、図2(b)のエネルギー準位で示すように、PAnとP3HTのマッチングがよく電流密度を稼げたことと、PAn膜の均質性によるものと考えられる。以上のことより、PAnは緩衝層材料として使用できることが判った。



Fig.11. Materials of buffer layer and J-V characteristics of OSC.

次に、PAn のよう素ドーピング時間と OSC の変換効率の関係について調べた。図 12、図 13 にその結果を示す。使用した OSC は、特性評価 OSC (0.5cm<sup>2</sup>) である。



図 12. Pan のよう素ドーピング時間とOSC の J-V 特性

Fig.12. Iodine doping time of PAn and J-V characteristics of OSC.





#### <3. 3> 活性層の膜厚

活性層の膜厚を、スピンコータの回転数により調整した。回転

数と膜厚の関係は、500rpm (200nm)、3500rpm (100nm)、6000rpm (40nm) であった。図 14 に活性層の膜厚と J-V 特性の関係を、図 15 に活性層の膜厚と OSC の変換効率の関係を示す。使用した OSC は、特性評価 OSC (0.5cm<sup>2</sup>) である。

図 14 より、膜厚 100nm では変換効率は 0.20%となり最も良かった。電流密度は、膜厚 200nm のものでは極端に低下し、電圧は、 膜厚 100nm のもので良好な値を示した。この現象は、膜厚の増加 に伴う失活の増加、電流密度の減少と、薄膜化に伴う欠陥の増大 と思われた。



図 14. 活性層の厚さと OSC の J-V 特性 (200nm、100nm、40nm)

Fig.14. Tthickness of active layer and J-V characteristics of OSC.



Fig.15. Thickness of active layer and conversion efficiency of OSC.

#### <3. 4> 活性層の乾燥温度

バルクヘテロ型活性層では温度変化により、P3HT と PCMB の 混合状態が変化し、OSC の変換効率に影響すること考えられる。 また、それは経時劣化の1つの要因になると考えられる。そこで 活性層のアニーリングと OSC の変換効率の関係について調べた。 ドライボックス内(露点温度:-30℃以下、酸素濃度:1%未満) で活性層を成膜乾燥後、放置(25℃、10分)またはアニーリング 処理(60℃、10分、100℃、10分)を行った。

図 16 に、アニーリング後の活性層の SEM 観察の結果を示す。共 に [ITO (10Ω/sq.) / PAn] 上の活性層の画像である。図 16 (a) の25℃では、明るいP3HT 相(平均数分子量:約30,000)と暗い PCBM 相(分子量:910)のナノ構造のドメインが確認できた。 また、図9(b)で見た下地のポーラスなITOの影響が窺えるも のであった。図16(b)の60℃では幾分か平坦となり、明暗の コントラストが低下した。図16(c)の100℃では、平坦で均質 となった。アニーリングにより応力が緩和されるものと考えられ る。



図 16. アニーリング後の活性層の SEM 画像 (25°C、60°C、100°C) Fig.16. SEM images of active layer after annealing.

図 17 に、活性層のアニーリングと変換効率の関係を示す。使用 した OSC は、大面積 OSC (10cm<sup>2</sup>) である。25°Cでは電流密度が 低く、電圧が高い。変換効率は、0.55%と最も良い値を示した。 60°Cでは電流密度が高く、電圧が低下した。変換効率は、0.54%と 25°Cと同等の値を示した。図6(b)から、アニーリングにより、直列抵抗 (Rs)、並列抵抗 (Rsh) は共に低下する。定電流源(Jsc) は増加し、並列ダイオードの特性が低下するものと考えられる。





#### <3. 5> OSC の特性劣化

バルクヘテロ型活性層を持つ OSC は、有機物で pn 接合が構成 されているため、Si 系太陽電池に比べ、機能の劣化が著しい。<sup>(5)</sup> 図 18 に、経過時間(初期状態と 1,000 時間経過後)と OSC の変 換効率を示す。1,000 時間後では、25℃、60℃(アニーリング、 10 分)、100℃(アニーリング、10 分)は、それぞれ初期状態時 の変換効率の 13%、13%、62%を維持した。100℃ (アニーリン グ、10 分) では、図 16 (c) で見たように、活性層は平坦で均 質であるため安定しており特性劣化が少なくなったと考えられ る。



図 18. 経過時間とOSC の J-V 特性 (初期状態、1,000h 経過後) Fig. 18. Elapsed time and J-V characteristics of OSC.

<3. 6> OSC の高効率化と特性劣化のまとめ

有機薄膜太陽電池 (OSC) の構成材料の検討を行い、OSC を試 作、特性の評価を行った結果、以下のことが分かった。

- ITO の抵抗値と変換効率の関係では、ポーラスな構造を 持つITO (10Ω/sq.)を用いて作製した大面積 OSC (10cm<sup>2</sup>) の変換効率が 0.55%で最も良かった。
- (2) 緩衝層材料として、PEDOT-PSS と代替材料の PAn を検討した。PAn は、均質な膜を得ることができた。PAn を用いた大面積 OSC では P3HT のエネルギー準位とのマッチングが良く、電流密度 3.2mA/cm<sup>2</sup> を得た。以上のことより、PAn は緩衝層材料として使用できることが判った。
- (3) PAn のよう素ドーピング時間と特性評価 OSC (0.5cm<sup>2</sup>) の変換効率の関係では、ドーピング時間が 5 分のとき変 換効率が 0.24%と最も良かった。
- (4) 活性層の膜厚と特性評価 OSC (0.5cm<sup>2</sup>)の変換効率の関係では、膜厚が100nmのとき変換効率が0.20%と最も良かった。
- (5) 活性層のアニーリングと変換効率の関係では、25℃(室温乾燥)のとき変換効率が0.55%と最も良い値を示した。 60℃(アニーリング)のとき変換効率が0.54%で25℃のときと同等の値を示した。
- (6) 大面積 OSC (10cm<sup>2</sup>) の変換効率の初期状態と1,000 時間
   経過後での比較では、活性層をアニーリング (100℃、10分) した OSC で、初期状態時の変換効率の 62%を維持した。

#### <3. 7> フレキシブル基板 (PET 基板)

ITO 付き PET 基板 (20Ω/sq.) を用いて大面積 PET-OSC (10cm<sup>2</sup>) を作製し、変換効率を測定した。作製手順は、<2.3>、<2.4> のとおりである。図 19 に大面積 PET-OSC の概観を、図 20 に PET-OSC と OSC (ガラス基板) の J-V 特性を示す。PET-OSC の 変換効率は 0.34% であり、OSC より劣るものの、OSC の 6 割程度 の変換効率を確保できた。



図 19. 大面積 PET-OSC の概観 Fig.19. Overview of large area PET-OSC.



## <3. 8> ウェアラブル小型電源

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。 ウェアラブル機器として心拍数や運動量を測定できるスマート ウオッチ (M430、POLAR 製)を、低電圧 (0.3V)を5Vまで昇 圧できる DC-DC コンバータモジュール (TPS61200、Texas Instruments 製)を、電源として本研究で開発した OSC、または PET-OSC を用いて、スマートウオッチに内臓のリチウムイオンバ ッテリー (250mAh)に充電する実験を開始した。図21 に PET-OSC によるウェアラブル機器への充電を示す。大型 OSC、大型 PET-OSC の発電量は、それぞれ 5.4mW、3.0mW 程度であり、詳 細な検討は今後の課題となった。



図 21. PET-OSC によるウェアラブル機器の充電 Fig.21. Charging wearable equipment with PET-OSC.

## 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。

OSC の高効率化では、ITO の抵抗値と変換効率の関係、PAn が 緩衝層材料として使用できること、PAn のドーピング時間と変換 効率の関係、活性層の膜厚と変換効率の関係、活性層のアニーリ ングと変換効率の関係、OSC の特性劣化について知見を得た。

OSC のフレキシブル化では、PET-OSC の変換効率はガラス基 板の OSC よりも劣るものの 6 割の変換効率を得ることができ た。

ウェアラブル小型電源の検討では、ウェアラブル機器、低電圧 DC-DC コンバータ、本研究で開発した OSC、PET-OSC を用いて、 ウェアラブル機器への充電を検討した。まだ、研究段階ではある が、ウェアラブル小型電源の実現に向け多くの知見を得ること ができた。

文 献

- National Renewable Energy Laboratory(NREL), https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png
- (2) Saoudi M., Ajjel R., Zaidi B., J. Mater. Environ. Sci. 7 (12) (2016) 4435-4447.
- (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) 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)
- (5) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/results/past\_presentation/2010/ 13Yamanari.pdf

## Ⅲ.厚膜型圧電振動発電素子の開発に関する研究−Ⅲ

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

櫻井 雅崇	坂井 雄一	寺澤 孝志	西村 克彦
SAKURAI Masataka	SAKAI Yuichi	TERASAWA Takashi	NISHIMURA Katsuhiko

## Abstract

An energy harvesting (EH) technique using piezoelectric devices which generate electric power from vibration energy in a surrounding environment was extensively studied for a power source of mobile devices and wireless sensor networks. We have studied the vibration energy harvester (VEH) elements using lead zirconate titanate (PZT) thick films by a screen printing method. However, the size of the VEH elements (26 × 4 mm<sup>2</sup>) used for the performance evaluation previously was too small to drive wireless nodes. In addition, the preparation process was complex. In this study, we aimed to enlarge the VEH element size sufficient to drive wireless sensor nodes and to simplify the preparation process of VEH elements. The VEH element size was increased by improvement of screen-printing condition and paste rheology. Maximum output power of the upsized VEH elements (26 × 75 mm<sup>2</sup>) and the conventional elements were approximately 701 and 18.1µW, respectively. The number of firing process was reduced from five times to one time for the VEH elements prepared on Ytria stabilized zirconia (YSZ) and Inconel substrates. The maximum output power of the VEH elements successfully drove wireless sensor node without battery by using the vibration of a rotary pump.

## 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さ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、モノのインターネット「Internet of Things (IoT)」のように無 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、無線 通信やセンサ素子の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では、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。そのなかでも我々は振動エネルギーを利用した発電に着 目した。振動を電力に変換する方法には、永久磁石・コイル、エレ クトレット、逆磁歪・コイルなどがあるが、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、厚膜等あるがこれまでパタ 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形成について 検討してきた。

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 ジルコニアと金属基板インコネル 600 を基板に用いた圧電厚膜素 子の作製に成功した。しかしながら、作製した素子は、サイズが 小さいために十分な発電量が得られず、エネルギーハーベスタと して用いるためには、素子の大面積化が必要であった。また、イ ンコネルを用いた場合、焼成によって基板が酸化し劣化していく ため、焼成回数を低減させることが必要であった。

そこで、本研究では、①大面積基板によって出力電力を増大さ せ、エネルギーハーベスタとして用いること、②熱履歴を小さく するために焼成の省工程化を行うことを目的とし、金属基板を用 いたエネルギーハーベスタを作製することを目標とした。

#### 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

<2.1.1> 各層焼成での厚膜作製

圧電材料のペーストは、ハード系 PZT 粉末、溶剤、分散剤、エ チルセルロース系のビヒクルを混合、三本ロールで混練すること で作製した。

厚膜の作製手順を図1に示す。基板には、セラミックス基板を



Fig. 1. Preparation process of piezoelectric thick films.

使用した。セラミックス基板材料としては、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)を用いた。基板サイズは、縦幅 16 mm、横幅 2 mm 厚み 0.2 mm の小型基板と、縦幅 76 mm、横幅 22 mm 厚み 0.2 mm の大型 基板の 2 種類を用いた。電極には Ag 粉と Pd 粉が Ag:Pd=8:2 の 割合で含まれるペーストを用いた。基板に各々の Ag-Pd ペースト をスクリーン印刷し、1050 ℃で焼成し下部電極とした。さらにハ ード系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℃で脱バインダをした後、1050 ℃で焼成を行った。この 印刷→脱バインダ→焼成の工程を 3 回繰り返し圧電体の厚膜を厚 くしていった。圧電体厚膜形成後、Au ペーストをスクリーン印刷 し、850 ℃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 ℃、2 kV/mm で 5 分間の分極処理を行い、特性を評 価した。

圧電厚膜振動素子の構成を図 2 (a)に示す。焼成後の厚みは上部 電極が約 10 μm、圧電材料が 30~50 μm、下部電極が約 10 μm であ った。作製した素子の写真を図 2(b)に示す。



図 2.(a) 圧電厚膜振動素子の模式図と(b) 作製した大基板(76×22×0.2 mm<sup>3</sup>)圧電厚膜振動素子と小基板(16×2×0.2 mm<sup>3</sup>)圧電厚膜振動素子の写真

Fig. 2. (a) Schematic image of a piezoelectric thick film and (b) photographs of the prepared piezoelectric thick films with the large base plate ( $76 \times 22 \times 0.2 \text{ mm}^3$ ) and the small base plate ( $16 \times 2 \times 0.2 \text{ mm}^3$ ).

#### <2.1.2> 複数層同時焼成での厚膜作製

複数層同時焼成の検討においては、基板に YSZ 基板、インコネ ル 600 (以下インコネルと省略) 基板、42 インバー (以下インバ ーと省略) 基板を使用した。基板サイズは、縦幅 16 mm、横幅 2 mm 厚み 0.2 mm の小型基板と、縦幅 76 mm、横幅 22 mm 厚み 0.2 mmの大型基板の2種類のサイズを用いた。下部電極には Ag:Pd =8:2 の割合で含まれるペーストを用いた。上部電極には、Au も しくは、Ag-Pd を用いた。

#### (a) 省工程 A

基板に Ag-Pd ペーストをスクリーン印刷し 1050 ℃で焼成した 後、圧電材料ペーストを印刷、乾燥の工程を 2 回繰り返した。そ の後 1050 ℃で焼成し、さらに、圧電材料ペーストを印刷、乾燥を 2 回繰り返した後、550 ℃で脱バインダ、1050 ℃で焼成した。圧 電体厚膜を形成後、Au ペーストをスクリーン印刷し、850 ℃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 ℃、 2 kV/mm で 5 分間の分極処理を行い、特性を評価した。この工程 を省工程 A とした。総焼成回数は各層焼成の方法よりも1 回少な い4 回である (図 3 (a))。



図 3.複数層同時焼成での圧電厚膜振動素子作製手順 (a)省工程 A および(b)省工程 B

Fig. 3. Preparation processes of piezoelectric thick films: (a) simplifying process A and (b) simplifying process B.

## (b) 省工程 B

基板に Ag-Pd ペーストをスクリーン印刷し乾燥、さらに圧電材 料のペーストを重ねてスクリーン印刷し乾燥した。この印刷⇒乾 燥の工程を3回繰り返した。圧電材料のペーストの上にさらに Ag-Pd ペーストをスクリーン印刷、乾燥後、550 ℃で脱バインダ、 1050 ℃で焼成することで下部電極、圧電体、上部電極を一括で焼 成した。各電気特性を測定後、120 ℃、2 kV/mm で5 分間の分極 処理を行い、特性を評価した。この工程を省工程 B とした。総焼 成回数は各層焼成の方法よりも4 回少ない1 回である(図3 (b)。

## <2. 2>評価方法

作製した圧電体厚膜は焼成後に Scanning Electron Microscope (SEM) 観察および Electron Probe Micro Analysis (EPMA) (JSM-6610LA、日本電子(株)) による元素分析を行なった。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、 1 kHz での静電容量 C、 $\tan\delta$  を測定し、更に静電容量 C、厚膜厚 み、電極面積から比誘電率 なを計算した。振動板の圧電定数 $d_{31}$ は、 分極後の振動板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<sup>2</sup>。

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

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、 $\delta$ : 変位、V: 印加電圧である。厚膜の圧電定数 $g_{31}$ は、以下 の式から算出した。

(2)

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\varepsilon_r \varepsilon_0}$$

ここで d31: 圧電定数、&: 比誘電率、&: 真空の誘電率である。

作製した振動板に種々の質量の錘を取り付け、下部電極および 上部電極から配線を引き出し、振動試験機(F-16000BDH/SLS16、 EMIC㈱)に固定し、加速度 0.5G で振動させた。図4に、出力電 圧測定時の模式図を示す。振動板から引き出された配線をオシロ スコープに接続し、共振周波数での負荷抵抗毎の出力電圧を測定 し出力電力を見積った。



## 図 4. 出力電圧および出力電力測定系の模式図 Fig. 4. Schematic diagram of the measurement system for output power.

無線通信実験で用いたシステム構成を図 5 に示す。通信には、 無線センサネットワークキット TWE-WSN-002(東京コスモス電 機)を用いた。評価には振動源として回転ポンプ(G-100D、㈱ ULVAC)や振動試験機を用いて測定を行った。接続されるマイコ ンを動作させるためには、定電圧での駆動が必要となる。今回使 用する圧電体を用いた発電では出力が交流であるため、直流に変 換しさらにコンデンサに蓄電する低電圧出力の電源 IC が必要と なる。電源 IC には LTC3588-1(リニアテクノロジー)を用いた。 無線タグ TWE-WSN-002(東京コスモス電機)は、温湿度センサを 搭載しており、取得した温湿度データを無線で送信することがで きる。



図 5. 無線通信システムの概略図および外観写真 Fig. 5. Block diagram and photographs of the radio communication system.

## 3. 実験結果

<3.1> 印刷用圧電材料ペーストの検討

昨年度まで用いていた印刷用圧電材料ペーストでは大基板を 用いて印刷すると、多数の穴が見受けられ、均一な印刷ができな かった。そこで、印刷用圧電材料ペーストの組成比を検討した。 その結果、図6に示すように昨年度までの印刷用圧電ペーストと 比較して、粘度を低下させることで、均一な印刷が可能となった。



#### Fig. 6. Shear rate and viscosity of the printed piezoelectric pastes.

#### <3.2> 素子の大面積化の検討

圧電振動素子を $2 \times 26 \times 0.2 \text{ mm}^3$ と $22 \times 76 \times 0.2 \text{ mm}^3$ の基板を用いて作製した。以下、試料名は総焼成回数、使用した基板、基板サイズに応じて、総焼成回数-基板種類-サイズSorLと記載する。例えば、総焼成回数5回、YSZ基板、 $2 \times 26 \times 0.2 \text{ mm}^3$ サイズの試料であれば5F-YSZ-S、総焼成回数5回、YSZ基板、 $22 \times 76 \times 0.2 \text{ mm}^3$ サイズの試料であれば5F-YSZ-L のように記載することとする。作製した圧電振動素子の電気特性を表1に示す。比誘電率  $\epsilon_r$ および tano は小基板および大基板においてほぼ変わらなかった。

図7に圧電振動素子の出力電力を測定した結果を示す。5F-YSZ-Sと5F-YSZ-Lの負荷抵抗毎の出力電圧を図7(a)に示し、負荷抵抗 毎の出力電圧から出力電力を計算した結果を図7(b)に示す。5F- YSZ-S は共振周波数 120 Hz、330 k $\Omega$  の負荷抵抗において最大発電 量 18.1  $\mu$ W であった。5F-YSZ-L は共振周波数 35.9 Hz、33 k $\Omega$  の負 荷抵抗において最大発電量 701  $\mu$ W であり、その差は約 39 倍であ った。圧電振動素子の面積はおおよそ 40 倍であることから、最大 発電量の差は素子の面積によるものと考えられる。

	長1.圧電振動素子(小基板・大基板)の電気特性	-
4		

	Table 1. Electric properties of the plezoelectric vibration devices.							
	試料	サイズ	٤ <sub>r</sub>	tanδ	最大発電量	無線通信		
		(mm²)		(%)	(µW)			
	5F-YSZ-S	2 × 26	613	0.8	18.1	×		
	5F-YSZ-L	22 × 76	669	0.9	701	0		
1								



図 7.(a)負荷抵抗毎と出力電圧および(b)負荷抵抗と出力電力の関係 Fig. 7. (a) Output voltage and (b) output power versus load resistance.

SF-YSZ-S および SF-YSZ-L を用いて無線通信が可能かどうかを 検討した。その結果、SF-YSZ-L は 0.5 G の加速度において無線通 信が可能であった。一方で、SF-YSZ-S では、無線通信を行うこと はできなかった。基板サイズを大きくしたことにより発電量が増 大し、無線通信が可能となった。SF-YSZ-L の無線通信時の温度お よび湿度の測定データを図8に示す。30秒間隔で温度、湿度のデ ータを取得し、無線でのデータ送信が行われた。1時間のデータ通 信を確認したが、データの欠落や受信強度の低下は見られなかっ た。

## <3.3> 複数層同時焼成についての検討

各層焼成と複数層同時焼成(省工程Aおよび省工程B)につい て、YSZ 基板、インコネル基板、インバー基板を用いて圧電体厚 膜を作製し、電気特性を測定した。その結果を表2に示す。4F-YSZ-S および 1F-YSZ-S は、それぞれ YSZ 小基板を用いた省工程A お よび省工程Bで作製した試料を示し、それぞれの比誘電率は600



図 6. 5F-15Z-L の無報通告試験におりる温度および速度データ Fig. 8. Temperature and humidity data of a radio communication system using the 5F-YSZ-L sample.

~700 で、tanδ は 2%以下と問題の無い値であることから、複数層 同時焼成工程でも圧電体厚膜が作製可能であることが分かった。 また、YSZ 大基板上に省工程 B で作製した試料 IF-YSZ-L の比誘 電率は 531 と他よりやや低いものの、強誘電性を示すことが分か った。省工程 A でインコネル基板上に作製した 4F-INC-L 場合、 基板から圧電体の層が剥離した。4F-INC-L の試料断面の反射電子 像および EPMA による断面の元素マッピングの結果を図 9 に示 す。元素マッピングでは白色に近いほど着目元素が多いことを示 している。インコネル基板と Ag-Pd 電極層の間に、20 μm 程度の Ni、Cr、Fe の酸化物層の存在を示唆している。この酸化物層が崩 れやすい層となったことで剥離したと考えられる。

表 2. 各層焼成と複数層同時焼成での圧電振動素子の電気特性 Table 2. Electric properties of the piezoelectric vibration device.

Table 2. Electric properties of the piezoelectric vibration device.								
試料	工程	基板種類	サイズ	٤ <sub>r</sub>	tanδ			
			(mm²)		(%)			
5F-YSZ-S	各層焼成	YSZ	2 × 26	613	0.8			
5F-YSZ-L	各層焼成	YSZ	22 × 76	669	0.9			
4F-YSZ-S	省工程A	YSZ	2 × 26	663	0.5			
1F-YSZ-S	省工程 B	YSZ	2 × 26	679	1.5			
1F-YSZ-L	省工程 B	YSZ	22 × 76	531	0.9			
4F-INC-L	省工程A	インコネル	22 × 76	剥	離			
1F-INC-L	省工程 B	インコネル	22 × 76	348	0.5			
1F-INV-L	省工程 B	インバー	22 × 76	溶	解			

4F-INC-L では剥離が見られた一方で、IF-INC-L では剥離するこ となく電気特性を測定することができた。これは、焼成回数が合 計で4回の省工程Aに比べて焼成回数が1回の省工程Bでは、熱 履歴が小さく、Ni、Cr、Feの酸化物層が省工程Aほど厚くは形 成されなかったことによるものと考えられる。しかしながら IF-INC-L の比誘電率は 348 と比較的低い値であり、熱が十分かかっ ていない分、PZTの焼結が進まないためと推測される。また、イ ンバー基板を用いた試料は省工程Bでも基板が溶解した。図10に SF-YSZ-L、IF-YSZ-L、IF-INC-Lのそれぞれの断面SEM像を示す。 SF-YSZ-L および IF-YSZ-L は下から YSZ 基板、Ag-Pd 電極、PZT、 Au もしくは Ag-Pd 電極の順に積層されていることが分かる。PZT 層は、結晶粒が密に詰まっておらず穴が散見された。印刷条件や 焼成条件を改善することで、より密で特性が良い圧電振動素子が 作製できると考えられる。一方、1F-INC-L はインコネル基板と Ag-Pd 電極の間に、図9 に示した 4F-INC-L ほどではないが、酸化物 層が存在していることが分かった。この酸化物の存在によって、 比誘電率は 348 と他の試料よりも低い誘電率を示したと考えられ る。1F-INC-L の PZT の層は 5F-YSZ-L や IF-YSZ-L と同様に穴が 散見されたが、強誘電体特性を示しており、これまで作製するこ とができなかったインコネル基板を用いての大面積圧電厚膜素子 を作製できることが分かった。



図 9. 4F-INC-L 断面の反射電子(COMPO)像と元素マッピング結果 Fig.9. Reflected electron image and elemental images of cross section for 4F-INC-L.



図 10. 5F-YSZ-L、1F-YSZ-L、1F-INC-L の断面 SEM 像 Fig.10. Cross sectional SEM images of 5F-YSZ-L, 1F-YSZ-L, and 1F-INC-L.

## <3. 4> 発電特性

試料 5F-YSZ-L、IF-YSZ-L、IF-INC-L の-g<sub>31</sub> 定数および-d<sub>31</sub> 定数をそれぞれ測定した結果を表3に示す。-g<sub>31</sub>と-d<sub>31</sub>の値は5F-YSZ-L、IF-INC-L でそれぞれ9.9、6.8、7.9 Vm/N と 54、32、24 pm/V であり、-g<sub>31</sub> および-d<sub>31</sub> において、5F-YSZ-L の試料がどちらも最も高い値を示した。各層焼成の方法で作製した試料の方が、複数層同時焼成の方法より圧電特性は高いことが分かった。これは、焼成回数が多くなることで、圧電体の結晶の成長が進み特性が高くなったためと推測される。YSZ 基板およびインコネル基板を用いて省工程Bの方法で作製した 1F-YSZ-L および 1F-INC-L の試料の-g<sub>31</sub> および-d<sub>31</sub> は同程度であった。

表3. 圧電特性と発電量 Table 3. Piezoelectric specification and output power

					a ponoi.
1	≡÷±₩3	~	d	最大発電量	最大発電量
	市八个十	<b>-9</b> 31	- <b>u</b> <sub>31</sub>	(錘なし)	(錘あり)
		(Vm/N)	(pm/V)	(µW)	(µW)
	5F-YSZ-L	9.9	54	453	701
	1F-YSZ-L	6.8	32	250	564
	1F-INC-L	7.9	24	136	226

圧電厚膜振動素子に錘をつけずに発電試験を行った結果を図11 に示す。5F-YSZ-L、1F-YSZ-L、1F-INC-Lはそれぞれ18、18、33

kΩの負荷抵抗の時に最大電力量を示し、その値はそれぞれ 453、250、136 μW であった。-d<sub>31</sub> 定数が高いほど最大発電量が大 きくなった。錘を圧電厚膜振動素子の先端に取り付けた時の共振 周波数と最大電力量を図 12、13 にそれぞれ示す。錘が重くなる にしたがい、共振周波数は低くなった。片持ち梁の共振周波数と 錘の重さの関係を示す(3)、(4) 式から算出した値と実測値を表4 に示す。実測値と計算値はおおむね一致した。

$$f_{0} = \frac{1}{2} \sqrt{Eab^{3} \frac{1}{m} \frac{1}{l^{3}}}$$
(3)  
$$m = m_{0} + \frac{33}{140} m_{1}$$
(4)

ここで $f_0$ : 共振周波数、E: 梁のヤング率、l: 固定端から重心 までの距離、 $m_0$ : おもりの質量、 $m_1$ : 梁の質量、a: 梁の幅、b: 梁の厚みである。



図 11. 5F-YSZ-L、1F-YSZ-L、1F-INC-L の発電電力量(錘無し)と負荷抵抗の関係

Fig. 11. Relationship between output power and load resistance of 5F-YSZ-L, 1F-YSZ-L, and 1F-INC-L (weight 0 g).



Fig.12. Relationship between resonance frequency and weight.



Fig. 13. Relationship between maximum output power and weight.

錘をつけたときの最大発電量は、5F-YSZ-L、1F-YSZ-L、1F-INC-L で、それぞれ0.24、0.87、0.87gの時に701、564、226μW であった。錘が重くなるほど最大の発電量は大きくなった。5F-YSZ-L の試料に0.24gより重い錘を取り付けた場合は、振幅量が 大きくなり破壊する恐れがあったため測定は行わなかった。1F-YSZ-L、1F-INC-Lにおいては0.87gより重い錘の場合、破壊の危 険性があり断念した。錘が重くなるにしたがい、共振周波数は低 下し、最大の発電量は増加するが、振幅が大きくなりすぎるため に、破壊する恐れがあることが分かった。

表 4. 実測値と計算値の共振周波数 Table 4. Measured resonance frequency and calculated resonance frequency

ilequency.				
試料	錘の質量	共振周波数 実測値	共振周波数 計算値	
	(g)	(Hz)	(Hz)	
5F-YSZ-L	0	42.5	43.6	
5F-YSZ-L	0.24	35.9	35.9	
5F-YSZ-L	0.87	27.7	26.4	
1F-YSZ-L	0	37.9	43.6	
1F-YSZ-L	0.24	32.4	35.9	
1F-YSZ-L	0.87	23.8	26.4	
1F-INC-L	0	32.2	40.2	
1F-INC-L	0.24	27.6	34.0	
1F-INC-L	0.87	21.5	25.7	

<3.5> ガラスエポキシ樹脂に包埋した素子の発電特性

エネルギーハーベスタとしての強度を向上させ、使用帯域を広 げることを目的として、5F-YSZ-L、1F-YSZ-L、1F-INC-Lをガラス エポキシ樹脂に包埋した素子を作製した。ガラスエポキシテープ で圧電振動素子を挟み込み、加圧プレス(120 °C、0.4 MPa、20 min) の後、本硬化(150 °C、60 min)し、再度分極(120 °C、2 kV/mm、 5 min)を行った。

5F-YSZ-L の試料のガラスエポキシ樹脂包埋前後の周波数と出 力電圧の関係(錘無し・負荷抵抗無し)を図14に示す。ガラスエ ポキシ樹脂包埋前の半値全幅は1.5Hzであったのに対し、包埋後 は4.5Hzまで広がることが分かった。また、共振周波数は42Hzか ら78 Hzまで高くなった。これは、ガラスエポキシ樹脂に包まれ ることにより、全体の厚みが増大したためである。しかしながら、



図 14. 試料 5F-YSZ-L のガラスエポキシ樹脂包埋(a) 前と(b)後の周波 数と出力電圧の関係

Fig. 14. Relationship between output voltage and frequency of 5F-YSZ-L(a) before (b) after glass epoxy resin packing.

出力電圧は包埋前後で 14 Vp-p から 3.1 Vp-p まで減少した。これ は、ガラスエポキシ包埋による拘束の影響で振動させた時の振幅 量が小さくなったことによる。

ガラスエポキシ樹脂に包埋した圧電厚膜振動素子に錘をつけず に発電試験を行った結果を図 15 に示す。5F-YSZ-L、1F-YSZ-L、 1F-INC-L はそれぞれ 10、10、18k $\Omega$ の負荷抵抗の時に最大電力量 を示し、その値はそれぞれ 42、42、21  $\mu$ W であった。錘を圧電厚 膜振動素子の先端に取り付けた時の共振周波数と最大電力量を図 16、17 にそれぞれ示す。錘が重くなるにしたがい、共振周波数は 低くなった。7.6 g より重い錘を取り付ける場合、素子の破壊のお



図 15. ガラスエポキシ樹脂に包埋した 5F-YSZ-L、1F-INC-Lの発電電力量(錘無し)と負荷抵抗の関係

Fig.15. Relationship between output power and load resistance of 5F-YSZ-L, 1F-YSZ-L and 1F-INC-L (weight 0 g).



図 16. ガラスエポキシ樹脂に包埋した 5F-YSZ-L、1F-YSZ-L、1F-INC-L の共振周波数と錘の質量の関係

Fig. 16. Relationship between resonance frequency and weight of 5F-YSZ-L, 1F-YSZ-L and 1F-INC-L after glass epoxy resin packing.



図 17. ガラスエポキシ樹脂に包埋した 5F-YSZ-L、1F-YSZ-L、1F-INC-Lの最大発電量と錘の質量

Fig. 17. Relationship between maximum output power and weight of 5F-YSZ-L, 1F-YSZ-L and 1F-INC-L after glass epoxy resin packing.

それがあったため測定は行わなかった。ガラスエポキシ樹脂に包 埋することで、発電可能な周波数は広がり、包埋前より大きい錘 を載せることもできたが、最大の発電量は5F-YSZ-L、IF-YSZ-L、 IF-INC-L でそれぞれ 180、170、77μW であり、包埋前の発電量を 大きく下回った。

#### <3. 6> 無線通信実験

試料 5F-YSZ-L、1F-YSZ-L、1F-INC-L のガラスエポキシ樹脂包 埋前後の試料について、無線通信実験を行った。振動源に回転ポ ンプを用い2min ごとに無線通信を行うことができたかどうかで 無線通信の可否を判断した。その結果を表5に示す。5F-YSZ-Lの 試料において無線通信が可能であったことから、大面積化したこ とにより昨年度までの小型基板ではできなかった回転ポンプを用 いての無線通信が可能であることが分かった。また、これまでお こなってきた各層焼結の方法だけでなく、省工程 B によって作製 された試料がエネルギーハーベスタとして利用することができる ことがわかった。また、5F-YSZ-Lの試料だけではあるが、ガラス エポキシ樹脂に包埋することで強度を増大させた試料でもエネル ギーハーベスタとして使用が可能であった。金属基板であるイン コネル基板を用いた 1F-INC-L においても、エネルギーハーベスタ として利用することができた。IF-INC-Lの振動発電によって得ら れた電力で無線通信を行い測定された温湿度の結果を図 18 に示 す。データの欠落は見られず安定して電力を供給することができ ることが確認できた。

	表 5.	圧電厚膜振動素子の無線通信結果
5	Padio commi	inication test results using the niezoelectric

Table 5. Radio communication test results using the piezoelectric thick film vibration devices.

試料	カラスエホキシ包埋の有無	無線通信
5F-YSZ-L	無	0
5F-YSZ-L	有	0
1F-YSZ-L	無	0
1F-YSZ-L	有	×
1F-INC-L	無	0
1F-INC-L	有	×



Fig. 18 Measured temperature and humidity data by the radio communication test using 1F-INC-L.

以上の結果から、目標としていた金属基板を用いてのエネルギ ーハーベスタの作製が可能であることが確認できた。YSZ のよう な高価な基板を用いずに、エネルギーハーベスタを作製すること ができただけでなく、焼成の工程を5回から1回に低減させるこ とが可能であることが分かった。これは、製造コストの大幅な低 減のみならず、焼成に必要な電力すなわち環境負荷を大幅に低減 することができるということを意味している。

#### 4. 結言

スクリーン印刷を利用して圧電体厚膜を形成し、エネルギーハ ーベスタ素子を作製したところ、以下の結果が得られた。

・昨年度までの基板よりも大型の基板を用いて圧電厚膜振動素子 を作製した。

・作製された大型の圧電厚膜振動素子を用い、エネルギーハーベ スタとしての動作を確認した。

・各層ごとに焼成を行う従来の作製方法に対して、焼成を一括し て行う手法で圧電厚膜振動素子を作製し、エネルギーハーベスタ としての動作を確認した。

・インコネル基板を用いて圧電厚膜振動素子を作製し、エネルギ ーハーベスタとしての動作を確認した。

・発電特性を向上させるために、PZTの細密化を行うこと、およびインコネル基板の酸化の抑制が今後の課題である。

文 献

- (1) 今井航平 他, 平成 28 年度若い研究者を育てる会研究発表会 研究論文集, pp. 1
- (2) I. Kanno et al., Sensor and Actuators A 107 (2003) pp. 68

「有機無機ペロブスカイト太陽電池の開発」グループの研究活動風景





「複合化樹脂粉を用いたレーザ塗装」グループの研究活動風景





「X線CTの形状計測および変形評価への応用」グループの研究活動風景





「工具寿命の機上検出手法に関する研究」グループの研究活動風景





「超音波接合における接合材の振動特性に関する研究」グループの研究活動風景





「ウェアラブル電源の開発-Ⅱ」グループの研究活動風景





「厚膜型圧電振動発電素子の開発に関する研究−Ⅲ」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

○ 31年間の研究テーマ数:197テーマ(昭和62年度~平成29年度)
 ○ 参加研究員延べ人数:370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)

- 複合材料の開発-金属粉末・樹脂複合材料による射出成形用簡易金型材料の開発
   竹本要一(㈱タカギセイコー)、田上輝次(東洋化工㈱)、長柄 勝(長柄鉄工㈱)
   ⑥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)
- 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)
   ⑥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)
   ⑥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)

- 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)
   ⑥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)
   ⑥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)
- Co-Metal系アモルファス軟磁性薄膜に関する研究 越浜哲夫(㈱不二越東富山製鋼所)
   ②指導機関:工業技術センター富山研究所(現機械電子研究所)
- 4. 樹脂・ファイバー複合材バネに関する研究
   池田秀雄(㈱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)
   ②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㈱)、水谷里志(立山電化工業㈱)、山田義昭(東洋化工㈱)、 宮沢進一(吉田工業㈱、現YKK㈱黒部工場)、山本直樹(NKK(日本鋼管㈱)富山製造所) ◎指導機関:工業技術センター富山研究所(現機械電子研究所)
- 6. 障害者のための学習機能を有するマンマシンシステムの研究〜機能的電気刺激のための上肢機能シミュレー タの研究開発

古瀬正浩(㈱インテック)、堀井 孝(エルコー㈱、現コーセル㈱) ◎指導機関:高志リハビリテーション病院

## ☆平成元年度(第3回)研究テーマと研究参加者(6テーマ、19名)

- 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)
   ②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) ⑥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)

- 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(㈱))
   ⑥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㈱)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- **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)
   ⑥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(株))、堀登紀男((株和泉電気富山製作所)
   ◎指導機関:富山大学工学部

7. 障害者のための学習性を有するマンマシンシステムの研究〜完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究 土田隆一(立山科学工業㈱) ◎指導機関:高志リハビリテーション病院

## ☆平成3年度(第5回)研究テーマと研究参加者(7テーマ、14名)

- 1. 強誘電体薄膜の応用に関する研究~光書き込み型メモリの開発
   玉川 勤(北陸電気工業㈱)
   ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 2. 仕上げ面粗さ自動測定装置の開発に関する研究 桜栄和則(㈱タカギセイコー)、田村正行(吉田工業㈱、現YKK㈱)、柳原 潔(㈱黒田精型) ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
- 3. 画像による円筒内面検査装置の開発 荒木満男(㈱タナカエンジニアリング)、西浦慎一(㈱タカノギケン)、 山本達生(エルコー㈱、現コーセル(㈱) ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- **1. 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㈱)
   ⑥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㈱)
   ②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)

- 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
- 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(㈱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) ②指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 4.透明プラスチックス製品の欠陥検査装置の開発
   大岩秀徳(三協アルミニウム工業㈱)、長峰浩幸(㈱タカギセイコー)、本堂 裕(㈱斎藤製作所)
   ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 5. 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㈱) ◎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)

- 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))
   ②指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 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)
   ⑥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(㈱タカギセイコー)、堀田正人(東洋化工㈱) ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 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㈱)、山口 睦(燐化学工業㈱)
   ③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㈱)、中村和禎(㈱タカギセイコー) ③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㈱)
   ③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)

- 視覚システムを持つ移動ロボットの開発
   小山直人(㈱タカギセイコー)、寺本正夫・杉谷健(コーセル㈱)、
   中村厚平(エヌアイシ・オートテック㈱)、松田英雄(㈱タナカエンジニアリング)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 2.機能性薄膜と半導体の複合素子の開発 高柳 殻(コーセル(株))、田村雅英(北陸電気工業(株)) ②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(燐化学工業㈱)
   ③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㈱)、福本 滋(北陸電気工業㈱)、三松克次(㈱タカギセイコー)、
   山下慎也(㈱タナカエンジニアリング)
   ⑥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㈱)、横山 大(長岡技術科学大学) ②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)

- 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㈱)、高田謙一(コーセル㈱)
   ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 金属製品の鍛造成形シミュレーションに関する研究 永森和久(㈱タナカエンジニアリング)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 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)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 4. 形状記憶合金薄膜を用いたマイクロアクチュエータの開発
   高橋伸忠(㈱タカギセイコー)、能村輝一(北陸電気工業㈱)、山下慎也(㈱タナカエンジニアリング)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 3. 微動機構による機械の高度化の研究
   佐野仁一(東洋化工㈱)
   ②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))
   ③指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- ア・レドックス型太陽発電システムの開発
   市川良雄・大橋伸一(富山軽金属工業㈱)、三井清隆(㈱タナカエンジニアリング)
   長谷川益夫(富山県林業技術センター木材試験場)
   ⑥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㈱)
   ⑥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)

- 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(㈱タカギセイコー)、田島正康(㈱タナカエンジニアリング)
   田中 篤(北陸電気工業㈱)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 2. 鍛造成形の簡易シミュレーションに関する研究 松井裕昭(㈱タナカエンジニアリング) ②指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 3. レドックス型太陽発電システムの開発(2)
   市川良雄(富山軽金属工業㈱)、田畑裕信(中越合金鋳工㈱)、三井清隆(㈱タナカエンジニアリング)、
   長谷川益夫(富山県林業技術センター木材試験場)
   ⑥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㈱)、安田純子(コーセル㈱) 〇指導機関: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㈱)、二見泰雄(三協アルミニウム工業㈱)
   ②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)

- レドックス型太陽発電システムの開発(3)
   市川良雄(富山軽金属工業㈱)、田畑裕信(中越合金鋳工㈱)、野中義夫(街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)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 複数のロボットによる協調制御の研究(2)
   森田裕之(立山アルミニウム工業㈱)、渡辺暁信(㈱タナカエンジニアリング)
   ⑥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
- 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)
   ⑥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
- 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. 局部的レーザー処理による形状記憶合金膜アクチュエータの開発 丹保哲也(北陸電気工業㈱)、野上拓也(㈱タナカエンジニアリング)、山田浩美(東洋化工㈱)、 滝川健太郎(金沢大学工学部) ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 6. 電気自動車の開発
   坂本雅美(㈱斉藤製作所)、高橋 聡(㈱タナカエンジニアリング)、藤木和幸(㈱タカギセイコー)
   ⑥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)

- **正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
- 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)
   ③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(㈱斉藤製作所) ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

- 5. 微細放電加工の研究
   太田光則(㈱斉藤製作所)、橋本 明(田中精密工業㈱)
   ③指導機関:工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
- 6. 電磁シールド材の基礎研究
   高橋伸忠(㈱タカギセイコー)、福田隆之(コーセル㈱)
   ⑥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)

- 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㈱)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 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㈱)
   ②指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 深層水及び藻類を利用した太陽光発電の基礎研究
   東堂浩次(コーセル(㈱)、坂本雅美(㈱斉藤製作所)、長谷川益夫(木材試験場)、小善圭一(水産試験場)
   ⑥指導機関:工業技術センター中央研究所
- 山岳遭難者探索システムの探索性能向上に関する研究前田智博(立山科学工業㈱)、高瀬 洋(県警察本部)
   ②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㈱)、石川勝巳(コーセル㈱) ③指導機関:工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部
- 6. 微細放電加工の研究(2)
   太田光則(㈱斉藤製作所)
   ⑥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㈱)、山田浩美(東洋化工㈱)
   ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 8. プラスチックス上のハードコーティング技術の研究 高橋伸忠(㈱タカギセイコー) ②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)

- 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㈱)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 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㈱)、谷口真也(コーセル㈱)
   ③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㈱) ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

- 本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(㈱タカギセイコー)、前田健二(立山アルミニウム工業㈱)
   ②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)) ②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)

- 滑雪板(着雪防止板)の開発 河井牧夫(田中精密工業㈱)、高橋伸忠(㈱タカギセイコー)、野田耕司(三協アルミニウム工業㈱)、 石井 雅(富山県土木部)
   ◎指導機関:工業技術センターPJ・中央研究所
- 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))
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 高摩擦係数材料の研究(2)
   高田智哉(田中精密工業㈱)
   ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 本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(㈱タカギセイコー)、前田健二(立山アルミニウム工業㈱)
   ③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)斎藤製作所)
   ⑥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PJ・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㈱) ◎指導機関:工業技術センターPJ・機械電子研究所、富山大学工学部、JST
- 8.アルミ表面解析技術の高度化に関する研究
   澤井 崇(武内プレス工業㈱)
   ◎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)
- ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発(2)
   石見雅美(㈱斉藤製作所)、稲澤直子(コーセル㈱)
   ⑥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・PJ・中央研究所

- 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)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所・PJ、富山大学工学部
   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㈱) ◎指導機関:工業技術センター中央研究所・PJ
- 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) ⑥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㈱)、野田耕司(三協アルミニウム工業㈱)
   ⑥指導機関:工業技術センターPJ・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㈱)
   ⑥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(㈱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)

- ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発(3)
   石見雅美(㈱斉藤製作所)、魚谷一成(コーセル㈱)
   ③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㈱)、中山 均(コーセル㈱)、中林俊幸(東洋化工㈱) ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
- 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(㈱タカギセイコー)
   ⑥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)
   ⑥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㈱)
   ②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)

 大型色素増感太陽電池の開発 廣田和也(㈱タカギセイコー)
 ②指導機関:工業技術センター中央研究所

- 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
- 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)
   ③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㈱)、石見雅美(㈱斉藤製作所)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
- 薄膜低温度特性抵抗器の開発(2)
   桑原大輔(北陸電気工業㈱)
   ⑥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㈱)
   ◎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㈱)
   ②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)

- 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(㈱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
- 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))
   ⑥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
- 薄膜低温度特性抵抗器の開発(3)
   津幡 健(北陸電気工業㈱)
   ◎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)
   ⑥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㈱)
   ②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)
   ②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(㈱タカギセイコー)
   ⑥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㈱)、深沢正樹(立山マシン㈱) ◎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」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(㈱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・PⅠ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㈱) ◎指導機関:工業技術センターP」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」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. 電子回路用ウエットエッチング液の研究 曽根宏信(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
  - 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㈱)、長柄大介(長柄鉄工㈱)
     ③富山県工業技術センター中央研究所・PJ推進担当、富山大学芸術文化学部
  - 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)
     ③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))
     ③富山県工業技術センター機械電子研究所

- 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))
   ③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㈱)
   ③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(㈱タカギセイコー) ◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・PJ推進担当
- 8.マイクロTASチップの開発(2)
   石村和雄(コーセル(株))
   ③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)

- 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㈱)、梅原洋平(コーセル㈱)
   ③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㈱)、古川万晃(㈱タカギセイコー)
   ③富山県工業技術センター中央研究所・PJ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(㈱タカギセイコー)
   ⑥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)) 〇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)

- 軽量・フレキシブルな色素増感太陽電池の開発
   吉田康子(㈱タカギセイコー)、中田裕一(北陸電気工業㈱)
   ③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(㈱)、日出嶋宗一(立山マシン(㈱) ◎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㈱)
   ②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)) 〇富山県工業技術センター機械電子研究所
- 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))
   ③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
- 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㈱)
   ③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㈱)、細川修宏(㈱タカギセイコー) ②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) ③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)

- 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㈱)
   ③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
- 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))
   ③富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所
- ・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㈱)、杉本考行(コーセル㈱)
   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・
- 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㈱)、岩滝幸司(北陸電気工業㈱)
   ③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(㈱タカギセイコー) ②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)

 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㈱)
 ③富山県工業技術センター機械電子研究所

- 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㈱)
   ③富山県工業技術センター機械電子研究所
- 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)
   ③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)
   ③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)) ③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㈱)
   ③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
   野口拡(コーセル(株))
   ③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)

- 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㈱)
   ◎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
- 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 拡(コーセル(㈱)
   ②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㈱)
   ②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㈱)、山崎鉄平(㈱タカギセイコー)
   ⑥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㈱)
   ②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)

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

- 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㈱)、若林武司(立山マシン㈱)
   ③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㈱)、相馬 優(㈱斉藤製作所)、桑原浩一(コーセル㈱) ◎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
- 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)
   ⑥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㈱)
   ◎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㈱)、山崎鉄平(㈱タカギセイコー)、林 達規(田中精密工業㈱)
   ②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)

- 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
- 3Dスキャナーを用いた形状測定と変形解析への適用 山﨑諭史(コーセル(㈱)、内山 肇(三協立山(㈱)、金山侑司(北陸電気工業(㈱))
   ③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㈱)
   ◎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(㈱タカギセイコー)、黒河歩美(立山マシン㈱)
   ⑥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㈱)
   ◎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㈱)
   ◎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)

- 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㈱)
   ◎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
- 振動の簡便な測定法・低減法の開発
   林 大清(コーセル(株)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

- 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㈱)、滝沢将史(コーセル㈱)
   ⑥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㈱)
   ⑥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 関ロ貴彬(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

☆平成29年度(第31回)研究テーマと研究参加者(7テーマ、9名)

- 1. 有機無機ペロブスカイト太陽電池の開発
- 宮崎幸輝(コーセル㈱) ◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
- 複合化樹脂粉を用いたレーザ塗装
   島林孝吉(㈱斉藤製作所)
   ⑥指導機関:工業技術センター中央研究所・ものづくり研究開発センター
- 3. X線 CT の形状計測および変形評価への応用 朝野剣太 (コーセル(株)、瀧田 諭 (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
- 工具寿命の機上検出手法に関する研究
   石澤剛士(田中精密工業㈱)
   ⑥指導機関:工業技術センター機械電子研究所
- 5. 超音波接合における接合材の振動特性に関する研究 盤若秀明(三協立山㈱) ②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.ウェアラブル電源の開発(2)
   林 大志(コーセル(株)、渡辺涼太(立山マシン(株))
   ⑥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.厚膜型圧電振動発電素子の開発に関する研究(3)
   櫻井雅崇(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、富山大学大学院理工学研究部

# 〇会員企業

平成30年3月13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	万尾 達也	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	(㈱タカギセイコー	八十島清吉	髙橋 伸忠	0766-24-5522		
5	タカノギケン(株)	高野 惠子	瀧森 幸浩	076-455-2525		
6	武内プレス工業㈱	武内 繁和	澤井 崇	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㈱	長岡 隆	福島 良浩	076-451-7651		
10	東洋化工㈱	中田 守人	中田 守人	076-475-2125		
11	長柄鉄工㈱	長柄 勝	長柄 大介	0766-22-3170		
12	北陸電気工業㈱	津田 信治	小川明夫	076-467-1125		
13	燐化学工業㈱	大塚 肇	稲生 吉一	0766-86-2511		
事務局	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)					

# O 研 究 会 員

氏	. 1 7	彳	7	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	Щ	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	次長・機械電	電子研究所長	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	工業技術センター企画管理部	部	長	博士(	工学)	0766-21-2121
富	田	IE.	吾	工業技術センター中央研究所	所	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
林		千	歳	工業技術センター企画管理部	企画情	報課長	博士(	工学)	0766-21-2121
松	田	敏	弘	富山県立大学工学部	教	授	博士(	工学)	0766-56-7500
溝	$\square$	IE.	人	工業技術センター中央研究所	加工技	術課長	博士(	工学)	0766-21-2121

○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	水口即	四一郎	(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~平成 28 年度)	14 代会長	齊藤	行男	(平成 29 年度~)

〇顧	問(	50音順)
會澤	宣一	((大) 富山大学・工学部長)
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)
島崎	慎一	((公財)富山県新世紀産業機構・専務理事)
龍山	智榮	((大) 富山大学・名誉教授)
谷野	克巳	(元工業技術センター所長)
東保喜	鄠八郎	((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)
町野	利道	(CS ポート (株)・代表取締役社長)
森	孝男	((大) 富山県立大学・工学部長)

(様式1)

# 「若い研究者を育てる会」入会申込書

企業名(事業所名)	
代表者名	
住所・電話番号・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
  - $F \ A \ X \quad 0 \ 7 \ 6 \ \ 4 \ 4 \ 4 \ \ 5 \ 6 \ 3 \ 0$

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	f 責 伯	£ 者	富山県工業技術センター 杉森 博 (公財)富山県新世紀産業機構 片桐 寛之
発行	<b>斤</b> 年月	月日	平成30年3月13日
印	刷	所	富山スガキ株式会社

\*無断転載を禁ずる.非 売 品.

