

令和7年度

(第38回)

若い研究者を育てる会研究発表会

研究論文集

令和8年3月16日(月)

於：ホテルグランテラス富山

若い研究者を育てる会

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

本書は下記の研究機関の指導のもとに作成された。

記

富山県産業技術研究開発センター

富山大学学術研究部工学系

富山大学先進アルミニウム国際研究センター

富山県立大学工学部

ごあいさつ

会長 下坂立正

「若い研究者を育てる会」第38回研究論文集の発刊にあたり、一言ごあいさつを申し上げます。

当会は1987年（昭和62年）に「これからの県内企業の若手技術者を、創造的な研究者として育成していこう」との趣旨のもと発足いたしました。以来、本年度も県内各企業から選抜された精鋭の皆さんが、一年間にわたり各テーマに真摯に取り組まれ、その成果をまとめた研究論文集を発行できますことを、大変嬉しく思います。これもひとえに、産業技術研究センターをはじめとする各研究機関、並びに日頃より当会の運営にご尽力いただいている会員企業および研究者各位の多大なご支援の賜物であると、心より感謝申し上げます。

さて、私たちを取り巻く環境が年々ダイナミックに変化する時代において、若手研究者に求められることは何でしょうか。私見ですが、単に技術を磨くだけではなく、これからの産業構造の変化を踏まえて、どんな価値を生み出せる人になるか、という視点が大切ではないかと考えます。

例えば、自分の専門分野を深く掘り下げると同時に、周辺領域の知識を理解し、他分野と協働できる幅の両方をもつことは強みになると思われます。また、製造現場では現在、IoT、画像解析、生成AIなどの導入が急速に進んでいます。データを読み解き、AIを活用して課題を発見し、改善につなげる力があるとさらに強みとなるはずです。それに加えて、市場のニーズや会社の戦略を理解して、研究と現場の両方をつなぐことができれば、さらに大きな価値を生み出すことにつながると考えられます。

当会の活動は、将来を担う若手研究者を育成し成長を支援する場として重要な役割を果たしていると思います。研究者の皆さんは、恵まれた環境の中で、活動を進め、多くの課題に向き合い、試行錯誤を繰り返されたことと思います。また産業技術研究センターをはじめ異業種の方々との交流を通じて得られた知識や経験は、皆さんの今後のキャリアにおける大きな財産になるものと確信しています。皆さんがこれを機会に、自社のみならず地域の発展にも貢献できる人財へと成長されることを、心より期待しております。

おわりに、ものづくり県とやまの産業と県内企業の技術力の発展に向けて、当会の活動が産学官の連携をさらに活性化し、また若い研究者の皆さんがそれぞれのテーマに挑戦し、世界に通じる活躍につながることを心から期待しております。関係各位の変わらぬご指導とご支援を賜りますようお願い申し上げます。発刊のごあいさつとさせていただきます。



研究の概要

「若い研究者を育てる会」(以下、「若研」)の研究発表会は今年度で38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12社)と会員企業の若手技術者が5つの研究テーマについて、令和7年5月から富山県産業技術研究開発センターにおいて、5グループ(3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。ここでは、今年度実施した5テーマの研究概要を述べる。

富山県産業技術研究開発センター 機械電子研究所 博士(工学) 坂井 雄一

①「ベイズ最適化を利用した条件出し方法の検討」の研究グループ(参加企業2社)では、実験の条件出し手法として近年注目されているベイズ最適化を用いた適応的実験計画法を参加企業の製品である樹脂成形品の作製やガスセンサ駆動の条件出しへと適用した。従来手法では、総当たり実験、直行配列表の利用、作業者の経験や勘に頼ることが多い一方でベイズ最適化は、効率的に最適条件を探索できる特徴がある。今回は、従来の総当たり実験における実験回数の多さや探索効率の低さといった課題の克服可能性を検討した。樹脂成形品の強度の最適化を検討した結果、ベイズ最適化を用いることで、総当たり実験に比べて実験回数を30%以上少なくできた。また、ガスセンサにおける濃度測定精度と消費電力について、バランスの良い条件を効率的に探索することを試みた結果、25%少ない実験回数においてよりバランスの良い条件が得られた。どちらの事例においても初期値の取り方、最適化の目的変数や因子の数等について更なる検討が必要であることも明らかとなったが、今回のような実践的な知見を蓄積することで省力化、省人化につながる有用なツールとなることが期待される。



富山県産業技術研究開発センター 機械電子研究所 博士(工学) 坂井 雄一

②「銅-はんだ接合部のシミュレーションに関する研究」の研究グループ(参加企業1社)では、分子動力学シミュレーション(MD)により、はんだ付け時に銅電極とはんだの界面に形成される金属間化合物層(IMC)形成の再現を試みた。MD法はニュートンの運動方程式を個々の原子に適用し、得られた原子の動きから、統計熱力学を基本としたさまざまな分析を行い、実際の実験では難しい領域でのメカニズムの解明や予測を行うことが可能である。計算に使用するポテンシャルの選定や多数に及ぶパラメータの設定が動作の要となるが、本研究では銅やはんだの主成分であるスズの物性値をできるだけ再現する条件を調べたうえで界面付近での原子の動きを計算した。銅およびスズの融点を固液平衡で確認したところ実験値に近い値が得られた。ヤング率は銅では実験値に近い値が得られた一方でスズについては安定した値が得られなかった。銅、スズ界面のシミュレーションにおいてはスズや銅は実際の配置と同じ配置となった一方でIMC層は実験で確かめられているCu₆Sn₅に近いものは得られたものの同じ配置の形成には至らなかった。今後、IMC層形成に至る過程の計算条件やポテンシャルに使用するパラメータの最適化が必要と考えられる。

富山県産業技術研究開発センター 機械電子研究所 角田 龍則

③「スズの表面酸化状態に関する研究」の研究グループ(参加企業 1 社)では、スズメッキ表面に形成される酸化膜の構造とはんだ濡れ性との関係を明らかにする事を目的として研究を実施した。まずはスズ板に陽極酸化と加熱処理により酸化膜を形成し、それぞれをオージェ電子分光分析の波形分離によって解析した。陽極酸化では SnO₂、加熱処理では SnO の割合が高い膜が形成されることが確認できた。また、はんだ濡れ性については、陽極酸化で形成された酸化膜は基材に浸透していくようにはんだが濡れ、加熱処理での酸化膜は基材上で盛り上がるようにはんだが濡れることを確認した。さらに、酸化膜の断面・表面観察結果から、酸化膜の多孔質構造や凹凸が影響していると推察できた。最後に、スズメッキ線において、加熱処理により酸化膜を作成し同様の評価を実施した結果、下地金属の銅がメッキ表面まで拡散し酸化膜を形成していたことがわかり、加熱処理後では濡れ性が低下することを確認した。今後は、実際のスズ酸化膜形成に則した酸化膜作成条件の検討と、下地金属元素の拡散の影響評価を実施し、さらに詳細な現象の解明を進めていくことが必要と考えられる。



富山県産業技術研究開発センター ものづくり研究開発センター 寺澤 孝志

④「薄膜における接合技術に関する研究」の研究グループ(参加企業 1 社)では、富山県産業技術研究開発センターで独自に開発した低温鍛接 (Cold Forge-Welding: CFW) 法の新たな用途展開として、電子機器やセンサにおける電極の接合やパッケージの封止を目標に、アルミニウム (Al) 薄膜 (厚さ μm) における CFW の可能性を探った。Al-Al の CFW には、接合界面の大変形が必要であるため、Al 薄膜は表面の凹凸が大きくなるものを準備した。Al 薄膜の表面の凹凸は、スパッタリング時の基板温度が高くなるにつれ大きくなり、CFW 接合後の引張せん断強度も大きくなることが判った。次に、CFW の接合条件 (加圧力、接合界面温度) と引張せん断強度を詳細に調べたところ、基板温度 130°C で成膜した Al を用い、接合条件 (8MPa、216°C) で接合したものでは引張せん断強度は 45MPa を示し、純アルミの母材相当の強度を達成した。さらに、界面を分析したところ、接合条件 (7MPa、216°C) で接合したものでは、界面にボイドは無く緻密な界面の形成が確認できた。薄膜 (厚さ μm) 領域での CFW の実証、強度評価、界面分析を通して、CFW 法の新たな用途展開 (電子部品の電極接合やパッケージの封止) に目途が立った。



富山県産業技術研究開発センター 機械電子研究所 角田 龍則

⑤「スマートテキスタイルのための温度センサ開発」の研究グループ(参加企業 1 社)では、体温測定のため違和感なく長時間装着でき、衣服の一部に組み込むことが可能な柔軟性に優れた温度センサの開発を目的として、研究を実施した。センサシステムとして測温抵抗体の自己発熱を利用した温度計測手法を提案し、その有効性を確認できた。提案したセンサ構造は縦型および横型の 2 種類であり、それぞれについて温度測定し性能を検証した。その結果、生地上において、縦型構造のセンサがより安定した特性を示すことがわかり、一定の誤差範囲内で測定可能であることを確認できた。また、測温抵抗体に電圧を印加し自己発熱させ、センサへの熱流量を変化させた場合の温度収束時間を評価し、実用上十分な特性を有することも確認した。今回の研究で、静止状態において小さな誤差で温度計測に成功したことから、今後は、生地空隙を考慮した熱回路モデルの検討および運動状態における測定を進める必要があると考えられる。

今年度は、5つの研究テーマに6人の企業内若手技術者が参加した。これまでこの会では**実施した38年間に230テーマ**の研究を実施しており、修了生は**418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す。

研究グループの構成

I. ベイズ最適化を利用した条件出し方法の検討の研究グループ

研究担当者 **松本 耀介** (北陸電気工業(株))

畦地 里奈 (㈱タカギセイコー)

○佐々木克浩 (産業技術研究開発センター機械電子研)

釣谷 浩之 (産業技術研究開発センター機械電子研)

☆坂井 雄一 (産業技術研究開発センター機械電子研)

II. 銅-はんだ接合部のシミュレーションに関する研究の研究グループ

研究担当者 **寺田 圭吾** (コーセル(株))

○関口 啓介 (産業技術研究開発センター機械電子研)

☆坂井 雄一 (産業技術研究開発センター機械電子研)

III. スズの表面酸化状態に関する研究の研究グループ

研究担当者 **大浦 真樹** (北陸電気工業(株))

○柳原 康平 (産業技術研究開発センター機械電子研)

村上 聡 (産業技術研究開発センターものづくり)

関口 啓介 (産業技術研究開発センター機械電子研)

坂井 雄一 (産業技術研究開発センター機械電子研)

☆角田 龍則 (産業技術研究開発センター機械電子研)

IV. 薄膜における接合技術に関する研究の研究グループ

研究担当者 **福澤 健介** (コーセル(株))

○升方 康智 (産業技術研究開発センターものづくり)

村上 聡 (産業技術研究開発センターものづくり)

山岸 英樹 (産業技術研究開発センターものづくり)

☆寺澤 孝志 (産業技術研究開発センターものづくり)

V. スマートテキスタイルのための温度センサ開発の研究グループ

研究担当者 **澤井 駿佑** (コーセル(株))

○七谷 佳祐 (産業技術研究開発センター機械電子研)

上野 実 (産業技術研究開発センター機械電子研)

☆角田 龍則 (産業技術研究開発センター機械電子研)

註：○印は各研究グループのチーフ

☆印は研究幹事

目 次

I. ベイズ最適化を利用した条件出し方法の検討	-----	1
II. 銅-はんだ接合部のシミュレーションに関する研究	-----	8
III. スズの表面酸化状態に関する研究	-----	15
IV. 薄膜における接合技術に関する研究	-----	21
V. スマートテキスタイルのための温度センサ開発	-----	27
○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」研究活動の足跡	-----	付-6
○会員企業および研究幹事名簿	-----	付-19
○入会申込書	-----	付-21

I. ベイズ最適化を利用した条件出し方法の検討

Exploration of Experiment Condition Using Bayesian Optimization

松本 耀介 畦地 里奈 佐々木 克浩 釣谷 浩之 坂井 雄一
MATSUMOTO Yosuke AZECHI Rina SASAKI Katsuhiko TURITANI Hiroyuki SAKAI Yuichi

Abstract

In product development and design, it is essential to identify optimal conditions that simultaneously satisfy multiple evaluation criteria such as performance, cost and quality. Although full-factorial experiments are widely used due to their simplicity, they require substantial time and cost because of the large number of trials. In contrast, Bayesian optimization, an adaptive experimental design approach that sequentially updates experimental conditions based on prior results, has attracted attention as an efficient alternative. In this study, the potential for reducing the number of experiments required for condition optimization was explored by using Bayesian optimization. Specifically, we conducted experiments focused on (1) optimizing the tensile strength of resin-molded products and (2) optimizing sensor performance. First, the optimization of the mechanical strength of resin-molded products was investigated. The results showed that Bayesian optimization enabled a reduction in the number of experiments compared with full-factorial experiments. Next, we attempted to efficiently search for well-balanced conditions between concentration measurement accuracy and power consumption in a gas sensor. As a result, balanced optimal conditions were obtained with fewer experiments than required by full-factorial experiments. However, depending on the initial conditions used in the Bayesian optimization, its effectiveness compared with full-factorial experiments was not always achieved. This issue remains a subject for future work.

1. 緒言

製品開発および製品設計においては、性能、コスト、品質など複数の評価項目を同時に満足させる最適な条件を見出すことが求められる。そのためには、材料選定、設計条件など、多数の要因を考慮した条件出しが不可欠であり、この工程は製品開発における重要な位置を占めている。従来、このような条件探索には総当たり実験が用いられてきた。総当たり実験は、すべての因子と水準の組み合わせを網羅的に評価でき、手法が単純で実装しやすいという利点を有する。一方で、因子数や水準数の増加に伴い実験回数が膨大となり、時間およびコストの面で大きな負担となるという課題がある。これに対し、実験回数削減を目的として直交配列法が用いられる場合も多い。直交配列法のメリットとしては、因子と水準の組み合わせをバランスよく抽出できる点、および全体傾向や各因子の影響を効率よく評価できる点が挙げられる。一方で、水準数や因子数に限りがあるため、最適条件が直交配列で設定した範囲外に存在する可能性があるというデメリットを有する。

近年、これらの従来手法とは異なるアプローチとして、ベイズ最適化を用いた適応的実験計画法⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾が注目されている。ベイズ最適化は、因子の水準数に関する制約が少なく、予測の平均値と不確かさに基づいて次の実験条件を逐次的に決定するため、効率的に最適条件を探索できる特徴がある。

本研究では、ベイズ最適化を利用した実験計画法を用い、従来法における実験回数の多さや探索効率の低さといった課題の克服可能性を検討する。具体的には、当研究グループの企業に関連する樹脂成形品の成形条件の最適化およびガスセンサ性能の最適化を対象とし、従来手法である総当たり実験との比較を通じて、ベイズ最適化の有効性を評価する。

2. ベイズ最適化と今回の実験対象

2.1 ベイズ最適化

ベイズ最適化の基本手順を図1に示す。初期実験の評価値を元に次の実験条件を探索し、決定した実験条件における評価値を加えて再び条件探索を行う。このような手順を繰り返すことで、逐次的に最適な条件を決定する。その進行過程について具体的に説明するため、(文献(2)~(7)を参考に設定・説明)条件 x の実験から特性値 y (目的変数)が得られる例を図2で考える。 x と y の関係である目的関数は、実際は未知であるが、図2(a)の破線の仮想的な関数を設定し、 y が最大となる条件を探索する。また、初期値として、4条件において実験と評価を行った結果は同図の黒丸であると仮定する。目的関数の予測手法の中でもガウス過程回帰では、複数のデータ点間の類似度を評価して用いることで、予測の平均値だけでなく標準偏差も計算可能である(文献(1) p. 80 の式(3.89)および式(3.90))。図2(a)に示す計算例では、実線がガウス過程回帰による予測の平均値、帯状の部分が予測の標準偏差(不確かさ)を示している。次に、予測の平均値と標準偏差を用いて「次に実験を行う価値が高そうな点」を決定する。これを定量的に評価する指標である獲得関数の例として、直観的に分かり易く、次式で表される Upper Confidence Bound (UCB)を用いて説明する。

$$UCB(x) = \mu(x) + \beta \sigma(x) \quad (1)$$

ここで、 $\mu(x)$ と $\sigma(x)$ はそれぞれ予測の平均値と標準偏差であり、 $\beta = 1$ とすると獲得関数 UCB は、平均値と標準偏差の和となり、図2(a)の帯状の部分の上端となる。同図の矢印で示す獲得関数が最大となる x が次の実験条件であり、その条件で実験と評価を行う。これをベイズ最適化の試行1回とし、得られたデータを初期値に追加したデータセットにより再びガウス過程回帰を行う(図2(b))。この手順を繰り返すことで、図

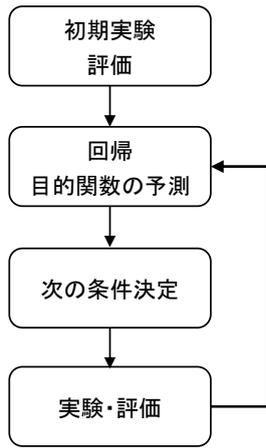


図 1 ベイズ最適化の手順
Fig. 1 Procedure of Bayesian optimization

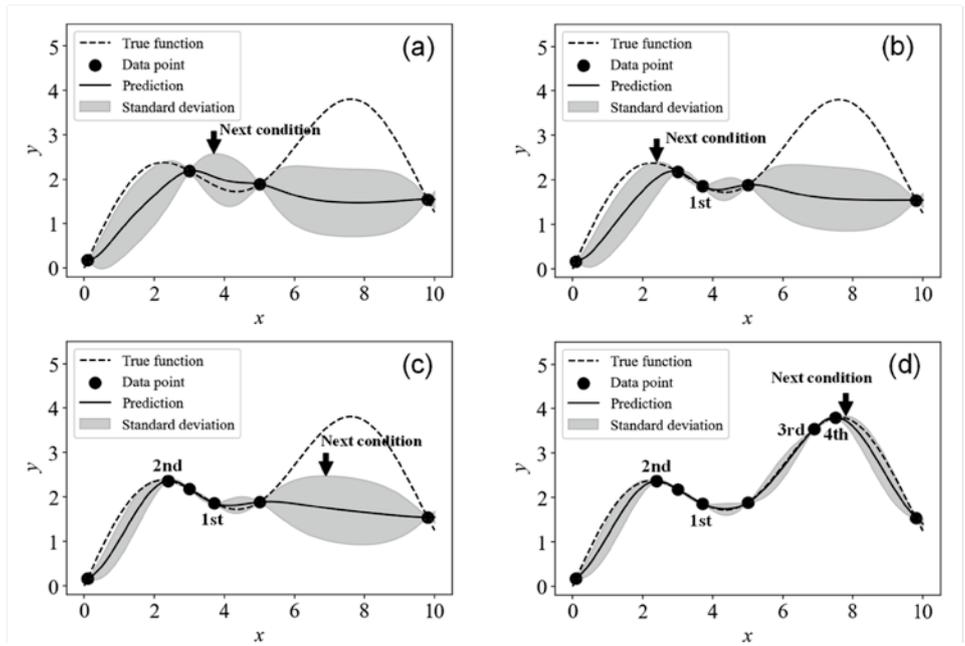


図 2 ベイズ最適化の進行例
(a)1回目、(b)2回目、(c)3回目および(d)5回目の探索
Fig. 2 Progress of Bayesian optimization :
(a) First, (b) Second, (c) Third, and (d) Fifth explorations

2(a)~(d)のように探索が進展し、(d)に示す4回目の試行において y は最大値付近の値が得られている。なお、(c)では、標準偏差が比較的大きい条件が選択されており、これは未だ試されていない条件領域の探索が重視された例と考えられる。以上により、ベイズ最適化では、予測の平均値が高い条件付近の選択と未知領域の選択の両方を考慮した探索を逐次的に繰り返すことで、効率的な最適化が期待される。

上記の手順の中で重要な役割を担う獲得関数は、UCB 以外にも以下の関数がある(文献(1)の p. 116 式(5. 1)、式(5. 5)、式(5. 6)参照)。

- (1) Probability in Target Range ; PTR
 y が設定した目標範囲に入る確率
- (2) Probability of Improvement ; PI
既存データ点における y の最大値より大きくなる確率
- (3) Expected Improvement; EI
既存データ点における y の最大値の改善量の期待値

詳細は3章で説明するが、本研究では、次節で述べる2種の最適化内容に応じて、上記(1)から(3)の中から適切な獲得関数を選択した。ここで、ベイズ最適化の計算は文献(1)に基づきプログラミング言語 Python で行い、ガウス過程回帰におけるカーネル関数は一般的によく用いられているマートン 5/2 カーネル関数に基づいて設定した(文献(1)p. 78 の式(3. 81))。

2.2 実験対象

2.2.1 樹脂成形品の強度の最適化

樹脂成形には様々な成型方法がある。なかでも回転成形は、粉末状の熱可塑性樹脂を金型内に投入し、加熱しながら金型を回転させることで、溶融した樹脂を金型内壁に均一に付着させ、中空で継ぎ目のない成形品を得る成形方法である。回転成形は射出成形のように外部から高い圧力を必要とせず、

大型かつ中空形状で、肉厚を有する製品の一体成形に適しており、バイクや油圧ショベルの燃料タンク、輸送・物流用コンテナなど、耐衝撃性や耐久性が要求される製品に用いられている。

回転成形では、加熱温度や加熱時間などの成形条件が、樹脂の溶融状態や金型内壁への付着挙動に影響を及ぼす。そのため、最終的な機械特性は成形条件に大きく依存し、適切な条件設定が製品品質を左右する重要な要因となる。樹脂成形品の主要な特性値のひとつには引張強度があり、高い強度が得られる条件を明確にすることが求められる。

従来、このような成形条件の探索には総当たり実験が用いられてきた。総当たり実験は、すべての因子および水準の組み合わせを網羅的に評価でき、手法が単純で実装しやすいという利点を有する。一方で、因子数や水準数の増加に伴い試験回数が膨大となり、時間およびコストの面で大きな負担となるという課題がある。特に、温度や時間を一定刻みで変化させながら試験を行う場合、実験回数が増える傾向がある。また、条件設定の範囲が作業者の経験に基づいて決定される場合が多く、効率的な条件設定が難しいという問題も指摘されている。

本研究では、回転成形により作製した樹脂成形品を対象とし、成形条件と引張強度との関係を明らかにするとともに、ベイズ最適化を適用し、総当たり実験と比較して、より少ない実験回数で高い引張強度が得られる条件を探索できるか検討した。

2.2.2 ガスセンサ性能の最適化

ガスセンサとは目に見えない有害な可燃性のあるガスを検知するためのものである。主に安全を守るために使われている。ガスセンサの検知方式にはいくつかあるが、ここでは主

に利用されている3つの方式を表1に示す。接触燃焼式と半導体式は化学反応を用いており、触媒の劣化が起きてしまうため長期使用には向いていない。一方、気体熱伝導式は気中の熱伝導率の変化という物理変化を利用しているため、劣化がなく長期使用が可能である。この長期使用可能な点に着目し、北陸電気工業(株)では気体熱伝導式を採用している。

気体熱伝導式ガスセンサでは、センサ素子に一定電流を流し、素子の抵抗値変化からガス濃度を計測する。ガスセンサは濃度測定の精度が高く、消費電力が低いことが求められる。電流量を増やすことで測定精度は向上するが、その分消費電力が多くなってしまふ。このようにトレードオフな関係がある場合は、単一の目的変数の最適化は適さず、目的変数ごとの獲得関数を掛け合わせて⁽¹⁾バランスの良い条件を探索する必要がある。

本研究では、測定精度と消費電力のバランスの取れた電流条件について、ベイズ最適化を用いて効率的に探索することを検討した。

表1 ガスセンサの主な検知方式

Table1 Main detection methods of gas sensors

主な検知方式	説明
接触燃焼式	ガス燃焼時の発熱量を利用
半導体式	ガスと半導体の化学反応を利用
気体熱伝導式	熱伝導率の変化を利用

3. 実験方法

3.1 樹脂成形品強度の最適化

回転成形の工程は、図3に示すように、パウダー投入、加熱・回転、冷却、取り出しの順に進行する。成形工程における主要なパラメータとして、加熱温度および加熱時間を設定し、これらを変化させて成形を行った。得られた成形品(図4(a))について、成形条件が機械的特性に及ぼす影響を評価した。本研究で使用した材料は、回転成形において一般的に用いられるポリエチレン(PE)とした。使用したPEの融点は130°Cである。成形後の樹脂成形品については、機械的特性を評価するため、打ち抜き機を用いてJIS K 6251⁽⁹⁾のダンベル形状の試験片(図4(b))を作製した。試験方法は、JIS K 7161⁽¹⁰⁾に準拠した。作製した試験片に対して引張試験を実施し、試験片を一定速度で引張り、破断に至るまでの荷重および変位を測定した。得られた荷重データと試験片の幅および厚さから破壊応力を算出した。各成形条件に対して5試験片の引張試験を行い、破壊応力はそれらの平均値として評価した。

総当たり実験では、作業者の経験と勘を考慮した条件範囲において成形を実施した。加熱温度は180°Cから240°Cの範囲、加熱時間は20分から35分の範囲とし、それぞれ20°C刻み、5分刻みで条件設定を行った。

ベイズ最適化では、総当たり実験で設定した条件範囲を拡張し、材料の融点および分解温度を考慮した条件範囲(140°C・20分および260°C・50分)における予備実験を実施し、成形可能な条件範囲を把握した。これを基に広範囲の条件空間において実験を行った。加熱温度は140°Cから260°Cの範囲、加



図3 回転成形工程の模式図

Fig. 3 Schematic of rotational molding process

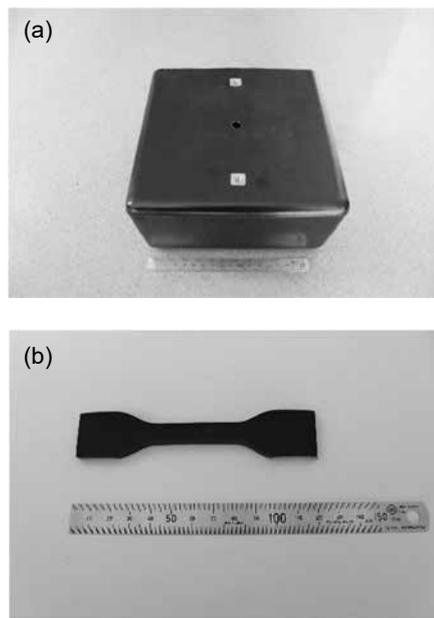


図4 (a)成形品と(b)試験片の写真

Fig. 4 Images of (a) molding product and (b) test specimen

熱時間は20分から50分の範囲とし、それぞれ20°C刻み、5分刻みで条件設定を行った。ベイズ最適化の初期値として設定した4点は、総当たり実験の条件範囲と予備実験からランダムに抽出した。本研究では初期条件の数が限られていることから、初期条件の違いが最適化挙動に与える影響を検討するため、2種類の初期条件パターンを設定した。初期条件パターン1では、200°C・25分、200°C・30分、240°C・25分、240°C・30分の4条件を初期値として用いた。初期条件パターン2では、140°C・20分、180°C・30分、200°C・25分、200°C・30分の4条件を初期値として設定した。獲得関数は一般的によく用いられるEI(2.1(3))を使用した。

3.2 ガスセンサの最適化

3.2.1 ガス濃度の測定原理

気体熱伝導式の測定原理の模式図を図5に示す。気体熱伝導式とは、検知対象ガスによる熱伝導率の変化を利用した方式である。また、熱伝導率とは熱の伝わりやすさを示すガスごとに固有の値である。まず、センサに一定電流を流し、一定温度に加熱する。熱伝導率の高い検知対象ガスが空気に混ざることによって測定雰囲気熱伝導率が高くなる。周辺の熱伝導率が高くなると加熱されたセンサから熱が逃げやすくなり、センサの温度が低下する。この温度変化を抵抗値変化として計測し、ガス濃度に換算する。

図5に示すように、ガス濃度 M (ppm) と抵抗値変化 ΔR (Ω)

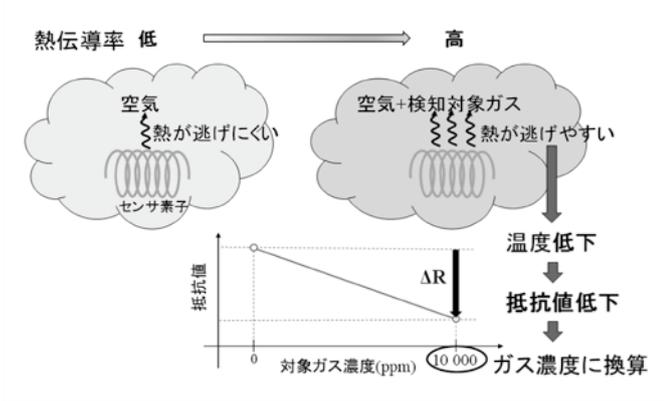


図5 気体熱伝導式センサの測定原理模式図

Fig. 5 Schematics of principle of thermal conductivity method

は比例関係にあり、オームの法則を適用すると以下の関係式が得られる。

$$M \text{ (ppm)} \propto \Delta R \text{ (}\Omega\text{)} = \frac{\Delta V \text{ (mV)}}{I \text{ (mA)}} \quad (2)$$

ここで電流は一定のため、電圧変化量 ΔV (mV) とガス濃度 M (ppm) も比例関係にある。したがって、センサの電圧からガス濃度を算出することができる。また、ガス濃度を求めるためにはセンサの感度 S を事前に求める必要がある。感度 S は以下の式で求められる。

$$S = \frac{\Delta V \text{ (mV)}}{M \text{ (ppm)}} \quad (3)$$

式(3)を変形することで次式により濃度 M (ppm) が求められる。

$$M \text{ (ppm)} = \frac{\Delta V \text{ (mV)}}{S \text{ (mV/ppm)}} \quad (4)$$

3.2.2 ガスセンサの駆動条件と評価方法

長期使用や省電力のため、センサにはパルス駆動で電流を流した。その時の電圧と電流の波形を図6に示す。パルスの立ち下がる直前の1点を電圧測定点とした。本研究では、因子を電流値と駆動時間に設定した。電流値を多くすると消費電力が大きくなるが、感度が向上され精度が良化することが期待できる。一方、駆動時間を短くすると、消費電力は小さくなるが、図6に示す電圧波形における電圧測定点が前に移動し、時間に対する電圧の平坦度が悪くなり、精度の低下が予測される。

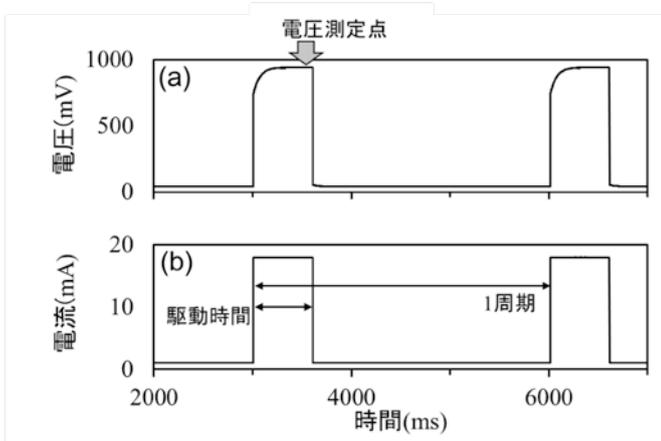


図6 (a)電圧および(b)電流波形

Fig. 6 (a)voltage and (b)current waveform

ガスセンサを3個作製し、以下の手順で評価を行った。

- (1) ガス濃度を0、20 000、40 000ppmに設定し、それぞれの濃度で20パルス分の電圧と電流を測定した。
- (2) 20パルス分の電圧測定点の標準偏差 σ (mV) を求めた。 $3\sigma/S$ (ppm) を精度の評価値とした(感度 S は前節の式(3)に、 $M = 40\ 000$ ppm と測定した電圧変化量 ΔV を代入して算出)。
- (3) パルス1周期の電力平均値を電力の評価値とした。
- (4) 3個のガスセンサそれぞれで3種の設定濃度について精度と電力を求め、これら9個の評価値を平均して最終的な評価値とした。

3.2.3 ガスセンサ駆動条件の最適化実験

総当たり実験では、電流値10、20、30mAの3条件、駆動時間100、300、600、1000msの4条件の中で組み合わせ合計12条件設定し評価値を求めた。

ベイズ最適化を行うにあたっての初期条件は、総当たり実験の12条件の中からランダムに4点抽出した。初期値が少ないため、2パターンの初期条件を用意し、それぞれについて評価値を求めた。本研究では、目的変数を2つに設定(精度と電力)しているため単目的最適化には適さない。そこで、多目的ベイズ最適化で最適条件を探索した。多目的ベイズ最適化ではそれぞれの目的変数ごとに獲得関数を決め、それらを掛け合わせて最適条件を探索する。ここで、目標仕様は「測定精度3000ppm以下かつ低消費電力」であるため、精度の獲得関数は、目的変数が目標範囲に入る確率であるPTR(2.1(1))を選択した。目標範囲は1000~3000ppmに設定した。電力の獲得関数は、目的変数の既存のデータ点より小さくなる確率であるPI(2.1(2))を選択した。

精度と電力のバランスの指標として、本研究では精度と電力の積を設定した。ベイズ最適化では、総当たり実験の実験回数12回より少ない実験回数で、総当たり実験より良いバランス指標値が見つかるかを検討した。

4. 実験結果および考察

4.1 樹脂成形品の最適化の結果

16回の総当たり実験を実施した結果、破壊応力の最適値は240°C・25分の条件で最大であり、26.2MPaであった(表2)。

初期条件パターン1におけるベイズ最適化の結果を表3と図7に示す。表3の矢印は試行が進んだ順番を示しており、

表2 総当たり実験条件と破壊応力(MPa)

Table 2 Fracture stress and experimental condition of the full-factorial experiment

		温度 (°C)				高 ↑ ↓ 低
		180	200	220	240	
時間 (min)	20	20.5	21.0	23.2	26.1	
	25	20.7	20.1	23.8	26.2	
	30	20.6	20.8	22.0	24.2	
	35	21.0	20.3	23.3	23.1	

表 3 ベイズ最適化(初期値パターン 1)での実験条件と破壊応力 (MPa)

Table 3 Fracture stress and experimental conditions in Bayesian optimization (initial condition of pattern 1)

		温度(°C)						高
		140	160	180	200	220	240	
時間 (min)	20						26.1	25.8
	25				20.1		26.2	26.1
	30				20.8		24.2	1st
	35							
	40							
	45							
	50	22.7				25.8		25.4

進行順番 →

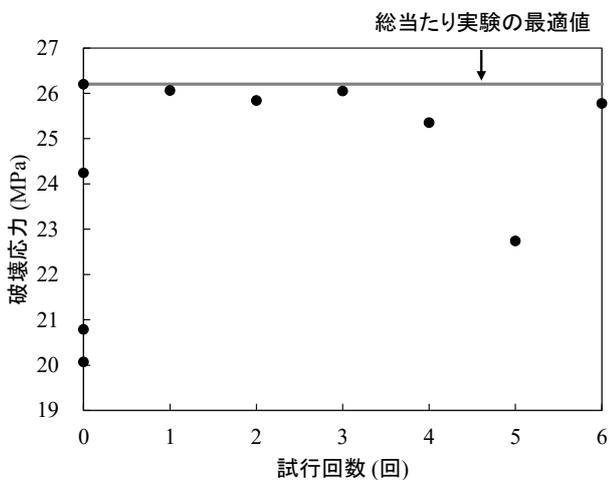


図 7 ベイズ最適化(初期値パターン 1)での試行回数と破壊応力
Fig. 7 Fracture stress and number of trials in Bayesian optimization (initial condition of pattern 1)

図 7 は横軸にベイズ最適化の試行回数、縦軸に破壊応力を示したものである。この初期条件パターン 1 では、初期値の中に総当たり実験の最適値となる条件が含まれており、ベイズ最適化は主としてその最適値周辺の条件を探索した。その結果、1 回目の試行において、総当たり実験で得られた最適値と同等の破壊応力が得られた。以上の結果より、総当たり実験(合計回数 16 回)と比較して少ない実験回数(4 回以下)で、高い破壊応力を示す最適条件を得ることができた。

初期条件パターン 2 における結果を表 4 と図 8 に示す。表 4 では、試行 2 回目以降の条件は温度が段階的に高くなり、上限 260°C に達すると試行 4 回目以降は時間が次第に長くなる傾向で探索が進んだ。図 8 では試行を重ねるにつれ徐々に総当たり実験の最適値へ近づく挙動が確認され、その結果、総当たり実験の合計回数(16 回)より少ない、初期実験 4 回と試行 7 回の合計 11 回で、総当たり実験の最適値と同等の破壊応力が得られた。

以上の結果より、樹脂の回転成形におけるベイズ最適化の有効性が確認された。

表 4 ベイズ最適化(初期値パターン 2)での実験条件と破壊応力 (MPa)

Table 4 Fracture stress and experimental conditions in Bayesian optimization (initial condition of pattern 2)

		温度(°C)						高	
		140	160	180	200	220	240		260
時間 (min)	20	20.9	20.6					25.8	
	25		1st		20.1			26.1	
	30				20.6	20.8	22.0	24.2	24.5
	35							4th	25.1
	40							7th	25.4
	45							24.6	26.1
	50	22.7							25.4

進行順番 →

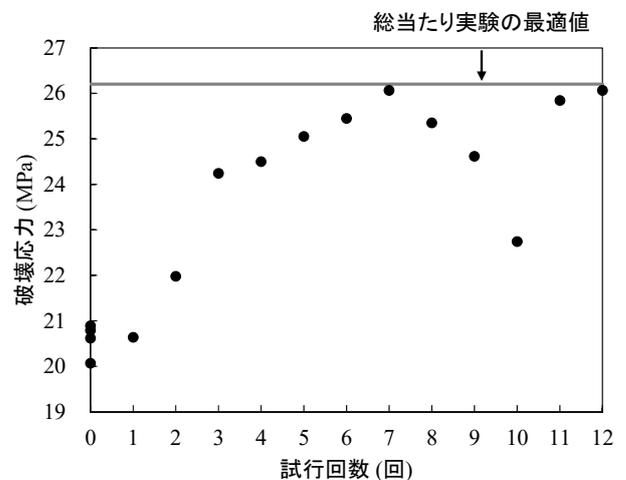


図 8 ベイズ最適化(初期値パターン 2)での試行回数と破壊応力
Fig. 8 Fracture stress and number of trials in Bayesian optimization (initial condition of pattern 2)

4.2 ガスセンサの最適化の結果

総当たり実験の条件および目的変数別の評価値を表 5 および表 6 に示す。これらの結果を元に精度を横軸、電力値を縦軸にして、プロットしたものを図 9 に示す。精度の目標範囲内で精度と電力の積(バランス指標)が最も低い点を総当たり実験の最適値とし、これと等しい数値を結んだ線を同図中に破線で示した。ベイズ最適化では、目標範囲内でこの線より下の領域の実験値を、より少ない実験回数で取得できるか検証した。

ベイズ最適化の実験結果について、初期条件パターン 1 で選ばれた初期値とベイズ最適化で得られた実験値をプロットしたものを図 10 に示す。ベイズ最適化の試行 4 回目までは、初期値の中で電力が最も低い条件付近からさらに電力を低減させるように探索が進行している。その後は目標精度の範囲内でかつ総当たり実験の最適値より良い条件を示した。以上の結果から、総当たり実験回数 12 回に比べ、初期実験 4 回と 5 回の試行の合計 9 回で最適条件が得られた。

初期条件パターン 2 の結果を図 11 に示す。初期値に、初期条件パターン 1 と比べて電力は小さいが精度が目標範囲から大きく外れた点が含まれており、ベイズ最適化の探索序盤で

表 5 総当たり実験条件と電力(mW)

Table 5 Experimental conditions and electric power of the full-factorial experiment

	電流 (mA)	駆動時間(ms)				高 ↓ 低
		100	300	600	1000	
	10	0.18	0.47	0.89	1.5	
	20	0.67	2.1	4.3	7.2	
	30	1.7	6.6	14	24	

表 6 総当たり実験条件と精度 ($\times 10^3$ ppm)

Table 6 Experimental conditions and accuracy of the full-factorial experiment

	電流 (mA)	駆動時間(ms)				高 ↓ 低
		100	300	600	1000	
	10	39	22	20	21	
	20	5.5	2.4	2.0	3.9	
	30	3.3	0.62	1.7	2.4	

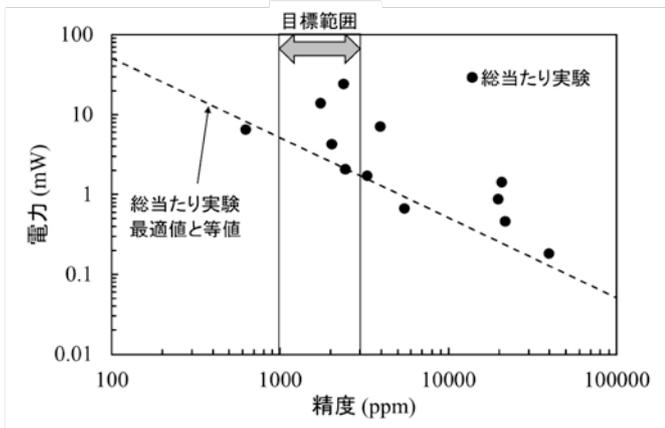


図 9 総当たり実験結果

Fig. 9 The results of the full-factorial experiment

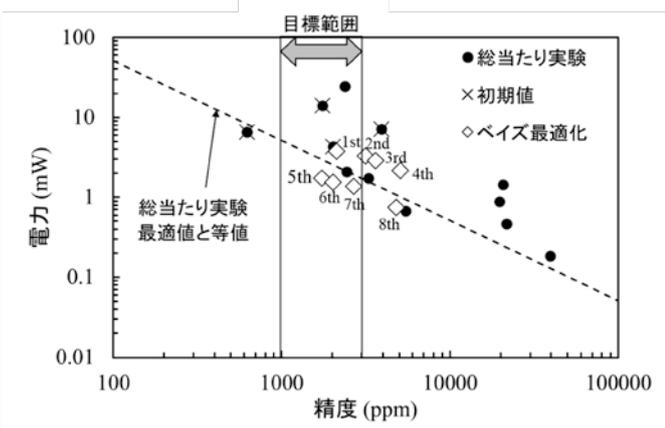


図 10 ベイズ最適化(初期条件パターン 1)での精度と電力の関係
Fig. 10 Relationship between accuracy and power in Bayesian optimization (initial condition of pattern 1)

はその点付近から電力を低減させるように探索が進行していった。その後、精度を改善するよう探索が進行し、8 回までの試行では目標精度に近づいたが範囲内には到達しなかった。この実験は初期値を得る実験回数を含めると、総当たり実験の回数である 12 回と同一になったため、ここでベイズ最適化

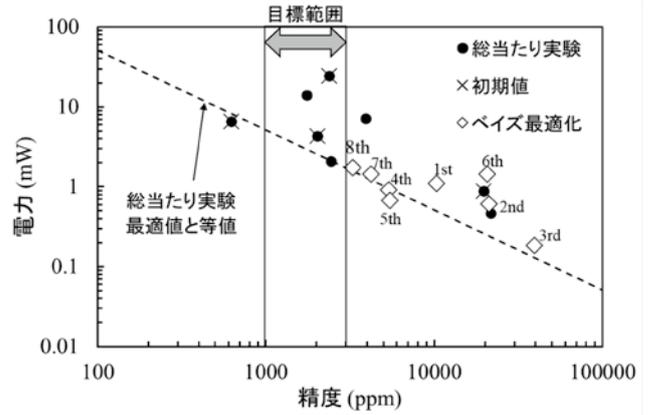


図 11 ベイズ最適化(初期条件パターン 2)での精度と電力の関係
Fig. 11 Relationship between accuracy and power in Bayesian optimization (initial condition of pattern 2)

の試行を終了とした。

4.3 考察

樹脂成形品のベイズ最適化の結果、加熱温度 220°C から 260°C の条件範囲において、引張強度に関して最適値に近い値を得ることができた。しかし、外観の観点から評価すると、 220°C では意匠面にボイドが発生し、 260°C では樹脂の分解に起因すると考えられる白色の変色部が意匠面に確認された。これらの結果から、外観品質を考慮した場合、 240°C が最適な成形温度であると判断された。以上のことより、成形条件の最適化においては、引張強度のみならず、外観といった品質指標を目的変数の一つとして考慮する必要があると考えられる。また、本研究では加熱温度および加熱時間の 2 因子に着目して実験を行ったが、冷却温度や冷却速度も樹脂の結晶化度に影響を与える重要なパラメータである。今後は、多目的最適化と組み合わせるなどの手法を用い、成形条件および目的変数を拡張した検討を行っていく必要がある。

ガスセンサのベイズ最適化においては、どちらの初期条件のパターンでも、初期値の中で最も電力が低い点付近を起点にして電力を下げるよう探索が進行した。2 パターンの初期条件を比較すると、パターン 1 では電力の最小値が精度の目標範囲内に収まっていたが、パターン 2 では目標から外れた点が初期値における電力の最小値だった。このように目標範囲内に電力の最小値があるかどうかの結果に影響したと考えられる。対策は、既存データ全ての電力最小値ではなく、目標範囲内の電力最小値より小さくなる条件を探索させるよう獲得関数を変更することが挙げられる。初期実験で目標範囲内の条件が出なかった場合は、精度の最適化のみを優先して行い、その後に電力の最小値を下げるよう最適化を行う必要がある。

樹脂成形、ガスセンサいずれにおいてもベイズ最適化の初期条件を 2 パターン検討した結果、樹脂成形品の場合はベイズ最適化により削減できる実験回数に差が生じ、センサの最適化では一方のパターンではベイズ最適化の有効性が示せなかった。これらの改善のための一対策としては、初期値の数を増やすことが挙げられる。一方で、初期値の数を単純に増加させると実験リソースが増加してしまうため、実用上は状況に応じた設定が必要と考えられる。今回は、ベイズ最適化

の活用に向けた第一歩として、比較的小規模な実験を対象にしたが、今後は、上述した目的変数や因子の増加とともに、初期値を増やした検討も必要である。

5. 結論

樹脂成形およびガスセンサ駆動の条件探索についてベイズ最適化を適用し、総当たり実験との比較を行った。樹脂成形品の強度の最適化を検討した結果、ベイズ最適化を用いることで、総当たり実験に比べて実験回数を30%以上少なくできた。削減できる実験回数はベイズ最適化の初期条件によって異なったものの、ベイズ最適化の有効性を確認できた。次に、ガスセンサにおける濃度測定の精度と消費電力について、バランスの良い条件を効率的に探索することを試みた。結果はベイズ最適化の初期条件によって異なり、初期条件の1例目では、総当たり実験と比較して、25%少ない実験回数においてよりバランスの良い条件が得られた。一方、2例目では、総当たり実験による最適値に近い値まで探索が進むに留まった。この課題に対しては、電力の獲得関数に関して、精度の目標範囲内における電力最小値より小さくなる確率に変更するなどの対策を検討する余地がある。実用化に向けた観点からは、最適化の目的変数や因子の数、初期値の数を増やした検討を行い、更なる知見を蓄積することが今後の課題である。

文 献

-
- (1) 金子: Python で学ぶ実験計画法入門, 講談社 (2021)
 - (2) 杓掛 他: 応用物理, 第 89 巻, 第 12 号 (2020) pp. 711-714
 - (3) 杓掛: 機械学習と最適化による問題解決講座, 翔泳社 (2025)
 - (4) 井手 他: 土木学会論文集 B2, Vol.78, No.1 (2022) pp.1-16
 - (5) ベイズ最適化の活用事例, 技術情報協会 (2025)
 - (6) 佐藤 他: シミュレーション, 第 34 巻, 第 4 号 (2015) pp. 6-9
 - (7) 松井 他: まてりあ, 第 58 巻, 第 1 号 (2019) pp. 12-16
 - (8) 新村 他: 長野県工技センター研報 (2020) pp.77-80
 - (9) 日本規格協会, JIS K 6251:2023
 - (10) 日本規格協会, JIS K 7161-2:2014

II. 銅-はんだ接合部のシミュレーションに関する研究

A Study on the Simulation of Cu-solder Joints

寺田 圭吾 関口 啓介 坂井 雄一

TERADA Keigo SEKIGUCHI Keisuke SAKAI Yuichi

Abstract

Solder joints are important parts that affect the reliability of electronic devices. This study aims to simulate the initial process of intermetallic compound (IMC) formation and analyze the composition of the mixed layer at the copper (Cu)-tin (Sn) interface in soldering, using the molecular dynamics (MD) method. The MD method is a computational technique that enables the time-sequential tracking of atomic and molecular motion, allowing for the evaluation of thermodynamic and structural behavior at the atomic level. In this study, the parameters of the potential function for Cu (copper) and Sn (tin) were determined by comparing the calculated values of melting point and Young's modulus with experimental values, in order to simulate the formation and growth of intermetallic compounds (IMCs). MD simulation was performed using the obtained parameters, and a mixed layer of Cu and Sn was observed. Furthermore, based on the evaluation of the diffusion coefficient, atomic diffusion between Cu and Sn occurred in the very early stages of the simulation, while diffusion was subsequently limited. Comparing the RDFs obtained from the database and MD simulations, the Cu-Cu distance in the mixed layer showed similarity between the calculated and database values, while the Sn-Sn and Cu-Sn distances showed only limited similarity.

1. 緒言

近年のEV(Electric Vehicle)化の進展に伴い、車載デバイスの更なる小型化に向けた技術開発が行われている。これに伴って、はんだ接合部の高温環境下における信頼性を確保することへの要求が高まっている。

はんだ接合部では、溶融させたはんだ側の錫(Sn)と基板側の銅(Cu)ランドの界面において Sn と Cu の相互拡散が生じ、 Cu_6Sn_5 や Cu_3Sn を代表とする金属間化合物 (以下 IMC) が生成し、一般的にはんだ付け時には Cu_6Sn_5 が生成し、長期の信頼性試験後には Cu_6Sn_5 に加えて Cu_3Sn が生成することが知られている。図 1 に、はんだ接合部の模式図と 553 K のホットプレートで熱した銅板上で一般的な鉛フリーはんだ Sn-3Ag-0.5Cu を溶融させたサンプルのはんだ接合部断面の反射電子像(COMPO 像)を示す。Cu と Sn 接合面によく知られている波紋状の IMC 層が確認できる⁽¹⁾。IMC 層は硬く脆い物性をもち、薄く均一な IMC 層の形成は十分な加熱が行われたことを示す一方で、厚すぎる IMC 層は、はんだ接合部の信頼性に悪影響を及ぼすことが知られており、はんだ接合部の評価の際は、その厚みや組成について観察および分析が行われている。

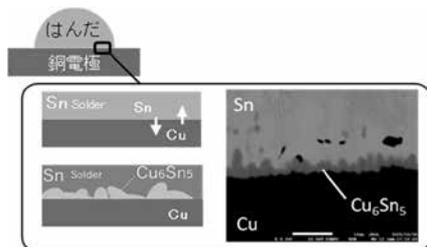


図 1 はんだ接合部模式図と断面の COMPO 像

Fig. 1 Schematic diagram and cross-sectional COMPO image of the solder joint

IMC 層の厚みや組成の評価は、一般的にはんだ接合部の断面観察や分析により実施される。試料の樹脂包埋の後、接合部の断面出しおよび研磨を行い、SEM などによる観察と分析を行う。この場合、はんだ接合部の IMC 層の形成過程を直接観察することは極めて困難である。

本研究は上記の状況に対して、分子動力学シミュレーション (Molecular Dynamics、以下 MD) を活用し、はんだ接合部において、Cu と Sn の相互拡散によって混合層が形成される過程をシミュレーションで再現することに加えて、形成した混合層の確認を通じて Cu_6Sn_5 など代表的な IMC が形成することの検証を目的とした。

2. MD シミュレーションの概要

MD法は、ニュートンの運動方程式を個々の原子に適用し、原子の座標の時刻歴を計算して、統計熱力学に基づいて系の物性を算出、制御する手法である⁽²⁾。得られた原子の動きから、統計熱力学を基本としたさまざまな分析を行い、実現象のメカニズムの解明や予測を行うことが可能である。シミュレーションモデルにおいて数千から数百万個の原子を扱うことができ、古典力学を適用することによって計算コストが低い特徴がある。IMC の生成過程を可視化する手法には、第一原理計算(Density Functional Theory、以下 DFT)もある。DFT は、量子力学に基づいて、電子の密度分布から物質の性質を求めることができる手法であり、電子構造計算に優れ、化学結合やエネルギーの高精度な予測に用いられる。扱う原子数は数十から数百個程度であることが多く、計算コストも高くなることから、今回は MD 法を活用した研究に取り組んだ。

Sn と Cu の拡散などに関する MD シミュレーションを活用

した先行研究としては以下のものがある。Jose らは、Cu(100) および Cu (111) 表面上に Sn が堆積する条件について、MD 解析の結果、界面に形成した 2 元合金層は、図 1 の COMPO 像に示されるような波紋状になることを示した⁽¹⁾。Huang らは、実物の IMC 層だけを取り出した実験は困難であるため、物性に与える温度やひずみ速度の影響を MD によって検証し、Cu₆Sn₅ などの IMC の S-S 曲線を算出した⁽²⁾。Sheng らは、Cu 基板表面上に溶融した Sn の濡れ性を MD で検証した結果、高温かつ表面粗さが荒い条件で濡れ性が良好であることを示した⁽⁴⁾。このような MD 法を活用した研究がなされていることが確認できた一方、IMC 組成の確認を行った研究はなく、本研究では、IMC の形成過程とその構造確認を目的とした。

3. 解析方法

3.1 MD シミュレーション手順

図 2 に MD シミュレーションの計算フローを示した。計算は図中①～⑤の手順で行われる。①原子を並べ、結晶構造の初期配置(初期モデル)を作成する。②原子の座標位置(原子間の距離) 情報を更新し、設定した原子間ポテンシャルから原子にはたらく力を計算する。③②で求めたはたらく力を基に、式(1)の運動方程式を式(2)～(4)の中心差分法で解くことにより各原子の Δt s 後の座標位置を計算する。このとき、原子の速度は高速であるため、 Δt は fs～ps の非常に短いタイムステップとなる。

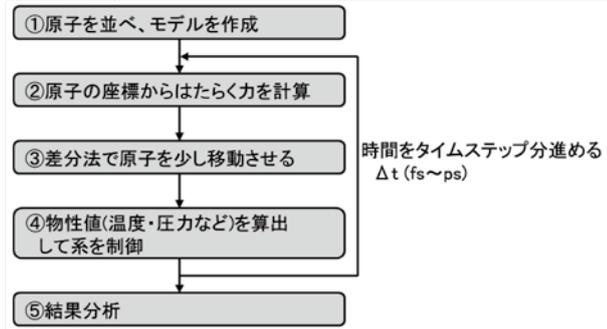


図 2 MD シミュレーションの計算フロー図

Fig. 2 Flow diagram of molecular dynamics simulation procedure

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) \quad (1)$$

$$a_i(t) = \frac{f_i(t)}{m_i} \quad (2)$$

$$v_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) = v_i \left(t - \frac{1}{2} \Delta t \right) + a_i(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$x_i(t + \Delta t) = v_i \left(t + \frac{1}{2} \Delta t \right) \times \Delta t \quad (4)$$

m_i は i 番目の原子の質量、 x_i は i 番目の原子の位置、 f_i は i 番目の原子にはたらく力、 a_i は i 番目の原子の加速度、 v_i は i 番目の原子の速度である。④③で求めた原子の速度から運動エネルギーを求め、系の温度や体積などの物性値を計算する。②～④を任意のステップ数まで繰り返すことで解析時間を進め、⑤全ステップ終了後に解析結果の分析を行う。

本研究では、MD シミュレーションにおいて最も一般的なオープンソースのソフトであり、大規模な原子・分子系の並列計算に適している LAMMPS(Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator)を使用した⁽⁵⁾。

3.2 モデル作成

シミュレーションモデル作成および結果の分析にはオープンソースの可視化ツールである OVITO (Open Visualization Tool) を使用した⁽⁶⁾。また、原子の種類と座標、格子定数と格子角、空間群などの結晶構造に関する情報を記述する CIF(Crystallographic Information File)は COD (Crystallography Open Database) から取得した⁽⁷⁾。図 3 に (a)Cu(9008468) と (b)Sn(1534488) の CIF を OVITO で表示したものを示す。また、図 4 には今回作成した初期モデルを示した。溶融したはんだを模擬した Sn 部が基板側の Cu 部の中央に重なるモデルを作成した。Cu 部は、 $20 \times 20 \times 10$ のスーパーセルとし、Sn は、 $9 \times 9 \times 10$ のスーパーセルとした。このときのモデル内の原子数は、Cu 部が 16,000 個、Sn 部が 3,240 個であった。シミュレーションの領域は X および Y 方向に 73.3 Å、Z 方向に 62.2 Å とし、Cu 部と Sn 部の間には 1 Å の空間を空けて配置した。LAMMPS で使用する境界条件は、上面(Sn 部上面)は境界を動的に調整するシュリンクラップに、その他の面は周期境界条件にそれぞれ設定した。

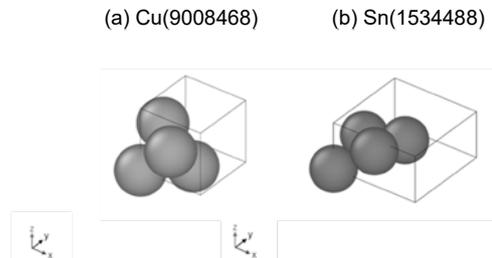


図 3 CIF ファイルを元にした(a)Cu および(b)Sn のモデル
Fig. 3 (a) Cu and (b) Sn model obtained from CIF file

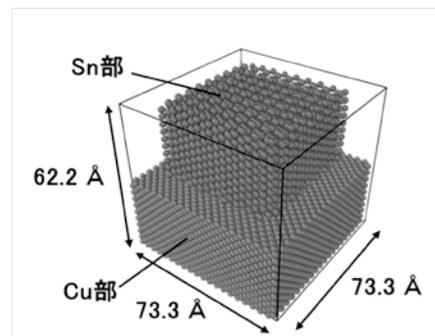


図 4 初期状態のシミュレーションモデル
Fig. 4 Initial state of the simulation model

3.3 原子間ポテンシャルと原子にはたらく力

図 2 の手順②では、原子にはたらく力は原子間ポテンシャル関数により計算される。図 5 に原子間ポテンシャルの例を示した。原子間ポテンシャルは、原子間相互作用や電子配置などによる原子間の力場を数式化したもので、1980 年代頃から様々な種類が考案されたが、全ての物質を表現できる網羅的なポテンシャルは現在に至るまで存在しない。対象とする現象を最もよく再現するポテンシャルを選定することが MD 計算手順の中で重要なプロセスとなっている。本研究では、原子にはたらく力の計算を多体ポテンシャル(金属結合系)の中より、金属材料を中心とした凝縮系の原子間相互作用を記述するために開発された半経験的ポテンシャルである MEAM (Modified Embedded-Atom Method) を選択し、解析を実施した。

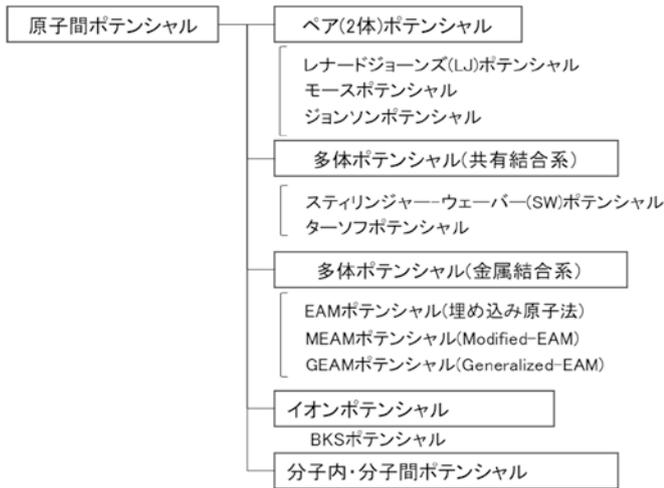


図5 分子間ポテンシャルの例
Fig. 5 Example of intermolecular potentials

MEAM ポテンシャルの基本形は式(5), (6), (7)で示される。

$$E_i = F_i \left(\frac{\rho_i}{Z_i} \right) + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} \phi_{ij}(R_{ij}) \quad (5)$$

$$F_i(\rho) = AE_c \rho \ln \rho \quad (6)$$

$$\rho_i = \sqrt{\sum_{l=0}^3 t_i^{(l)} (\rho_i^{(l)})^2} \quad (7)$$

E_i は*i*番目の原子のポテンシャル、 F_i は*i*番目の原子をその位置に埋め込むために必要なエネルギーを計算する関数(埋め込み関数)、式(5)の右辺第2項は、原子の反発相互作用を表すペアポテンシャル関数である。 ρ_i はその位置での電荷密度、 Z_i は第一近接原子数、 ϕ_{ij} は*j*番目の原子との原子間ポテンシャル、 R_{ij} は*j*番目の原子との原子間距離である。埋め込み関数 F_i は式(6)で示され、 A は材料パラメータ、 E_c は凝集エネルギーである。電荷密度 ρ_i は式(7)から求められる。 $t_i^{(l)}$ は実験値から求められる重み関数、 $\rho_i^{(l)}$ はs電子($l=0$)、p電子($l=1$)、d電子($l=2$)、f電子($l=3$)のそれぞれの部分電荷密度であり、 $\rho_i^{(0)}$ はどの元素においても1である⁽⁸⁾。 $\rho_i^{(1)}$ 、 $\rho_i^{(2)}$ 、 $\rho_i^{(3)}$ の関数について、本稿では詳細を記述しないが、角度依存項が含まれることによりMEAMポテンシャルは2体ポテンシャルの形で多体ポテンシャルのように扱うことができる。

3.4 計算方法

Cu と Sn 原子の動的な挙動解析に先立って、先行研究における MEAM ポテンシャルのパラメータセットを参照し、融点および引張操作によるヤング率をMDシミュレーションで検証した。得られた融点およびヤング率が実測の文献値に最も近いパラメータセットを選択し、シミュレーションのパラメータに使用した。融点調査では、固液平衡の状態から融点を判定した。概要を図6(a)に示す。Cu と Sn 原子のそれぞれのスーパーセルに最小化計算を行った後、上下部に分割、グループ化する設定を行い、上部に 1,500 K を与えて溶融し液体の状態とした。続いて、任意温度のNPTアンサンブル(原子数、圧力、温度一定)をセル全体に付与してシミュレーションを実施した。時間ステップを進め、液体と固体間の境界の動きにより融点を判定した。具体的には、界面が固体側に移動し液体領域が増加する場合は設定温度が融点以上、その逆は融点以下とした。ヤング率は、図6(b)に示したように、スーパーセルの上下面に1%/psのひずみ速度を与えた引張操作により得られたS-S曲線の弾性領域の傾きから算出した。

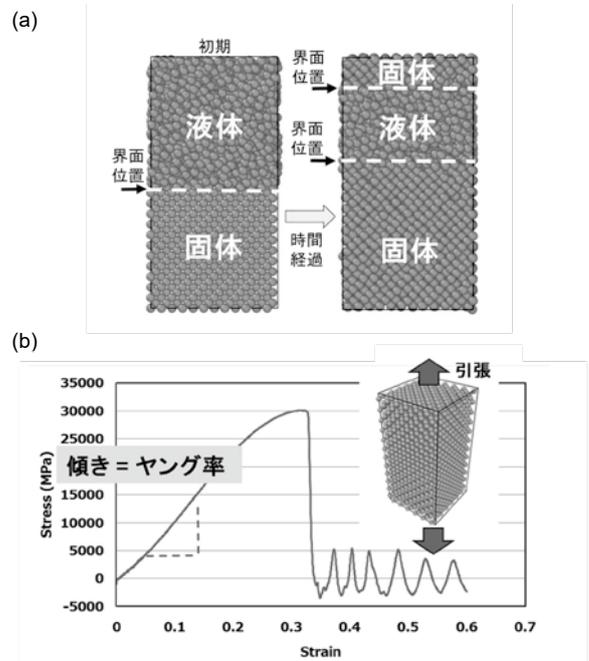


図6 パラメータ検証の方法(a)融点、(b)ヤング率
Fig. 6 Verification methods for MD parameters, (a)melting point, (b)Young's modulus

表1 先行研究におけるMEAMパラメータ (a) Sn、(b) Cu

Table1 MEAM parameters reported in previous studies (a) Sn, (b) Cu

(a) Sn	E_c (eV)	A	r_0 (Å)	α	β^0	β^1	β^2	β^3	t^0	t^1	t^2	t^3	C_{min} (Sn-Sn)	C_{max} (Sn-Sn)
Ref. (1)	3.08	1.00	3.44	6.20	6.2	6.0	6.0	6.0	1.0	4.50	6.50	-0.183	0.8	2.8
Ref. (9)			-		6.2	6.0	6.0	6.0		4.50	6.50	-0.183	-	-
Ref. (10)			-		6.2	6.0	6.0	6.0		12.50	8.00	-0.383	-	-
Ref. (4)			-		5.5	5.1	4.5	4.3		1.30	3.60	-0.900	1.29	4.43
(b) Cu	E_c (eV)	A	r_0 (Å)	α	β^0	β^1	β^2	β^3	t^0	t^1	t^2	t^3	C_{min} (Cu-Cu)	C_{max} (Cu-Cu)
Ref. (1)	3.62	1.07	2.5	5.106	3.62	2.2	6.0	2.2	1.0	3.14	2.49	2.95	2.0	2.8
Ref. (9)	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Ref. (10)	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Ref. (4)	3.62	0.73	-	5.10	2.54	2.24	1.48	0.14		1.46	1.88	1.20	0.21	4.43

先行研究に記載のパラメータを表 1 に、各パラメータにおいて実施したシミュレーション結果を表 2 に示す。表 2 より、融点およびヤング率が実験値に最も近い組み合わせとして、Cu には文献(1)のパラメータ、Sn には文献(10)のパラメータを選定した。以降の Cu と Sn 界面に関する MD シミュレーションは、このパラメータ組み合わせを用いて実施した。なお、Sn のヤング率については、本条件下では安定した値を得ることができなかった。明確な原因の特定には更なる検討が必要であるが、今回使用した MEAM ポテンシャルが fcc 構造を前提としている一方、実際の Sn は正方晶系であり、ヤング率が適切に再現されなかった可能性がある。

表 2 各パラメータによるシミュレーション結果

Table 2 Simulation results using parameters from previous studies

元素	融点 (K)			ヤング率			採用
	実験値	計算値	差	実験値	計算値	差	
Ref. (1)	Sn	505	450	55	50	-	-
	Cu	1357	1340	17	129	96	○
Ref. (9)	Sn	505	370	135	50	-	-
Ref. (10)	Sn	505	470	35	50	-	○
Ref. (4)	Sn	505	300	205	50	-	-
	Cu	1357	1200	157	129	89	40

4. 解析結果

4.1 原子の拡散状況と温度による影響

3.4 で選定した MEAM パラメータを用いて、Cu と Sn 界面の原子拡散の状況とそれに与える温度の影響を検証した。具体的には、各原子の拡散係数 D の時間変化および Cu と Sn 原子の混合状態の最終ステップでのモデルを確認した。

シミュレーションは、初期モデルの最小化計算後に、実際のはんだ付け工程を想定した 550 K、600 K、650 K の 3 温度条件をそれぞれモデル全体に与えた。時間はタイムステップ 0.001 ps を 200 万回ステップ行うように設定し、2,000 ps (2 ns) まで各原子の座標データを 5,000 ステップ毎に出力した。拡散係数は、各原子の移動量の二乗平均を表す式(8)の MSD (Mean Squared Displacement) の値から式(9)で算出した。尚、MSD の算出は、Sn 溶融による原子の移動の影響を縮小するため、図 7 に示す範囲内の原子を対象とした。

$$MSD(t) = \langle |\vec{r}_i(t) - \vec{r}_i(0)|^2 \rangle \quad (8)$$

$$D = \frac{1}{2N} \cdot \frac{d}{dt} \cdot MSD \quad (9)$$

ここで、 t は時間、 \vec{r}_i は i 番目の原子の位置ベクトル、 N は原子の移動の次元数を表す。今回は Cu と Sn の界面に垂直な Z 方向のみに注目したため、 $N=1$ とした。図 8 に温度 650 K における (a) Sn、(b) Cu 原子の拡散係数の 500 ps までの時間経過を示す。Cu と Sn 原子は共に解析時間のごく初期の期間だけで拡散係数が大きく、急激な原子拡散が生じた。また、約 50 ps 以降の拡散係数は一定で、拡散が収束していたことが確認された。これは、Cu と Sn 原子の拡散により IMC が界面近傍に生成したため、両原子が IMC を通り抜けて移動することが困難となり、移動が制限されたという可能性が考えられた。

図 9 に 40 ps までの各温度条件の Sn 原子の拡散係数を示す。Sn 原子では開始直後の溶融による原子の移動を考慮して 5 ps までの拡散係数は無視した。温度による拡散係数への大きな影響は確認されず、10 ps における各温度の拡散係数は 0.06 ~

0.09 $\text{\AA}^2/\text{ps}$ であった。式(10)に拡散係数のアレニウス式を示す。

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (10)$$

D_0 は拡散係数の理論的な最大値、 E_a は活性化エネルギー、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である。10 ps における各温度の拡散係数 0.06 ~ 0.09 $\text{\AA}^2/\text{ps}$ から、 D_0 を 5.0 $\text{\AA}^2/\text{ps}$ 、 k_B を 8.617×10^{-5} eV/K に仮定して式(10)により活性化エネルギー E_a を求めると、0.23 ~ 0.25 eV となった。一方で、Sn 原子の拡散係数について実測と解析の両方を報告した先行研究⁽⁹⁾の拡散係数から、活性化エネルギーを求めると、実測の場合で約 0.13 eV、MEAM ポテンシャルを用いた解析値で約 0.18 eV であった。活性化エネルギーは、原子の動きに対する障壁の高さを表すため、今回のシミュレーション条件は、他の研究と比較すると原子の移動が制限されていたことがわかった。

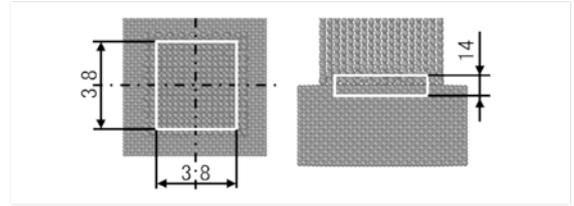


図 7 MSD 算出領域

Fig. 7 Region for MSD calculation

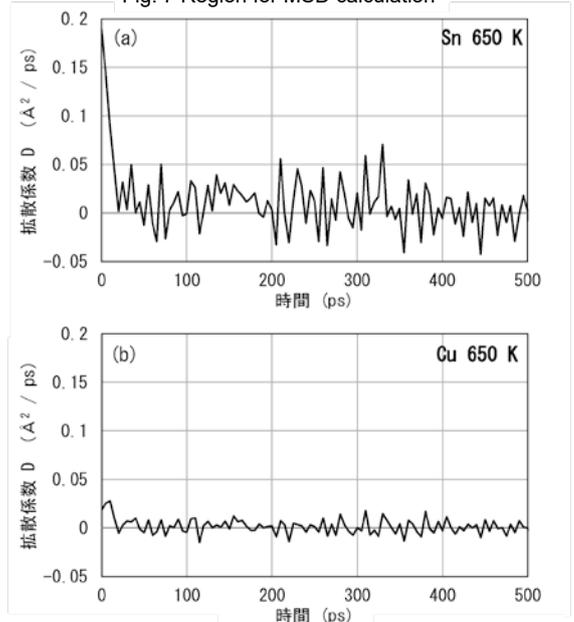


図 8 (a) Cu と (b) Sn の拡散係数の時間経過

Fig. 8 Time dependences of the diffusion coefficient of (a) Sn, (b) Cu

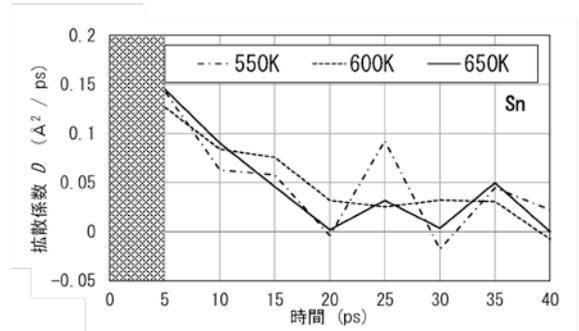


図 9 Sn の拡散係数の時間経過 (0 ~ 40 ps)

Fig. 9 Time dependences of diffusion coefficient at Sn

拡散係数では温度による大きな影響が認められなかったため、モデルを用いた解析を行った。図 10 に、各温度条件下の最終ステップ(2 ns)のモデル断面図および Z 軸方向の Cu と Sn 原子の濃度分布を示す。断面は Y 軸方向の中央(Y=36.7 Å)とした。MD シミュレーションの結果、温度 600 K と 650 K では、Cu と Sn の原子が相互に混合した領域が確認された。一方、温度 550 K では一部に原子混合が十分に進行していない領域が残っていた。濃度分布の図において Z 位置が 34.5 Å の点線が界面の初期位置を示すが、温度 600 K、650 K の拡散層は 550 K よりも広がっており、モデル図と同様の結果となった。

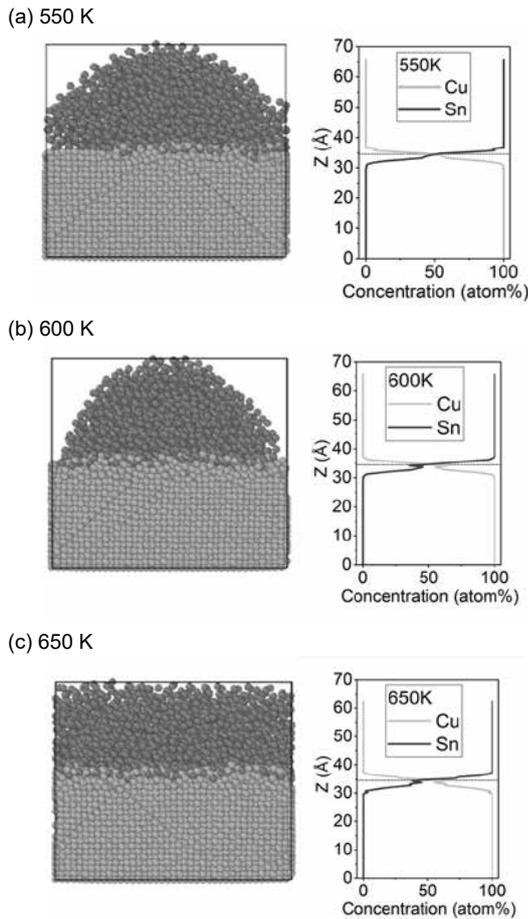


図 10 最終ステップのモデル断面図および Z 方向濃度分布
Fig. 10 Cross-sectional view of the model and concentration changes at the final step

4.2 MEAM パラメータの再検討

4.1 の結果では、温度 550 K において Cu と Sn 界面に未混合領域が残存することが確認された。そこで、材料物性を大きく損なうことなく混合挙動を改善することを目的として、合金(IMC)における角度依存パラメータである C_{min}/C_{max} の再検討を行った。具体的には、Sn に対して良好な物性再現性を報告した先行研究⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾のパラメータを参考に C_{min}/C_{max} を再設定し、その他のシミュレーション条件は 4.1 と同一とした上で、Cu/Sn 界面モデルに対して再度 MD シミュレーションを実施した。表 3 に再設定した C_{min}/C_{max} の値を示し、図 11 に C_{min}/C_{max} を再設定した後の各温度条件下における最終ステップのモデルおよび Z 方向濃度分布を示した。MD シミュレーションの結果、温度 600 K と 650 K で

は、Cu と Sn の原子が界面全体にわたって混合している様子が確認された。また、従来条件では未混合領域が残存していた温度 550 K においても、界面全域で原子混合が確認でき、未混合領域は確認されなかった。この結果より、 C_{min}/C_{max} の再設定により界面での原子間相互作用が緩和され、550 K のような低い温度条件においても Cu と Sn の混合が進行したと考えられた。組成比を考えると、 Cu_6Sn_5 が生成した場合は Cu 濃度が約 55 atom%、 Cu_3Sn が生成した場合は Cu 濃度が 75 atom% となると考えられる。 C_{min}/C_{max} 変更前は拡散層の Cu 濃度は 65 atom%程度であるのに対し、 C_{min}/C_{max} パラメータ再設定後は 53~55 atom%程度となっており、 Cu_6Sn_5 の組成比に近い値となった。また、図 12 に 650 K 条件における C_{min}/C_{max} 再設定前後の拡散係数の 80 ps までの時間経過を示した。 C_{min}/C_{max} 再設定後の値は設定前より高く、解析開始後から約 30 ps の間においても高く維持されていた。

表 3 再設定後の C_{min} および C_{max} パラメータ
Table 3 C_{min} and C_{max} parameters after reconfiguration

	C_{min}	C_{max}	C_{min}	C_{max}	C_{min}	C_{max}	C_{min}	C_{max}
	(Sn-Sn-Cu)		(Cu-Sn-Cu)		(Sn-Cu-Sn)		(Cu-Cu-Sn)	
Ref. (1)	0.8	2.8	0.8	2.8	0.8	2.8	-	-
Ref. (10)	0.14	3.41	0.27	1.93	0.17	1.15	0.07	2.36

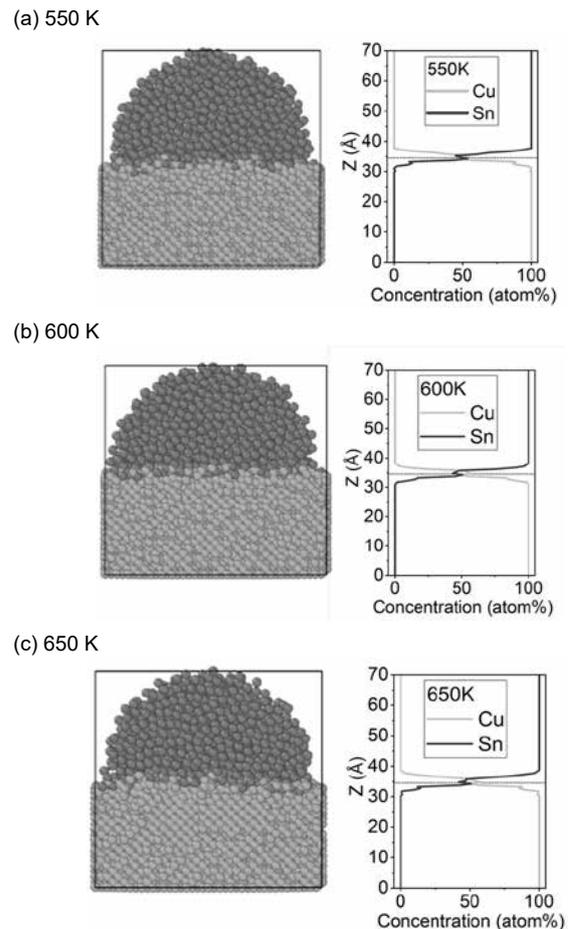


図 11 C_{min} と C_{max} 変更後の最終ステップのモデル断面図および Z 方向濃度分布
Fig. 11 Cross-sectional view of the model and concentration changes at the final step after changes in C_{min} and C_{max}

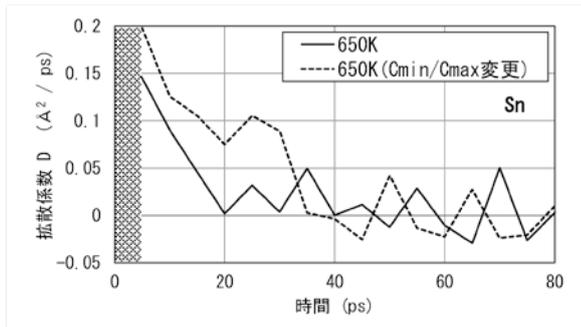


図 12 温度 650 K における拡散係数の時間経過

Fig. 12 Time dependences of diffusion coefficient at 650 K

4.3 混合領域の評価

Cu と Sn の界面に形成された混合領域の結晶構造を評価するため、動径分布関数(Radial Distribution Function、以下 RDF)を取得した。RDF は基準となる粒子から距離 r の位置に他の粒子が存在する確率の分布を示す関数である。ピークが現れる原子間距離 r を理想的な値と照合することでその結晶構造を評価することができる。評価には、4.2 の Cmin/Cmax 再設定後の温度 650 K におけるシミュレーション結果の最終ステップを用いた。界面の Cu/Sn 混合領域の結晶構造をより詳細に把握するために、界面中心($Z=35$ Å)から ± 5 Å の範囲を抽出し、この領域を混合層とした。

最初に、混合層下部の Cu 原子群および層上部の Sn 原子群の RDF と、Materials Project⁽¹²⁾(以下 MP)から取得した Cu および Sn 単体の RDF を重ね合わせた結果を図 13 に示す。Cu 原子群と Cu データベースの RDF は良好に一致したのに対し、Sn では第 1 近接および第 2 近接は一致したが、第 3 近接以降でずれが生じていた。これは、3.4 にも記載したとおり、Sn の結晶構造に対して原子間ポテンシャルの表現力が十分でないことが考えられるが、詳細については検証ができなかった。

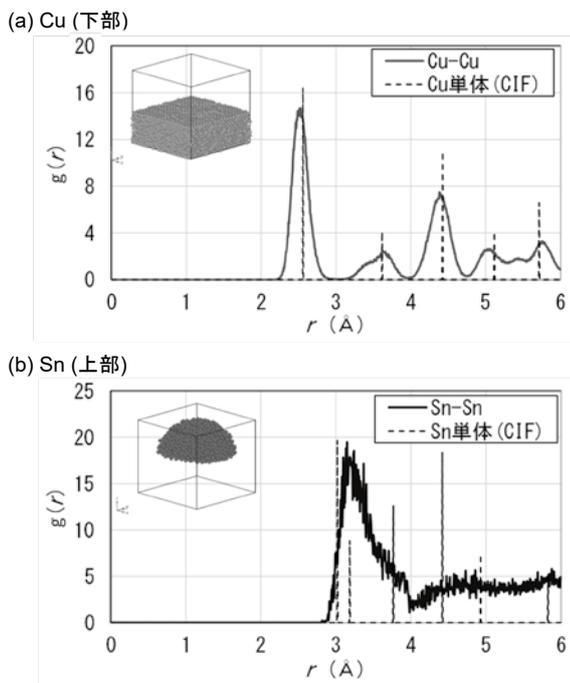


図 13 動径分布関数 (a) Cu、(b) Sn

Fig. 13 Radial distribution function (a) Cu, (b) Sn

続いて、混合層内の原子配置が Cu_3Sn と Cu_6Sn_5 の IMC 結晶構造と一致するか評価した。検証対象となる Cu_3Sn および

Cu_6Sn_5 の結晶構造 CIF ファイルは、MP から取得し、 Cu_3Sn は mp-13138、 Cu_6Sn_5 は mp-1223 をそれぞれ用いた(図 14)。

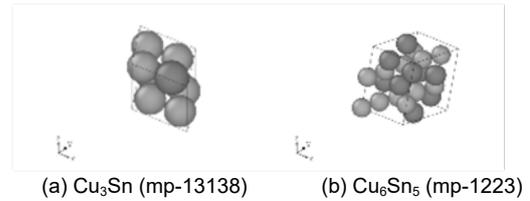


図 14 単位格子モデル (a) Cu_3Sn 、(b) Cu_6Sn_5

Fig. 14 Unit cell model of (a) Cu_3Sn and (b) Cu_6Sn_5

図 15(a)に混合層の RDF を示した。まず、Cu-Cu 間の RDF ピーク値が現れる原子間距離をデータベースから得られた値と比較した結果、混合層の Cu-Cu 間の第 1 近接距離は、 Cu_6Sn_5 および Cu_3Sn の両 IMC の第 1 近接距離と一致していた。一方で、Sn-Sn 間の比較では、混合層の第 1 近接距離は Cu_6Sn_5 と一致したものの、 Cu_3Sn とは一致しなかった。したがって、混合層の構造は Cu_3Sn よりも Cu_6Sn_5 に近い可能性を考えたが、Cu-Sn 間では Cu_6Sn_5 、 Cu_3Sn の両 IMC と一致せず、混合層の Cu-Sn 構造が IMC と異なる構造をとっていることも示される結果となった。この要因は上述のとおり、Sn の結晶構造に対するポテンシャルの表現力不足やパラメータ、アンサンブルについての検討が十分でないことが考えられた。

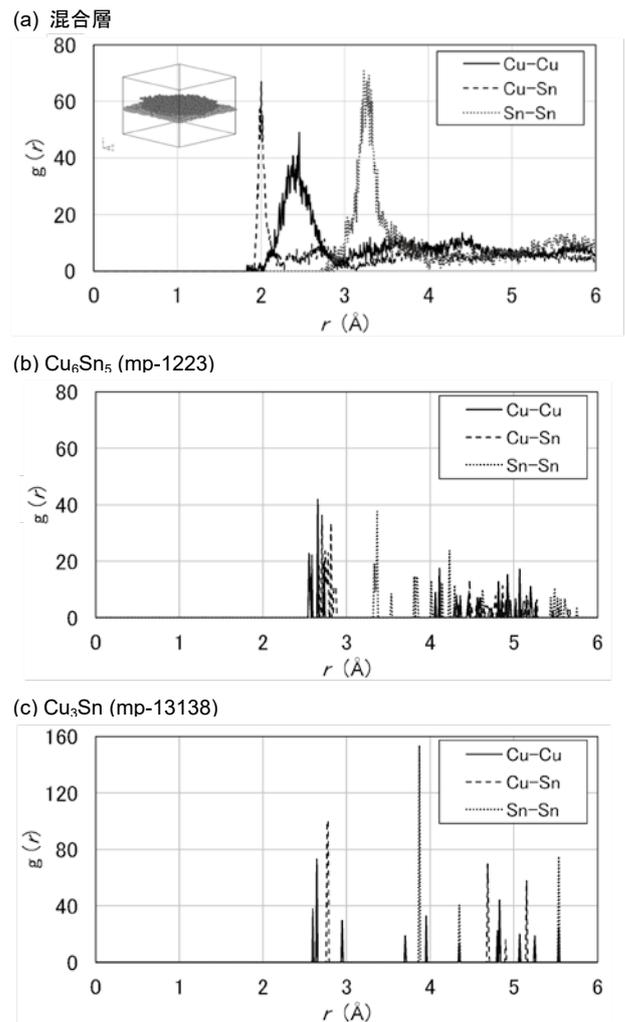


図 15 動径分布関数 (a) 計算結果(混合層)、(b) Cu_6Sn_5 および Cu_3Sn のピーク値

Fig. 15 Radial Distribution Function (a) Simulation results (mixed layer), (b) Peak value of Cu_6Sn_5 and Cu_3Sn

5. 結言

本研究では、分子動力学(MD)シミュレーションを用い、はんだ接合部において、Cu と Sn の相互拡散によって IMC 層が形成される過程を再現すること、形成した層が Cu₆Sn₅ など代表的な構造を示すことを目標として検討を行ったところ、以下の結果が得られた。

実際の融点やヤング率を MD シミュレーションで再現するような MEAM ポテンシャルのパラメータセットを選定したうえで IMC 層形成のシミュレーションを実施した。その結果、Cu と Sn の界面に両原子が混合する IMC 層が形成され、その組成は Cu₆Sn₅ に近い値となった。MD シミュレーションを用いた拡散係数の経時変化や活性化エネルギーの算出から、原子の拡散現象は解析開始からごく初期段階で生じ、すぐに収束に向かうという結果が得られた。また、パラメータ変更によって拡散係数が実験値に近づくことを示した。

動径分布関数 RDF の計算によって、MD シミュレーションで形成された IMC の結晶構造を検証した結果、混合層内の Cu-Cu 間の原子間距離(構造)は、データベースから得られる Cu₆Sn₅ と Cu₃Sn および Cu 単体の距離と類似した値を示した。一方で、Sn-Sn 間と Cu-Sn 間の RDF ではデータベースから得られた距離と一致せず、Cu₆Sn₅ や Cu₃Sn と同一の結晶構造を有する混合層の生成を示すには至らなかった。MEAM 以外のポテンシャル、パラメータ、IMC 層形成時の熱力学的な条件などについて、さらなる検討を行うことで IMC 形成過程の可視化や物性のさらなる高精度な検証につながると期待される。

文 献

- (1) J. F. Aguilar *et al.* *Modeling Simul. Mater. Sci. Eng.* **8** (2000) 335
- (2) 泉聡志, 増田裕寿共著, 機械・材料設計に生かす実践分子動力学シミュレーション, 森北出版, (2013), P-3
- (3) W. Huang *et al.* *Crystals* **11** (2015) 1415
- (4) J. Sheng *et al.* *Results in Surface and Interfaces* (2024) 100219
- (5) A. P. Thompson *et al.* *Comput. Phys. Commun.* **271** (2022) 108171
- (6) A. Stukowski *et al.* *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.* **18** (2010) 015012
- (7) Crystallography Open Database. <https://qiserver.ugr.es/cod/index.php>
- (8) 酒井高行, 村上秀之, 原田広史, 新田明人, 多元系合金を扱える分子動力学解析システムの開発, 電力中央研究所報告, 研究報告 T99087 (2000)
- (9) K. H. Kim *et al.* *Calhad* **48** (2015) 27
- (10) S. Etesami *et al.* *Acta Materialia* **161** (2018) 320
- (11) W. S. Ko *et al.* *Metals* **8** (2018) 900
- (12) <https://materialsproject.org/>

Ⅲ. スズの表面酸化状態に関する研究

Study on the Surface Oxidation State of Tin

大浦 真樹
OURA Masaki
関口 啓介
SEKIGUCHI Keisuke

柳原 康平
YANAGIHARA Kohei
坂井 雄一
SAKAI Yuichi

村上 聡
MURAKAMI Satoshi
角田 龍則
KAKUDA Tatsunori

Abstract

In electronic component assembly processes, soldering reliability is a critical factor that directly affects the quality and performance of electronic products. Tin plating applied to component terminals is widely used to improve solder wettability and ensure stable solder joints. However, in actual manufacturing, poor solder wettability still occurs even when tin-plated components are used. Insufficient solder wettability is caused by multiple factors. One primary factor is the oxide film formed on the surface of the tin plating. In addition, the diffusion of underlying metals, such as copper and nickel, into the tin layer, as well as surface sulfidation during storage, adversely affects solder wettability. When solder wetting is inadequate, incomplete bonding may occur at the joint interface, leading to stress concentration. As a result, the electrical and mechanical reliability of solder joints may deteriorate, potentially causing product failure. Nevertheless, the relationship between the structure of tin oxide films and solder wettability has not yet been fully elucidated. This study investigates the relationship between the structure of oxide films on tin surfaces and solder wettability. The objective of this study is to provide fundamental knowledge for achieving reliable solder joints. To evaluate the oxide films, tin plates were subjected to anodic oxidation and heat treatment in a thermostatic chamber. The chemical states of the fabricated oxide films were evaluated using Auger electron spectroscopy, and the differences were identified. Furthermore, solder wettability was evaluated on the oxidized tin plates, and differences in wetting behavior were observed between the two types of oxide films. To clarify the origin of this phenomenon, cross-sectional observations of the oxide films were conducted using transmission electron microscopy, and surface analyses were performed using Auger electron spectroscopy. The results suggest that the porous structure and surface roughness of the oxide films significantly influence the solder wetting behavior.

1. 緒言

電子部品の実装工程において、はんだ付けの信頼性は電子製品の品質および性能に直接影響を及ぼす重要な要素である。そのため、部品端子に施されるスズメッキは、はんだ濡れ性を向上させ、安定したはんだ接合を確保する目的で広く用いられている。しかし、実際の製造工程においては、スズメッキ品を使用している場合であっても、はんだ濡れ不良が依然として発生している。その主な要因の一つは、スズメッキ表面に形成される酸化膜であり、加えて銅やニッケルなどの下地金属がスズ層中に拡散することや、保管時に生じる表面の硫化も、はんだ濡れ性に影響を及ぼしている⁽¹⁾。はんだの濡れが不十分な場合、接合界面において不完全な接合が生じやすくなり、応力集中が発生する可能性がある。その結果、はんだ接合部の電気的および機械的信頼性が低下し、製品故障につながるおそれがある。しかし、スズ酸化膜の構造や組成とはんだ濡れ性との関係については、十分に解明されていないのが現状である。

本研究では、スズ表面に形成される酸化膜の構造とはんだ濡れ性との関係について詳細に検討する。本研究の目的は、スズ酸化膜の特性とはんだ濡れ性との関係についての理解を深めるとともに、信頼性の高いはんだ接合部を実現するための基礎的知見を得ることである。

2. 陽極酸化によるスズ板への酸化膜作製と評価

スズメッキ表面に形成される酸化膜の構造とはんだ濡れ性

との関係を明らかにすることを目的として、スズ板に酸化膜を作製した。

2.1 酸化膜作製

電気化学的手法により、酸化膜厚を制御して作製するため、スズ板(ニラコ製、純度 99.9%、板厚 0.2 mm)を用いて、陽極酸化を実施した。その様子を図 1 に示す。処理条件は、炭酸ナトリウム(富士フィルム和光純薬製、特級)を純水にて 0.1 M に調整した溶液を使用した。対極は白金(イーシーフロンティア製、直径 0.5 mm)を用いた。印加電圧は 3.5 V、印加時間は 15 分、30 分、60 分で実施した。

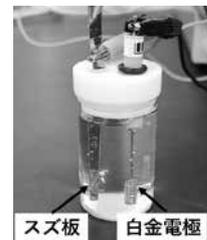


図 1 陽極酸化による酸化膜作製の様子

Fig. 1 Image of fabrication of oxide film by anodization

2.2 酸化膜の評価

スズ板表面に作製された酸化膜をオージェ電子分光分析装置(日本電子製、JAMP-9500F)の深さ方向分析にて評価した。

前述の電気化学的手法で、電圧を 15 分印加したスズ板の深さ方向分析結果を図 2 に示す。横軸は、SiO₂標準試料をもとに設定したエッチングレートを用いて換算した深さを示している。また、酸化膜厚は酸素原子濃度が最大値に対して半分になる深さとし、図 2 では約 150 nm と算出された。それぞれの作製条件にて算出した酸化膜厚を図 3 に示す。酸化膜厚と電圧印加時間には正の相関が認められた。

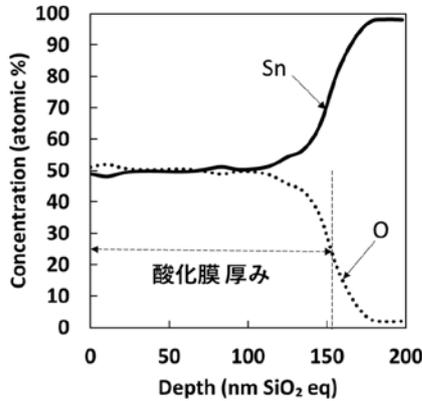


図 2 スズ酸化膜の深さ方向分析結果 (印加時間 : 15 分)

Fig. 2 Depth profile of tin plate with tin oxide-layer (Anodization time : 15 min)

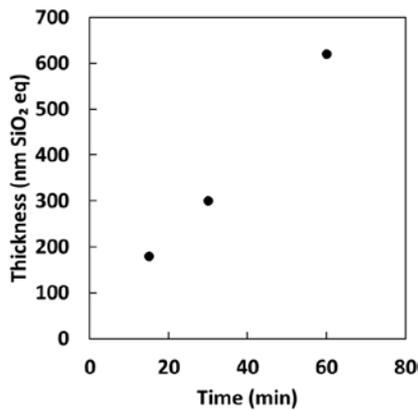


図 3 酸化膜厚と電圧印加時間の関係

Fig. 3 Relationship between oxide film thickness and voltage applied time

次に、オージェ電子分光分析装置にて波形分離による酸化膜の評価を実施した。スズ(Sn)は、一酸化スズ(SnO)と二酸化スズ(SnO₂)の化学状態をとる。図 4 にオージェ電子分光分析装置で測定された標準試料 Sn、SnO、SnO₂ のスペクトルを示す。Sn のスペクトルと比較し、SnO は約 4 eV、SnO₂ は約 5 eV 低エネルギー側へシフトし、それぞれ異なる位置にピークが出現することが判る。これらのスペクトルデータを用いて、装置付属のデータ解析ソフト(Spectra Investigator)にて、波形分離によって酸化膜の化学状態を評価した。図 5 にスズ酸化膜の深さ方向分析のスペクトルを波形分離した結果を示す。酸化膜の最表層に SnO₂ が形成されており、Sn との間には SnO が形成されていることが判った。また、図 5 に示す①および②を、それぞれ SnO₂ 層および SnO 層の厚みとすると、作製した酸化膜は SnO₂ 層が厚く形成されていることが判った。同様に、電圧印加時間 30 分、60 分の試料にて深さ方向分析お

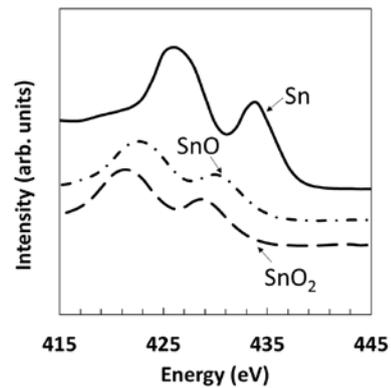


図 4 Sn、SnO、SnO₂ の標準スペクトル

Fig. 4 Standard spectra of Sn, SnO, and SnO₂

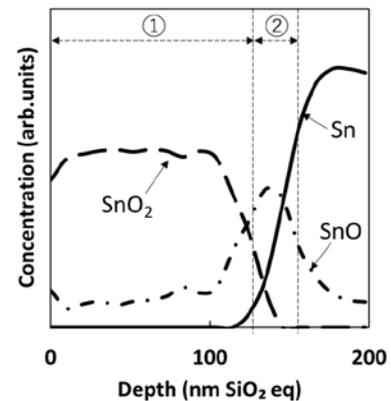


図 5 深さ方向分析 波形分離 (印加時間 : 15 分)

Fig. 5 Depth profile deconvoluted from the measured spectra (Anodization time : 15 min)

よび波形分離し、SnO₂ 層および SnO 層の厚みを算出した結果を表 1 に示す。電圧印加時間が長くなるほど、SnO₂ 層が厚くなる傾向にあり、SnO 層の厚みはほとんど変化しないことが判った。陽極酸化の場合、スズ板表面では水の電気分解により常時酸素が発生するため、酸素がスズ表面に供給されつづけ、価数の多い SnO₂ として酸化膜が形成されていくと考えられる。

表 1 陽極酸化にて作製した酸化膜の SnO₂ 層、SnO 層の厚み

Table 1 Thicknesses of SnO₂ and SnO layers in oxide films

印加電圧 (V)	電圧印加時間 (min)	SnO ₂ 層 (nm SiO ₂ eq)	SnO 層 (nm SiO ₂ eq)
3.5	15	125	31
3.5	30	230	31
3.5	60	540	42

3. 加熱処理によるスズ板への酸化膜作製と評価

3.1 酸化膜作製

より実環境で形成される酸化膜に近づけるため、大気雰囲気中でスズ板に酸化膜を作製した。恒温槽(エスペック製、PHH-202)に、2.1 と同じスズ板を投入し、設定温度 200 °C、保持時間 24 時間、72 時間、168 時間として酸化膜を作製した。また、スズ板はあらかじめアセトンおよび純水で洗浄し、乾燥させたものを使用した。

3.2 酸化膜の評価

作製された酸化膜を 2.2 と同様に深さ方向分析した。図 6 に酸化膜厚と恒温槽保持時間の関係を示す。陽極酸化と比較し、膜厚の増加量は少なく、飽和傾向を示した。次に、それぞれの酸化膜の深さ方向分析を波形分離した結果を図 7 に示す。陽極酸化の場合と同様に、最表層から SnO₂、SnO の順に酸化膜が形成されており、①および②を SnO₂ 層および SnO 層の厚みとすると、陽極酸化の場合と異なり、SnO 層が厚く形成されることが判った。

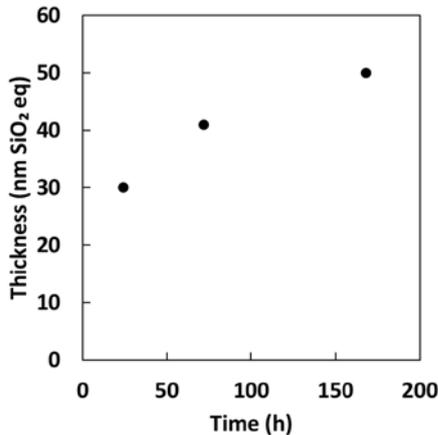


図 6 酸化膜厚と恒温槽保持時間の関係

Fig. 6 Relationship between oxide film thickness and isothermal holding time

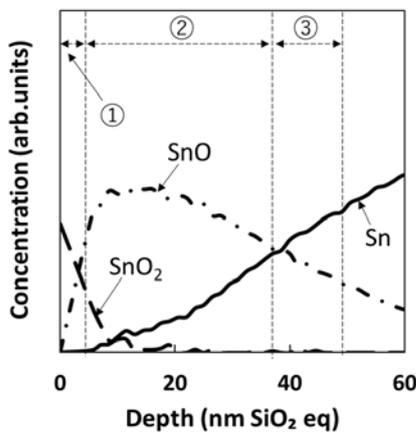


図 7 深さ方向分析 波形分離 (保持時間 : 168 時間)

Fig. 7 Depth profile deconvoluted from the measured spectra (Holding time : 168 hour)

さらに、保持時間ごとに SnO₂ 層および SnO 層の厚みを算出した結果を表 2 に示す。保持時間が長くなるほど SnO 層が厚くなる傾向にあり、SnO₂ 層の厚みはほとんど変化しないことが判った。これは、スズ板表面の酸素濃度が低い状態で酸化が進み、価数の少ない SnO として酸化膜が形成されていくためと考えられる。

4. スズメッキ銅線への酸化膜作製と評価

スズメッキ銅線を加熱処理し、酸化および拡散を加速させた場合に生じる表面状態の変化を確認した。直径 80 μm、メッキ膜厚 0.7 μm のスズメッキ銅線を、設定温度 200 °C の恒温槽中で 24 時間保持し、オージェ電子分光分析装置にて深さ

表 2 恒温槽中にて作製した酸化膜の SnO₂ 層、SnO 層の厚み

Table 2 Thicknesses of SnO₂ and SnO layers in oxide films prepared in a constant-temperature chamber

設定温度 (°C)	保持時間 (h)	SnO ₂ 層 (nm SiO ₂ eq)	SnO 層 (nm SiO ₂ eq)
200	24	3	20
200	72	4	25
200	168	4	36

方向分析を実施した。図 8 に加熱処理前後のメッキ表面の深さ方向分析を示す。処理前では、最表面に Sn が約 34%、Cu が約 6%、O が約 60% 検出されており、主に Sn と O による酸化膜が形成されていることが判った。一方処理後では、最表面に Sn が約 4%、Cu が約 46%、O が約 50% 検出されており、主に Cu と O による酸化膜が形成されていることが判った。この結果から、下地金属である銅がメッキ表面まで拡散し、酸素と結びついて酸化膜を形成していると推察される。メッキ線における下地金属の拡散は、室温でも進行することから、はんだ濡れ性にはスズ酸化膜だけでなく、下地金属の拡散や酸化も影響を与えられられる⁽²⁾。

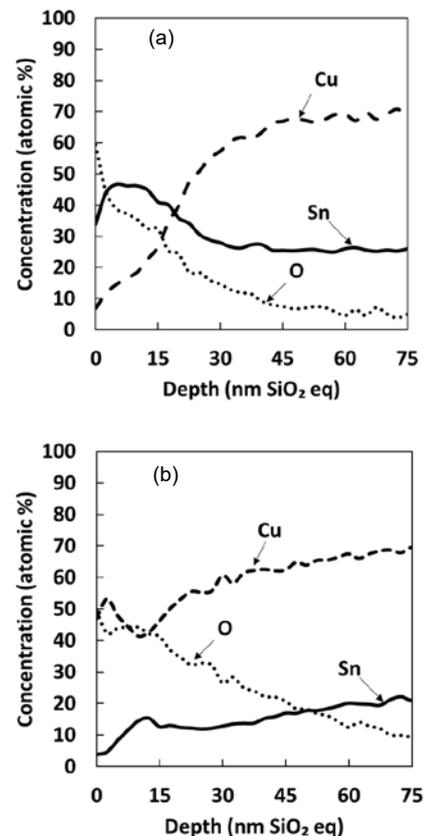


図 8 スズメッキ銅線の深さ方向分析 (a) 加熱処理前、(b) 加熱処理後
Fig. 8 Depth profile of Sn plated copper wire : (a) untreated and (b) after heat treatment

5. はんだ濡れ性の確認

陽極酸化および加熱処理によってスズ板表面に形成された酸化膜を対象に、はんだの濡れ広がりの違いを評価した。具体的には、酸化処理時間を変化させた複数のスズ板を用い、酸化膜厚とはんだ濡れ性との関係を確認した。

図9に光学顕微鏡による観察の様子を示す。直径20 mmのホットプレート上に10 mm角のアルミナ基板、5 mm角のスズ板、鉛フリーはんだ(白光製、FS-521、Φ1 mm)を順に置いた。はんだは穴あけポンチを用いて、 4 ± 0.5 mgになるよう調整した。ホットプレートの設定温度は225 °C(はんだの融点は215 °C)とし、設定温度到達30秒後に光学顕微鏡で画像撮影を行った。撮影した画像を二値化処理し、はんだが濡れ広がった面積を算出した。なお、酸化処理時間ごとに3回の繰り返し試験を行い、その平均値を濡れ広がり面積とした。

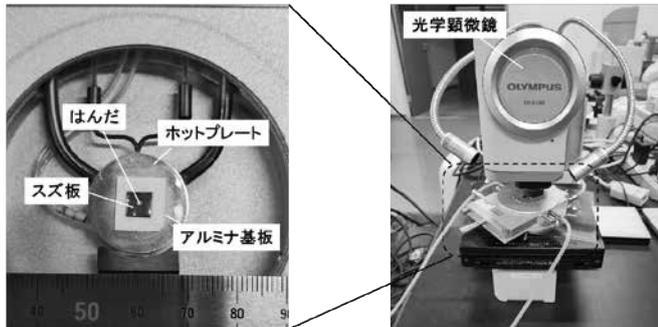


図9 光学顕微鏡による観察
Fig. 9 Optical microscope observations

はんだの濡れ広がった面積と酸化処理時間の関係を図10に示す。陽極酸化したスズ板の場合、処理時間が9分まではんだが濡れ広がる様子が確認され、10分の時点で溶けたはんだが球状になり、濡れ広がらないことが確認された。また、深さ方向分析にて、10分時点での酸化膜厚は約120 nmであることが確認された。一方で、恒温槽中にて処理したスズ板の場合、処理時間が長くなるほど、濡れ広がり後のはんだ面積が小さくなっていく傾向が確認された。しかし、168時間まで処理を実施したが、はんだが球状になることはなかった。また、深さ方向分析にて168時間時点での酸化膜厚は約50 nmであることを確認した。

はんだ濡れ性確認後の試料の様子を図11に示す。陽極酸化したスズ板の場合、はんだはスズ板内部へ浸透するように濡れ広がった。一方、恒温槽中にて処理したスズ板の場合、はんだはスズ板上で、高さ約0.1~0.2 mm盛り上がった形状に濡れ広がった。このことから、両者でははんだとスズ板との界面状態に違いがあると考えられる。また、恒温槽中にて保持(200 °C、24時間)したスズメッキ線についてもはんだ濡れ性の確認を試みた。同量のはんだとメッキ線を接触させ、ホットプレート上で加熱し、濡れ広がり方を確認した。確認後の様子を図12に示す。加熱処理後でも、はんだとメッキ線は接合された。しかし、加熱処理後の濡れ広がり方は処理前に比べて小さかったことから、表面酸化により濡れ性が低下したと考えられる。

6. 酸化膜断面観察

陽極酸化および加熱処理によってスズ板上に形成された酸化膜の構造や厚みの評価を行うため、透過電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope : TEM、日本電子製、JEM-2100)にて酸化膜断面の観察を実施した。観察には、陽極酸化(印加電圧3.5 V、印加時間3分)および恒温槽(設定温度

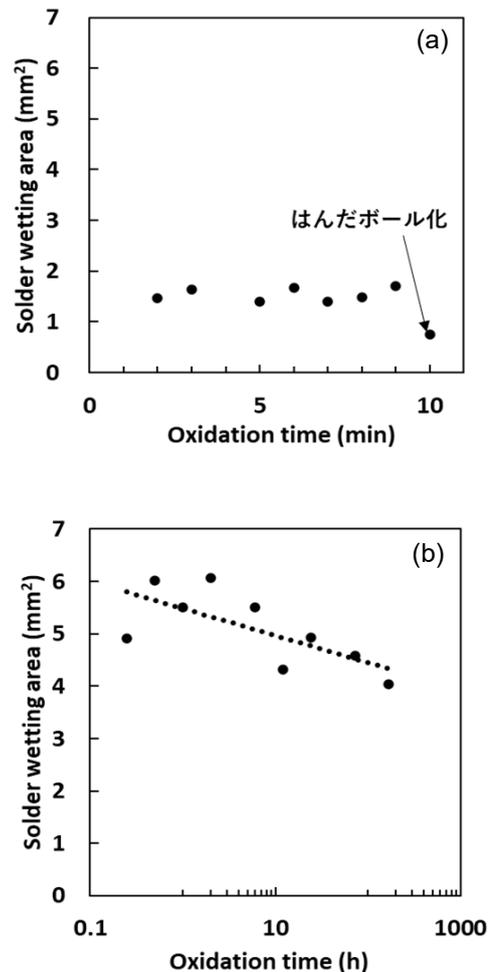


図10 はんだの濡れ広がり面積と酸化処理時間の関係 (N=3)
(a) 陽極酸化, (b) 恒温槽中にて処理

Fig. 10 Oxidation time dependence of solder wetting area (N=3)
: (a) anodization and (b) isothermal chamber

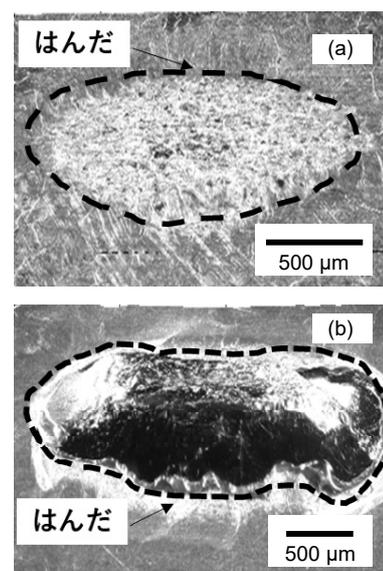


図11 はんだ濡れ広がり後のスズ板の様子 (a) 陽極酸化 (b) 恒温槽中にて処理

Fig. 11 Appearance of tin plate after solder wetting : (a) anodization and (b) isothermal chamber

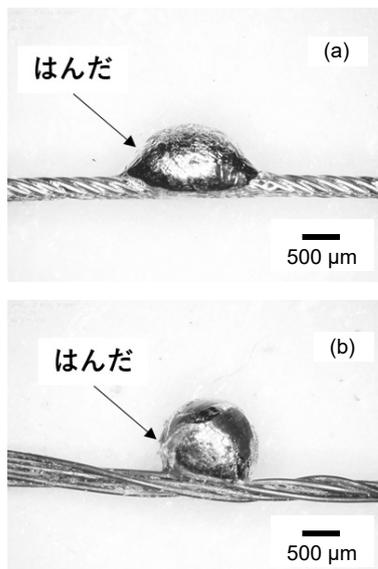


図 12 はんだ濡れ広がり後のスズメッキ線の様子 (a) 未処理 (b) 恒温槽中にて処理

Fig. 12 Appearance of tin-plated copper wire after solder wetting : (a) untreated (b) isothermal chamber

200 °C、保持時間 168 時間)にて酸化膜を形成させたスズ板を使用した。

まず、マイクロサンプリングユニットを備えた集束イオンビーム加工機(日立ハイテック製、FB2200)を用いて酸化膜を薄片加工した。その後、TEM へ試料を投入し酸化膜断面の観察を実施した。図 13 に TEM 画像および深さ方向分析を示す。TEM 画像中の①～③が酸化膜となっており、両条件とも 3 層構造となっていることが判った。また、深さ方向分析の①～③に対応すると考えられる位置を示す。①は両者とも SnO₂ で形成されており、③は SnO および Sn にて形成されていると推察された。②については、陽極酸化で形成された酸化膜の場合は SnO₂、恒温槽中で形成された酸化膜の場合は SnO が主であると推察された。

7. 酸化膜表面観察

5 章にて陽極酸化および恒温槽中で形成された酸化膜のはんだ濡れ性を確認したところ、両者の濡れ広がり方に違いがみられた。この現象について、SnO₂ 層および SnO 層の厚みの違いのほか、物理的構造に違いがないか確認を行った。図 13 に示す①～③の位置におけるスズ板表面の SEM 画像を図 14 に示す。②および③については、オージェ電子分光分析装置のアルゴンイオンエッチングにより表層を除去し観察した。陽極酸化の場合、①～③のすべてで直径約 0.1 μm の孔が無数に確認され、多孔質な構造であると推察された。また、①から③にかけて局所的にエッチングの進行度に差が確認された。これは、多孔質な酸化膜では原子密度が不均一であり、孔の内部と外部でアルゴンイオンによるエッチング量に差が生じたためと考えられる。陽極酸化した試料で吸い込まれるようにはんだが濡れ広がった現象は、熔融したはんだが孔内部へ引き込まれることで、スズ板へ浸透するように濡れ広がったことに起因すると推察される。一方で恒温槽中にて作製された酸化膜には孔は確認されず、比較的緻密な構造であることが判った。また、①から③にかけて均一にエッチングが進む

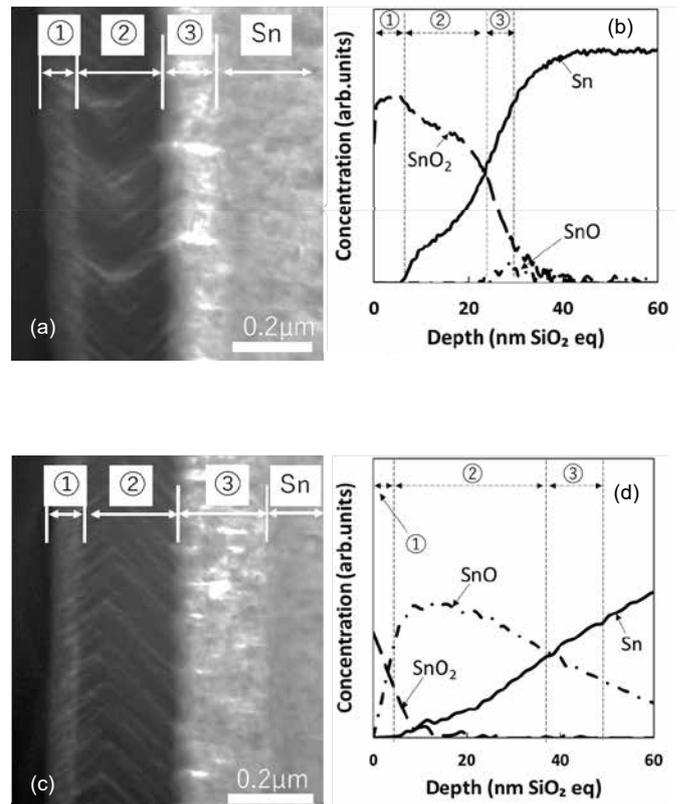


図 13 TEM 画像および深さ方向分析 (a), (b) 陽極酸化 (c), (d) 恒温槽中にて処理

Fig. 13 TEM images and depth profile : (a - b) anodization and (c - d) isothermal chamber

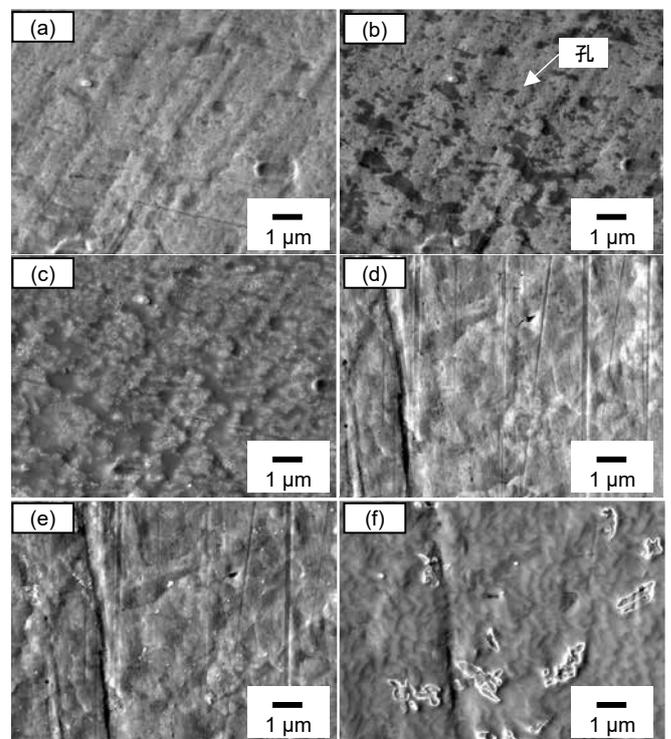


図 14 表面の SEM 画像 (a) 陽極酸化①, (b) 陽極酸化②,

(c) 陽極酸化③, (d) 恒温槽①, (e) 恒温槽②, (f) 恒温槽③

Fig. 14 Surface SEM images : (a) anodization①, (b) anodization②, (c) anodization③, (d) isothermal chamber①, (e) isothermal chamber② and (f) isothermal chamber③

様子が確認された。これは、形成された酸化膜が緻密で、アルゴンイオンが表面に対して均一に衝突したためと考えられる⁽³⁾。この緻密な構造により、はんだは酸化膜内部へ引き込まれにくく、盛り上がるように濡れ広がったと考えられる。

8. 結言

スズメッキ表面に形成される酸化膜の構造とはんだ濡れ性との関係を明らかにすることを目的として、スズ板に酸化膜を作製した。オージェ電子分光分析の波形分離によって酸化膜は最表層から SnO₂、SnO の順で構成されており、陽極酸化では SnO₂、恒温槽中では SnO の割合が高い膜が形成されることが確認できた。また、各条件で形成された酸化膜とはんだ濡れ性の関係について、陽極酸化および恒温槽中で形成された酸化膜は、前者は基材に浸透していくようにはんだが濡れ、後者は基材上で盛り上がるようにはんだが濡れることを確認した。さらに、酸化膜の表面観察結果から、酸化膜の多孔質構造や凹凸が影響していると推察できた。

スズメッキ銅線において、酸化膜を作製し評価を行った。その結果、加熱処理後には、下地金属の銅がメッキ表面まで拡散しており、酸化膜を形成していたこと、はんだの濡れ広がり方を観察し、加熱処理後では濡れ性が低下することを確認した。また、スズメッキ品のはんだ濡れ性には、スズ酸化膜に加え下地金属の拡散による酸化膜形成も影響を及ぼすと考えられる。

参考文献

- (1) 泉水崇彰, 長居秀幸, 「Sn 酸化被膜に基づくはんだ付け性試験の新規前処理の検討」, 第 32 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム(MES2022 論文集), 2022, pp. 281-284.
- (2) 野瀬 昌治.「カラー版 目で見てナットク! はんだ付け作業」, 日刊工業新聞社 2021 年, pp. 16-17
- (3) M. Seo and N. Sato, Depth-profiling of Surface Oxide Film/Metal Systems, *Transactions of the Japan Institute of Metals*, **26** (10), (1985), pp. 747-752

IV. 薄膜における接合技術に関する研究

A Study on Joining Technologies for Thin Films

福澤 健介 升方 康智 村上 聡
FUKUSAWA Kensuke MASUGATA Yasutomo MURAKAMI Satoshi
山岸 英樹 寺澤 孝志
YAMAGISHI Hideki TERASAWA Takashi

Abstract

Joining is a critical process used across various industrial sectors. Numerous joining methods exist, each with distinct advantages and disadvantages, necessitating selection based on application. Cold forging welding (CFW), a high-productivity joining method that forms and joins materials using instantaneous pressure, is gaining attention in fields such as multi-material applications. However, conventional cold forging welding compresses the base material, making it unsuitable for processes where deformation is unacceptable. Therefore, we are developing CFW application technology for thin films that enables joining without deforming the base material. This method has successfully joined base materials such as stainless steel and glass. To expand further applications, evaluation and analysis of properties such as strength are necessary. This study evaluates strength, the joint interface, and deformation state during pressurization using SUS substrates as the base material. This analysis aims to elucidate the physical mechanism of the micro-CFW method for thin films.

We evaluated the bonding strength of the micro-CFW method using sputtered Al thin films with microscopic surface irregularities. By varying the bonding temperature at sputter deposition temperatures of 80°C and 130°C, we observed a tendency for the tensile shear strength to increase with higher bonding temperatures under both conditions. Furthermore, we confirmed that bonding strength reached a level comparable to the strength of the Al thin film itself at a bonding temperature of approximately 216°C. We also confirmed that the bonded Al/Al interface formed a uniform interface free of voids.

This joining method can be applied not only to metals but also to various materials such as glass and ceramics, making it promising for applications in numerous fields including electronic devices, medical equipment, and the automotive sector.

1. 緒言

接合技術は、物理的・科学的、あるいは機械的な手段を用いて個別の材料を一体化させ、単一の素材では成しえない機能的・構造的付加価値を創出する技術である。また製造業において、単なる組み立て工程の一環ではなく、製品の性能、安全性、コスト、ひいてはエネルギー効率など、最終製品の多くの性能を左右する根幹的な要素を担う技術であり、次世代自動車、航空宇宙、電子デバイス、医療、リサイクル分野など、様々な分野において接合技術に関する技術開発が活発に行われている。

接合方法は大きく分けて、機械的接合、化学的接合、熔融接合、液相接合、固相接合などの種類が存在するが、接合強度、コスト、防水性などそれぞれメリット、デメリットがあり、用途に応じて使い分けられる。固相接合は、材料を溶かすことなく融点以下の温度で熱、圧力を加えて接合する技術であり、材料を溶かさなため、組織の変形を防ぐこと、比較的低温で接合可能なため、材料のそりなどが少なくすむことや、スパッタ、ヒュームなど周辺に影響を与える副産物がないこと等のメリットがある。固相接合にも数多くの種類が存在するが、中でも摩擦攪拌接合や、超音波接合などの技術は、幅広い分野において、製品の設計自由度の増大させる技術である。自動車分野においては、マルチマテリアル化による、軽量化と、それに伴う燃費の向上などに寄与している。電子デバイス分野では、配線のボンディングなどにおいて実装され、熱ダメージの抑制に寄与するとともに、高いスルー

プットを実現している。

富山県産業技術研究開発センターでは、金属材料の新たな固相接合法として、加圧により接合界面に大変形を付与し、界面の拡散障害性を低下させることで、加熱による原子拡散を促進して金属の高強度接合を短時間、低コストで実現する低温鍛接法(Cold Forge Welding:CFW)を独自に開発した⁽¹⁻⁴⁾。低温鍛接法は、加圧により接合界面に大変形を付与すると同時に、溶かさずに効率よく低温で拡散を行うことで、反応層生成を接合の原理としながらその厚みをナノメートルオーダーに抑え込むことができる。従来の溶接では金属間化合物の生成のために接合が困難であった「銅とアルミニウム(Al)」、「銅とAl」、「チタンとAl」などの高強度異材接合を可能にしている。

また、これを発展させたプロセスとして、基材の表面にサブミクロンサイズの微細な凹凸を形成した薄膜において、微細な凹凸を加熱しながら圧下させることによるマイクロ低温鍛接法(マイクロCFW法)を実証している⁽⁵⁾。マイクロ低温鍛接法の模式図を図1に示す。基材表面にサブミクロンサイズの凹凸を有する薄膜を製膜し、薄膜同士を対向させ、加熱・加圧する。この時、サブミクロンサイズの凹凸が圧下、変形し、表面の酸化膜は延伸、分断されることでその拡散障害性が低下、圧下比が高まったサイトから、金属薄膜の原子が効率的に界面を跨ぎ相互拡散できるようになる。最終的に圧下により初期表面形態の凹凸構造は平坦化し、薄膜同士は冶金的に一体化し、基材の接合を完了するものである。

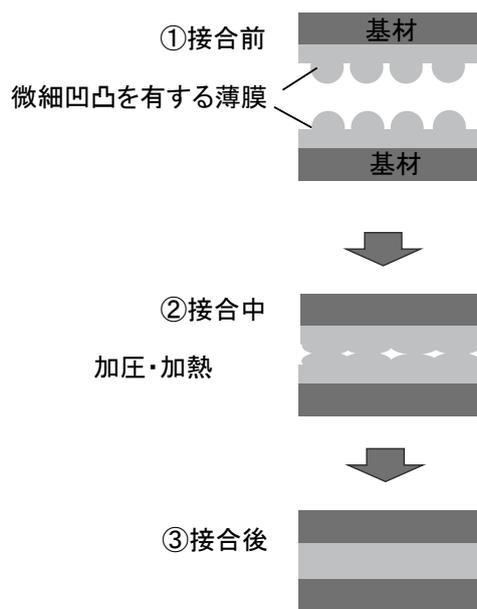


図1 マイクロ低温鍛接法の模式図
Fig. 1 Schematic image of Micro CFW

基材上にサブミクロンサイズの凹凸を有する薄膜の形成法には、めっき、スパッタリング、真空蒸着などがある。今回我々は、基材へのAlのスパッタ法を選択した。これは、成膜時間や基板加熱温度などのスパッタ条件によりサブミクロンサイズの凹凸などのAl薄膜の表面形態をコントロールできることや、特に、基材とAl薄膜の密着性を高めることができるためであり、応用面でメリットも広がる。スパッタで成膜した、サブミクロンサイズの凹凸を表面に有するAl薄膜を対向させて加圧することで、サブミクロンサイズの凹凸が平坦化し、酸化層による拡散障害性が低下することで、加熱による原子拡散を促進してAl薄膜同士を冶金的に接合する。この手法は、従来の低温鍛接法同様、金属同士の高強度接合を短時間で実施できる点や、低コストである点などに加え、母材となる基板の変形・圧下を伴わず、基板上に形成したAl薄膜表面のサブミクロン粒子の圧下のみで接合できることから、母材の変形を嫌う用途への応用も可能である。また、薄膜に微細加工を施すことで、微小部の接合への応用も可能であることがあげられる。

本研究では、マイクロ低温鍛接法の接合性を詳細に検証することを目的として、接合条件(接合温度、接合圧力)が及ぼす継手強度への影響を調べ、さらにAl/Al接合界面の観察を行った。

2. 実験手法

Al薄膜は、スパッタ装置(SH-250-T4 ULVAC)で成膜した。スパッタは、装置内に導入したアルゴンガスに高周波電圧を加えアルゴンのプラズマを生成し、アルゴンイオンをAlターゲットに衝突させ、飛び出したAl原子を基板に付着させることで薄膜を形成する。基板(SUS304)はアセトンで洗浄後、逆スパッタでクリーニングしてからスパッタを実施した(図2)。

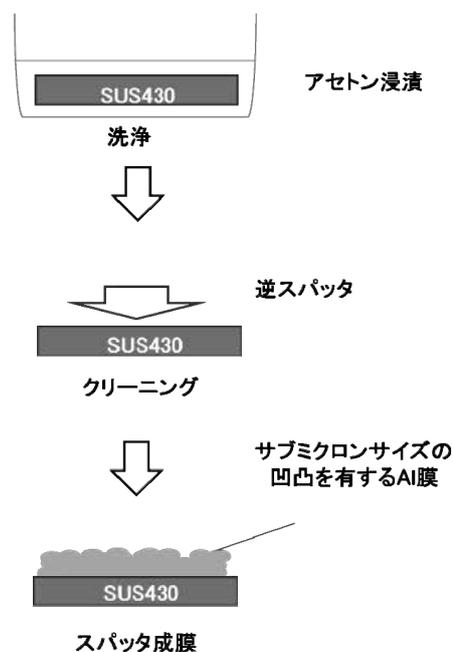


図2 成膜プロセス
Fig. 2 Film deposition process

マイクロ低温鍛接法は、金属、ガラス、セラミックス、Siなど基材によらず接合することが可能だが、接合の詳細なメカニズムなどを評価するためには、接合強度試験や界面観察が必要である。そこで、今回は、面観察および強度評価における加工の容易性を考慮し、SUS304基材を採用した。またステンレス基材であれば、観察でAl薄膜との区別も容易となる。

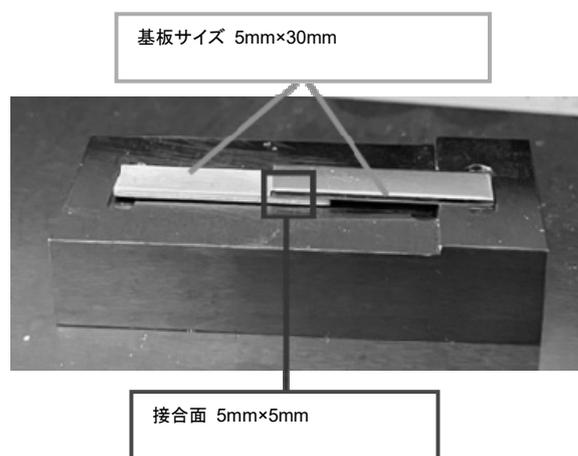


図3 接合部材と試験治具
Fig. 3 Setup of the joining test

接合工程は、表面にサブミクロン粒子を有するAl膜を成膜したSUS304基材を対向させ、接合面積が $5 \times 5 \text{ mm}^2$ となるように治具を用いて配置し(図3)、加熱しながら加圧して行った。接合温度はK型熱電対により実測し、 99°C から 264°C の間で、加圧力は $2\text{--}9 \text{ MPa}$ の間で変化させて接合した(図4)。接合した部材について、小型強度試験機(EZ-LX 島津製作所)により継手の引張せん断荷重を測定した。

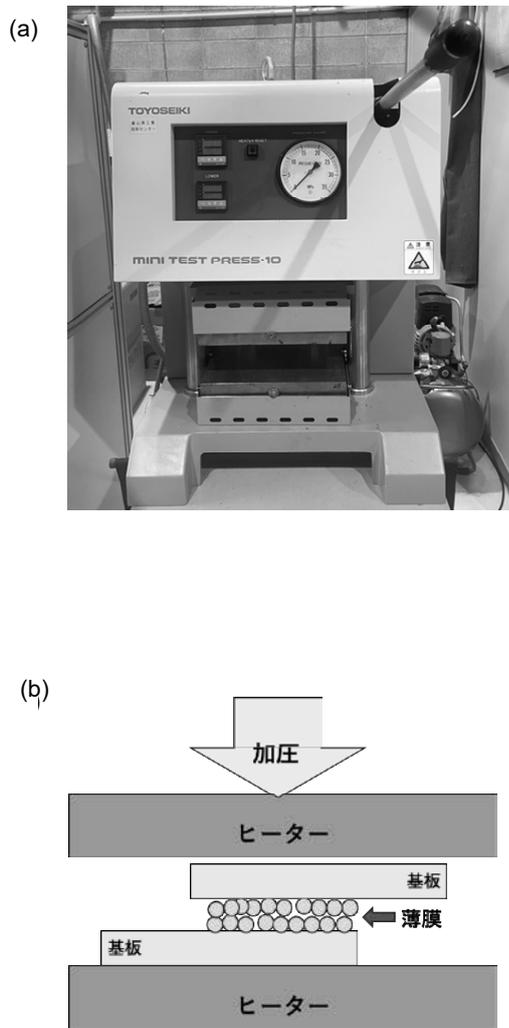


図4 接合試験装置 (a)外観 (b)模式図

Fig. 4 Joining test equipment (a)exterior photo (b)Schematic image

3. 実験結果

薄膜において低温鍛接法を適用する場合、平坦膜同士を加圧しても接合はできない。Al 薄膜表面にサブミクロンサイズの凹凸構造を付与することで、これらが局所的に変形し、接合することができるようになる。このため、サブミクロンサイズの凹凸の形成条件を探ることが重要である。Al スパッタ膜は、成膜中に原子の移動、凝集が起きることで膜表面に凹凸が形成されることが知られている。高いスパッタ成膜温度と、長時間のスパッタにより膜厚を厚くすることで、成膜中の原子の移動が促進され、凹凸が大きくなると考えられている。本実験では、膜厚を 650 nm 程度と厚くし、成膜温度を変えた条件で成膜を行い、膜表面の観察を行った。

スパッタ成膜温度を室温(RT)、80°C、130°C と変化させて成膜したスパッタ膜表面の SEM 像を図 5 に示す。室温においては、原子の凝集による凹凸が見られる個所もあるが、全面にわたり凹凸構造が形成されているとは言えない状態である。80°C、130°C とスパッタ成膜温度を高くすると、成膜中の原子の拡散による凝集が促進されることによりスパッタ膜表面は膜全面に凹凸を有するようになることが確認された。また、80°C よりも 130°C の方が、一つ一つの凹凸が大きく成長していることが分かる。

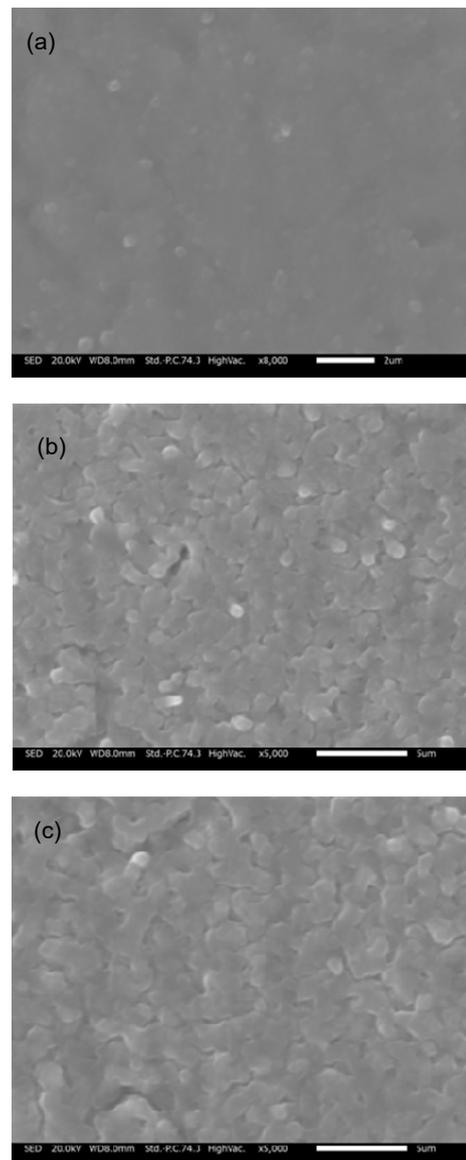


図5 各成膜温度におけるスパッタ膜表面の SEM 像 (a)RT, (b)80°C, (c)130°C

Fig. 5 SEM images of sputtered film surfaces at each deposition temperature (a)RT, (b)80°C, (c)130°C

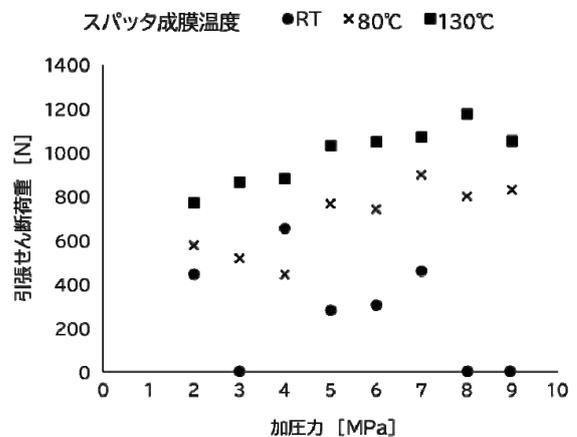


図6 各成膜温度における引張せん断強度

Fig. 6 Bonding strength at each film deposition temperature

各スパッタ成膜温度(RT、80°C、130°C)で、接合温度 239°C で接合した試料の引張せん断強度を図 6 に示す。室温でのスパッタ成膜では、接合しない試料も存在し、せん断強度は比較的弱く、また強度のばらつきが大きいことが分かる。スパッタ膜表面の凹凸が場所によっては十分な大きさではなく、加圧による凸凹の変形が不十分であった可能性があると考えられる。スパッタ成膜温度 80°C、130°C においては、すべての試料において接合に成功し、加圧力が大きくなるほど引張せん断強度が上がる傾向が確認された。また、80°C よりも、130°C 方が引張せん断強度は強かった。これは、成膜後の膜表面に形成された凹凸が、130°C の方が大きく、局所的に圧下比を高めやすいためと考えられる。

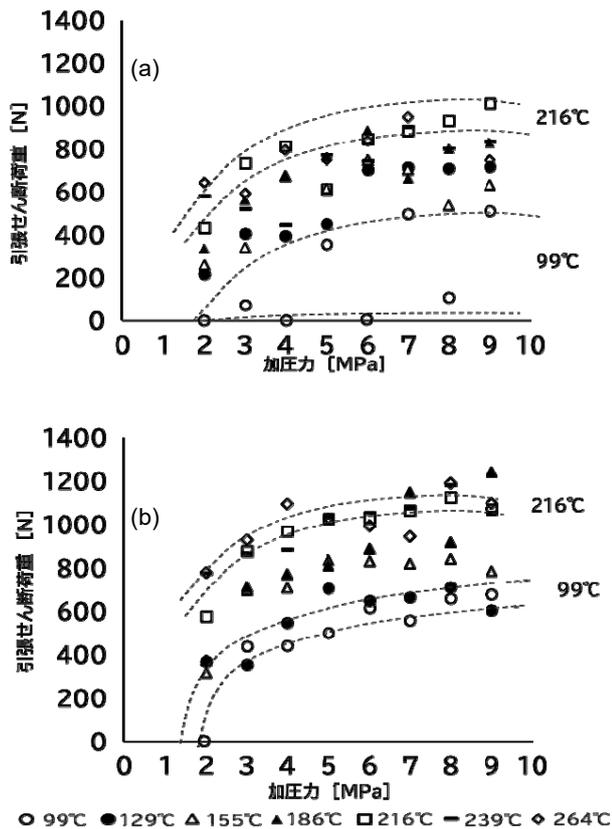


図 7 各接合温度における引張せん断強度 (a)スパッタ成膜温度 80°C (b)スパッタ成膜温度 130°C

Fig. 7 Bonding strength at each jointing temperature (a)film formation temperature 80°C, (b)film formation temperature 130°C

ばらつきが少なく、良好な接合を実現できたと考えられるスパッタ成膜温度 80°C、130°C で成膜した試料について、接合温度を 99-264°C(実測値)の範囲、また加圧力は 2-9 MPa の範囲で変化させて接合した試験片の引張せん断強度を測定した。その結果を図 7 に示す。

スパッタ成膜温度 80°C においては、接合温度 99°C では接合が安定せず、引張せん断強度のばらつきが大きく、また接合できない試験片もあった。これは、低い接合温度では、Al 膜のサブミクロンサイズの凹凸の圧下により原子の拡散が促進されるが、熱拡散力が不足しているため、接合が不十分となったと考えられる。また、接合温度を高くすると、引張せん断強度が高くなり、ばらつきが小さくなる傾向が見られた。加圧力を増すと、圧下による Al 膜のサブミクロンサイズの凹

凸の変形が大きくなることにより、より酸化膜の断片化・薄膜化が起こるようになり、拡散障害性がより効果的に低下するためと考えられる。また、接合温度を高くすると原子の拡散がより促進されることにより、安定的に引張せん断強度の大きな接合が可能になると考えられる。

さらに、スパッタ成膜温度 130°C においては、接合温度 99°C と低い接合温度においても、接合できない試験片は、加圧力の低い 2MPa で加圧した試料のみとなり、3 MPa~9 MPa で接合した試験片についても、接合強度のばらつきが小さかった。接合温度を高くするか、加圧力を大きくすると引張せん断強度が高くなる傾向が見られたことはスパッタ成膜温度 80°C の時と同様だが、同時接合条件において、全体的にスパッタ成膜温度が高い方が接合強度が高くなることが確認された。これは、図 5 に示すように、スパッタ成膜温度 80°C に比べ、130°C の方が一つ一つの凹凸が大きく成長していることで、加圧により圧下した際に局所的な変形がより大きくなることで、酸化膜による拡散障害性がより効果的に低下することで、Al 薄膜間の原子拡散が促進されたためであると考えられる。

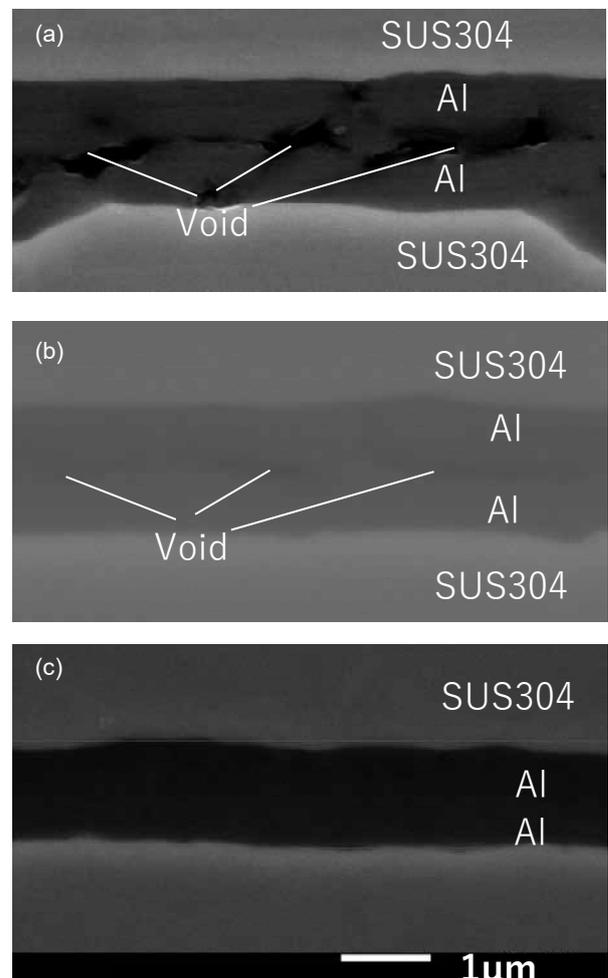


図 8 圧力における接合した試料の Al-Al 界面の断面 FE-SEM 像 (a)2MPa, (b)4MPa, (c)7MPa

Fig. 8 FE-SEM image of the Al-Al interface in the sample (a)2MPa, (b)4MPa, (c)7MPa

熱拡散力は、接合温度が高い方が大きくなる。スパッタ成膜温度 80°C、130°C のいずれの条件においても、接合温度を

高くすると、引張せん断強度が高くなる傾向は、接合温度 216°C 程度で頭打ちとなる挙動が確認された。接合強度が Al 薄膜の強度相当になっていることが示唆される。

本試験で得られた最大の引張せん断荷重は、接合温度 186°C、加圧力 9 MPa において 1243 N であり、その引張せん断強度は、式(1)より、約 50 MPa となる。Fn は引張強度[N]、A は接合面積[mm²]である。一般的なアクリル系接着剤の強度は 20 MPa 程度であると言われており、マイクロ低温鍛接法はこの約 2 倍以上の強度を出すことができ、接合手法として実用的な強度を備えていることが確認された。

$$F = F_n / A \quad (1)$$

図 8 に、スパッタ成膜温度 130°C、接合温度 216°C、加圧力 2 MPa、4 MPa、7 MPa で接合した試料の Al/Al 界面の FE-SEM 像を示す。加圧力 2 MPa、4 MPa においては、Al/Al 界面にボイドが確認される個所もあり、膜面全体において均一な接合をしていないことが確認された。7 MPa においては、Al/Al 界面にボイドが確認されず、均一な界面を形成していることが分かった。圧力を増すことで、サブミクロンサイズの凹凸が完全につぶれたことで、薄膜間のボイドが消失したものと考えられる。

加圧により Al 膜がどの程度圧下しているかについても考察を行った。圧下比は、接合前の厚み t_0 を接合後の厚み t_1 で除したものと定義され⁽²⁾、式 2 より算出できる。

$$R = t_0 / t_1 \quad (2)$$

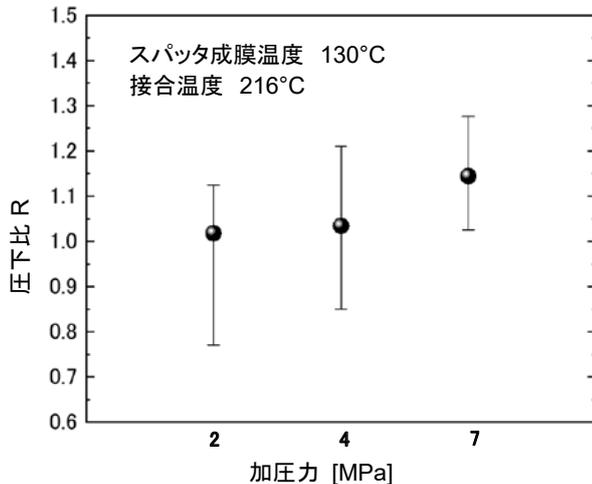


図 9 加圧力に対する Al 薄膜の圧下比

Fig. 9 Pressure dependence of the apparent reduction of Al thin films

膜厚を 30 か所測定し求めたみかけの圧下比を図 9 に示す(初期状態が凹凸で、またある程度ばらつきもあるため、1 を下回る値も得られる)。加圧力を大きくするに従い、圧下比は大きくなる傾向が確認された。またそのばらつきも小さくなる傾向がみられる。Al 展伸材同士の低温鍛接においては、プラグ破断は圧下比 1.4 程度⁽³⁾であるが、マイクロ低温鍛接における接合では Al 膜全体の圧下比は 7 MPa の圧力で加圧した際でも 1.14 程度と低いことが分かった。膜全体の圧下比は低くても、膜面に存在する凸部が局所的に高い圧下比で変形して

いることが考えられる。また、スパッタ膜は、展伸材に比べて清浄であることも、低い圧下比での接合が可能な要因であると考えられる。

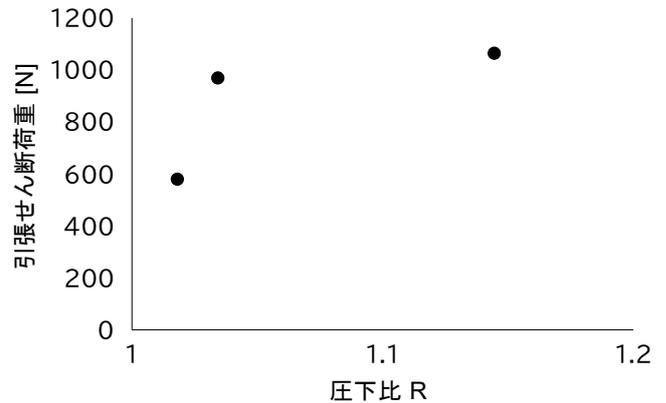


図 10 接合強度の圧下比依存性

Fig. 10 Apparent reduction dependence of the joint strength

スパッタ成膜温度 130°C、接合温度 216°C、加圧力 7 MPa の条件で接合した、Al/Al 接合界面の TEM 像を図 11 に示す。平坦な接合界面が確認できる。また、接合界面において、ボイドが存在せず、緻密な接合界面が形成されていることが確認できる。スパッタ薄膜の形成時に薄膜表面に存在していたサブミクロンサイズの凹凸は、加圧により完全に消失していることが推察される。引張せん断強度の測定では、接合温度 216°C 程度で強度が飽和する挙動が確認されており、ボイド等が消失し、緻密な界面が形成されていることは、この結果と整合性があるといえる。

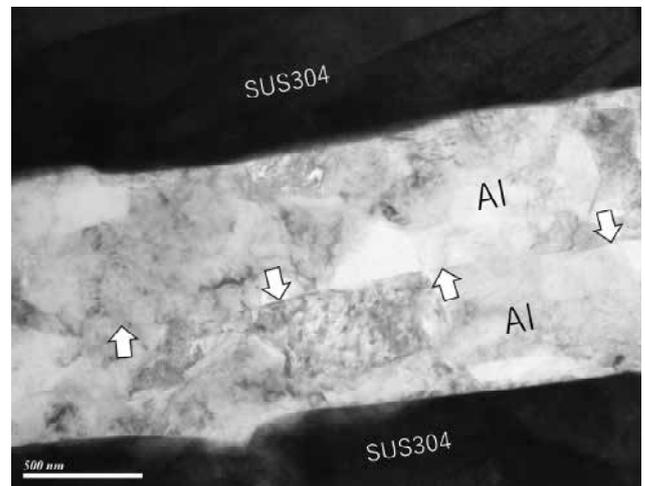


図 11 接合した試料の Al-Al 界面の断面 TEM 像

Fig. 11 TEM image of the Al-Al interface

4. 結言

今回、我々は、SUS304 を基材として、凹凸構造の Al スパッタ薄膜を介したマイクロ低温鍛接法についての実証試験を行った。接合温度及び接合圧力が継手強度に及ぼす影響を調査し、界面観察から本接合現象について検討した。

スパッタ成膜温度による接合強度の評価では、室温でのスパッタではせん断強度は比較的弱く、ばらつきが大きかった。

スパッタ成膜温度 80°C、130°C においては、成膜後の膜表面に形成された凹凸がより大きくなることで、ばらつきは小さくなり、安定的な接合が可能であることが分かった。また、80°C よりも、130°C 方が引張せん断強度は強かった。

また、スパッタ成膜温度 80°C、130°C における接合温度を変化させて行った接合強度の評価では、スパッタ成膜温度 80°C、130°C のいずれの条件においても、接合温度を高くすると、引張せん断強度が高くなる傾向がみられた。また、接合温度 216°C 程度で接合強度が Al 薄膜の強度と同等程度に達したものとみられ、接合強度が飽和する挙動が確認された。接合した Al-Al 界面の断面 SEM 観察では、7 MPa の加圧力において、Al/Al 界面にポイドの存在しない均一な界面を形成していることが分かった。圧下比の評価では、加圧力を大きくするに従い、圧下比は大きくなった。Al 展伸材同士の低温鍛接では、圧下比 1.4 程度³⁾であるが、マイクロ低温鍛接における接合では 7 MPa の圧力でも 1.14 程度と低いことが分かった。膜面の凸部が局所的に高い圧下比で変形していることが考えられる。

本研究で検討した、Al スパッタ薄膜の圧下によるマイクロ低温鍛接法のメリットとしては、汎用的なスパッタ装置で Au などの高価な貴金属を用いずに、低コストで実施できるプロセスであることや、これまで報告されている接合温度よりも十分に低い 200°C 以下の低温領域においても接合可能であり、幅広い分野において応用できる可能性があることなどが挙げられる。また、母材の変形を必要としないため、従来の低温鍛接法を適用できなかった、母材を変形させることができない用途への応用も可能である。さらに、金属基板に限らず、密着層を介して Al 膜が密着する材料であれば、Al 薄膜をバインダとして、様々な種類の基材の接合に適用できる。例として、ガラス基板同士の、Al スパッタ薄膜の圧下によるマイクロ低温鍛接法により接合したものを図 12 に示す。様々な部材の接合に適用できることから、電子デバイス、医療機器、自動車分野など、多くの分野における応用が期待できる。

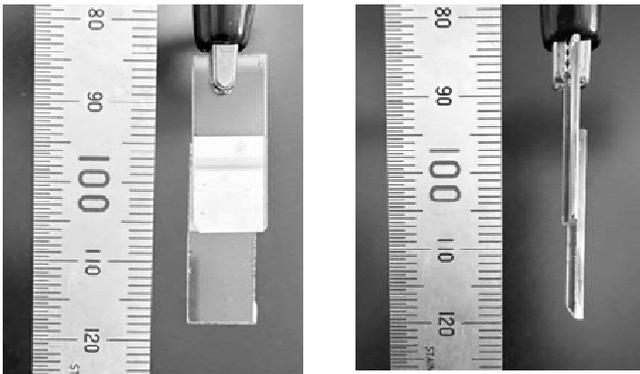


図12 マイクロ低温鍛接法により接合したガラス基板

Fig. 12 Glass substrates joined by micro CFW

参考文献

- (1) 特許第 7114029 号「金属接合方法」
- (2) 特許第 7526404 号「金属材料の接合方法」
- (3) H. Yamagishi: *Merall. Mater. Trans. A*, 52, 2021, pp.741-752
- (4) H. Yamagishi: *Merall. Mater. Trans. A*, 54, 2023, pp.3519-3536
- (5) 升方康智, 寺澤孝志, 山岸英樹, 酒井康祐: 富山県産業技術研究開発センター研究報告 No.39 (2025) pp. 6-7

V. スマートテキスタイルのための 温度センサの開発

Development of Temperature Sensors for Smart Textiles

澤井 駿佑 七谷 佳祐 上野 実 角田 龍則
SAWAI Shunsuke SHICHITANI Keisuke UENO Minoru KAKUDA Tatsunari

Abstract

Wearable devices such as smartwatches have been required for non-invasive and continuous monitoring of bio-information in daily life. Smart textile technology is developing as a promising platform for achieving seamless physiological monitoring. In bio-information monitoring, core body temperature monitoring is particularly emphasized due to the increasing necessity for heatstroke prevention. Conventional temperature detection relies on rigid metal or ceramic-based devices like platinum resistance thermometers or thermistors, which are incompatible with textile materials and unsuitable for long-term, unrestricted measurements. This research aims to develop a temperature sensor that can be seamlessly integrated into clothing and worn comfortably for extended periods. We validated a method optimized for smart textile implementation, derived from existing core body temperature estimation techniques. The results indicated an error margin of $\pm 0.9^{\circ}\text{C}$ within the $32\text{--}37^{\circ}\text{C}$ range corresponding to the temperature, suggesting the feasibility of continuous core body temperature monitoring during daily activities without limiting user comfort.

1. 緒言

スマートウォッチに代表されるウェアラブルデバイスの普及に伴い、日常生活に溶け込む形で生体情報(心拍数や血圧、睡眠パターンなど)を計測できる技術が求められている。このような背景のもと、衣服そのものにセンサ機能を持たせるスマートテキスタイル技術の実用化が進んでいる⁽¹⁾。要素技術として、洗濯に対する耐久性を持つ導電糸や接着性と伸縮性を兼ね備えた導電性接着剤、軽量で小型の電源・バッテリーなどの技術が開発されている。これらの技術により、快適で自然な装着性を保ちながら生体情報を計測することが可能になりつつある。

生体情報の中でも特に体温計測の需要が高まっている。体温を非侵襲かつ継続的に計測することは、体調異常の早期発見を可能とし、死亡・重症化リスクの低減に寄与する。令和7年6月には職場における熱中症対策が義務化され、体温管理の重要性は一層増している⁽²⁾。一般的に、体温計測は高精度な白金測温抵抗体やサーミスタに代表される金属・セラミック材料をベースとした温度センサを使用し、腋下に温度計を保持する手法が広く普及している。しかし、これらは硬く、テキスタイル材料との親和性が高くないため、柔軟な材料上にセンサを設置する場合、装着時の不快感につながる。また、保持の必要性から、長時間の連続測定や無拘束計測が困難である。

そこで、本研究では違和感なく長時間装着でき、かつ衣服の一部に組み込むことが可能な柔軟性に優れた温度センサの開発を目指す。スマートテキスタイルでの実装を前提に日常生活で違和感のない体温計測手法の有効性を検証する。

2. スマートテキスタイルにおける体温計測の課題

図1に代表的なスマートテキスタイルデバイスを示す⁽³⁾。

本製品は、スマートテキスタイル技術における温度センサを実装した事例であり、衣服内の空間温度を測定することが可能となっている。装置が生地上に実装されているため、衣服として自然にセンサを着用しながら、連続的に体温変化を取得できるようになる可能性がある。しかし、熱流情報は皮膚-センサ間の熱抵抗に依存しやすいため、衣服内の空間温度と体温との相関は弱い。

体温は、一般に医療機関などで診断の指標として用いられる深部体温と、皮膚表面の温度を指す体表温度に分類される⁽⁴⁾。深部体温は、体の中心部や頭部の温度であり、センサを直接挿入して継続的に計測することは困難であるため、皮膚表面に取り付けたセンサが捉える熱流情報を用いて推定する方法が広く利用されている。

図2に目指す温度センサの模式図を示す。生地上に温度セ



図1 代表的なスマートテキスタイルデバイス⁽³⁾

Fig. 1 Representative smart textile device⁽³⁾

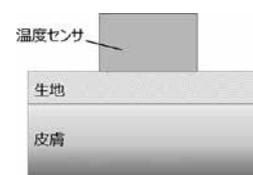


図2 目指す温度センサの模式図

Fig. 2 Schematic diagram of the target temperature sensor

ンサを配置することで、違和感なく長時間装着できる構造とする。このとき、温度センサは生地による熱抵抗の影響を受けてしまう。そこで、生地を含む計測部位に対して、深部体温計測で用いられる熱流情報に基づく体温推定手法を適用することで、柔軟性を損なうことなく体温を推定することを目指す。

3. 既存の深部体温計測手法

人体の内部発熱は深部組織、皮膚組織およびセンサを経て周囲環境へ放散される。この一連の熱伝達経路を熱回路で表すと、深部体温 T_i には以下の関係式(1)が成り立つ。

$$T_i - T_a = Q \times R \quad (1)$$

ここで、 T_a は周囲温度、 Q は周囲環境へ放散される熱流、 R は熱伝達経路の熱抵抗である。既存の深部体温計測では、この熱回路を用いることにより、計測部位において熱抵抗が存在する条件下においても精度よく体温推定が可能である。

熱回路モデルを応用した、非侵襲かつ継続的に深部体温計測が可能なる手法として、熱流補償法、熱流束法、双熱流法などが挙げられる。図3に熱流補償法の原理図を示す⁽⁴⁾。熱流補償法は断熱されたプローブ内の温度勾配をヒーターにより制御する方法である。プローブを取り付けるだけで深部体温計測が可能である一方、周囲温度が深部体温よりも高くなると測定できなくなるという課題がある。図4に熱流束法の原理図を示す⁽⁵⁾。熱流束法は、皮膚から外界へ流れる熱流束を体表面温度と同時に測定し、深部体温を推定する方法である。しかし、熱流センサを同時に使用するためセンサ構成が複雑になるという課題がある。図5に双熱流法の原理図を示す⁽⁶⁾。双熱流法は、ヒーターや熱流センサを用いることなく、複数配置された感温素子から得られる熱流条件の差異を利用する方法である。一方で、センサが大型化してしまうという課題がある。

以上のことから、スマートテキスタイル技術に既存の深部体温計測手法を適用するためには以下の課題が挙げられる。

- ① 設置用途が限定的
- ② 構成が複雑化
- ③ センサの大型化

そこで本研究では、スマートテキスタイル向けに、二つの感温素子のみを用いて、能動的に熱流条件を制御することで小型化が可能な体温計測手法の提案を行った。日常的な装着環境を想定し、ヒトの体温に相当する温度域において計測が可能であることを目指した^{(7),(8)}。

4. 提案手法

4.1 センサ構成

図6に本研究で提案する体温計測手法の概念図を示す。提案手法は、感温素子として抵抗温度特性を有する測温抵抗体を用い、二つの測温抵抗体の間に熱抵抗が既知である熱抵抗素子を配置した構造とする。また、測温抵抗体への印加電圧制御回路を備え、測温抵抗体の自己発熱を利用して熱流を制御できる構成とした。

図7に印加電圧制御方法の一例を示す。測温抵抗体は温度

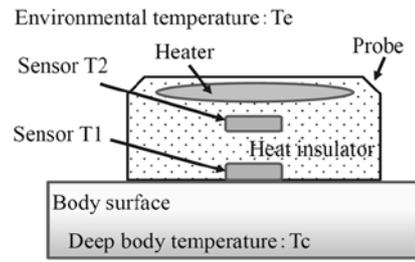


図3 熱流補償法の原理図⁽⁴⁾

Fig. 3 Schematic diagram of Zero Heat Flow Method⁽⁴⁾

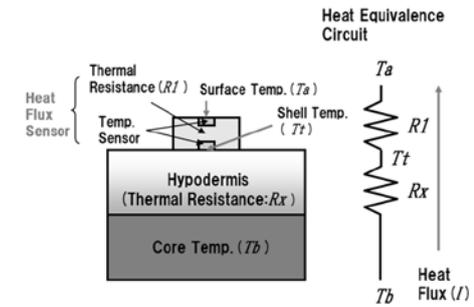


図4 熱流束法の原理図⁽⁵⁾

Fig. 4 Schematic diagram of Heat flux method⁽⁵⁾

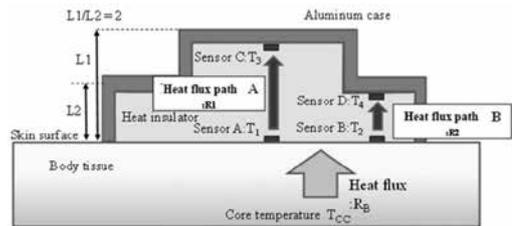


図5 双熱流法⁽⁶⁾

Fig. 5 Schematic diagram of the Dual-Heat-Flux method⁽⁶⁾

変化に対して安定した抵抗温度特性を有する基準抵抗と直列に接続されており、分圧点の電圧を測定することで抵抗値を算出することができ、測温抵抗体の温度を計測することが可能となっている。また、測温抵抗体は印加電圧によりジュール損失が発生する。この自己発熱を利用し、センサに印加電圧に応じた任意の熱を発生させ、熱量を変化させることで異なる定常状態を実現し、生地上からの体温計測を可能としている。

提案手法は、従来手法である熱流補償法のような周囲温度条件の制約がない。また、熱流束法のように熱流センサを必要としないため、構成が複雑化せず、スマートテキスタイルへの実装に適している。そして、双熱流法と比較して感温素子数を半分にでき、センサ部について、少ない素子・回路数かつシンプルなセンサ構成で体温計測を行うことが可能となる。

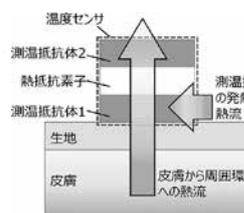


図6 提案手法の概念図

Fig. 6 Proposed method

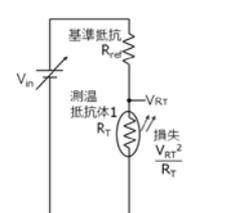


図7 印加電圧制御方法の一例

Fig. 7 Applied voltage control method

4.2 体温計測原理

図8に本研究における提案手法の熱回路モデルを示す。ここで、 R_i は皮膚から測温抵抗体1までの間の熱抵抗、 R_L は二つの測温抵抗体の間に配置された値が既知の熱抵抗素子、 R_e は周囲温度と測温抵抗体2との間の熱抵抗を、 R_z はセンサを通らず生地から周囲環境へ直接流れる漏れ熱流経路の抵抗を表す。また、 Q_a は測温抵抗体の自己発熱により発生する熱流を表す。

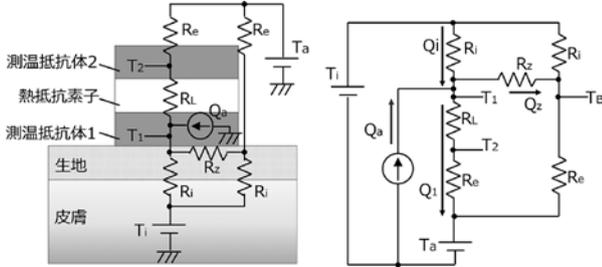


図8 熱回路モデル(縦型)
Fig. 8 Thermal circuit model (vertical method)

二つの測温抵抗体は値が既知の熱抵抗 R_L を挟む形で配置されており、測温抵抗体の温度差から式(2)によりセンサを流れる熱流 Q_1 が求まる。

$$Q_1 = \frac{T_1 - T_2}{R_L} \quad (2)$$

この熱流は測温抵抗体2から周囲環境に流れる熱流と等しくなるため、測温抵抗体2と周囲温度との関係から式(3)により周囲温度との間の熱抵抗 R_e が求まる。

$$Q_1 = \frac{T_2 - T_a}{R_e} \quad (3)$$

ノード T_1 および T_B についてエネルギー保存則を適用すると、それぞれ式(4),(5)で表される。

$$\text{ノード } T_1: \quad \frac{T_i - T_1}{R_i} + Q_a = \frac{T_1 - T_a}{R_L + R_e} + \frac{T_1 - T_B}{R_z} \quad (4)$$

$$\text{ノード } T_B: \quad \frac{T_i - T_B}{R_i} + \frac{T_1 - T_B}{R_z} = \frac{T_B - T_a}{R_e} \quad (5)$$

式(5)から T_B は式(6)で表される。

$$T_B = \frac{\frac{T_i}{R_i} + \frac{T_a}{R_e} + \frac{T_1}{R_z}}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_z}} \quad (6)$$

式(4)に式(6)を代入することで、 T_B が消去され、未知量 T_i 、 R_z 、 R_i を含む方程式となる。この方程式を自己発熱なし、発熱小、発熱大の3条件について適用すると、合計3つの方程式が得られ、この連立方程式を解くことで T_i を求めることができる。

ここで、 T_i の計算手段として最小二乗法を用いて目的関数を最小化する方法を用いる。具体的には、まず(4)式から各条件に対して残差を次式で定義する。

$$e_n = \frac{T_{i,n} - T_{1,n}}{R_i} + \frac{T_{B,n} - T_{1,n}}{R_z} + Q_a - \frac{T_{1,n} - T_{a,n}}{R_L + R_e} \quad (7)$$

式(7)について、各条件の残差の二乗和は式(8)で表される。

$$S_c = \sum_{n=0}^2 e_n^2 \quad (8)$$

式(8)で得られる残差の二乗和を目的関数として最小化を行う。最小二乗法の解の導出は様々な方法があるが、本研究ではExcel(Microsoft社)のソルバー機能で行った。

なお、図9のように素子を横に配置した場合、 T_1 と T_c の温度が等しいと近似することで、同様の原理で体温計測が可能であり、より薄くセンサを構成することが可能となる。縦に配置した方式を縦型構造、横に配置した方式を横型構造と呼称する。本研究では縦型と横型の両構成についてセンサを作製し、温度特性の比較を行った。

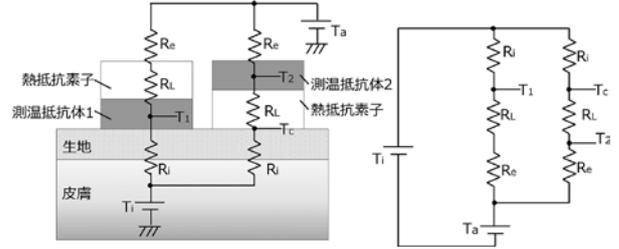


図9 熱回路モデル(横型)
Fig. 9 Thermal circuit model (horizontal method)

5. ポリプロピレン(PP)板上での測定

5.1 実験方法

生地は表面に凹凸を有し、かつ柔軟性が高いため、測定面との接触状態が不安定になりやすく、計測における再現性を低下させる要因となる。そこで、皮膚と生地との接触状態が安定した状態を模擬した環境を構築し、その条件下で温度計測を行うことにより、提案手法の有効性を検証した。

人体温を模擬するために、水冷板を使用した温度制御系を構築した。水冷板はチャラーと接続されており、循環水の温度を制御することで水冷板温度を任意に設定することが可能である。生地の模擬には物性が安定で表面が平らなポリプロピレン(PP)板を用いた。

図10に構築した実験環境を示す。水冷板の上にPP板、センサの順に配置し、これらを恒温槽内に設置する。また、恒温槽内における対流の変動による測定への影響を抑制するため、水冷板全体をアクリルケースで覆い、恒温になった状態で測定を行った。

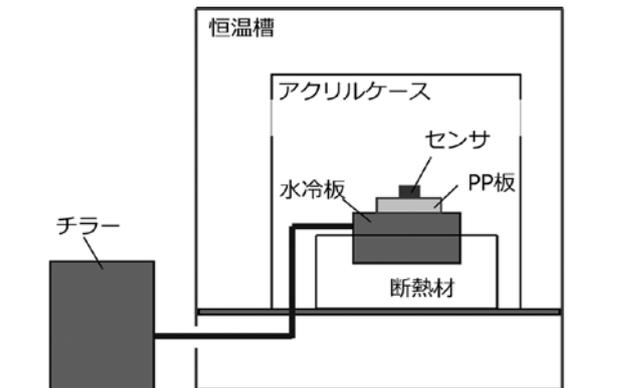


図10 実験環境

Fig. 10 Experimental environment

図 11 に本研究で用いたセンサの構成を示す。測温抵抗体には体温計測用途で広く用いられている白金測温抵抗体 (YAGEO Corporation, Pt1000) を使用した。熱抵抗素子にはシリコンゴムシート ($t=1.25\text{ mm}$, $\lambda = 1.86\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) を用い、測温抵抗体と熱抵抗素子は、接続部の熱抵抗を一定にするため、接着剤を用いて接続した。

表 1 に実験条件を示す。まず、周囲温度および体温が測定値に与える影響を確認するため、ケース内温度と水冷板温度を変化させ温度を測定した。使用する PP 板は、生地熱抵抗に相当する、厚み 1.5 mm の板を用いた。繰り返し測定のため、周囲温度を変化させ、 $N=3$ で測定した。次に、水冷板とセンサとの間の熱抵抗が測定値に与える影響を確認するため、PP 板の厚みを変化させて温度測定し、誤差を評価した。

測温抵抗体への電圧印加には直流電源を用い、所定の電圧を印加後、温度飽和させるために十分に時間が経過してから、デジタルマルチメータを用いて分圧点の電圧値を測定した。得られた電圧値からセンサ抵抗値と温度を算出し、提案手法による温度測定に用いた。なお、印加していない状態での抵抗値および温度については、デジタルマルチメータの抵抗値測定機能を用いて確認した。

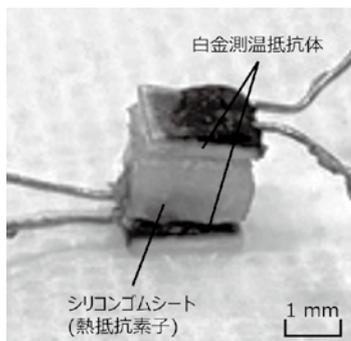


図 11 センサ構成

Fig. 11 Sensor configuration

表 1 実験条件 (PP 板上: 水冷板・ケース内設定温度)

Table 1 Experimental conditions (PP sheet: water-cooled plate, case internal set temperature)

ケース内温度 [°C] \ 水冷板温度 [°C]	10	25	40	50
32	-	○	-	-
34.5	-	○	-	-
37	○	○	○	○

5.2 実験結果・考察

図 12 にケース内温度と測定値の関係を示す。PP 板表面温度と比較すると、提案手法による測定値は水冷板温度により近い結果となっており、縦型構造と横型構造ともに誤差は 0.3°C 以下であった。また、周囲温度の変化に対して顕著な変化を示さず、提案手法の有効性が確認された。

図 13 に水冷板温度と測定値の関係を示す。周囲温度変化時

の結果と同様に、提案手法により温度変化に追従して精度よく水冷板温度を測定することができた。

図 14 に PP 板厚みと誤差の関係を示す。PP 板厚みの増加に伴い誤差が増加する傾向が確認された。この要因は、厚み増加によりセンサへ流れる熱流が減少し、センサ部から周囲環境へと流れ出す熱流が無視できなくなったことで、熱回路モデルにおいて仮定した熱流バランスが崩れ、測定値に誤差を与えたと考えられる。

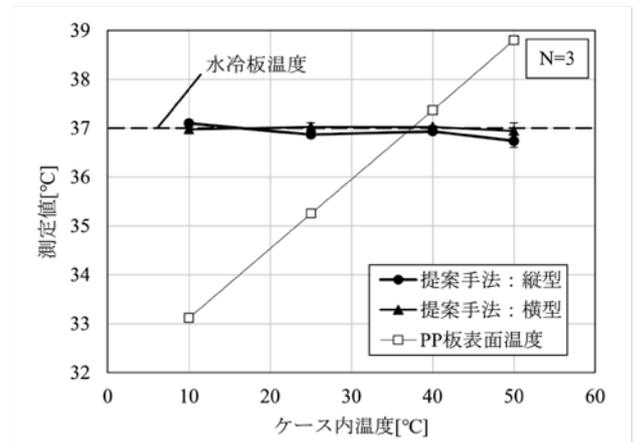


図 12 ケース内温度と測定値の関係: PP 板上

Fig. 12 Relationship between case internal temperature and measured values: on PP sheet

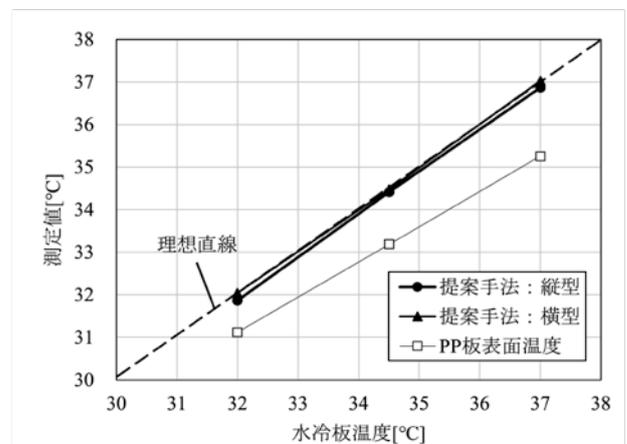


図 13 水冷板温度と測定値の関係: PP 板上

Fig. 13 Relationship between water-cooled plate temperature and measured values: on PP sheet

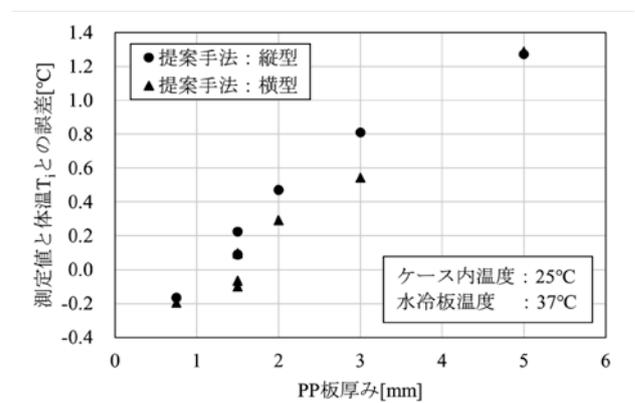


図 14 PP 板厚みと誤差の関係

Fig. 14 Relationship between PP sheet thickness and the error margin

5.3 まとめ

皮膚と生地との接触状態を安定にした模擬条件下において生地の熱抵抗に相当する厚みの PP 板を使用して温度測定を行った。周囲温度および水冷板温度を変化させた場合の誤差は 0.3°C 以下となり、提案手法の有効性を確認することができた。一方で、PP 板の厚みの増加に伴い誤差が増大する傾向が確認され、接触状態によって測定精度に限界があることが示唆された。

6. 生地上での測定

6.1 実験方法

次に、実際に生地を用いて温度測定を行った。ナイロン製の生地を用い、図 15 に示すように押え枠を水冷板にねじ止めて固定することで生地と水冷板を接触させて測定した。

センサへの電圧印加等の測定方法は、前述の PP 板上での実験と同様の手順で実施した。表 2 に実験条件を示す。

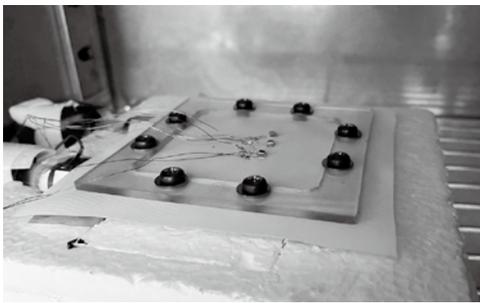


図 15 生地の取り付け状態
Fig. 15 Fabric installation status

表 2 実験条件(生地上: 水冷板・ケース内設定温度)

Table 2 Experimental conditions (fabric: water-cooled plate, case internal set temperature)

ケース内温度[°C] 水冷板温度[°C]	10	25	40	50
32	-	○	-	-
37	○	○	○	○

6.2 実験結果・考察

図 16 にケース内温度と測定値の関係、図 17 に水冷板温度と測定値の関係を示す。生地表面温度の測定値と比較すると、提案手法による測定値は水冷板温度により近い結果となった。測定誤差は縦型構造で 0.9°C 以下、横型構造で 2.2°C 以下であった。また、PP 板での結果では見られなかった周囲温度と水冷板温度の差に比例して誤差が生じた。これは、生地の空隙に起因して水冷板から周囲環境へと流れ出す漏れ熱流が、周囲温度や水冷板温度、熱流印加条件に依存して変化し、熱回路モデルにおいて仮定した漏れ熱流経路が成立せず、周囲温度と水冷板温度の差に比例した誤差として現れたと考えられる。

測定値のばらつきについて、縦型構造と比較して、横型構造では特に低温領域においてばらつきが大きくなる傾向が観測された。これは、生地と水冷板との接触状態が固定条件に

よって変化し、その影響を横型構造がより強く受けているためと考えられる。

そこで、生地の水冷板への接触状態が測定値のばらつきに与える影響を確認するため、同一条件下で生地の固定と取り外しを繰り返し、測定値の分散を比較した。図 18 に測定値のばらつきを示す。縦型構造では標準偏差が $\sigma = 0.068$ 、横型構造では $\sigma = 0.109$ となり、横型構造の方がより大きなばらつきがみられた。この結果から、横型構造では並列に配置された二つの測温抵抗体において、生地と水冷板との間の熱抵抗に

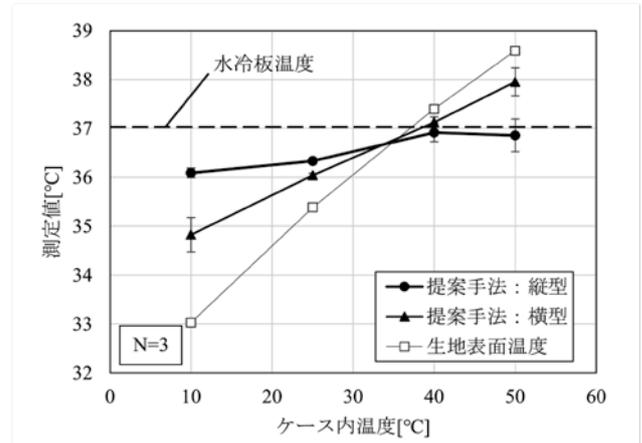


図 16 ケース内温度と測定値の関係:生地上

Fig. 16 Relationship between case internal temperature and measured values: on textiles

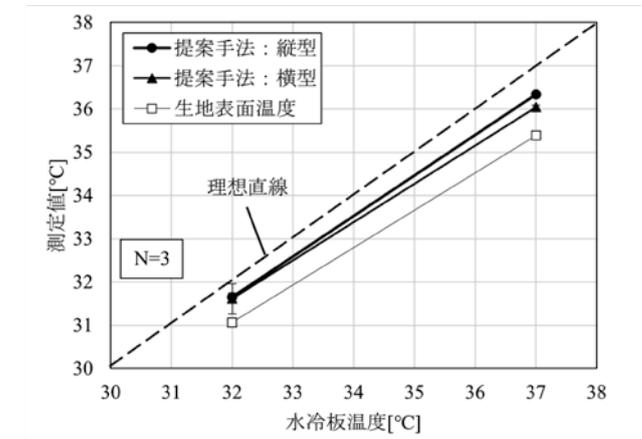


図 17 水冷板温度と測定値の関係:生地上

Fig. 17 Relationship between water-cooled plate temperature and measured values: on textiles

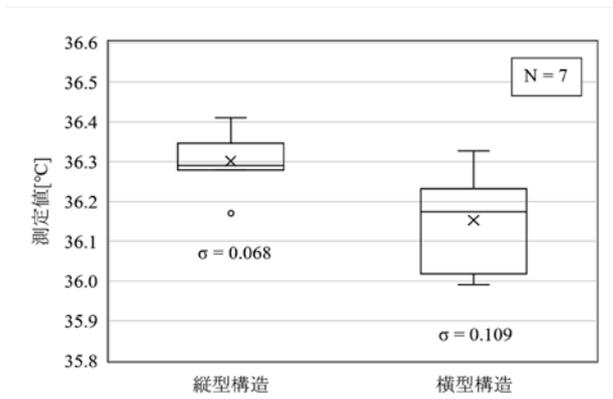


図 18 測定値のばらつき

Fig. 18 Measurement value variability

差が生じやすく、測定値のばらつきとして表れることが確認された。一方、縦型構造では生地と水冷板との間の熱抵抗は共通の成分となり、接触状態のばらつきの影響を受けにくく、比較的安定した温度測定が可能であることが確認された。

6.3 電圧印加からの収束時間

作製したセンサの温度特性評価として、測温抵抗体への電圧印加後の電圧値の時間変化を測定し、温度変化が定常状態に到達するまでの時間を評価した。

図 19 に電圧の時間変化波形を示す。電圧変化は約 20 s で収束しており、周囲温度条件による収束時間の差はほとんど認められなかった。この結果から、提案手法は体温計測において十分な応答性を有することが確認された。

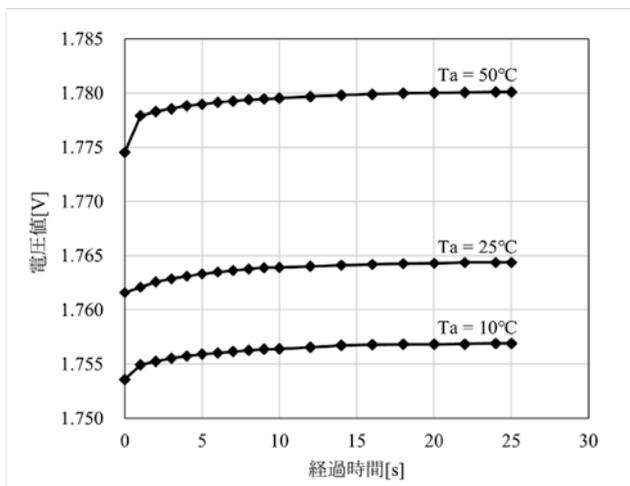


図 19 電圧の時間変化波形

Fig. 19 Time-varying waveform of voltage

6.4 まとめ

生地を用いての測定では縦型構造で 0.9°C 以下、横型構造では 2.2°C 以下の誤差が生じ、PP 板での測定結果と比較して生地の空隙に起因すると考えられる誤差の増加が確認された。また、測定値のばらつきについて、水冷板とセンサ間の熱抵抗が不安定となり、測定値のばらつきが増大する傾向が確認された。特に横型構造ではばらつきが顕著であり、実用性の観点から縦型構造が適していることが明らかとなった。

7. 結言

本研究では、違和感なく長時間装着できる、衣服の一部に組み込むことが可能な柔軟性に優れた温度センサの開発を目的として、測温抵抗体の自己発熱を利用した温度計測手法を提案し、その有効性を実験的に評価した。

提案手法について、センサ構造として縦型および横型の 2 種類を作製し、それぞれについて温度特性を測定し、比較を行った。その結果、縦型構造のセンサが生地上においてより安定した特性を示すことが確認され、一定の誤差範囲内で温度計測が可能であることが確認できた。また、電圧印加からの温度収束までの時間を評価し、実用上十分な応答性を有することが確認できた。

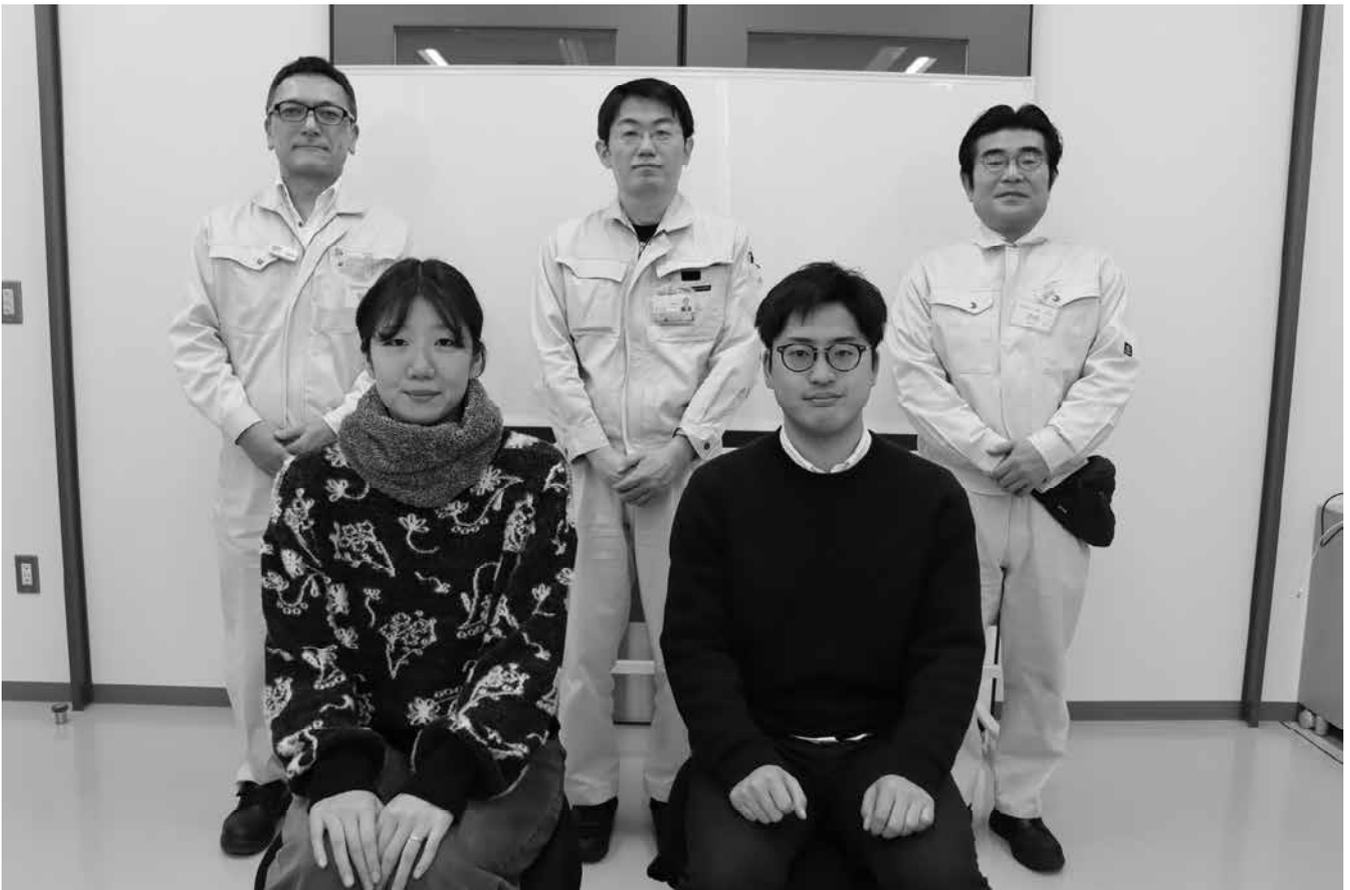
静止状態において一定の誤差での温度計測に成功したことから、今後は熱回路モデルについて生地の空隙を考慮した構造の改善や補正手法の高度化により誤差をさらに低減するこ

とに加え、ウェアラブルデバイスとしての活用に向けて、運動状態における体温測定への適用性を検証する必要がある。

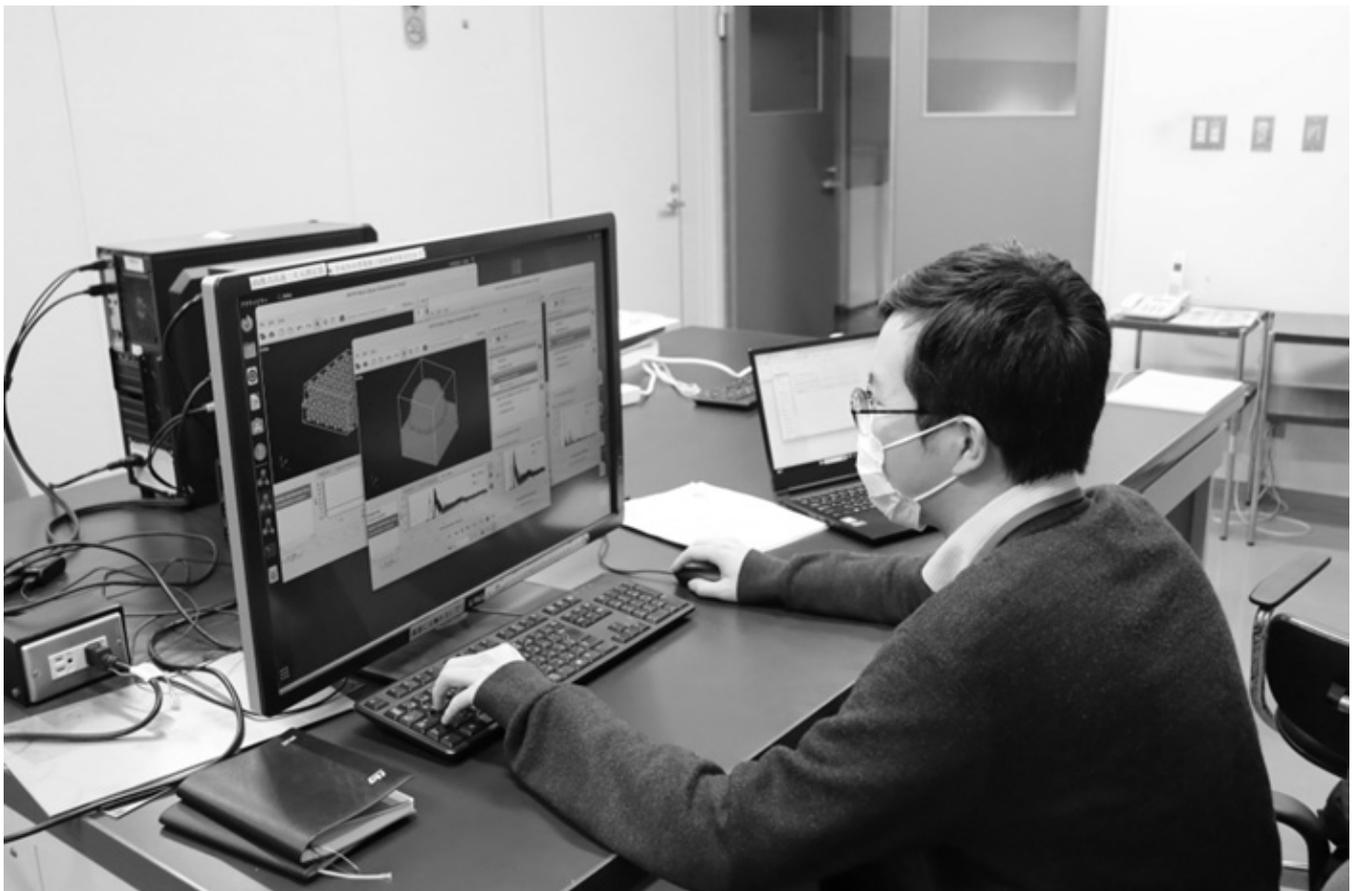
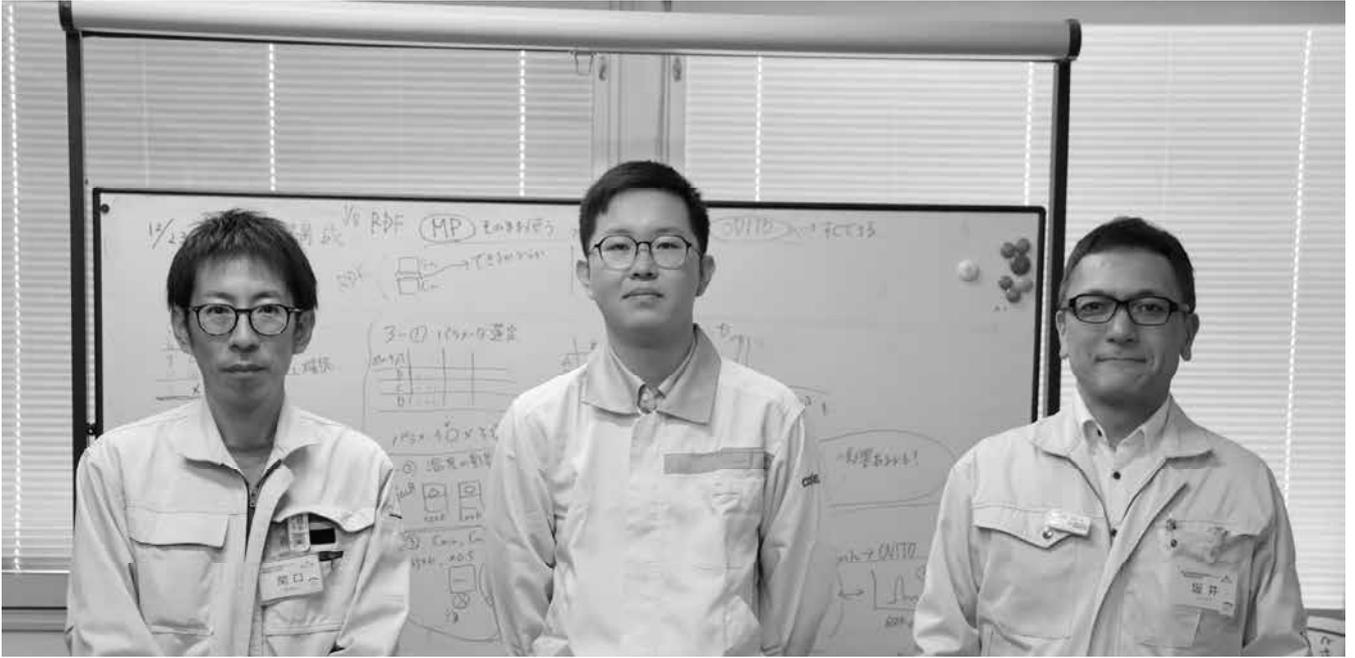
参考文献

- (1) 堀照夫. スマートテキスタイルの技術と開発動向. オレオサイエンス, 2021, 21.9: 361-368.
- (2) 職場における熱中症対策の強化について (令和 7 年 6 月 1 日施行)
https://site.mhlw.go.jp/kumamoto-roudoukyoku/newpage_01552.html
2026 年 1 月 5 日閲覧
- (3) 心電送信装置 HMTX1、(株)パラマ・テック、福岡
https://www.pmda.go.jp/PmdaSearch/kikiDetail/ResultDataSetPDF/630237_305AIBZX00005000_1_01_01
2026 年 1 月 29 日閲覧
- (4) 吉村拓巳; 黄銘; 田村俊世. ヘルスケアにおける体温計測のセンサ技術. 日本 AEM 学会誌, 2023, 31.4: 510-516.
- (5) 中川慎也; 清水正男; 濱口剛. MEMS 熱流束センサによるウェアラブル深部体温計の提案. 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), 2015, 135.8: 343-348.
- (6) TAMURA, Toshiyo, et al. An Advanced internet of things system for heatstroke prevention with a noninvasive dual-heat-flux thermometer. Sensors, 2022, 22.24: 9985.
- (7) GENEVA, Ivayla I., et al. Normal body temperature: a systematic review. In: Open forum infectious diseases. US: Oxford University Press, 2019. p. ofz032.
- (8) ROMANOVSKY, Andrej A. Skin temperature: its role in thermoregulation. Acta physiologica, 2014, 210.3: 498-507.

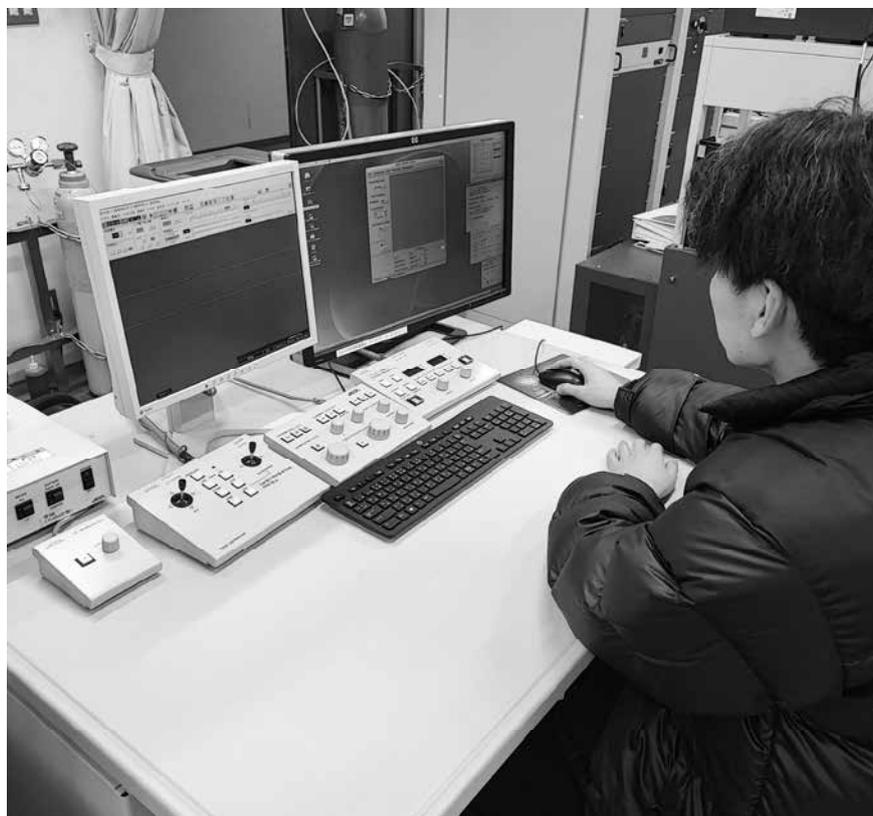
「ベイズ最適化を利用した条件出し方法の検討」グループの研究活動風景



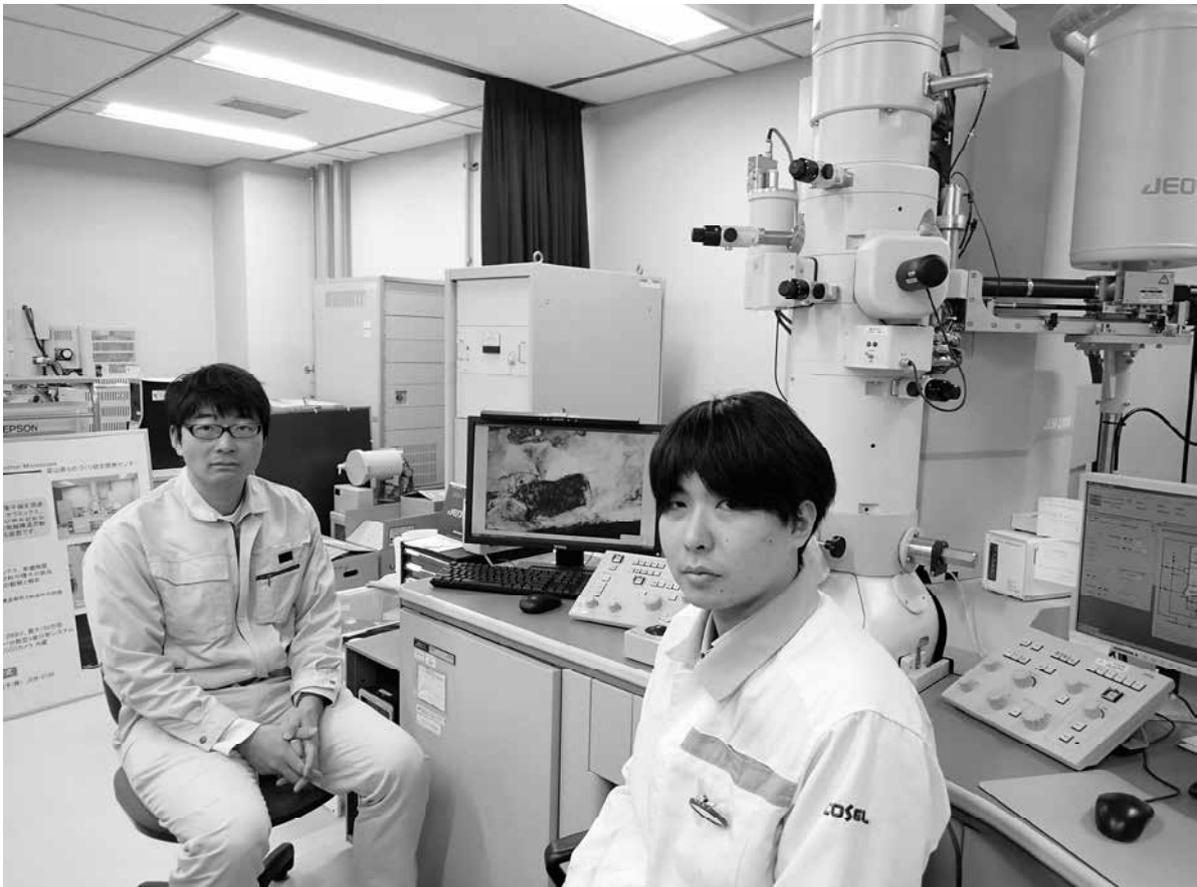
「銅-はんだ接合部のシミュレーションに関する研究」グループの研究活動風景



「スズの表面酸化状態に関する研究」グループの研究活動風景



「薄膜における接合技術に関する研究」グループの研究活動風景



「スマートテキスタイルのための温度センサ開発」グループの研究活動風景



「若い研究者を育てる会」の研究活動の足跡

- 38年間の研究テーマ数：230テーマ(昭和62年度～令和7年度)
- 参加研究員延べ人数：418名(指導機関の研究員を除く)

☆昭和62年度(第1回)研究テーマと研究参加者(3テーマ、12名)

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

☆昭和63年度(第2回)研究テーマと研究参加者(6テーマ、21名)

1. フレキシブルハンドに関する研究～ロボット用アームの試作(2)
石崎 浩・滝森幸浩(タカノギケン㈱)、茨木正則(北日本電子㈱)、窪池義文(エルコー㈱、現コーセル㈱)、
滝脇優治(㈱タナカエンジニアリング)
◎指導機関：工業技術センター富山研究所(現機械電子研究所)
2. ZnO系セラミックス薄膜に関する研究～圧電薄膜音響素子の開発
小西孝浩(タカノギケン㈱)、小町秀彦(㈱タカギセイコー)、滝川義弘(燐化学工業㈱)、平能 司(㈱和泉電気富山製作所)
◎指導機関：工業技術センター富山研究所(現機械電子研究所)
3. CO-METAL系アモルファス軟磁性薄膜に関する研究
越浜哲夫(㈱不二越東富山製鋼所)
◎指導機関：工業技術センター富山研究所(現機械電子研究所)
4. 樹脂・ファイバー複合材バネに関する研究
池田秀雄(㈱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)
◎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)

1. 樹脂・ファイバー複合材に関する研究
池田秀雄・高柳敏信(㈱タカギセイコー)、上段一徳(東洋化工㈱)、長柄 勝(長柄鉄工㈱)、柳原 潔(㈱黒田精型)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. ZnO系セラミックス薄膜に関する研究～圧電薄膜音響光学素子の開発
小西孝浩(タカノギケン㈱)、滝川義弘・煙田不二男(燐化学工業㈱)、平能 司(㈱和泉電気富山製作所)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
3. 焦電型赤外線センサに関する研究～RFマグネトロンスパッタ法によるチタン酸鉛薄膜の作製
山田義昭(東洋化工㈱)、吉田孝一(㈱タカギセイコー)、吉野正浩(吉田工業㈱、現 YKK(㈱))
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
4. CO-NB-ZRアモルファス軟磁性薄膜に関する研究
越浜哲夫(㈱不二越)、西田達也(北陸電気工業㈱)、前坂昌春(エルコー㈱、現コーセル㈱)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
5. 障害者のための学習機能を有するマンマシンシステムの研究～機能的電気刺激のための上肢機能シミュレータの研究開発
古瀬正浩(㈱インテック)、堀井 孝(エルコー㈱、現コーセル㈱)
◎指導機関：高志リハビリテーション病院
6. 超音波メガネの研究
中村 亮(北日本電子㈱)、中山正明(㈱和泉電気富山製作所)
◎指導機関：富山大学工学部

☆平成2年度(第4回)研究テーマと研究参加者(7テーマ、16名)

1. 磁性薄膜の応用に関する研究～倍周波型磁気センサの開発
越浜哲夫(㈱不二越)、高島 誠(エルコー㈱、現コーセル㈱)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. 仕上げ面粗さ自動測定装置の開発に関する研究
高柳敏信(㈱タカギセイコー)、田村正行(吉田工業㈱、現 YKK㈱)、柳原 潔(㈱黒田精型)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
3. 圧電シートを用いた簡易超音波診断装置の開発に関する研究
尾畑哲史(㈱和泉電気富山製作所)、山田義昭(東洋化工㈱)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
4. 拡散型光導波路を用いた音響光学素子に関する研究
煙田不二男(燐化学工業㈱)、若林成喜(北陸電気工業㈱)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
5. 画像による寸法計測に関する研究
石黒哲也(㈱タナカエンジニアリング)、窪池義文(エルコー㈱、現コーセル㈱)、西浦慎一・村井哲雄(㈱タカノギケン)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
6. 超音波杖の研究
中村 亮(北日本電子㈱)、堀登紀男(㈱和泉電気富山製作所)
◎指導機関：富山大学工学部
7. 障害者のための学習性を有するマンマシンシステムの研究～完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究
土田隆一(立山科学工業㈱)
◎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
4. 圧電シートを用いた簡易超音波診断装置の開発に関する研究
尾畑哲史(㈱和泉電気富山製作所)、山田義昭(東洋化工㈱)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
5. 薄膜微細加工技術の研究
飴井俊裕(エルコー㈱、現コーセル㈱)、竹端精己(㈱不二越)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
6. 視覚障害者のための音声点字変換装置に関する研究
岩田雅明(北日本電子㈱)、島野英明(㈱インテック)
◎指導機関：富山大学工学部
7. 障害者のための学習性を有するマンマシンシステムの研究～完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究
土田隆一(立山科学工業㈱)
◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成4年度(第6回)研究テーマと研究参加者(6テーマ、12名)

1. マイクロマシンの研究
白石信行(コーセル㈱)、新谷哲也(北陸電気工業㈱)、吉井靖岳(㈱タナカエンジニアリング)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. 薄膜微細加工技術の研究～トランスの試作
伊勢寿夫(コーセル㈱)、戸田雅規(㈱不二越)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
3. 形状測定装置の開発に関する研究
野末昌朗(立山アルミニウム工業㈱)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
4. 透明プラスチック製品の欠陥検査装置の開発
大岩秀徳(三協アルミニウム工業㈱)、長峰浩幸(㈱タカギセイコー)、本堂 裕(㈱斎藤製作所)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 単音節認識による音声～点字変換
北喜靖規(北日本電子㈱)、島野英明(㈱インテックシステム研究所)
◎指導機関：富山大学工学部
6. 完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究
土田隆一(立山科学工業㈱)
◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成5年度(第7回)研究テーマと研究参加者(6テーマ、12名)

1. 機能性膜の微細加工に関する研究～磁気式回転センサおよび温度抵抗素子の試作
伊東 守(コーセル㈱)、森田智之(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. マイクロマシンの研究
川西和昭(三協アルミニウム工業㈱)、後藤 肇(コーセル㈱)、佐々木啓充(㈱タナカエンジニアリング)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
3. 有機電子材料の研究
雨野孝信(㈱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
4. リン酸塩系セラミックス固体電解質の開発～Ag イオン固体2次電池の試作
黒川寛幸(北陸電気工業㈱)、山口 睦(燐化学工業㈱)
◎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)
◎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㈱)
◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成6年度(第8回)研究テーマと研究参加者(6テーマ、16名)

1. 視覚システムを持つ移動ロボットの開発
小山直人(㈱タカギセイコー)、寺本正夫・杉谷 健(コーセル㈱)、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)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. 機能性薄膜と半導体の複合素子の開発
高柳 毅(コーセル㈱)、田村雅英(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
3. リン酸系エッチング液の基礎研究
山口 睦(燐化学工業㈱)
◎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)
◎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)
◎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㈱)、米谷庄一(三協アルミニウム工業㈱)
◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成7年度(第9回)研究テーマと研究参加者(8テーマ、15名)

1. 視覚システムを持つ移動ロボットの開発(2)
大浦真司(三協アルミニウム工業㈱)、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
2. 金属製品の鍛造成形シミュレーションに関する研究
永森和久(㈱タナカエンジニアリング)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
3. 電子回路用ウェットエッチング液の研究
山口 睦(燐化学工業㈱)
◎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)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 微動機構による機械の高度化の研究
佐野仁一(東洋化工株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
6. 薄膜超磁歪素子の研究
酒井隆正(コーセル株)、谷上英樹(北陸電気工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
7. レドックス型太陽発電システムの開発
市川良雄・大橋伸一(富山軽金属工業株)、三井清隆(株タナカエンジニアリング)、
長谷川益夫(富山県林業技術センター木材試験場)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
8. 障害者のための屋内環境制御装置の開発に関する研究(3)
五十嵐隆治(立山アルミニウム工業株)
◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成 8 年度(第 10 回)研究テーマと研究参加者(6 テーマ、15 名)

1. 形状記憶合金膜を用いたマイクロポンプの開発
三松克次・笹島和明(株タカギセイコー)、田島正康(株タナカエンジニアリング)、田中 篤(北陸電気工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. 鍛造成形の簡易シミュレーションに関する研究
松井裕昭(株タナカエンジニアリング)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
3. レドックス型太陽発電システムの開発(2)
市川良雄(富山軽金属工業株)、田畑裕信(中越合金鋳工株)、三井清隆(株タナカエンジニアリング)、
長谷川益夫(富山県林業技術センター木材試験場)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
4. 複数のロボットによる協調制御の研究
金田淳也(コーセル株)、森田裕之(立山アルミニウム工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
5. 多孔質シリコンの形成に関する研究
石川秀人(北陸電気工業株)、安田純子(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
6. 高輝度蓄光性蛍光板の開発
佐野仁一(東洋化工株)、二見泰雄(三協アルミニウム工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

☆平成 9 年度(第 11 回)研究テーマと研究参加者(6 テーマ、18 名)

1. レドックス型太陽発電システムの開発(3)
市川良雄(富山軽金属工業株)、田畑裕信(中越合金鋳工株)、野中義夫(南トヤマ技術開発研究所)、
長谷川益夫(富山県林業技術センター木材試験場)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. 複数のロボットによる協調制御の研究(2)
森田裕之(立山アルミニウム工業株)、渡辺暁信(株タナカエンジニアリング)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
3. 生活環境用臭センサの開発
垣内由美子(コーセル株)、角谷哲哉(北陸電気工業株)、小島理敬(三協アルミニウム工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部
4. 電力変換用圧電セラミックストランスの開発
堀井一宏(コーセル株)、柳川 新(立山科学工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
5. 局部的レーザー処理による形状記憶合金膜アクチュエータの開発
丹保哲也(北陸電気工業株)、野上拓也(株タナカエンジニアリング)、山田浩美(東洋化工株)、滝川健太郎(金沢大学工学部)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
6. 電気自動車の開発
坂本雅美(株斎藤製作所)、高橋 聡(株タナカエンジニアリング)、藤木和幸(株タカギセイコー)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成 10 年度(第 12 回)研究テーマと研究参加者(6 テーマ、11 名)

1. 圧電素子を用いた制振機構の研究
稲垣 聡(北陸電気工業株)、渡辺暁信(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. コーティング工具の密着性向上に関する研究
野上拓也(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 生活環境用においセンサの開発(2)
星野昌則(コーセル株)、南 政克(北陸電気工業株)、山田浩美(東洋化工株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部
4. 電気自動車の開発(2)
坂本雅美(株斉藤製作所)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
5. 微細放電加工の研究
太田光則(株斉藤製作所)、橋本 明(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
6. 電磁シールド材の基礎研究
高橋伸忠(株タカギセイコー)、福田隆之(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成 11 年度(第 13 回)研究テーマと研究参加者(8 テーマ、14 名)

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

☆平成 12 年度(第 14 回)研究テーマと研究参加者(5 テーマ、8 名)

1. エンジンの動弁機構における構造解析および強度評価(2)
島村和孝(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. インテリジェントにおいセンサの研究(2)
小森一哉(北陸電気工業株)、谷口真也(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部
3. 高摩擦係数材料の研究
高田智哉(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
4. 木粉末を配合したプラスチックリサイクル材の研究
酒井康弘(株タカギセイコー)、前田健二(立山アルミニウム工業株)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所
5. 低温駆動小型燃料電池の開発に関する基礎研究
高橋雄一(コーセル株)、山田浩美(東洋化工株)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成 13 年度(第 15 回)研究テーマと研究参加者(8 テーマ、14 名)

1. 滑雪板(着雪防止板)の開発
河井牧夫(田中精密工業株)、高橋伸忠(株タカギセイコー)、野田耕司(三協アルミニウム工業株)、石井 雅(富山県土木部)
◎指導機関：工業技術センターPJ・中央研究所
2. 分子機能材料を用いた光電池の研究開発
濱口 誠(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 高摩擦係数材料の研究(2)
高田智哉(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
4. 木粉末を配合したプラスチックリサイクル材の研究(2)
酒井康弘(㈱タカギセイコー)、前田健二(立山アルミニウム工業株)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所、富山県立大学工学部
5. ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発
小出哲雄(コーセル株)、坂本雅美(㈱斉藤製作所)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部
6. 体質診断等 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(北陸電気工業株)
◎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(武内プレス工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成 14 年度(第 16 回)研究テーマと研究参加者(8 テーマ、13 名)

1. ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発(2)
石見雅美(㈱斉藤製作所)、稲澤直子(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部
2. 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
3. MEMS を応用した高精度温度センサの開発
今村徹治(北陸電気工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・PJ、富山大学工学部
4. アルミ飲料容器の形状評価手法の開発
清水 歩(武内プレス工業株)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所・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)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
6. 滑雪機構の改善に関する研究
河井牧夫(田中精密工業株)、野田耕司(三協アルミニウム工業株)
◎指導機関：工業技術センター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(立山科学工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
8. 有機材料を用いた排ガス吸着材料の検討
酒井康弘(㈱タカギセイコー)
◎指導機関：工業技術センター生活工学研究所、機械電子研究所

☆平成 15 年度(第 17 回)研究テーマと研究参加者(6 テーマ、9 名)

1. ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発(3)
石見雅美(㈱斉藤製作所)、魚谷一成(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部
2. 生活習慣病等体質診断用 DNA チップの検出精度向上に関する研究(3)
碓井洋平(立山科学工業株)、中山 均(コーセル株)、中林俊幸(東洋化工株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
3. 薄膜超低温特性抵抗器の開発
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)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
5. 超小型 4 サイクルエンジンの開発(2)
花崎 大(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

6. インクジェット法による電子部品作製に関する基礎研究
増山智英(立山科学工業㈱)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成 16 年度(第 18 回)研究テーマと研究参加者(7 テーマ、12 名)

1. 大型色素増感太陽電池の開発
廣田和也(㈱タカギセイコー)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所
2. 交流法を用いたバイオセンサの開発
米澤久恵(コーセル㈱)、碓井洋平(立山科学工業㈱)、深沢正樹(立山マシン㈱)、
宝泉重徳(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、富山県新世紀産業機構
3. インクジェット用機能性インクの開発
松田杏子(立山科学工業㈱)
◎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)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
5. 薄膜低温度特性抵抗器の開発(2)
桑原大輔(北陸電気工業㈱)
◎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㈱)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所・生活工学研究所・機械電子研究所

☆平成 17 年度(第 19 回)研究テーマと研究参加者(7 テーマ、10 名)

1. 小型燃料改質器を用いた燃料電池の開発(2)
小杉京平(コーセル㈱)、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
2. 交流法を用いたバイオセンサの開発(2)
上谷聡史(コーセル㈱)、深沢正樹(立山マシン㈱)、中田守人(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、富山県新世紀産業機構
3. 薄膜低温度特性抵抗器の開発(3)
津幡 健(北陸電気工業㈱)
◎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㈱)
◎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㈱)
◎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㈱)
◎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)
◎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㈱)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所・プロジェクト推進担当・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・プロジェクト推進担当

4. インクジェット法による電子回路パターンの作製
篠原おりえ、田中裕美(立山科学工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
5. 小径穴仕上げ加工
高岡利尚(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センタープロジェクト推進担当・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・プロジェクト推進担当

☆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
曾根宏信(燐化学工業株)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所、富山県立大学工学部
2. 肉盛ステライトの硬さに影響を与える溶接条件の研究
田中隆尚(田中精密工業株)、長柄大介(長柄鉄工株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・プロジェクト推進担当、富山大学芸術文化学部
3. インクジェット法を用いたアンテナの作製
廣島大三(立山科学工業株)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
4. 燃料電池用超小型水素発生器の開発
川端基裕(コーセル株)、遠藤 亮(三協立山アルミ株)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所
5. 三次元座標測定機における測定信頼性向上に関する研究
中橋秀記(立山マシン株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・企画管理部
6. ナノポーラス構造薄膜の作製とセンサーへの応用研究(2)
石橋孝裕(北陸電気工業株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所
7. 陽極酸化皮膜を用いたナノ構造体の応用研究
清水裕也(株)タカギセイコー
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・プロジェクト推進担当
8. マイクロ TAS チップの開発(2)
石村和雄(コーセル株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・生活工学研究所

☆平成 20 年度(第 22 回)研究テーマと研究参加者(5 テーマ、8 名)

1. マイクロリアクタによる反応制御方法に関する研究
大橋裕之(燐化学工業株)、梅原洋平(コーセル株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・生活工学研究所
2. 空中超音波を用いた空間温度計測システムの研究
正源浩之(コーセル株)、木下正之(立山科学工業株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・生活工学研究所
3. ダイカスト金型材料の接合技術の開発
花崎裕美(田中精密工業株)、古川万晃(株)タカギセイコー
◎富山県工業技術センター中央研究所・プロジェクト推進担当、富山大学芸術文化学部
4. 局部加熱によるプラスチック表面の高機能化
吉田康子(株)タカギセイコー
◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
5. 酵母を利用した和漢薬の薬理作用の解析および測定デバイスの開発
日出嶋宗一(立山マシン株)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所

☆平成 21 年度(第 23 回)研究テーマと研究参加者(5 テーマ、9 名)

1. 軽量・フレキシブルな色素増感太陽電池の開発
吉田康子(株タカギセイコー)、中田裕一(北陸電気工業株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所
2. ハンダ付着性導電塗料を用いた試作基板作製法の開発
熊田泉実(コーセル株)、日出嶋宗一(立山マシン株)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所
3. X線 CT を用いた実寸計測に基づく CAE 技術の研究
山根幸治(コーセル株)、細川修宏(株タカギセイコー)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
4. ダイカスト金型材料の接合技術の開発(2)
中田雄三(田中精密工業株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学芸術文化学部
5. スクリーン印刷法による低コスト色素増感太陽電池の開発
斉藤洋輔(コーセル株)、若林 傑(立山科学工業株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

☆平成 22 年度(第 24 回)研究テーマと研究参加者(5 テーマ、8 名)

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

☆平成 23 年度(第 25 回)研究テーマと研究参加者(5 テーマ、7 名)

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

☆平成 24 年度(第 26 回)研究テーマと研究参加者(7 テーマ、10 名)

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

4. 小水力発電システムの研究
中瀬典章(コーセル株)、荒井勇人(立山科学工業株)、熊澤周士(株タカギセイコー)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部
5. 受動的歩行ロボットの開発
水上慎太郎(コーセル株)、若崎祥人(立山マシン株)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
6. 積層鋼板の磁気特性に関する研究(2)
藤岡英示(田中精密工業株)
◎富山県工業技術センター機械電子研究所、谷野技術士事務所、富山大学大学院理工学研究部
7. SW 電源の電磁ノイズのシミュレーション
野口拓(コーセル株)
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

☆平成 25 年度(第 27 回)研究テーマと研究参加者(6 テーマ、7 名)

1. 接着剤を用いない異種材料の超音波接合に関する研究
猪原 悠(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、元工業技術センター
2. スイッチング電源における電磁界ノイズシミュレーション実用化の研究
野口 拓(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所
3. 単層カーボンナノチューブに関する研究
大門貴史(北陸電気工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部
4. 極低容量水力発電システムの研究
住和大輔(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
5. マグネシウム燃料電池の開発
安田 剛(三協立山株)、山崎鉄平(株タカギセイコー)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部
6. ナノインプリント技術による金属ナノドットパターン形成に関する研究
升方康智(立山科学工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・企画管理部、県商工労働部

☆平成 26 年度(第 28 回)研究テーマと研究参加者(6 テーマ、12 名)

1. トイレからの漏えい音低減に関する研究
中村将士(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. 切削加工シミュレーションに関する研究
水野輝章(田中精密工業株)、若林武司(立山マシン株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所、元工業技術センター
3. 3D プリンタを利用した簡易的なブロー成形樹脂型の製作に関する研究
黒田大輔(武内プレス工業株)、相馬 優(株斎藤製作所)、桑原浩一(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所・ものづくり研究開発センター
4. エネルギーハーベスター利用システムに関する研究
浦山陽平(コーセル株)、中田智康(北陸電気工業株)
◎指導機関：工業技術センターものづくり研究開発センター・中央研究所・機械電子研究所
5. 量子ドット増感太陽電池の研究
山本尚人(北陸電気工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部
6. 接着剤を用いない異種材料の超音波接合に関する研究(2)
大浦秀剛(三協立山株)、山崎鉄平(株タカギセイコー)、林 達規(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、元工業技術センター

☆平成 27 年度(第 29 回)研究テーマと研究参加者(6 テーマ、9 名)

1. トイレからの漏えい音低減に関する研究(2)
杉森雄平(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
2. 3D スキャナーを用いた形状測定と変形解析への適用
山崎諭史(コーセル株)、内山 肇(三協立山株)、金山侑司(北陸電気工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
3. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究
山本貴之(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所・富山大学大学院理工学研究部

4. ハイブリッド樹脂粉末を用いた樹脂の特性改善
熊澤周士(株)タカギセイコー)、黒河歩美(立山マシン株)
◎指導機関：工業技術センター中央研究所
5. ドリル切削加工における精度向上に関する研究
石澤剛士(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
6. アルミ缶内面の腐食防食評価技術の高度化
筒井英明(武内プレス工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

☆平成 28 年度(第 30 回)研究テーマと研究参加者(6 テーマ、9 名)

1. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究(2)
今井航平(北陸電気工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部
2. 振動の簡便な測定法・低減法の開発
林 大清(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
3. 金属積層造形の基礎と造形物の評価に関する研究
永田直也(三協立山株)、滝沢将史(コーセル株)
◎指導機関：工業技術センターものづくり研究開発センター・中央研究所
4. 容器用実用アルミ材の耐食性および腐食反応の解析に関する研究
深川裕之(武内プレス工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
5. エンドミル加工での工具寿命向上に関する研究
中嶋 謙(田中精密工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・生活工学研究所・中央研究所
6. ウェアラブル電源の開発
関口貴彬(コーセル株)、天野久美子(北陸電気工業株)、坂井友樹(立山科学工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

☆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
2. 複合化樹脂粉を用いたレーザ塗装
島林孝吉(株)齊藤製作所)
◎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
4. 工具寿命の機上検出手法に関する研究
石澤剛士(田中精密工業株)
◎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(三協立山株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所
6. 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)
◎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(北陸電気工業株)
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

☆平成 30 年度(第 32 回)研究テーマと研究参加者(4 テーマ、5 名)

1. CAE を用いた振動解析の信頼性評価への応用
稲垣友大(株)タカギセイコー)、村井慎介(北陸電気工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター
2. 超音波接合における接合材の振動特性に関する研究(2)
藤田直希(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター

3. 曲面用外観検査手法の研究
石澤剛士(田中精密工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター
4. 感光性ナノファイバーを用いたフレキシブルな透明導電パターンの作製
榎 正史(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

☆令和元年度(第33回)研究テーマと研究参加者(5テーマ、8名)

1. 外観検査用画像処理の自動最適化に関する研究
中嶋 謙(田中精密工業株)、田中智惟(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター
2. 生産現場への行動認識及びマルチエージェントシミュレーションの適用
大上泰輝(コーセル株)、三鍋香織(立山科学工業株)
◎指導機関：富山県立大学工学部
3. フレキシブル薄膜二次電池の基礎研究
岩滝幸司(北陸電気工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所、富山大学学術研究部工学系
4. 遠隔モニタリングシステムを利用した製品評価技術の研究
小林寛治(コーセル株)、吉澤 明(株タカギセイコー)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター
5. CAEの構造最適化を用いた設計手法に関する研究
清田典秀(株タカギセイコー)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター

☆令和3年度(第34回)研究テーマと研究参加者(6テーマ、6名)

1. 基板トランスにおける交流抵抗の低減技術検討
萩中悠太(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター
2. フッ素ガス表面処理によるガスケット高機能化の評価手法の研究
中山 翔(株タカギセイコー)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター
3. 時系列データ分類のための誤分類低減手法
寺井太朗(田中精密工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所
4. 熱伝導式水素センサの加熱冷却曲線のシミュレーション
中野貴之(北陸電気工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所
5. 製品のヘルスマニタリングのIoT化に関する研究
西井渉太(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター・生活工学研究所
6. 水の光分解に関する基礎研究
塚田成弘(燐化学工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター

☆令和4年度(第35回)研究テーマと研究参加者(4テーマ、8名)

1. CNF複合樹脂成形とめっき技術を用いた高性能部品の作製
朝日奈幸輝(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター
2. 表面微細構造による濡れ性制御に関する研究
杉田涼輔(北陸電気工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター
3. プラスチック製品の性能向上のための設計技術と評価に関する研究
永井孝紀(コーセル株)、大上戸勇馬(株タカギセイコー)、田中和馬(株タカギセイコー)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所
4. デジタルツイン技術を活用した工場内の電波環境の改善
澤田直登(立山マシン株)、沙 悠輝(田中精密工業株)、長柄直樹(長柄鉄工株)
◎指導機関：富山県立大学工学部

☆令和5年度(第36回)研究テーマと研究参加者(5テーマ、8名)

1. リグニン系バイオマス製品の開発に関する研究
天池夏希(三協立山株)
◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター

2. 小型マイクロ波無線給電システムの開発
高嶋翔太(コーセル株)、田開孝祐(北陸電気工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター
3. プラスチック製品の性能向上のための設計技術と評価に関する研究(2)
田中和馬(株タカギセイコー)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所
4. 衝撃応答特性の測定および解析による電子部品の信頼性向上
林 怜汰(コーセル株)、松田修人(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所
5. 製造業におけるデジタルツインを活用した業務改善
諸岡哲史(三協立山株)、中村宙夢(株タカギセイコー)
◎指導機関：富山県立大学工学部

☆令和6年度(第37回)研究テーマと研究参加者(4テーマ、7名)

1. マイクロ波電力伝送の高効率化に関する研究
水島颯汰(コーセル株)、種岡涼音(株タカギセイコー)
◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター
2. 半透明有機薄膜太陽電池の開発
田中溪太(コーセル株)
◎指導機関：富山大学学術研究部工学系、産業技術研究開発センター機械電子研究所
3. フレキシブル導体の開発
岡田達也(株タカギセイコー)、水戸俊宏(北陸電気工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター生活工学研究所
4. 振動発電デバイスのための自動共振機構に関する研究
東光一郎(株立山科学ハイテクノロジーズ)、織田航輝(株立山科学ハイテクノロジーズ)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所

☆令和7年度(第38回)研究テーマと研究参加者(5テーマ、6名)

1. ベイズ最適化を利用した条件出し方法の検討
松本耀介(北陸電気工業株)、畦地里奈(株タカギセイコー)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所
2. 銅-はんだ接合部のシミュレーションに関する研究
寺田圭吾(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所
3. スズの表面酸化状態に関する研究
大浦真樹(北陸電気工業株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター
4. 薄膜における接合技術に関する研究
福澤健介(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター
5. スマートテキスタイルのための温度センサ開発
澤井駿佑(コーセル株)
◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所

○ 会 員 企 業

令和8年3月16日現在(50音順)

	企 業 名	代表者氏名	運営委員氏名	電話番号
1	コーセル株式会社	斉藤 盛雄	真野 達也	076-432-8151
2	株式会社斉藤製作所	齊藤 行男	相馬 優	076-468-2727
3	三協立山株式会社	平能 正三	庵 真砂代	0766-20-2101
4	株式会社タカギセイコー	高木 章裕	高橋 伸忠	0766-24-5522
5	タカノギケン株式会社	高野 吉寿	高野 吉寿	076-455-2525
6	武内プレス工業株式会社	武内 繁和	澤井 崇	076-441-1856
7	立山科学株式会社	水口 勝史	西野 文雄	076-483-3088
8	立山マシソン株式会社	宮野 兼美	松井 和浩	076-483-4123
9	田中精密工業株式会社	田中 英一郎	高井 正樹	076-469-9107
10	長柄鉄工株式会社	長柄 大介	長柄 大介	0766-22-3170
11	北陸電気工業株式会社	下坂 立正	荻原 克行	076-467-1111
12	燐化学工業株式会社	吉村 浩幸	下野 哲教	0766-86-2511

事務局：(公財)富山県新世紀産業機構内 〒930-0866 富山市高田 529 TEL:076-444-5607(林 千歳、市田 聡)

○ 研 究 幹 事

氏 名	所 属	役 職	学 位	電話番号
石本 卓也	富山大学先進アルミニウム国際研究センター	教 授	博士(工学)	076-411-4897
岩本 健嗣	富山県立大学工学部情報システム工学科	教 授	博士(政策・メディア)	0766-56-7500
上野 実	産業技術研究開発センター	副主幹研究員		076-433-5466
小幡 勤	産業技術研究開発センター	次 長	博士(工学)	0766-21-2121
角田 龍則	産業技術研究開発センター	電子デバイス技術課長		076-433-5466
川堰 宣隆	産業技術研究開発センター	副主幹研究員	博士(工学)	0766-21-2121
佐伯 和光	産業技術研究開発センター	ものづくり基盤技術課長	博士(工学)	076-433-5466
坂井 雄一	産業技術研究開発センター	副主幹研究員	博士(工学)	076-433-5466
早苗 徳光	産業技術研究開発センター	生活資材開発課長		0763-22-2141
住岡 淳司	産業技術研究開発センター	企画管理部長		0766-21-2121
高田 耕児	産業技術研究開発センター	副主幹研究員	博士(工学)	0763-22-2141
塚本 吉俊	産業技術研究開発センター	上席専門員		0766-21-2121
寺澤 孝志	産業技術研究開発センター	製品・機能評価課長		0766-21-2121
中 茂樹	富山大学学術研究部工学系	教 授	博士(工学)	076-445-6731
中橋 美幸	産業技術研究開発センター	企画調整課長	博士(学術)	0766-21-2121
鍋澤 浩文	産業技術研究開発センター	所 長	博士(工学)	0763-22-2141
山岸 英樹	産業技術研究開発センター	機能素材加工課長	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	水口昭一郎 (平成 17 年度～平成 18 年度)
9 代会長	町野 利道 (平成 19 年度～平成 20 年度)
10 代会長	笠井 千秋 (平成 21 年度～平成 22 年度)
11 代会長	津田 信治 (平成 23 年度～平成 24 年度)
12 代会長	田中 一郎 (平成 25 年度～平成 26 年度)
13 代会長	武内 繁和 (平成 27 年度～平成 28 年度)
14 代会長	齊藤 行男 (平成 29 年度～平成 30 年度)
15 代会長	水口 勝史 (令和元年度～令和 2 年度)
16 代会長	谷川 正人 (令和 3 年度～令和 4 年度)
17 代会長	高木 章裕 (令和 5 年度～令和 6 年度)
18 代会長	下坂 立正 (令和 7 年度～令和 8 年度)

○ 顧 問 (50 音順)

小熊 規泰	((大)富山大学・工学部長)
九曜 英雄	((公財)富山県新世紀産業機構・理事イノベーション推進センター長)
坂村 芳孝	((大)富山県立大学・工学部長)
高林 外広	(産業技術研究開発センター・所長)
谷野 克巳	(元工業技術センター・所長)
土肥 義治	(元(公財)富山県新世紀産業機構・イノベーション推進センター参与)
夏野 光弘	((公財)富山県新世紀産業機構・専務理事)
町野 利道	(CS ポート(株)・代表取締役社長)
松田 敏弘	(元公立大学法人富山県立大学・工学部教授)

(様式 1)

「若い研究者を育てる会」入会申込書

企業名（事業所名）
代表者職氏名
住所・電話番号・FAX 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。 年 月 日 企業名（事業所名） 印 代表者氏名 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 FAX にてお願いします。
- ・申し込み用紙は本票をコピーしてご利用ください。
- ・その他不明な点は事務局へお問合わせください。

☆申し込み先

〒930-0866 富山市高田 529
（公財）富山県新世紀産業機構
「若い研究者を育てる会」事務局
TEL 076-444-5607
FAX 076-444-5630

発 行 者 若い研究者を育てる会

〒930-0866

富山市高田 529

(公財)富山県新世紀産業機構

プロジェクト推進課内

発 行 責 任 者 富山県産業技術研究開発センター

角田 龍則

(公財)富山県新世紀産業機構

市田 聡

発 行 年 月 日 令和 8 年 3 月 16 日

印 刷 所 富山スガキ株式会社

