

令和元年度

(第 33 回)

若い研究者を育てる会研究発表会

研究論文集

令和2年3月11日（水）

於：ホテルグランテラス富山

若い研究者を育てる会

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

本書は下記の研究機関の指導のもとに作成された。

記

富山県産業技術研究開発センター
富山大学学術研究部
富山県立大学工学部

ご あ い さ つ

会 長 水 口 勝 史

「若い研究者を育てる会」の第33回研究論文集発行にあたり、一言ごあいさつを申し上げます。

昭和62年1月に発足した「若研」ですが、「昭和」「平成」の時代を経て、「令和」初の研究論文集を発行するに至ったことに、改めてその歴史の重さを実感しております。これもひとえに大学の諸先生方、産業技術研究開発センターの方々をはじめ、富山県新世紀産業機構、他会員企業の関係者各位のご支援の賜物と改めて深くお礼を申し上げます。

さて、近年世界は「デジタル社会」へと大きく舵を切り、そのスピードは年々加速し留まることを知りません。概して「デジタル社会」は一見無機質なイメージがありますが、「利便性を高める」ことが重要なキーワードであることを鑑みると、「人間中心主義」の社会の実現こそがその本質であり、追い求めるものであると考えられます。何故なら、市場を支配する者は常に消費者・ユーザーであり、それらが求めるものを実現するためにデジタル化が進み、一方、デジタル化を進めるのも私たち人間であるからです。その大きな流れの中で必要とされる優秀な技術者を産学官が連携し育成していくことは、非常に有意義な取り組みであり、当会の存在意義が今後益々重要になっていくことは疑う余地のないものと思います。

さらに目を広く海外に転じると、例えばドイツのフランホファー研究機構のように、いい企業は必ずいい大学と強い繋がりを持っています。いい大学との連携は、企業のステータスであり、社員の誇りとなっています。そうした企業の存在は、地域発展の大きな力となり、それらが発信する魅力に惹かれまた優秀な学生が集まるという、好循環が生まれているのです。「ものづくり県とやま」の発展のためにも産学官が連携し、このような相乗効果を生み出すことが必要であると考えるとき、今後「若い研究者を育てる会」の卒業生が、その一翼を担っていくことを確信し、本論文集がそのための一助となることを期待しております。

終わりにになりましたが、関係各位の変わらぬご指導とご支援をお願いして、発行にあたってのごあいさつとさせていただきます。



研 究 の 概 要

「若い研究者を育てる会」（以下、「若研」）の研究発表会は今年度で33回目を迎えた。本論文集は「若研」に参加する企業（現在の会員企業数13社）と会員企業の若手技術者が5つの研究テーマについて、令和元年5月から富山県産業技術研究開発センターおよび富山県立大学において、5グループ（5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。5テーマの内1テーマについては、富山大学学術研究部工学系の研究協力と指導のもとで実施した。ここでは、今年度実施した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) 本保栄治

①「外観検査用画像処理の自動最適化に関する研究」の研究グループ（参加企業2社）では、外観検査のための画像処理において、画像データをもとに各画像処理の手順および各処理に要するパラメータを自動的に生成する方法に取り組んだ。まず画像処理方法の選択とそれらの順番および各画像処理に要するパラメータの最適化をアルゴリズムによって実施し、自動的に決定する手法を検討した結果、遺伝的アルゴリズムを用いて、適切な画像処理の手順・パラメータを獲得する手法を考案した。次に自動車用精密加工部品ピストンピンの研削不良、および電子基板の部品抜けの外観検査において、考案した自動生成法を試みたところ、ピストンピンの研削ムラ、らせんキズ、および電子基板上のジャンパ線が実装されず抜けている状態を自動で検出することができた。画像処理を自動最適化する手法を考案したことは検査工程の省力化や高速化に向けて実用化が期待される。



富山県立大学工学部 電子・情報工学科 博士(政策・メディア) 岩本健嗣

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」の研究グループ（参加企業2社）では、人の介在の多い生産現場の改善を図るために行動認識及びマルチエージェントシミュレーション(MAS)の適用を行いその可能性について探った。1つめの現場では、細かい手元作業の多い現場において作業が標準化されておらず、また、標準化したとしても実際の作業を評価する方法がないことが課題であった。本研究では25の工程に対してウェアラブルセンサによる行動認識を行い、行動の分類ならびに標準作業との比較を行う検討を行った。結果としてある程度の実用性を見込める精度を達成することができた。2つめの現場では、作業員及び生産ラインの最適化が課題であった。MASを用いて、ルールベースで生産ラインおよび作業員をシミュレートし、生産現場で取得したデータを使用するシミュレータを実装した。現実の条件を設定することで、実績に近い出来高をシミュレーション結果として取得することができた。これらの結果から、人の介在の多い生産現場において行動認識およびMASを用いた改善の可能性を示すことができた。



③「フレキシブル薄膜二次電池の基礎研究」の研究グループ（参加企業 1 社）では、次世代の二次電池として期待されているリチウムイオン固体電解質二次電池について、課題である界面制御の観点から正極薄膜と固体電解質薄膜を形成し、その構造解析および二次電池特性の評価を行った。リチウム化合物粉末を加圧焼成したターゲットを作製し、スパッタ法によりコバルト酸リチウム正極薄膜を、また成膜時の窒素ガス導入により窒化リン酸リチウム固体電解質薄膜を得た。正極薄膜については、電解液を用いた電池セルを作製し、正極として機能することを確認した。また、成膜時の基板加熱制御により、大きな電池容量と安定した放電を得た。さらに、窒素ガス導入量制御により高いイオン伝導度をもつ固体電解質薄膜を得た。今後、多層膜構造での基板加熱や、耐熱ポリミドフィルムなどの樹脂基板上への形成を進めることでフレキシブル薄膜固体電池への展開が期待できる。



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」の研究グループ（参加企業 2 社）では、平成 30 年度に富山県産業技術研究開発センター機械電子研究所に整備された「先端デバイスマルチ信頼性試験室」において、「冷熱衝撃試験装置」を遠隔モニタリングできる「試験機器集中管理システム」を用い、信頼性試験の効率化について検討を行った。その結果、従来の方法と比較して、100 サイクル間隔の試験モニタリングにおいては、無駄となる平均残サイクル数を 76.8%削減することができた。また、試験体の稼働状況を短い間隔でモニタリングすることにより、損傷の進行過程に関して新たな知見が得られ、詳細な健全性評価が可能となった。さらに、X 線 CT 検査などとの併用により、疲労破壊の原因解析も迅速化した。今後、環境試験全般について、試験・評価環境の充実が期待できる。



⑤「CAE の構造最適化を用いた設計手法に関する研究」の研究グループ（参加企業 1 社）では、トポロジー最適化を用いた自由度の高い設計を、射出成形による樹脂成形品に適用すべく、実用的な CAE 設計プロセスについて提案、検討し、その有効性を検証した。一般的な構造体として椅子を例にとり、(1)体積制限下での平均コンプライアンス最小化によるトポロジー最適化形状の探索、(2)設計変更が容易な 3D-CAD データへの変換、および(3)シェル構造化などの樹脂成形性を考慮した形状設計、の各プロセスを実施し検討を加えた。最終的に得られた形状については、3D プリンターを用いた実体化を経た上で、静的負荷試験によるコンプライアンスの検証、および破壊試験と構造解析による構造体としての強度の検証を行った。その結果、樹脂成形品の設計工程へのトポロジー最適化の導入を可能とする一般的な設計を実現することができた。



今年度は、5つの研究テーマに8人の企業内若手技術者が参加した。これまでこの会では**33年間に206テーマ**の研究を実施しており、卒業生は**383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、ご助言を賜ったことに深く感謝の意を表します。

研究グループの構成

I. 外観検査用画像処理の自動最適化に関する研究の研究グループ

研究担当者 **中嶋 謙 (田中精密工業㈱)**

田中 智惟 (コーセル㈱)

○金森 直希 (産業技術研究開発センター機械電子研)

佐々木克浩 (産業技術研究開発センターものづくり)

☆本保 栄治 (産業技術研究開発センター機械電子研)

II. 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の研究グループ

研究担当者 **大上 泰輝 (コーセル㈱)**

三鍋 香織 (立山科学工業㈱)

○☆岩本 健嗣 (富山県立大学工学部)

III. フレキシブル薄膜二次電池の基礎研究の研究グループ

研究担当者 **岩滝 幸司 (北陸電気工業㈱)**

○角田 龍則 (産業技術研究開発センター機械電子研)

本保 栄治 (産業技術研究開発センター機械電子研)

横山 義之 (産業技術研究開発センター機械電子研)

早苗 徳光 (産業技術研究開発センター機械電子研)

寺澤 孝志 (産業技術研究開発センター機械電子研)

☆ 中 茂樹 (富山大学学術研究部工学系)

IV. 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の研究グループ

研究担当者 **小林 寛治 (コーセル㈱)**

吉澤 明 (㈱タカギセイコー)

○釣谷 浩之 (産業技術研究開発センター機械電子研)

佐々木克浩 (産業技術研究開発センターものづくり)

塚本 吉俊 (産業技術研究開発センター生活工学研)

佐山 利彦 (産業技術研究開発センター機械電子研)

☆関口 徳朗 (産業技術研究開発センターものづくり)

V. CAE の構造最適化を用いた設計手法に関する研究の研究グループ

研究担当者 **清田 典秀** (株)タカギセイコー)

- 中村 陽文 (産業技術研究開発センター機械電子研)
- 金森 直希 (産業技術研究開発センター機械電子研)
- 羽柴 利直 (産業技術研究開発センター機械電子研)
- 住岡 淳司 (産業技術研究開発センターものづくり)
- 山本 貴文 (産業技術研究開発センターものづくり)
- ☆佐山 利彦 (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. 外観検査用画像処理の自動最適化に関する研究	1
1. 緒 言	1
2. 画像処理の手順・パラメータの自動生成方法	1
3. 光沢曲面を有する金属加工部品の外観検査への適用	4
4. 電子基板の部品抜け検査への適用	5
5. 結 言	7
II. 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	8
1. 緒 言	8
2. 標準化の課題に対する検討	8
3. 実験結果と評価	9
4. 最適化の課題に対する検討	1 2
5. 結 言	1 5
III. フレキシブル薄膜二次電池の基礎研究	1 6
1. 緒 言	1 6
2. 正極薄膜の形成	1 6
3. 窒化リン酸リチウム／コバルト酸リチウム薄膜の形成	1 9
4. 固体電解質窒化リン酸リチウムの形成	2 0
5. まとめと今後の課題	2 1
IV. 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	2 2
1. 緒 言	2 2
2. 熱サイクル試験とその課題	2 2
3. 試験機器集中管理システムについて	2 3
4. 実験方法	2 4
5. 入出力電力の温度依存性の確認	2 5
6. 実験結果	2 6
7. まとめ	2 7

V. CAE の構造最適化を用いた設計手法に関する研究	-----	2 8
1. 緒 言	-----	2 8
2. 構造最適化について	-----	2 8
3. 樹脂成形品の最適化方法の提案	-----	2 9
4. トポロジー最適化について	-----	3 0
5. 樹脂成形品の最適化の工程	-----	3 1
6. 3D 実体化による最適化設計の検証	-----	3 4
7. 結 言	-----	3 5

○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—23
○入会申込書	-----	付—24

I. 外観検査用画像処理の自動最適化に関する研究

Study on Automatic Optimization of Image Processing for Visual Inspection

中嶋 謙 田中 智惟 金森 直希
NAKASHIMA Ken TANAKA Tomonobu KANAMORI Naoki
佐々木 克浩 本保 栄治
SASAKI Katsuhiko HONBO Eiji

Abstract

In the manufacturing industry, visual inspection using camera images is actively conducted. The image processing program used for visual inspection is created by trial and error by some engineers who have knowledge and experience in the field. Therefore, if a false detection occurs while the production line is in operation, it is necessary to correct or adjust the program immediately, which places a heavy burden on the engineer. It is necessary for workers with no experience in image processing to be able to create and adjust image processing programs. In this research, we examined methods of automatically generating image processing procedures and parameters simply by presenting non-defective images and defective images in image processing for visual inspection. We search for better image processing procedures and parameters using a genetic algorithm, one of the evolutionary algorithms. In executing the algorithm, it was carefully considered that the created image processing program would be used on actual production lines. The devised program generation method was applied to appearance inspection cases of precision machined parts and electronic boards, and its effectiveness was confirmed.

1. 緒言

製造業において、カメラ画像による外観検査が盛んに行われている。外観検査に使われる画像処理プログラムは、当該分野の知識・経験を有する技術者が試行錯誤を繰り返すことによって作成されていることが多いと考えられる。製造ラインの稼働中に外観検査の誤検知が発生した場合、プログラムの迅速な修正・調整が必要となるため、それらの技術者に負担がかかることになる。画像処理プログラムを作成した経験のない作業者がプログラムを作成・修正できれば、それらの技術者の負担が軽減できると考えられる。

そこで、本研究では、外観検査のための画像処理において、ユーザが良品画像および不良品画像を提示するだけで、画像処理の手順および各画像処理に要するパラメータを自動的に生成する方法を検討した。

2. 画像処理の手順・パラメータの自動生成方法

< 2. 1 > 概要

外観検査のための画像処理は、通常、カメラ撮影された原画像に対して、様々な画像処理関数を適切な順番で、かつそれぞれの画像処理関数を適切なパラメータで施すことで実現される。従来、これらの「画像処理の選択とそれらの適切な順番（手順）」および「各画像処理に要するパラメータ」は、知識・経験を有する技術

者による試行錯誤の繰り返しによって決められてきた。本研究では、この試行錯誤をアルゴリズムによってコンピュータ内で実施することで、画像処理の手順・パラメータを自動的に決定する。

外観検査のための画像処理では、目的の検査ごとに定番の画像処理手順がある程度確立されており、現場技術者はこれを基本手順として、使用する画像処理関数やパラメータを微調整することが多いと考えられる。しかし、技術者が気づいていないような、より精度の高い処理手順が存在する可能性があると考えられる。また、製造ラインにおける外観検査の不具合修正では、例えば翌日朝の始業時までには不具合修正を終える必要があるなどの時間的制約が存在する場合も考えられる。そこで、我々は、時間をかけて最高精度を探索するのではなく、局所最適解のような不十分な解からの脱出性や、時間による打ち切りへの対応性を重視して、進化計算型のアルゴリズムを用いて画像処理の手順とパラメータを求めることとした。本研究では、進化計算アルゴリズムの中でも、古くから広く知られておりソフトウェア・ライブラリの入手もしやすいと考えられる遺伝的アルゴリズムを用いた。

同様の取り組みは既に存在する⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾が、本研究では、生成された一連の画像処理を外観検査に適用した結果だけを評価するのではなく、生成された一連の画像処理を製造ラインの外観検査システムで実行することを考慮した評価も加えた。すなわち、使用する画像処理関数そのものや、画像処理を実施するハードウェアの性能などが評価される。これは、実際の製造ラインにおける外観検

査工程に存在する制約である、(1) 工程作業時間(タクトタイム)、
(2) 画像処理ハードウェアの特性・性能、および (3) 画像処理ソフトウェアの機能、を強く意識したものである。

< 2. 2 > 画像処理手順の木構造による表現

入力画像に対して、実行する画像処理関数とその関数に要するパラメータを合わせたもの、および前後のユニットとの繋がり方を記述したものを1つの画像処理ユニットとして考え(図1)、この画像処理ユニットを木構造状に並べたものを一連の画像処理手順とする(図2)。とくに、図2の入力画像がすべて同じ画像の場合は、図3に示すブロック図状に表すことができる。

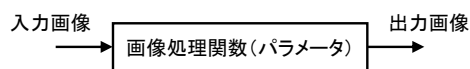


図1 画像処理ユニット
Fig.1 Image processing unit.

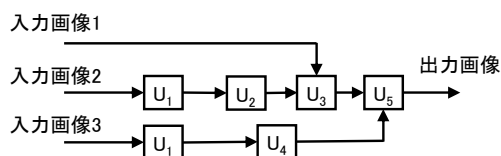


図2 画像処理手順の木構造表現
Fig.2 Tree structure representation of image processing procedure.

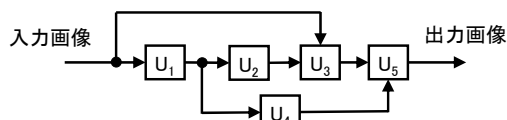


図3 画像処理手順のブロック図表現
Fig.3 Block diagram representation of image processing procedure.

< 2. 3 > 遺伝的アルゴリズムによる画像処理手順の生成

図2の画像処理手順全体が1つの個体であると考えて、画像処理ユニット $U_1 \sim U_5$ がそれぞれ遺伝子であると考える。画像処理ユニット $U_1 \sim U_5$ に使われる関数・パラメータをユニット番号順に全て並べたものを染色体として定義する(図4)。初期状態として、ランダムな染色体(すなわちランダムな複数の画像処理関数(パラメータを含む)からなる画像処理手順)を持つ個体を多数作成し(図5)、これを第1世代とする。次に、入力画像に対する各個体の適応度を算出する。適応度 *fitness* は染色体を評価するためのものであり、次式で表すこととした。

$$fitness = f(S_{grade}, S_{load}) \quad (1)$$

ここで、 S_{grade} は入力画像に対して染色体に記述された一連の画像処理を実施した際の成績であり、 S_{load} は入力画像を実際の外観検査システムで画像処理を実行することを想定した計算負荷に関する成績である。適応度 *fitness* は、これら2つの成績からなるスコア関数 f で算出される。この適応度が大きいほど、その染色体に記述された画像処理の手順・パラメータが良いことを意味する。

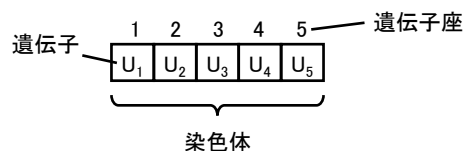


図4 染色体
Fig.4 Chromosome.

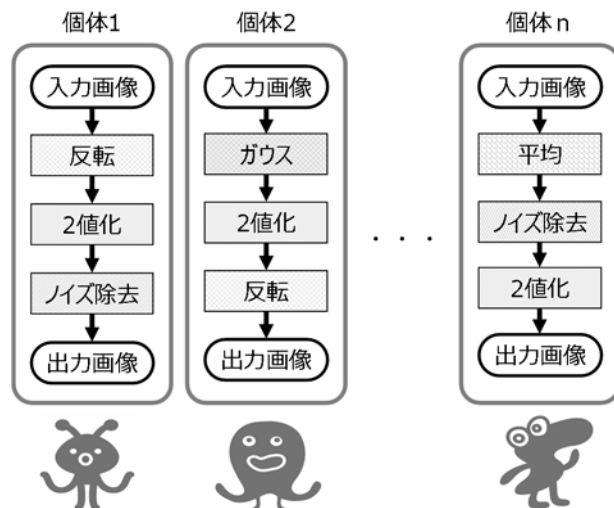


図5 ランダムに生成された遺伝子のイメージ
Fig.5 Image of a randomly generated genes.

次に、適応度が大きかった染色体を次世代のために残して、適応度が小さかった染色体を捨てる「エリート保存」(図6)を実施した後、エリート染色体の一部をランダムに変異させる「突然変異」(図7、図8)、およびエリート染色体の部分同士を交換する「交叉」(図9、図10)を実施することで新しい染色体を生成する。これらの染色体を第2世代とする。そして、この第2世代の染色体に対して適応度を算出し、先程と同様にエリート保存、交叉、および突然変異を施して、次世代の染色体を生成する。以上の操作を繰り返すことで、より適応度の大きな染色体を獲得する。目標の適応度に到達したかあるいはユーザが指定した打ち切り世代に達した場合に次世代を作成する操作は終了し、その世代の最大適応度の染色体を抽出することで、適切な画像処理の手順・パラメータが獲得できる。本アルゴリズムのフローチャートを図11に示す。

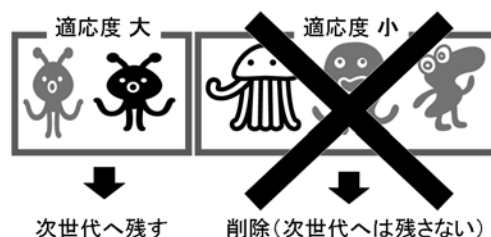


図6 エリート保存のイメージ
Fig.6 Image of elite preservation.

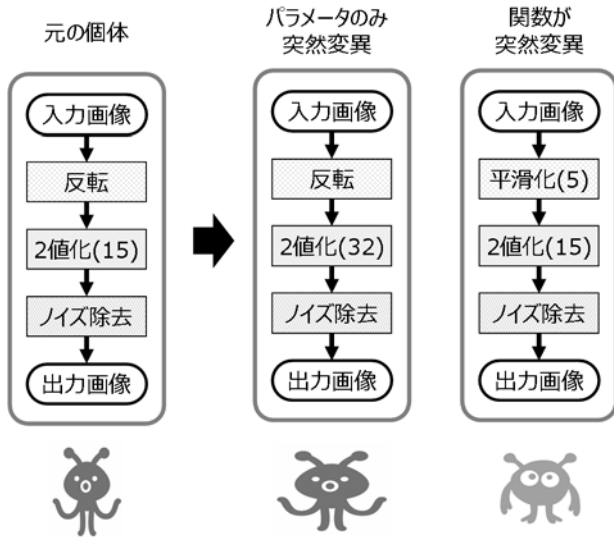
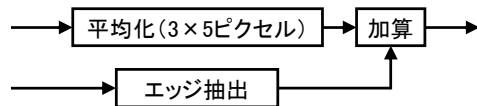
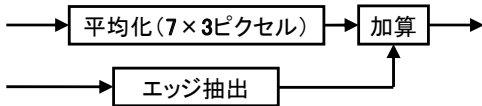


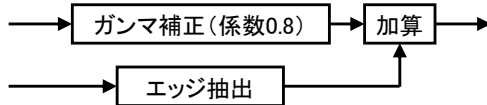
図7 突然変異のイメージ
Fig.7 Image of mutation.



(a) 突然変異前
(a) Before mutation.



(b) 突然変異後(パラメータのみが変異する場合)
(b) After mutation (when only the parameter changes).



突然変異後(関数に変異する場合)
(c) 突然変異後(関数に変異する場合)
(c) After mutation (when the function itself changes).

図8 突然変異の例
Fig.8 Example of mutation.

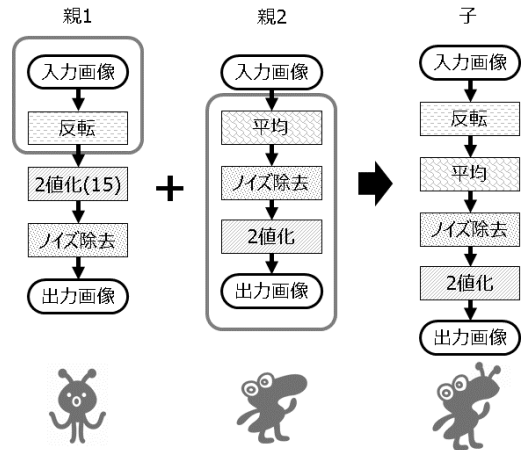
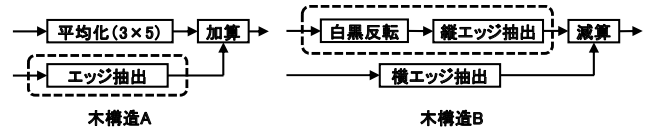
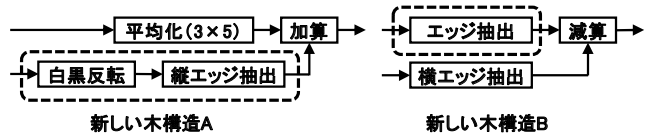


図9 交叉のイメージ
Fig.9 Image of crossover.



(a) 交叉前
(a) Before crossover.



(b) 交叉後
(b) After crossover (when only the parameter changes).

図10 交叉の例
Fig.10 Example of crossover.

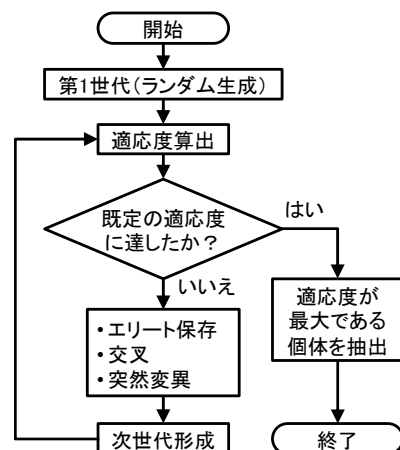


図11 遺伝的アルゴリズムのフローチャート
Fig.11 Flowchart of genetic algorithm.

3. 光沢曲面を有する金属加工部品の外観検査への適用

< 3. 1 > 対象とする外観検査の概要

企業で実際に量産されている自動車用精密加工部品の外観検査工程を題材として、前節で考案した画像処理手順・パラメータの自動生成法の適用を試みた。

検査対象物は、昨年度（2018 年度）に実施した光沢曲面上の外観不具合をカメラ画像から検出するための撮影方法・画像処理アルゴリズムの研究⁵⁾で採り上げたピストンピン（図 12）である。検査対象の外観不具合は、このピストンピンの外周円筒面に発生することがある小さな研削ムラ（図 13）である。比較対象として、ピストンピンの良品画像例を図 14 に示す。

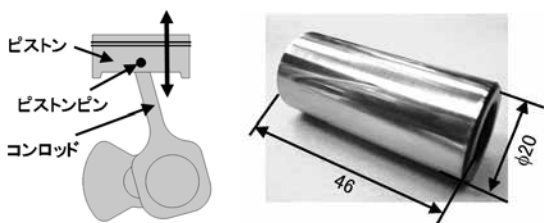


図 12 ピストンピン

Fig.12 Piston pin.



図 13 ピストンピンの外観不具合例(研削ムラ)

Fig.13 Example of appearance defect on piston pin (grinding unevenness).



図 14 ピストンピンの良品画像例

Fig.14 Example of good product image example of piston pin.

< 3. 2 > 画像処理手順の自動生成実験

画像処理ユニットで使用可とした画像処理関数を表 1 に示す。各世代の個体数は 1000 個とし、次世代に残すエリート個体はもとの 10%とした。交叉させる個体数およびエリートを突然変異させる個体数はそれぞれもとの 45%とした。入力画像は、外観不具合画像 3 枚および良品画像 3 枚とした。また、それぞれの外観不具合画像において、どの部分が外観不具合なのかを示すマスク画像を与えた。使用した PC の主な仕様は、CPU: Core-i9 9900X、GPU: RTX2080Ti×2 個+RTX2080×2 個であった。プログラムは技術計算ソフトウェア MATLAB 上で記述し実行させた。プログラムを第 50 世代まで実行した際に、適合度が最も高くなった画像処理の手順・パラメータの一例を図 15 に示す。このときの、図 13 および図 14 の入力画像に対応する出力画像をそれぞれ図 16 および図 17

に示す。また、図 13 の外観不具合画像に対応するマスク画像を図 18 に示す。研削ムラの存在する部分のみを適切に抽出することができた。生成された画像処理手順の解釈としては、手順 (1) ～ (3) で背景むらを均一化し、後段の手順 (4) ～ (6) で支配的なノイズと考えられる微細な縦線やその他のノイズを削除していると考えられる。なお、手順 (7) は手順 (6) に包含されるため無意味であると考えられる。途中の世代における外観不具合画像に対する出力画像を図 19 に示す。第 10 世代目では、背景むらを抑制できておらず、外観不具合部分の抽出も甘い。第 20 世代目では、背景むらがより抑制できており、外観不具合部分がより鮮明になっている。

表 1 使用可とした画像処理関数(研削ムラ)

Table 1 Available image processing functions (grinding unevenness).

画像処理関数	パラメータ
2 値化	輝度の閾値
平均値フィルタ	フィルタサイズ
ガウシフィルタ	フィルタサイズ
島削除	削除対象とする島の大きさ
2 つの画像の加算	なし
白黒反転	なし

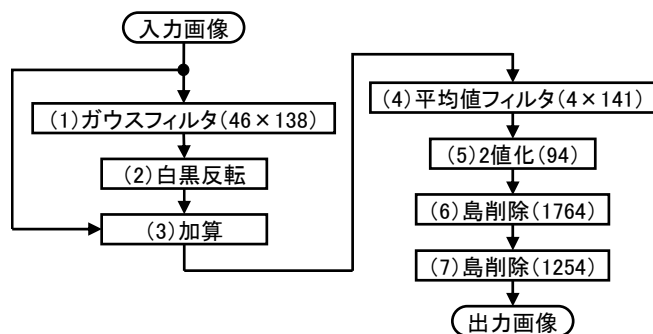


図 15 画像処理手順の自動生成結果(研削ムラ)

Fig.15 Results of automatically generating image processing procedure (grinding unevenness).



図 16 外観不具合画像に対する出力画像(研削ムラ、第 50 世代目)

Fig.16 Output image for appearance defect image (grinding unevenness).



図 17 良品画像に対する出力画像(研削ムラ、第 50 世代目)

Fig.17 Output image for good product image (grinding unevenness).



図 18 マスク画像(研削ムラ)
Fig.18 mask image (grinding unevenness).



(a) 第 10 世代目
(a) 10th generation.



(b) 第 20 世代目
(b) 20th generation.

図 19 外観不具合画像に対する出力画像(研削ムラ、途中の世代)
Fig.19 Output image for appearance defect image (grinding unevenness).

次に、ピストンピンに発生することがある別の外観不具合（らせんキズ（図 20））に対して、研削ムラの場合と同様に、キズ部のみを抽出する画像処理の手順・パラメータを自動生成する実験を行った。外観不具合部のマスク画像を図 21 に示す。画像処理ユニットで使用可とした画像処理関数を表 2 に示す。遺伝的アルゴリズムの各パラメータ（各世代の個体数、エリート保存、突然変異、および交叉）は研削ムラの場合と同一とした。プログラムを第 30 世代まで実行した際に、適合度が最も高くなった画像処理の手順・パラメータの一例を図 22 に示す。このときの入力画像の一つである図 17 に対応する出力画像を図 23 に示す。らせんキズの部分のみ抽出することができた。生成された画像処理手順の解釈としては、手順（1）～（2）において太目の線キズを抽出し、手順（3）でノイズを削除し、手順（4）～（5）で線キズを強調していると考えられる。

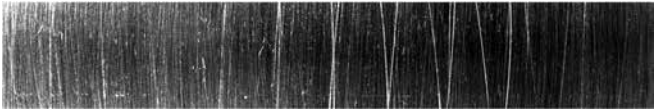


図 20 ピストンピンの外観不具合例(らせんキズ)
Fig.20 Example of appearance defect on piston pin (spiral scratch).



図 21 マスク画像(らせんキズ)
Fig.21 mask image (spiral scratch).

表 2 使用可とした画像処理関数(らせんキズ)
Table 2 Available image processing functions (spiral scratch).

画像処理関数	パラメータ
2 値化	輝度の閾値
平均値フィルタ	フィルタサイズ
ガウスフィルタ	フィルタサイズ
島削除	削除対象とする島の大きさ
2 つの画像の加算	なし
白黒反転	なし
膨張	膨張させるサイズ
収縮	収縮させるサイズ
エッジ抽出	なし

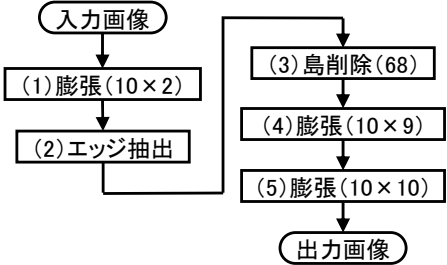


図 22 画像処理手順の自動生成結果(らせんキズ)
Fig.22 Results of automatically generating image processing procedure (spiral scratch).



図 23 外観不具合画像に対する出力画像(らせんキズ)
Fig.23 Output image for appearance defect image (spiral scratch).

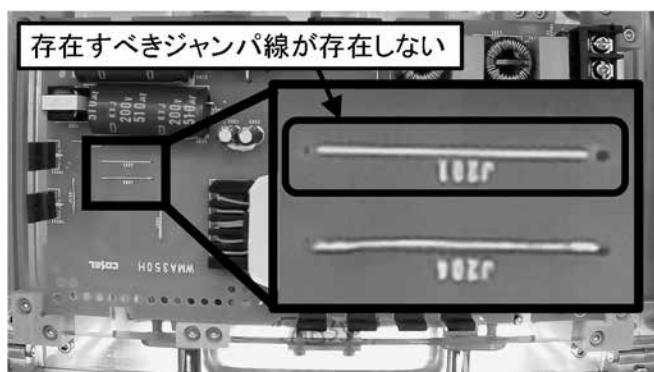
4. 電子基板の部品抜け検査への適用

< 4. 1 > 対象とする外観検査の概要

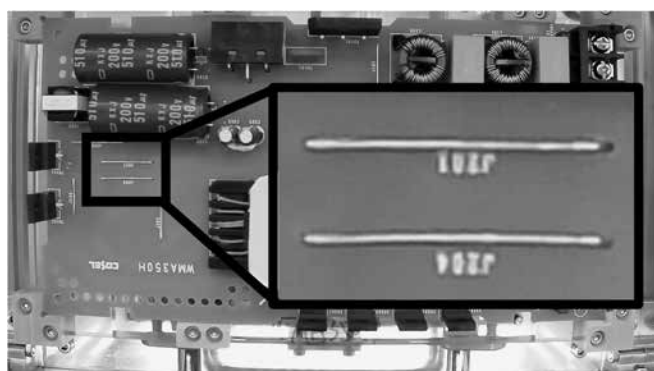
企業で実際に量産製造されている電子基板の部品抜けを確認するための外観検査工程を題材として、画像処理手順・パラメータの自動生成を試みた。検査対象物は、電子部品が実装された電子基板であり、ここでは、電子部品（ジャンパ線）の一部が実装されず抜けてしまった状態を検査することを目的としている。対象画像の例を図 24 に示す。

< 4. 2 > 画像処理手順の自動生成実験

ジャンパ線の有無抽出するための画像処理の手順・パラメータを自動生成する実験を行った。画像処理ユニットで使用可とした画像処理関数を表 3 に示す。



(a) 外観不具合画像例
(a) Example of appearance defect image.



(b) 良品画像例
(b) Example of good product image.

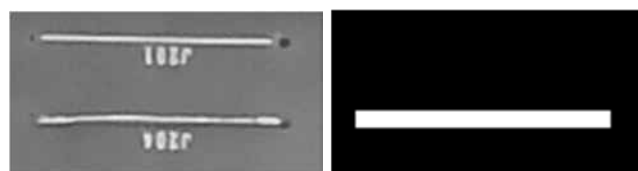
図 24 電子基板のジャンパ線抜け検査
Fig.24 Inspection of missing jumper wires on electronic boards.

表 3 使用可とした画像処理関数(ジャンパ線有無の外観検査)
Table 3 Available image processing functions (Visual inspection for jumper wires).

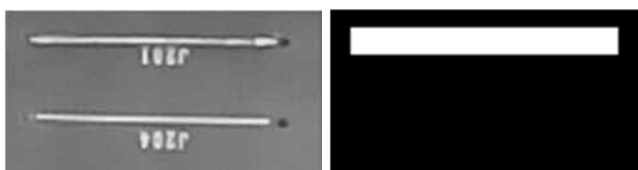
画像処理関数	パラメータ
2 値化	輝度の閾値
平均値フィルタ	フィルタサイズ
ガウスフィルタ	フィルタサイズ
中央値フィルタ	フィルタサイズ
島削除	削除対象とする島の大きさ
2 つの画像の加算	なし
白黒反転	なし
膨張(グレー画像用)	膨張させるサイズ
収縮(グレー画像用)	収縮させるサイズ
膨張(2 値化後画像用)	膨張させるサイズ
収縮(2 値化後画像用)	収縮させるサイズ
エッジ抽出	なし

遺伝的アルゴリズムの各パラメータ（各世代の個体数、エリート保存、突然変異、および交叉）は前節と同一とした。入力画像およびどの部分が外観不具合なのかを示すマスク画像を図 25 に示す。入力画像は不鮮明であり、ジャンパ線の有無の判別は肉眼でも多少時間がかかるレベルである。ジャンパ線が存在する部分のみをマスクすることで、ジャンパ線が存在する部分のみを白く残す画像処理手順が得られることを狙っている。

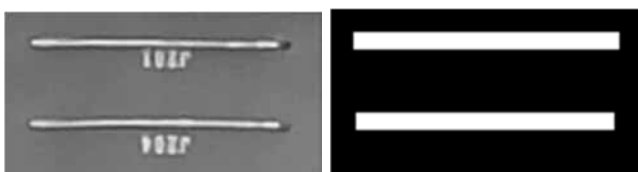
プログラムを第 30 世代まで実行した際の出力画像を図 26 に示す。第 3 世代目では挿入穴付近などに処理不足が見られるが、第 30 世代ではそれらが解消され、ジャンパ線の有無を適切に見分ける画像処理手順が生成された。適合度が最も高くなった画像処理手順・パラメータの一例を図 27 に示す。生成された画像処理手順の解釈としては、手順 (1) ～ (2) において細線を抽出し、その細線を手順 (3) で太くし、手順 (4) ～ (5) でノイズを削除していると考えられる。



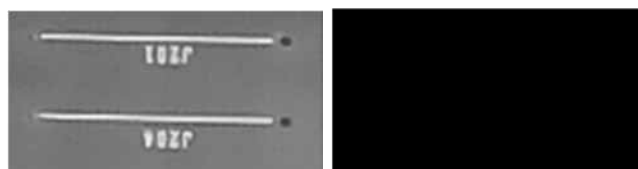
(a) 下側のみジャンパ線が存在する例
(a) Example where jumper wire exists only on the lower side.



(b) 上側のみジャンパ線が存在する例
(b) Example where jumper wire exists only on the upper side.



(c) 両側ともジャンパ線が存在する例
(c) Example where jumper wires exist on both sides.



(d) 両側ともジャンパ線が存在しない例
(d) Example of no jumper wires on both sides.

図 25 ジャンパ線の抜け検査用の入力画像およびマスク画像
Fig.25 Input image and mask image for jumper wire inspection.

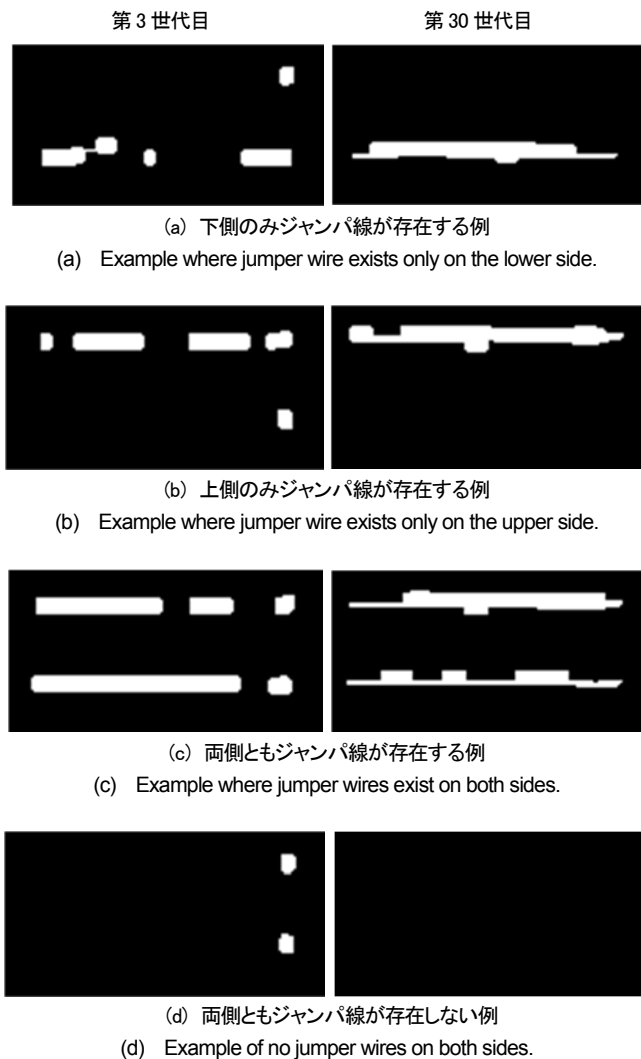


図 26 ジャンパ線有無判定用出力画像
(左側: 第3世代目、右側: 第30世代目)

Fig.26 Output image for jumper line presence / absence judgment (left: 3rd generation, right: 30th generation).

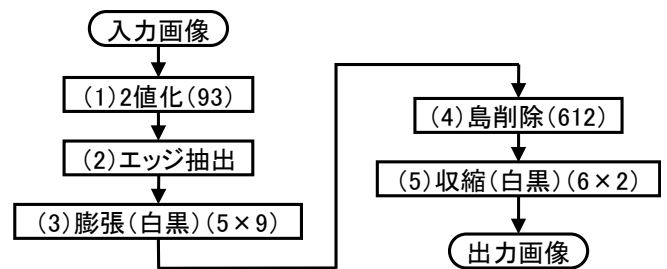


図 27 画像処理手順の自動生成結果(ジャンパ線有無判定)

Fig.27 Results of automatically generating image processing procedure
(Visual inspection for jumper wires).

5. 結言

本研究では、ユーザが良品・不良品の画像を与えるだけで、外観検査のための画像処理の手順および各画像処理に要するパラメータを自動的に生成する方法を検討・プログラム試作した。それを、具体的な精密機械加工部品および電子基板の外観検査事例に適用して、本自動生成手法の有効性が確認できた。

文 献

- (1) 長尾智晴：進化的画像処理 (2002).
- (2) 青木紳也，長尾智晴：木構造状画像変換の自動構築法 ACTIT, 映像情報メディア学会誌, Vol.53, No.6 (1999), pp.888-894.
- (3) 室井基継，中山攻：進化的計算手法を用いた画像処理アルゴリズムの自動最適化, Ricoh Technical Report, No.40 (2015), pp.80-87.
- (4) 長門毅，肥塚哲男：生産ラインにおける画像処理プログラミングの自動生成技術, FUJITSU, Vol. 66, No.5 (2015), pp.27-33.
- (5) 石澤剛士，金森直希，中村陽文，溝口正人：曲面用外観検査手法の研究, 平成 30 年度若い研究者を育てる会研究発表会研究論文集 (2019), pp.15-22.

Ⅱ．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

The Activity Recognition and Multi Agent Simulation for Production Sites

大上 泰輝 三鍋 香織 岩本 健嗣
OOKAMI Yoshiki MINABE Kaori IWAMOTO Takeshi

Abstract

The expectation for smart factories has grown by the idea of Industry 4.0. Small and medium-sized companies have promoted "visualization" of production sites, for example, systems monitoring the status of production in real-time have become popular. On the other hand, especially in small and medium-sized companies manufacturing processes by humans and machines are still mixed, and most of the human manufacturing processes have not yet been digitized. In this study, we focused on the manufacturing processes by human and examined two problems "standardization" and "optimization". In "standardization", we perform activity recognitions of the worker to identify which process is doing and whether there are any deviations from standard work. In "optimization", we simulate the production site by using software agents of each worker, machine and product, and find suitable people and the best machine conditions.

1. 緒言

近年、ドイツで提唱された Industry4.0 により、AI や IoT を駆使したスマートファクトリーへの期待が高まっている。中小企業の生産設備でも見える化が進み、リアルタイムで設備や生産状況を把握できるシステムが普及しはじめている。一方、多くの生産現場では未だ手作業による工程が混在しており、そういったデータ化されていない工程を含めた生産現場全体のデジタル化が次なる課題となっている。

今回、手作業工程の混在する生産現場 2 か所へヒアリングの上、課題定義を行った。各現場では「標準化」「最適化」という課題を抱えており、本研究では「標準化」の課題に対しては行動認識を、「最適化」の課題に対してはマルチエージェントシミュレーション(MAS)を行い、現場への実践的な課題解決を試みる。

1 つめの作業者の標準化という課題に対しては、行動認識技術を用いて、現場の作業者がどの工程に従事しているのかを推定し、さらにその作業内容が標準作業を逸脱していないかを評価することを目的とする。

2 つめの作業者及び生産ラインの最適化という課題に対しては、MAS を用いて、ルールベースで生産ラインおよび作業者をシミュレートし、現実では簡単に試行できない条件をシミュレーションの中で最適な現場条件を見つけることを目的とする。

2. 標準化の課題に対する検討

本章では、1 章で述べた課題のうち標準化の課題に対して、行動認識技術を用いる理由と、本課題の対象とした現場、並びに実験方法について述べる。

< 2. 1 > 行動認識技術

行動認識とは、加速度等のセンサデータから人間の行動を推測する技術を指す。例えばスマートフォンを用いて宅内での生活行動を認識する試み¹⁾があり、スマートフォン内の加速度センサとマイクを使用して行動推定が行われている。初めに加速度センサから「静止」「作業」「歩行」の状態を推定し、次にマイクを用いて具体的な「皿洗い」「アイロンがけ」などの作業内容を推定するという手法がとられており、2 つのセンサと推定手法を組み合わせることで行動の識別を行っている。このように、一般に行動認識では、(1)センサの選定、(2)センサデータから行動を推定する基準の定義、という 2 つの課題が存在する。さらに本研究が対象とする現場は手作業を中心とするため、取得できるデータの変化量が小さく、より難易度が高いといえる。

< 2. 2 > 現場環境・手法

本研究で対象としたのは、立山科学グループのうち温度センサ(図 1)を製造するセル生産方式の現場である。本現場の選定理由は、20 人程度の作業者で数百種にもおよぶ多品種な製品を製造している現場であるため、作業内容の標準化が十分に達成できていないという問題意識が強いことである。

今回は対象現場のうち生産の 3 割を占める主力の 1 製品を対象として作業データの収集を行った。対象製品の製造工程のうち実作業が必要な工程数は 25 であり、ほぼ全てが手元作業で行う工程である。工程内容としてははんだ付け、樹脂の充填をはじめとする特定作業から、チューブの挿入、梱包まで繊細な作業が多い。乾燥炉に投入する、などの人間がほとんど介在しない工程については今回データ収集対象外とした。

データ取得のため、作業者には各工程を始める前に左右の手首に TickWatch というスマートウォッチを装着した。腕に装着するセンサであれば手元の繊細な作業を取得でき、かつ作業を妨害しないという条件を満たすことができる。TickWatch には加速度センサ (50Hz) 及びジャイロセンサ (50Hz) が内蔵されており、Google が開発した Wear OS が搭載されているため、Android 端末と通信を行ってデータの収集を行うことが容易である。今回は TickWatch からペアリングした Android 端末へ Bluetooth 通信でデータを転送するアプリを作成し、タイムスタンプと併せて加速度およびジャイロのデータを取得した。

取得したデータの例を図 2 に示す。図 2 は梱包工程のデータであり、波形のうち点線で囲まれたジャイロの 3 軸が大きく上下にぶれる部分は輪ゴムの巻き付ける動作である。加速度からはその力の向きを、ジャイロからは力の大きさを知ることができる。工程毎にこのような波形の周期や形が違いため、加速度やジャイロのデータから工程を識別できると考えた。



図1 対象現場で製造している温度センサの一例
(立山科学グループホームページ(<https://www.tateyama.jp/>)より)
Fig.1 The example of temperature sensor produced by the target factory.

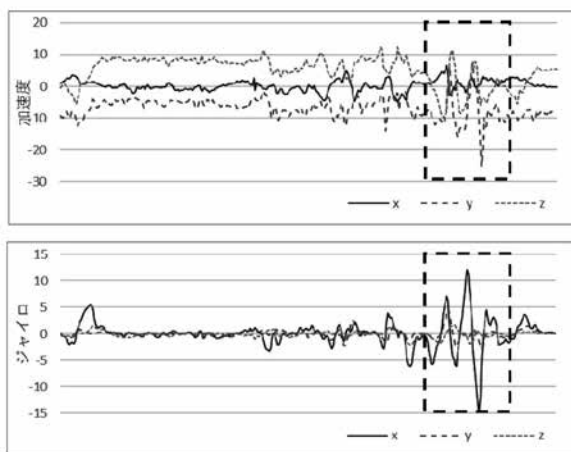


図2 梱包工程のデータ
Fig.2 The acceleration and gyro data of wrapping.

3 実験結果と評価

本章では、2 章で述べた現場・環境において行ったデータ収集実験と、そのデータから工程分類を行なう手法とその結果について述べる。またその結果を踏まえたうえで、標準作業からの逸脱の評価可否を検討する。

< 3. 1 > 実験結果 (工程分類)

データを取得した 25 の工程について、それぞれ 5~30 秒程度の短い 1 つの動作に切り出したサンプルを 5 つ用意した。そのうち 2 サンプルを使用して工程分類の基準軸を定義し、残りの 3 サンプルを使用して実際に正しい工程に分類することができるかを評価する。

本研究では、行動認識の対象となる工程の種類が多いため、以下の 2 段階で分類を行う提案をする。(1) 時系列クラスタリングを用いていくつかのクラスに分類する、(2) (1) で導いた各クラス内で工程毎に分類する基準を定義する。

(1) 時系列クラスタリングを用いた分類

まず 25 種類のデータについて大まかに分類するため、各データ同士の類似度を動的時間伸縮法 (以下、DTW) で算出した。DTW とは、比較対象の 2 つの時系列データの各点を総当たりで比較し、系列同士の距離が最短となるパス (これを DTW 距離という) を用いて時系列データを比較する手法である。各点を総当たりで比較するため、片方を平行移動させて比較するだけの時系列相関 (CCF) などと比べて、2 つのデータの周期が違ってても相関を得やすいという特長がある⁽²⁾。

次に算出した DTW 距離を用いて、階層型クラスタ分析を行った。階層型クラスタ分析とは、距離の小さい組み合わせのデータから順番にクラスタにしていく方法であり、今回クラスタ内の代表点の取り方にはウォード法を採用した。階層型クラスタ分析の結果をデンドログラムとして図 3 に示す。

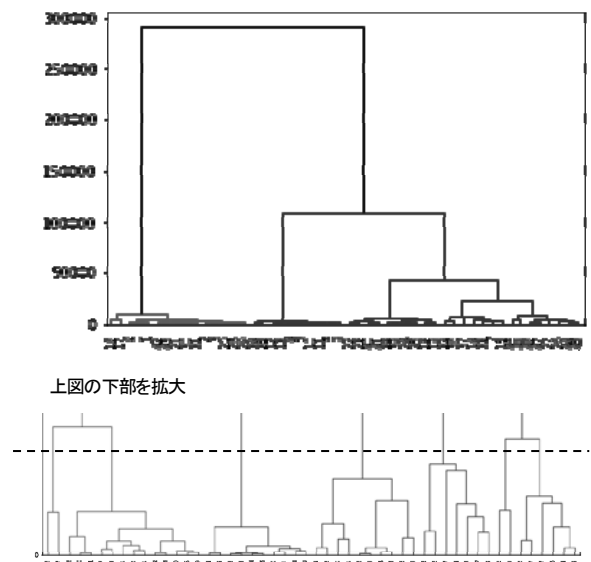


図3 工程ごとの DTW 距離樹形図 (加速度 z 軸)
Fig.3 The tree diagram of DTW distances (acceleration z-axis).

デンドログラムでは距離の近い、つまりデータ波形が似ている工程同士が優先的に図の下部で結びついている。よって、任意の DTW 距離を閾値とすることで任意の数のクラスタに分類することが可能である。例えば図 3 の点線は DTW 距離 8000 の位置に引いたものであるが、その線より下で結びついている部分を 1 クラスタとみなすと、7 つのクラスタに分類することができる。

任意のクラスタに分類した後、クラスタ分類が最適かどうかを以下の 2 つの基準で評価する。(a) 同じ工程の 2 サンプルのデータが同じクラスタに含まれている割合（以下、この割合を分類成功率と定義する）が高い、(b) 1 クラスタに含まれる工程数の最大値が少ない。(b)については、今回のクラスタリングは(2)において更に個々の工程に分類することを前提としているため、1 クラスタに多くの工程が含まれていると、その後の分類が難しくなってしまうという懸念からである。

加速度 3 軸それぞれについて DTW 距離を算出、時系列クラスタ分析を行った結果をデンドログラムの形式で表示し、任意の DTW 距離でクラスタに分類した結果が表 1 である。閾値である DTW 距離を小さく設定すると多数のクラスタに分類することができ、1 クラスタの工程数の最大値も小さくなるため(b)を満たすが、(a)の分類成功率は低くなりやすい。

(a)(b)の指標をどちらも満たしているのが「加速度 z 軸を DTW 距離 8000 でクラスタ分類した場合」である。(a)の分類成功率は 24/25 工程と 96%の工程を同じクラスタに分類することができ、(b)については 1 クラスタに最大 7 工程までしか入らないため、加速度の X 軸や Y 軸で同クラスタ数、同分類成功率のものと比較しても良い数値である。

よって、(1)の「加速度 z 軸を DTW 距離 8000 でクラスタ分類した」結果である表 2 を利用し、より詳細な分析を行った。

(2) 基準による各クラスタ内での工程の分類

(1)の結果である表 2 の各クラスタについて、1 つ 1 つの工程にまで分類するための基準を定義していく。(以降、表 2 の上から各クラスタをクラスタ 1、クラスタ 2...クラスタ 7 と呼ぶ)

表1 クラスタ分類の評価

Table 1 The evaluation of cluster classification.

軸	閾値	10000	9000	8000	7000	6000
X	クラスタ数	6	6	7	7	8
	分類成功率	23/25	23/25	23/25	23/25	23/25
	最大工程数	10	10	9	9	9
Y	クラスタ数	5	6	6	6	8
	分類成功率	24/25	23/25	23/25	23/25	22/25
	最大工程数	17	14	14	14	14
Z	クラスタ数	5	6	7	7	8
	分類成功率	24/25	24/25	24/25	24/25	22/25
	最大工程数	8	7	7	7	7

表2 時系列クラスタ分析結果

Table 2 The result of time series cluster classification.

クラスタ番号	工程名
1	工程 1, 2, 4(※), 11, 15, 16, 22
2	工程 3, 5, 6, 7, 18
3	工程 4(※), 8, 17, 19
4	工程 9
5	工程 10, 12, 13, 20, 21
6	工程 14, 23, 24
7	工程 25

※ 工程 4 のみ分類に失敗し、2 つのクラスタに存在している

ここで、クラスタ 4 およびクラスタ 7 には既に 1 工程分のデータしか入っていないため、これ以上分類の必要はない。よって残りの 5 つのクラスタについて基準を定義する。

先ほどの(1)時系列クラスタ分析については加速度 z 軸を採用したが、本項では加速度 3 軸全てのデータを用いて、工程による違いを見つける。

データがどの工程か見分けるときには以下の点に着目する。(a) 軸同士の交点の位置および数、(b) 軸同士の距離、(c) 軸の大きさ。(a)軸同士の交点、は腕のひねり、(b)軸同士の距離と(c)軸の大きさは腕の角度に相当する。個人差が出にくいのは(a)に相当する腕のひねりだが、それだけで工程を分類するのは難しいため、(b)軸同士の距離や(c)軸の大きさにも着目して分類基準を定めていく。

分類基準の例としてクラスタ 3 を示す。クラスタ 3 には工程 4、工程 8、工程 17、工程 19 という 4 工程各 2 サンプルのデータが分類されている。各工程について代表 1 サンプルの加速度データを図 4 に示す。図 4 には加速度 3 軸の生データと共に、突発的な変化に左右されにくい 51 データの移動平均線も示した。グラフ中の網掛けで示したポイントでそれぞれの工程を識別する。

まず工程 8 の(c)軸の大きさに着目すると、工程 8 のみデータ後半の y 軸が正の値であり、他工程と大きく異なる特長を持つ。よって、「データ後半の y 軸が正の値である」という条件で識別することができる。次に(a)軸の交点に着目すると、工程 19 のみデータの前半に y と z の交点があるため、この特長で工程 19 を識別する。残りの工程 4 と工程 17 については、明確な交点で識別することが難しいため、(b)軸の距離に着目する。工程 17 の方は特に中盤にかけて x と z に一定の距離があるが、工程 4 は全体を通して距離が狭い。そのため、x と z の距離平均が一定以上かどうかで工程 4 と工程 17 を識別することができる。

同様に他のクラスタについても交点、軸の距離、軸の値の大きさ等を利用して分類基準を定義した結果が図 5 である。

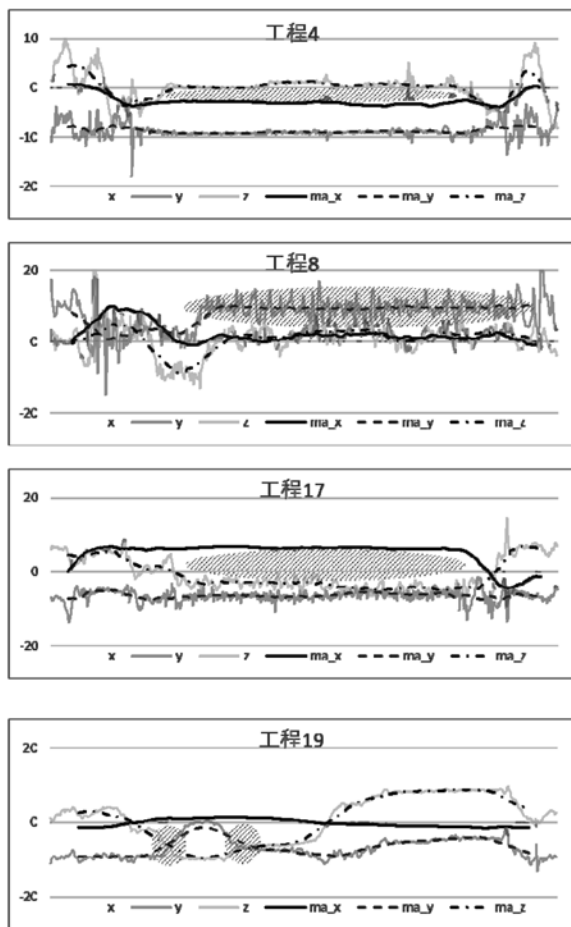


図4 クラスタ3に含まれる4工程の加速度データ
Fig.4 Three processes acceleration data within cluster No.3.

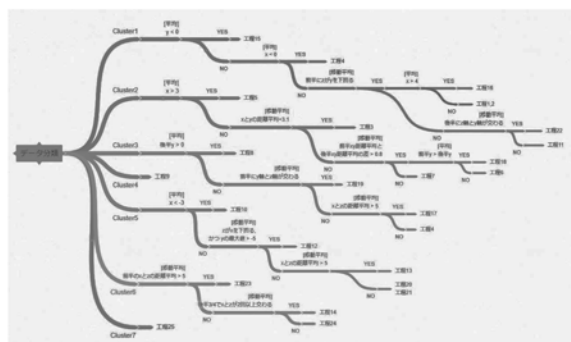


図5 クラスタを工程に分類するための基準一覧
Fig.5 The list of condition for process classification.

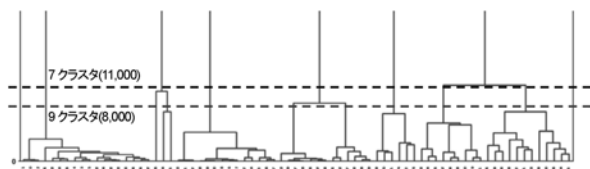


図6 評価サンプルのDTW距離樹形図
Fig.6 The tree diagram of evaluation samples.

< 3. 2 > 評価 (工程分類)

前節で定義した手法・基準を、基準定義に使用していない 25 工程各 3 サンプルを用いて、どの程度正しい工程に分類することができるかの評価を行った。

まず、加速度 z 軸のデータについて DTW 距離を算出、階層型クラスタ分析を行い、DTW 距離 8,000 の閾値でクラスタリングを行ったところ、前節では 7 クラスタに分類することが出来たが、データ数が多くなった影響かクラスタ数が 9 に増える結果となった。デンドログラムを図 6 に示す。図 6 にもあるように、閾値を 11,000 に設定するとクラスタ数を前節の基準に合わせて 7 とすることができる。今回は比較しやすいようにクラスタ数を合わせて分類する。評価サンプルを閾値 11,000 で 7 クラスタに分類した結果を表 3 の「評価サンプル」の列に示す。この段階で工程 5 のみサンプルが複数のクラスタに分かれたため分類失敗となり、分類成功率は 96% (24/25 工程) である。

表3 基準クラスタと評価サンプル

Table 3 The result of evaluation sample's clustering.

クラスタ	基準	評価サンプル	詳細工程分類
1	工程 1,	工程 1,	3 / 3
	工程 2,	工程 2,	3 / 3
	工程 4(※)		
	工程 11	工程 11	2 / 3
	工程 15	工程 15	3 / 3
	工程 16	工程 16	2 / 3
2	工程 22	工程 22	2 / 3
	工程 3	工程 3	3 / 3
	工程 5	工程 5(※)	3 / 3
	工程 6	工程 6	2 / 3
	工程 7	工程 7	3 / 3
	工程 18	工程 18	3 / 3
3	工程 4(※),		
	工程 8	工程 8	3 / 3
	工程 17	工程 17	3 / 3
	工程 19	工程 19	3 / 3
4	工程 9	工程 9	3 / 3
	工程 10,	工程 10,	3 / 3
5	工程 12		
	工程 13	工程 13	3 / 3
	工程 20	工程 20	3 / 3
	工程 21	工程 21	3 / 3
	工程 5(※)		
	工程 14,		
6	工程 23	工程 23	3 / 3
	工程 24		
	工程 4		
7	工程 12		
	工程 25	工程 25	3 / 3
	工程 24		

表3の「基準」列は前節の基準クラスタである。基準クラスタと同じクラスタに一部、または全部のサンプルが入っていない工程が5工程あり、この段階で分類成功率は20/25工程、80%となった。

基準クラスタと同じクラスタに分類できた20工程について、さらに前節の(2)各クラスタ内での工程分類の基準を評価した結果を、表3の「詳細工程分類」列に示す。16工程については3サンプル全てを正しい工程と識別することができたが、4工程については3サンプル中1サンプルの識別に失敗した。総合結果としては、25工程中20工程がクラスタ分類に成功し、さらにそのうち16工程については全サンプルを正しい工程に分類することできたため、64% (16/25) の工程を正しく分類できた。

64%は高い精度とはいえないが、実際の運用を想定すると、3サンプル中の2サンプルは正しい工程に分類できていることから、工程分類に失敗した4工程については、複数回繰り返して判定精度を高めることで正しい工程に分類できる可能性がある。

< 3. 3 > 実験結果 (標準作業)

前節までにおいて、一定の精度で作業者の加速度データから工程を導き出すことが出来ることが判明した。本節では作業者のデータから「標準作業として定義されている作業からの逸脱」を評価できるかについて述べる。

(1) 工程12

工程12では、作業者は2~3cmほどのチューブを製品に挿入する作業を行う。このとき、入りづらいチューブを無理矢理挿入すると不良になってしまう恐れがあるため、ある程度入りづらい場合は見切りをつけて交換する必要がある。この「入りづらい」という指標は曖昧で個人差があるため、「一定時間以上チューブ挿入を試みている場合」という定量的な指標に変えることで作業の標準化を行う。

図7は工程12の右手の加速度3軸のデータである。タイムスタンプと照らし合わせると、波形のうち点線で囲まれた部分が手を捻りながらチューブを挿入している部分である。この部分の時間に応じてチューブの交換を促す等の活用法が想定される。

(2) 工程23

工程23では作業者は防滴用樹脂の塗布を行う。この際、塗布量が多すぎると拭き取る必要があり、少なすぎると再塗布が必要になり手戻りが発生する可能性がある。そのため塗布時間をデータから計測し、「一定時間以上塗布を続けている場合」という定量的な指標に変えることで作業の標準化を行う。

図8は工程23の左手の加速度3軸のデータである。波形のうち点線で囲まれた部分が樹脂の塗布を行う部分である。この部分の時間に応じて短い、または長い場合に塗布量の確認を促す等の活用法が想定される。

このように、作業者のデータから標準作業を逸脱していないかを検知することができる指標が存在することが判明した。

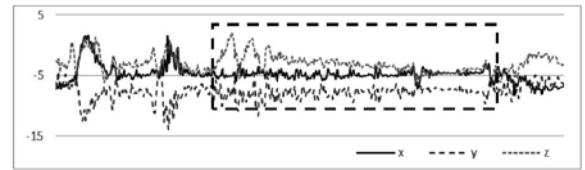


図7 工程12の加速度データ
Fig.7 Acceleration data of process No.12.

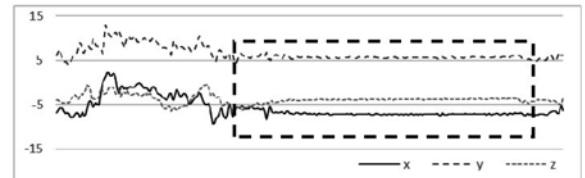


図8 工程23の加速度データ
Fig.8 Acceleration data of process No.23.

< 3. 4 > 考察 (今後の課題)

今回の研究では、手作業工程の多い現場について16/25工程の加速度データを正しい工程に分類し、作業標準化への指針を得た。工程分類については、厳密には64%という分類精度であったが、運用においては繰り返される工程の動きに基づいて分類も複数回行い、その結果のうち信ぴょう性が高いものを選択するという方法も考えられるため、前項でも述べたように80%程度の精度が期待される。

一方で今回取得したデータは各工程につき作業者一人のものであるため、定義した基準が個人の動き方やクセに依存している可能性がある。今後は複数人分の同作業のデータを取得し、作業者によってデータ波形に違いが見られるかどうかの分析を行った上で、誰がどの工程に携わっても高い精度で工程を見分けられるようにしていく必要がある。

4. 最適化の課題に対する検討

本章では、最適化の課題に対する解決策として用いるMASについて述べ、また、本課題における対象環境について述べる。

< 4. 1 > 生産現場におけるシミュレーション技術の適用

作業者の手作業と機械での加工が混合する生産現場において、作業者および機械をどのように配置するかが工程設計の課題であり、工程設計者は人と作業者が手待ちなく動くことのできる工程設計を日々模索している。この作業者と機械が混合する生産現場においては人と機械の相互作用が重要となるが、実際に現場では生産量を上げたいときに人を増やしたり、機械を増設したりすることが行われ、状況に応じて作業者の作業における持ち場を決定する必要がある。しかし、実際には生産管理者や生産技術者の感覚でそれが判断されていることが多く、定量的な判断材料が必要と言える。そこで、シミュレーション技術の一つであるMASを用いることで、作業者や機械の複雑な相互作用を加味したシミュレーションを行い、定量的な判断材料に使用できると考える。

MAS とは、与えられた条件に従って意思決定、行動するエージェントを単位として、互いに相互作用する多数のエージェントを計算機上に仮想的に構築された環境内に配置、動作させることによって振舞いを再現する手法である。この MAS は複雑な社会現象を解析する手法の一つとして注目されており、これまでも交通環境や被災時避難環境などの再現に活用されている⁽¹²⁾。また、MAS を用いることによって、実際には再現が難しい状況や多くのコストがかかる環境を計算機上で再現できるため、日常生活における様々な場面における安全性・利便性の向上や社会科学分野の飛躍的な発展に寄与すると考えられている。従って、生産現場 MAS を適用することで、複雑に相互作用する生産現場の状態を再現できると言える。

< 4. 2 > 生産現場環境

本研究では、セル生産方式の一形態である U 字ラインで構成されている製造ラインを対象とした MAS を構築する。U 字ラインとは、図 9 に示すように設備を U 字型にレイアウトし、比較的小さな部品や製品を一人もしくは複数人の多能工により生産する方式である。

本研究で対象とする U 字ラインは図 10 に示すような構成であり、コーセル株式会社の製造ラインの一つであり以下に示す特徴を有する。

- 1) ワーク（基板）は 2 種類あり、基板 1 と基板 2 でラインへの入り口が異なる。
- 2) それぞれの基板の流れは図 11 に示す通りであり、途中で基板 1 と基板 2 が合流し、合体する。
- 3) 手作業のみの工程と手作業の後に機械に入れて加工する工程がある。

実際の製造ラインを詳細に示すと 50 工程程度あるが、本研究では便宜上 11 工程で区切ることとした。また、各工程での作業時間（HT）は実際の作業をストップウォッチ法で測定し、機械の稼働時間（MT）は機械の仕様書から導出した。ここで定義した工程区分と機械の関係を表 4 に示す。さらに、各工程間の移動については移動時間（TT）で定義し、工程間の移動時間を表 5 に示すマトリックスで定義した。なお、TT も HT と同様ストップウォッチ法で測定した。

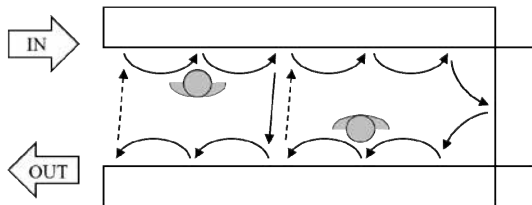


図9 U字ライン
Fig.9 U-shaped line.

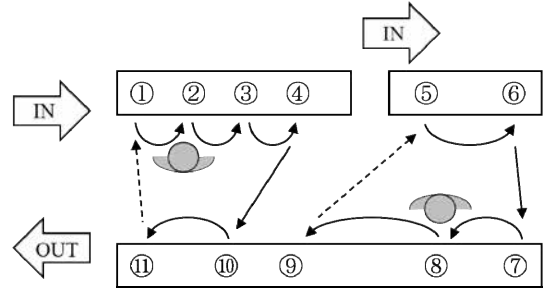


図10 対象の U 字ライン
Fig.10 Target U-shaped line layout.

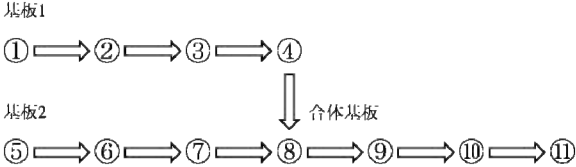


図11 基板の遷移フロー
Fig.11 Transition flow of workpiece.

表4 工程と機械の関係[秒]

Table 4 Relationship between process and machine (sec.).				
No.	工程名	HT	機械名	MT
1	基板 1 準備工程	15	—	0
2	基板 1 前加工工程	18	圧入装置	9
3	基板 1 マウント工程	55	リフロー炉	57
4	基板 1 移動工程	7	—	0
5	基板 2 準備工程	28	—	0
6	基板 2 マウント工程	107	はんだ槽	52
7	基板 2 検査工程	24	1 次検査装置	60
8	合体基板組立工程	25	—	0
9	自動はんだ付け工程	14	はんだ付けロボット	129
10	製品検査工程	24	2 次検査装置	125
11	仕上げ工程	7	—	0

表5 工程間の移動時間[秒]

Table 5 Matrix of travel time between process (sec.).											
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	1	1	6	6	6	7	6	6	3	2
2	1	0	1	5	6	6	6	6	5	2	2
3	1	1	0	4	5	6	6	5	4	2	3
4	6	5	4	0	1	2	3	2	2	4	5
5	6	6	5	1	0	1	2	2	2	5	5
6	6	6	6	2	1	0	2	2	3	5	6
7	7	6	6	3	2	2	0	1	2	5	6
8	6	6	5	2	2	2	1	0	1	5	5
9	6	5	4	2	2	3	2	1	0	1	2
10	3	2	2	4	5	5	5	5	1	0	1
11	2	2	3	5	5	6	6	5	2	1	0

< 4. 3 > MAS の実装

本研究におけるエージェントで模擬する対象は、①作業者、②機械、③基板（製品）の3つであり、各エージェントの振舞い条件を以下に示す。

① 作業者

- a) 工程 1、2、3、4 は基板 1 がないと作業できない。
- b) 工程 5、6、7 は基板 2 がないと作業できない。
- c) 工程 8 は基板 1、基板 2 両方がないと作業できない。
- d) 工程 9、10、11 は合体基板がないと作業できない。
- e) 機械が稼働していると作業できない。
- f) 他作業者が作業している工程では作業できない。
- g) 作業者は工程順に作業できる工程を探索する。
- h) 作業できる工程がない場合は手待ちになる。

② 機械

- a) 作業者の作業が完了したら機械が稼働する。

③ 基板（製品）

- a) 基板は図 11 の順で流れる。
- b) 作業者が工程 1 に到着すると基板 1 が生成される。
- c) 作業者が工程 2 に到着すると基板 2 が生成される。
- d) 作業者の作業かつ機械の稼働が完了したら基板は次工程に移動する。
- e) 工程 9 に移動する際に基板 1 および基板 2 はそれぞれ 1 個ずつ消え、合体基板が生成される。
- f) 工程 11 が終了すると合体基板が 1 個消え、製品置き場に製品が 1 個積み上げられる。
- g) 各工程での仕掛上限数は任意に設定した数値で設定する。

本研究における MAS の実装は、Java 言語環境で行った。ここで、エージェントにおける振舞いの実装例を図 12 に示す。図 12(a) は作業者が現工程の作業を終えて次工程を探索する場合、(b) は機械の稼働が完了して基板が次工程に遷移する場合の一部を示している。エージェントの振舞いは基本的に if 文で記述しており、図 12(a) に示すコードは①作業者の a)、e)、f) および③基板（製品）の g) の条件、図 12(b) に示すコードは③基板（製品）の d) の条件を用いた振舞いによって構成している。

< 4. 4 > 評価

本研究で実装した MAS の有効性を評価するために、1 人作業と 2 人作業におけるシミュレーションを行い、実際の生産現場との比較を行った。また、2 人作業における各作業者の持ち場は作業者エージェント A が 1、2、3、9、10、11 工程、作業者エージェント B が 4、5、6、7、8、9 工程とし、各作業者エージェントはこの決められた持ち場でのみ作業を実施する。

まず、1 人単位時間あたりの出来高における比較（図 13）を行った。図 13 では、シミュレーションにおける 1 人作業、2 人作業における 1 人あたりの出来高と実際の生産現場における 1 人あたりの出来高を示している。ここで、シミュレーションにおける出来高は、経過時間毎の出来高の推移である。また、実際の生産現

場における出来高とは、実際の生産現場で作業者が記入している出来高管理表の値を基に、ある 1 週間の 2 人作業における出来高より算出した参考値である。そのため、シミュレーション結果とは異なり、経過時間における推移表現になっていない。図 13 より、シミュレーションにおける 1 人作業と 2 人作業における出来高を比較すると、1 人作業は 2 人作業に比べて乱高下しているが、経過時間の増加に伴って収束しており、1 人作業および 2 人作業における 1 人あたりの出来高は 8 台/h 程度で同等の値を示している。また、実績の平均値（7.15 台/h）と比較すると、大きな差異があるとは言えないため、出来高については現実を再現できたと考える。

```
1: if (A.nextProcess == 2
    /* 作業者 A の次工程が 2 の場合 */
2:   && getItemNum(2, P1_items) > 0
    /* ①a) 工程 2 に基板 1 が 1 つ以上ある場合 */
3:   && !B_machine.operating
    /* ①e) 工程 2 の機械が稼働していない場合 */
4:   && !(B.nowProcess == 2 && B.working)
    /* ①f) 作業者 B が工程 2 で作業していない場合 */
5:   && getItemNum(3, P1_items) < A.P.getItemLimit(3)
    /* ③g) 工程 3 の仕掛が上限数より少ない場合 */
6: { A.decisionProcess = true; /* 次工程を工程 2 に決定 */ }
```

(a) 作業者 A が工程 2 を作業できるかの判断

(a) Determine if worker A can perform process 2

```
1: if (B_machine.stopping)
    // ③d) 工程 2 の機械が停止した場合
2: { for (int i = 0; i < P1_items.size(); i++)
3:   { if (P1_items.get(i).getItemProcess() == 2)
        /* 基板 1 が工程 2 にある場合 */
4:     { P1_items.get(i).changeItemProcess(3);
        // 基板 1 を工程 3 に移動
5:       break; }}} }
```

(b) 工程 2 から工程 3 への基板 1 の遷移

(b) Workpiece 1 transitions from process 2 to process 3

図 12 ソースコード例

Fig.12 Source code example.

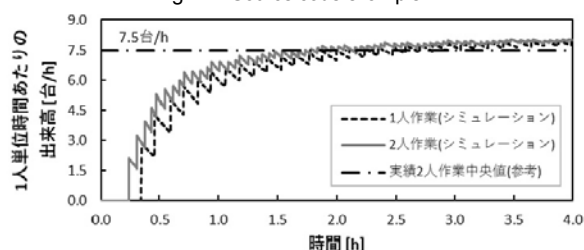


図 13 シミュレーション結果(出来高)

Fig.13 Simulation results (Production volumes).

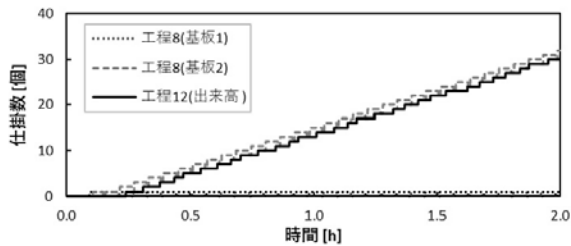


図 14 シミュレーション結果(仕掛数)

Fig.14 Simulation results (Number of workpieces).

次に、1 人作業および 2 人作業のシミュレーションにおける作業エージェントおよび基板（製品）エージェントの振舞いが実状を模擬できているかを定性的視点で評価した。ここでは、対象ラインで実際に作業している作業者に今回実装したエージェントの振舞いを見てもらい、現実を表現できているかをヒアリングし、以下の評価をいただいた。

- ・ 仕掛が溜まる工程については実際の工程と同等であり、実状を再現できていると言える。
- ・ 最も仕掛が溜まる工程において、シミュレーション結果では図 14 のように常に上昇傾向であるが、実際は最大でも 20 台程度であり、実際の現象と乖離している。
- ・ 実際の生産現場では部品・部材の補充や不具合対応などの不随作業が発生するため、それによって作業者は他作業者の状況を見て動きを判断しているため、固定値で HT を表現するだけでは現実を模擬できない。

ヒアリング結果より、仕掛の溜まる箇所については HT と MT を実際の値を使用し、作業者の持ち場も実際の工程を条件として設定したため、再現できたとと言える。しかし、HT は実際の作業をストップウォッチ法で測定した値を直接使用したため、部品補充や段取り替えなどのイレギュラーを加味できておらず、乖離した部分が現れたと考える。そのため、作業時間はばらつきやイレギュラー発生確率を考慮した実装を行う必要があると言える。また、今回は便宜上工程を纏めて表現したため、工程数の違いにより作業者の行動パターンが簡略化されて実際との差異に現れたと考える。

5. 結言

本研究では、生産現場における標準化の課題および最適化の課題に対する検討を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

① 標準化の課題について

作業者にスマートウォッチを装着し得られた加速度のデータを用いて、時系列クラスタリングおよびデータの特徴による識別を行うことで、64%の工程の分類ができた。同時に得られた加速度データを用いることによって標準作業を逸脱していないかどうかの定量的な指標を定義できた。一方、今回の実験では 1 名の被験者のみのデータから識別を行ったため、今後、被験者を増やして個人差を考慮する必要がある。

② 最適化の課題について

生産現場で取得したデータを使用するシミュレータを実装し、現実の条件を設定することで、実績に近い出来高をシミュレーション結果として取得することができた。一方、イレギュラー等を考慮していないため、仕掛数の変化は現実と乖離しており、今後、よりエージェントの振舞いを改善する必要があることがわかった。

文 献

- (1) 大内一成、土井美和子：スマートフォンを用いた生活行動認識技術，東芝レビュー，Vol. 68, No. 6 (2013).
- (2) 動的時伸縮法 / DTW (Dynamic Time Wrapping) を可視化する
<http://sinhrks.hatenablog.com/entry/2014/11/14/232603>
- (3) 山田知典、石川佳愛、阿部和規、藤井秀樹、吉村忍：マルチエージェント交通流シミュレーションにおける交通量の不確実性評価，日本シミュレーション学会論文誌，Vol.9, No.1 (2017).
- (4) 渡邊卓也、大上俊之、小山茂：マルチエージェントモデルを用いた建物火災の避難行動シミュレーション，計算理工学論文集，Vol.7, No.1 (2007).

Ⅲ. フレキシブル薄膜二次電池の基礎研究

Study on Thin-film Secondary Battery Using Lithium-ion Conductive Solid Electrolyte

岩滝 幸司 角田 龍則 本保 栄治 横山 義之
IWATAKI Kouji KAKUDA Tatsunori HONBO Eiji YOKOYAMA Yoshiyuki

早苗 徳光 寺澤 孝志 中 茂樹
SANAE Norimitsu TERASAWA Takashi NAKA Shigeki

Abstract

In recent years, with the spread of mobile electronic devices and electric vehicles, demand for higher performance of secondary battery has been increasing. Materials are being developed to improve the performance of secondary battery. In particular, secondary batteries using lithium-ion conductive solid electrolyte that do not use an electrolytic solution have a low risk of ignition. In addition, the characteristics do not deteriorate due to the decomposition products of the electrolyte. Therefore, there is a possibility that both improvement of energy density and securing of reliability can be achieved. Among them, thin-film secondary battery having thinned layers are flexible and lightweight. So, the aim of this study was to develop a flexible thin-film secondary battery with forming thin-film layers at low temperature by a vacuum deposition method. This year, we focused on the cathode thin-film and analyzed its structure. Subsequently, the characteristics of thin-film secondary battery were evaluated. In this paper, the deposition condition (sputtering temperature) of cathode thin-film and the discharge characteristic of flexible thin-film secondary battery are reported.

1. 緒言

近年、携帯型電子機器や電気自動車の普及に伴い二次電池の高性能化への需要が高まり、多くの研究機関で特性の改善を目的に新しい材料の開発が進められている。中でもリチウムイオン二次電池は、エネルギー密度が高く高出力な蓄電池として様々な電気機器に採用されており、今後、電気自動車やIoT 関連の市場が急速に拡大していくとともに、ますます需要増が期待されるデバイスである。また、次世代の電池として期待されているリチウムイオン固体電解質二次電池は、電解液を使用しない固体電解質を採用した電池であり、リチウムの単一イオン伝導の電池である。一般的に、固体は界面制御をクリアできれば、取り扱いが楽で発火の心配がなく、電解液の分解副生成物による特性劣化が起きないという利点がある。そのため電池のエネルギー密度を上げることによる短絡の危険性を大幅に低減でき、高い長期信頼性と高出力特性が実現できると考えられている。

そのような固体電池の中でも、構成材料を薄膜化した薄膜二次電池は電解質を薄くすることで内部抵抗を低減できるため、古くから研究されているデバイスである。容量は小さいものの軽量で柔軟性を付加することが可能であり、ウェアブルデバイスと一体化できるという特徴あるため、フレキシブルな二次電池として応用が期待されている。具体的には、IoT 向け無線センサーなどの電子デバイスと太陽光や振動など環境発電と融合した製品や生

体モニタの蓄電デバイスなどへの応用が考えられる。そこで本研究では、真空成膜法で薄膜を形成しフレキシブルな二次電池を開発することとした。本年度は正極薄膜に重点をおき、その構造解析および二次電池特性の評価を実施し、特性の改善を進めた。

2. 正極薄膜の形成

< 2. 1 > 正極用コバルト酸リチウムターゲットの作製

真空成膜法(スパッタリング法)により正極のコバルト酸リチウム(LCO)薄膜を形成するため、まず LCO ターゲットを作製した。LCO 粉末(Merck)とバインダ(EC-ビヒクル、日清化成(株))を混合し、直径 80 mm のカーボン型に充填した後、200 kg/cm² の圧力を加えて、円盤状の LCO 板を作製した。得られた板を大気中 950℃ で 1 時間焼結し、直径約 75 mm 厚さ 4 mm の LCO ターゲットを得た。図 1 は、左が焼成後の LCO ターゲット、右が使用する RF スパッタリング装置である。

このターゲットの X 線回折測定(Smart Lab、(株)リガク)を行った。図 2 は LCO 粉末と LCO ターゲットの X 線回折プロファイルを示す。ターゲットのプロファイルは使用した LCO 粉末とほぼ同じ測定結果が得られ、加熱により組成および構造が変化していないことを確認した。

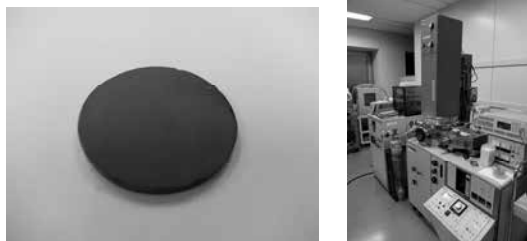


図1 LCO ターゲット(左)とRF スパッタリング装置(右)
Fig.1 LCO target and RF sputtering apparatus.

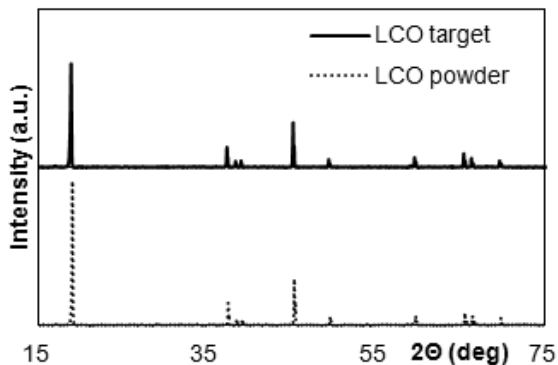


図2 LCO ターゲットと粉末の X 線回折プロファイル
Fig.2 X-ray diffraction patterns of LCO target and powder.

< 2. 2 > LCO 正極薄膜の成膜

作製した LCO ターゲットを図 1 のスパッタリング装置 (SPF-332H、アネルバ (株)) に取り付け、以下の条件で耐熱ガラス基板(ホウケイ酸ガラス)に成膜をおこなった。

まず、洗浄したガラス基板を装置にセットし、背圧 1.3×10^{-3} Pa まで到達した後、Ar を 12 sccm 流入させて圧力 2.2×10^{-1} Pa、出力 100W でそれぞれ 30 分間ずつ Ti と LCO の成膜を行った。

< 2. 3 > LCO 正極薄膜の組成分析

得られた LCO 薄膜の表面を X 線光電子分光分析装置(XPS、PHI 5000 VersaProbe III、アルバック・ファイ (株)) で組成分析した。図 3 は XPS の測定結果を示す。

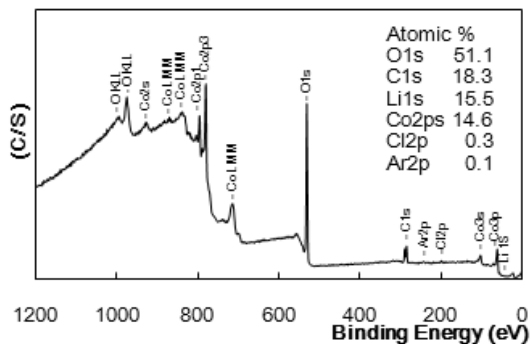


図3 LCO/Ti 薄膜の XPS による表面組成分析

Fig.3 XPS surface composition analysis of LCO/Ti thin layer.

Li, Co, O の原子比率は、それぞれ 15, 14, 51% となり、組成比は Li:Co:O=1:1:3.4 であった。LiCoO₂ のモル比は 1:1:2 であり酸素が多いのは、膜表面が大気中の酸素に曝されたことにより酸化したためと考えられる。続いてグロー放電発光分析(GDA750、(株)リガク)により LCO/Ti 薄膜の厚み方向の組成分析を行った。なお、成膜時には、基板加熱を実施した。図 4 はそれぞれの温度で成膜した LCO/Ti 薄膜の厚み方向の組成分析結果を示す。加熱なしの場合、Li 比率が多目ではあるが、Co は一定の割合で成膜されており、Co:O のモル比はほぼ 1:2 の割合で存在していることがわかった。また、加熱温度を上げると LCO 内部で O 比率の低下が見られた。これは、膜内にあるターゲット由来の C により、酸化物が還元されたと考えられる。また、550°C では LCO と Ti の界面に Ti の化合物が生成された。400°C 以下では、この LCO/Ti 界面の化合物が見られず、後ほど説明する 500°C 以上で充放電容量が低下する原因となっている。

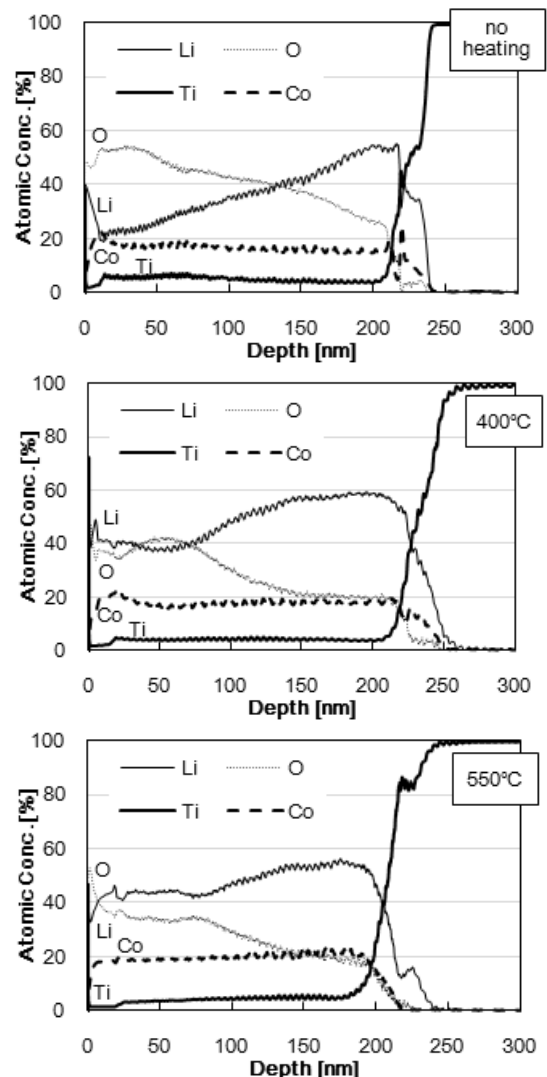


図4 LCO/Ti 薄膜の厚み方向組成分析(基板加熱なし、400°C、550°C)

Fig.4 Thickness direction composition analysis of LCO/Ti thin layer.

＜ 2. 4 ＞LCO 正極薄膜の X 線回折測定

図 5 は基板加熱温度を変えて成膜した LCO 薄膜の X 線回折測定プロファイルを示す。加熱温度をあげると 37°と 45°のピークの半値幅が小さくなり、LCO の結晶化が確認できた。また、600℃では 18°にもピークが現れ、LCO の結晶化を高めるためには、高温での基板加熱成膜が有効なことがわかった。

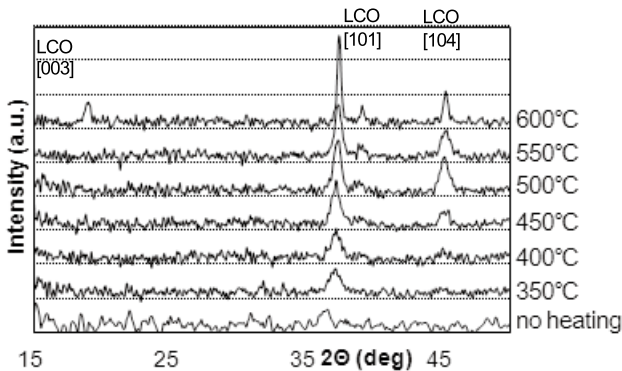


図 5 基板加熱による LCO 薄膜の X 線回折プロファイル変化

Fig.5 X-ray diffraction patterns of LCO thin layer by heating substrate.

＜ 2. 5 ＞LCO 正極薄膜の充放電特性

真空成膜法により Ti 基板上に成膜した LCO 薄膜と電解液、セパレータ、Li 箔を充放電特性評価用電池セルに組み込み、正極薄膜の放電特性を評価した。図 6 は、充放電特性評価用電池セルの模式図を示す。



図 6 充放電特性評価用電池セルの模式図

Fig.6 Battery cell for evaluating charge / discharge characteristics.

成膜時の基板加熱温度を加熱なし、200℃、300℃、400℃、500℃、550℃の 6 条件で成膜し、その LCO 薄膜の放電特性を評価した。図 7 は、それぞれの基板加熱温度の放電特性、表 1 は放電容量を示す。加熱温度 300℃ 以上でプラトー領域(放電カーブがフラットな領域)が現れており、特に 300℃ と 400℃ の成膜においてその範囲が大きくなった。これは LCO 薄膜の結晶性向上によって内部インピーダンスが低下したためである。また、放電容量も 300℃ と 400℃ で大きくなり、500℃、550℃ では、容量の低下が見られた。この理由としては＜ 2. 3 ＞で説明した LCO と Ti 界面に発生した化合物により内部抵抗が増加したことと、LCO 薄膜厚さの減少が影響していると考えられる。

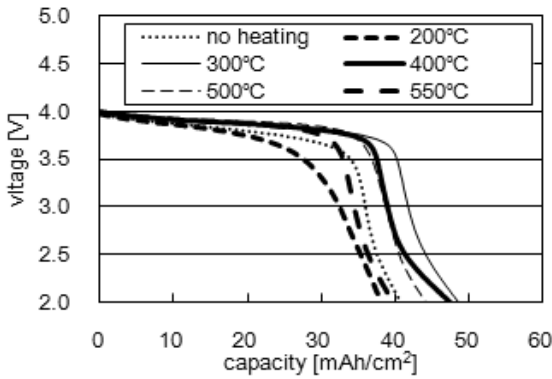


図 7 LCO 薄膜の放電特性(基板加熱なし、200、300、400、500、550℃)

Fig.7 Discharge characteristics of LCO electrode.

表 1 基板加熱による LCO 薄膜の放電容量

Table.1 Discharge capacity of LCO electrode by heating substrate.

加熱温度 [° C]	LCO 膜厚 [nm]	容量 [μAh/cm²]
無し	250	40.8
200	—	38.2
300	—	48.4
400	250	47.4
500	—	44.1
550	220	39.6

＜ 2. 6 ＞LCO 正極薄膜の厚みによる影響

成膜時間を増加することで LCO 薄膜の厚みを 2 倍にして、同じように評価セルを使用し放電特性を評価した。図 8 は、成膜時間を 2 倍にした加熱なしと 400℃ 加熱の薄膜の放電特性、表 2 は、放電容量を示す。

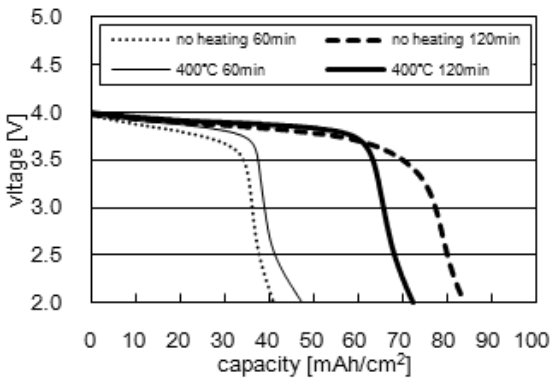


図 8 LCO 薄膜の放電特性(基板加熱なし、400℃、成膜時間 60、120 分)

Fig.8 Discharge characteristics of LCO electrode.

表2 成膜時間による LCO 薄膜の放電容量

Table.2 Discharge capacity of LCO electrode by sputtering time.

加熱温度 [°C]	成膜時間 [min]	容量 [μAh/cm ²]
加熱なし	60	40.8
加熱なし	120	84.1
400	60	47.4
400	120	72.2

成膜時間を2倍にすると、加熱なしでは放電容量が約2倍となり、400℃では約1.5倍となった。プラトー領域は加熱温度400℃のほうが広く、膜厚を増加させた場合においても、放電特性の改善に基板加熱が有効であることがわかった。

< 2. 7 > LCO 正極薄膜の成膜後の大気アニール

成膜時基板加熱なしの LCO 薄膜を電気炉で大気アニールした。図9は、アニール温度を変更した LCO 薄膜の X 線回折プロファイルを示す。450℃から Li 酸化物のピークが現れ、500℃から LCO のピークが現れた。さらに 600℃では LCO の結晶化が進みピーク強度が大きくなった。

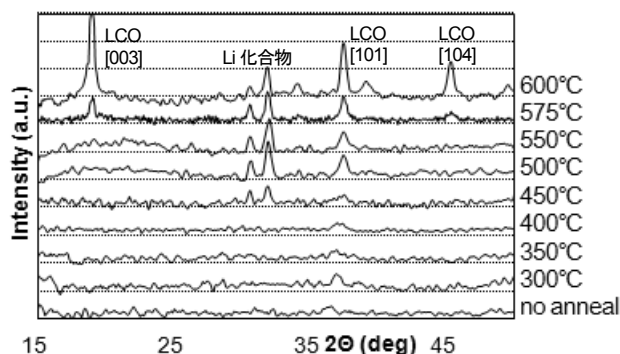


図9 アニールによる LCO 薄膜の X 線回折プロファイル変化

Fig.9 X-ray diffraction patterns of LCO by annealing.

次にグロー放電発光分析により LCO/Ti 薄膜の厚み方向の組成分析を行った。図10は基板加熱350℃で成膜した LCO/Ti 薄膜と、その後600℃で大気アニールした厚み方向の組成分析結果を示す。600℃アニールした LCO/Ti では Ti の酸化が確認できた。他社の報告⁽⁴⁾においても基板に LCO を成膜した後大気アニールすることで結晶性を向上させているが、膜構成は LCO/Pt/Ti と酸化を防ぐ中間層をもうけており、アニールの際は、LCO と Ti 間に酸化物が生成しない層設計が必要である。

大気アニールした LCO 薄膜で電池セルをくみ、放電特性の評価を試みたが全く充放電しなかった。これは内部抵抗の増大に加え、LCO 薄膜を成膜した Ti 基板の裏面が大気アニールで酸化し大きな抵抗を持ったためである。このことから、LCO 薄膜をアニールする場合は金属基板(Ti)の裏面側に保護膜を形成するか、樹脂基板などを使用する必要がある。

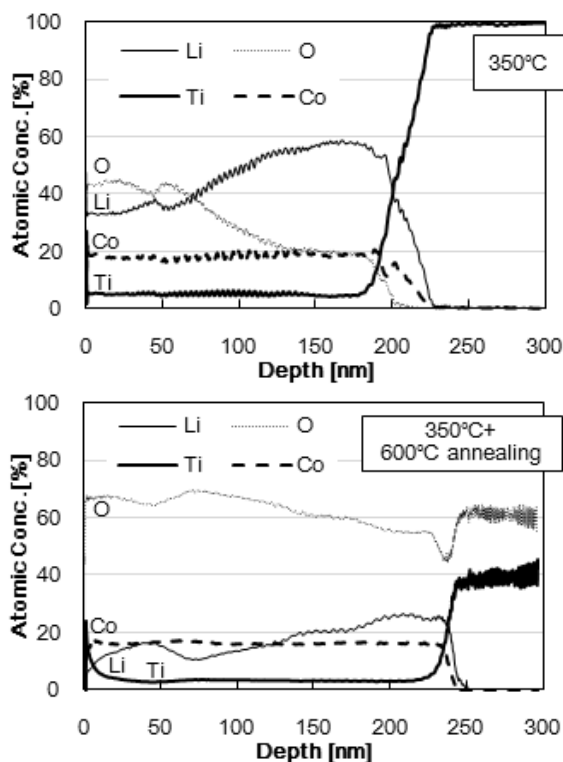


図10 LCO/Ti 薄膜の厚み方向組成分析(アニールなしとアニール 600℃)

Fig.10 Thickness direction composition analysis of LCO/Ti thin layer.

3. 窒化リン酸リチウム／コバルト酸リチウム薄膜の形成

< 3. 1 > 窒化リン酸リチウム薄膜の成膜

真空成膜法(スパッタリング法)により固体電解質となる窒化リン酸リチウム(LiPON)薄膜を形成するため、リン酸リチウム(Li₃PO₄)ターゲットを作製した。Li₃PO₄粉末とバインダーを混合し、直径80mmのカーボン製の型に充填した後、200 kg/cm²の圧力を加えて、円盤状のLi₃PO₄板を作製した。得られた板を大気中700℃で2時間焼結し、直径約75mm厚さ4mmのLi₃PO₄ターゲットを得た。このターゲットをスパッタ装置にセットして、Ar流量12 sccm、Ar分圧2.2×10⁻¹ Pa、N₂分圧3×10⁻² Pa、出力100 Wで30分間LiPON薄膜を成膜した。

< 3. 2 > LiPON/LCO/Ti 薄膜の放電特性

Ti 基板上に成膜した LiPON/LCO/Ti 薄膜と電解液、セパレータ、Li 箔を充放電特性評価用電池セルに組み込み、放電特性を評価した。図11は、それぞれの基板加熱温度で成膜した薄膜の放電特性を示す。結果、容量はLiPONを成膜しないLCOのみの正極とほぼ同じであったが、放電電圧が安定せずプラトー領域が確認できなかった。LCO単体の放電カーブでは明確なプラトー領域が確認できていたため、特性劣化の原因は固体電界質LiPON薄膜にあると考えられた。そこで、Li₃PO₄ターゲットの作製から再度LiPON薄膜の加工条件出しを行うこととした。

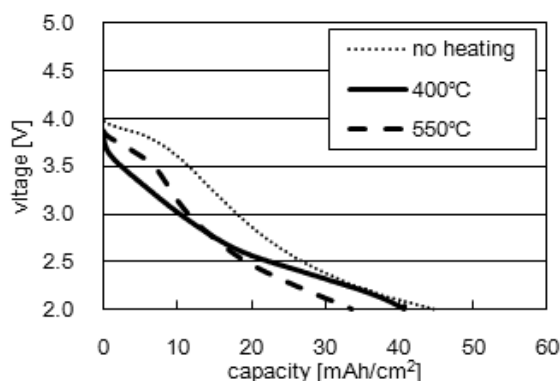


図 11 LiPON/LCO 薄膜の放電特性(基板加熱なし、400°C、550°C)

Fig.11 Discharge characteristics of LiPON/LCO electrode.

4. 固体電解質窒化リン酸リチウムの形成

< 4. 1 > 固体電解質用リン酸リチウムターゲットの作製

真空成膜法(スパッタリング法)により固体電解質膜の LiPON を成膜するため、加圧焼成により Li_3PO_4 ターゲットを作製した。 Li_3PO_4 粉末(和光純薬(株))45 g をカーボン型に充填し、加圧 90 kg/cm^2 、温度 750°C、真空雰囲気下で焼成した。図 12 は、加圧焼成後の Li_3PO_4 ターゲットを示す。



図 12 Li_3PO_4 ターゲット

Fig.12 Li_3PO_4 target.

< 4. 2 > LiPON 薄膜の作製

上記 Li_3PO_4 ターゲットをスパッタリング装置にセットし、基板加熱無し、Ar 流量 12 sccm、Ar 圧力 2.2×10^{-1} Pa、 N_2 分圧 $3 \sim 12 \times 10^{-2}$ Pa で窒素を導入しながら出力 100 W で 30 分間 LiPON を成膜した。図 13 はそれぞれの条件で成膜した LiPON 薄膜の X 線回折プロファイルを示す。

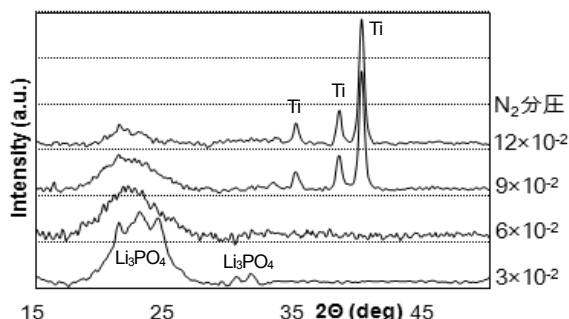


図 13 LiPON の X 線回折プロファイル(N_2 分圧 $3 \sim 12 \times 10^{-2}$ Pa)

Fig.13 Characteristics X-ray diffraction patterns of LiPON.

N_2 導入量が大きくなるほど、 Li_3PO_4 のピーク($20 \sim 25^\circ$)が小さくなる傾向が見られた。また、 40° 付近のピークは Ti 基板のピークあり、 N_2 導入量を大きくするとそのピーク強度も大きくなるため、同時間の成膜においても LiPON の膜厚が薄くなったと考えられる。

< 4. 3 > LiPON 薄膜の組成分析

さらにグロー放電発光分析により LiPON 薄膜の厚み方向の組成分析を行った。図 14 は、 N_2 導入量を変えて成膜した LiPON 薄膜の厚み方向の組成分析の結果を示す。

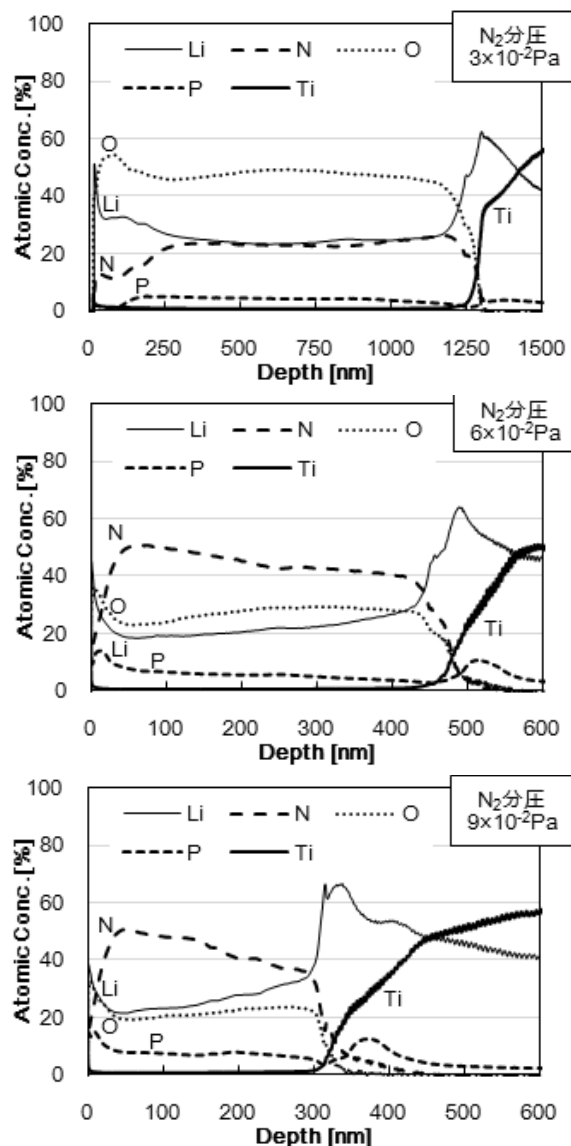


図 14 LiPON/Ti 薄膜の厚み方向組成分析(N_2 分圧 $3 \sim 9 \times 10^{-2}$ Pa)

Fig.14 Thickness direction composition analysis of LiPON/Ti thin layer.

N_2 導入量を増やすと膜厚が減少することがわかり、 9×10^{-2} Pa では 3×10^{-2} Pa の約 3 分の 1 の厚みとなった。組成としては、固体電

解質として報告されている LiPON の組成式 $\text{Li}_2\text{9PO}_{3.3}\text{N}_{0.46}$ ⁽²⁾ と比較して膜中の N がかなり多く、また LiPON と Ti 間では、Li が Ti 層に拡散していることが確認できた。

< 4. 4 > LiPON の伝導度

LiPON の伝導度測定を行うために Ti/LiPON/Ti 薄膜⁽³⁾を成膜した。図 15 は、Ti 基板上に成膜した Ti/LiPON/Ti 薄膜を示す。各層間の短絡を防ぐため、LiPON/Ti を成膜した後マスクを付けて上部 Ti を成膜し、直径 20mm の円板を切り出して、交流インピーダンス測定を行った。その測定結果から伝導度⁽⁴⁾を算出した。図 16 は、それぞれの薄膜の複素インピーダンス平面プロット、表 3 に算出した伝導度を示す。成膜時の N_2 分圧 5×10^{-2} Pa の薄膜で円弧が小さくなり、最も高い伝導度が得られた。

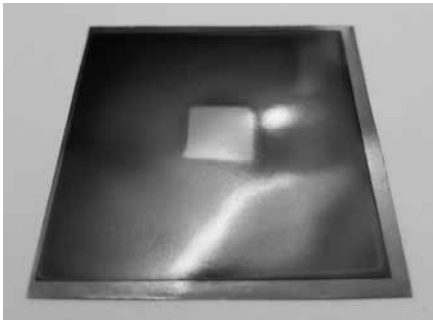


図 15 Ti 基板上に成膜した Ti/LiPON/Ti 膜

Fig.15 Ti/LiPON/Ti film on Ti substrate.

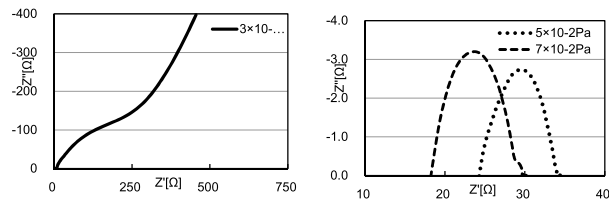


図 16 LiPON 薄膜の複素インピーダンス平面プロット

Fig.16 Complex impedance plane plot of LiPON thin layer.

表 3 LiPON 薄膜の伝導度

Table.3 Conductivity of LiPON thin layer.

N ₂ 導入量(Pa)	3×10^{-2}	5×10^{-2}	7×10^{-2}
抵抗(Ω)	400	9	11
面積(cm ²)	0.25	0.25	0.25
厚さ(μm)	1.1	0.5	0.4
伝導度(S/cm)	1.1×10^{-6}	2.2×10^{-5}	1.5×10^{-5}

図 17 は、交流インピーダンス測定結果の等価回路を示す。測定結果の等価回路から、 N_2 分圧 3×10^{-2} Pa で成膜した LiPON では、複数の容量が並列に存在している状態であり、 N_2 の供給量が少な

かったため、均一な膜が形成できていないことがわかった。

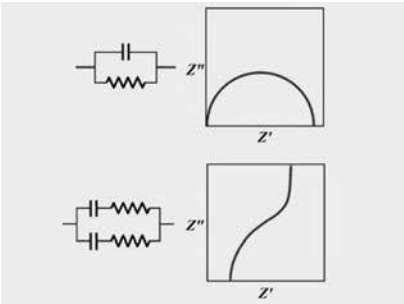


図 17 複素インピーダンス平面プロットの等価回路

Fig.17 Equivalent circuit of complex impedance plane plot.

5. まとめと今後の課題

本年度の研究では、フレキシブルな薄膜固体電池を開発することを目的に、リチウム化合物粉末を加圧焼成したターゲットを用いてスパッタリング法により成膜し、正極薄膜と固体電解質薄膜をそれぞれ得られた。具体的には、コバルト酸リチウム粉末からターゲットを作製し成膜することでコバルト酸リチウム薄膜が得られた。薄膜については、電解液を用いた電池セルにより放電特性評価をおこない、正極として機能することが確認できた。また、成膜時の基板加熱(300~400℃)により結晶化が進み、電池容量とプラトー領域が大きくなることを確認した。さらに、リン酸リチウム粉末から加圧焼成によりターゲットを作製し、 N_2 を導入しながら成膜することで窒化リン酸リチウム固体電解質薄膜が得られ、 N_2 分圧 5×10^{-2} Pa で最も大きい伝導度 2.2×10^{-5} S/cm が得られた。

今後の課題としては、集電電極、正極薄膜および固体電解質薄膜を積層し、充放電可能な薄膜固体電池を作製することである。積層構造としては、リチウムの不要な Ti/Cu/LiPON/LCO/Ti や正負極にともにリチウム化合物を使用した Ti/LiTiO/LiPON/LCO/Ti などを検討している。また、多層膜構造で基板加熱を実施し、耐熱ポリミドフィルムなどの樹脂基板上に成膜することでフレキシブル薄膜固体電池を作製する予定である。

文 献

(1) 特開 2017-59322.
(2) 日刊工業新聞社：全固体電池入門 (2019).
(3) 特許 第 6051514.
(4) 技術堂出版株式会社：電気化学測定法 (上) (1984).

Ⅳ．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

Research on Product Evaluation Technology Using Remote Monitoring System

小林 寛治 吉澤 明 釣谷 浩之 佐々木克浩
KOBAYASHI Kanji YOSHIZAWA Akira TSURITANI Hiroyuki SASAKI Katsuhiro

塚本 吉俊 佐山 利彦 関口 徳朗
TSUKAMOTO Yoshitoshi SAYAMA Toshihiko SEKIGUCHI Noriaki

Abstract

At the development of electronic devices and components, thermal cycle tests are widely performed to evaluate the reliability. In the actual tests, it is usual to take the products out of the thermal chambers and evaluate the structural integrity at the end of the test or every few hundred cycles internally. However, this procedure can only discretely detect the product failure and has the problem of performing unnecessary thermal cycles before product removal. On the other hand, in order to respond to the spread of IoT in recent years, Toyama Industrial Technology Research and Development Center has developed a test equipment remote monitoring system, which connects environmental testing chambers to the Internet, and makes it accessible from the outside. In this research, this system is used to improve the efficiency of the environmental testing, so that the structural integrity is evaluated remotely and continuously from the outside without removing the specimens from the thermal chamber. Using DC switching regulators as specimen, a measuring system that can remotely evaluate the structural integrity of the specimens was constructed, and then the system actually operated properly. Additionally, in order to increase the efficiency of the environmental tests, the testing method has been improved so that multiple specimens can be tested simultaneously in a certain temperature range. As a result, the average number of remaining cycles was reduced by 76.8% compared to the case when the evaluation was performed at intervals of 100 cycles. In addition, by constantly monitoring the operation status of the specimens, it was found that input / output power ratio rapidly decreased in a very short time when the damage occurred.

1. 緒言

電子機器などの製品を開発する際には、その信頼性を確保する目的で、環境試験が広く実施される。環境試験の一つとして、熱サイクル試験があげられる。熱サイクル試験は、冷熱衝撃試験装置などの温度槽を用いて、温度変化を繰り返すことで、製品への影響を評価する。実際に、熱サイクル試験を実施する際には、数百サイクル毎に製品を温度槽から取り出して、その健全性の評価を行うのが一般的である。しかし、この手順では、製品の不具合を数百サイクル間隔でしか検出できず、製品を取り出すまでに無駄な熱サイクルを実施するという問題がある。一方で、近年、IoTの活用が広がりつつあり、例えば、工場の機械をネットワークに接続し、稼働履歴が見える化することで、稼働率が1.8倍に増加した例¹⁾、また、IoTの活用により、熟練技能者の高度な作業をNC加工へ置き換え、アルミダイカスト金型製作の生産性を向上させた例²⁾など、既にさまざまな分野で応用が進められている。そのような中、富山県産業技術研究開発センターにおいても、IoT

化支援の取組みを強化しており、平成30年度に先端デバイスマルチ信頼性試験室が整備され、試験室内に設置された環境試験装置をネットワークで接続し、外部から各試験装置を遠隔でモニタリングできる試験機器集中管理システムが整備されたところである。本研究では、熱サイクル試験を実施する際に、このシステムを利用し、試験体を温度槽から取り出すことなく、外部から遠隔でモニタリングしながら、健全性の評価を行うことを試みる。これにより、従来の方法と比較して、短い間隔で健全性の評価を行うことができることから、環境試験の効率化を図ることができることに加え、これまで明らかでなかった対象製品の健全性が損なわれるまでの特性の変化についても調べることが可能となる。

2. 熱サイクル試験とその課題

< 2. 1 > 電子基板の熱疲労破壊

電子機器の信頼性を評価するために、熱サイクル試験が広く行われている。このような試験が実施されるのは、電子機器を実際

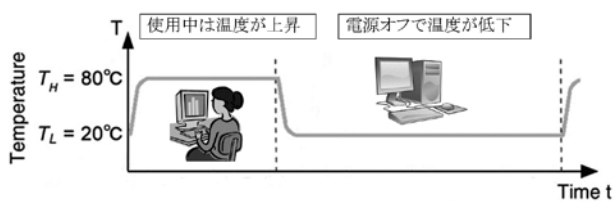


図1 電子機器使用時の温度変化の例

Fig.1 An example of temperature profile during use of electronic devices.

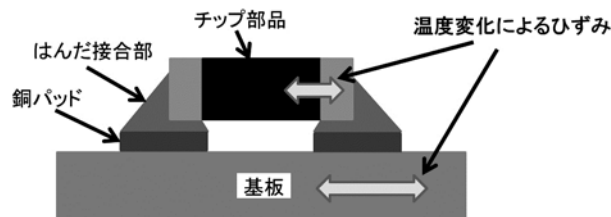


図2 電子基板上のはんだ接合部の概略図

Fig.2 Schematic view of solder joints on an electronic substrate.

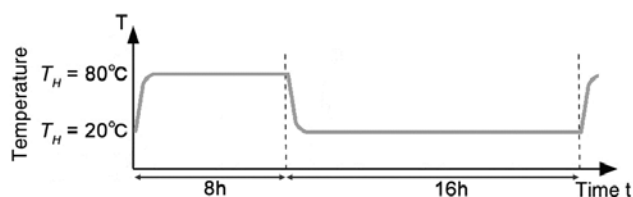


図3 実使用環境の温度変化の例

Fig.3 An example of temperature profile in actual use condition.

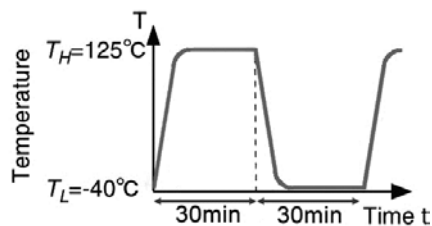


図4 加速条件の温度変化の例

Fig.4 An example of temperature profile in acceleration condition.

に使用し続けた際の、破壊過程と関係している。図1は、電子機器を使用した際の温度変化の例を模式的に示す。電子機器を実際に使用する場合、電源を入れて機器を使用している間は、温度が上昇する。電子機器の使用を終えて、電源を落とすと温度が低下する。長期間電子機器を使用すると、温度上昇と温度低下を繰り返すことになる。温度の上昇と低下に伴って、電子機器内部の電子基板には、ひずみが発生する。図2は、電子基板上のはんだ接合部の構造を模式的に示す。電子基板は、さまざまな材料でできた部品を組み合わせて作られている。図2の例では、基板上に銅パッドを介してチップ部品がはんだによって接合されている。通常、チップ部品と基板の線膨張係数は異なっており、温度が上昇すると、接合部には温度に応じたひずみが発生する。温度が下がると、ひずみも元の状態に戻る。電源のON、OFFに伴ってひずみ振幅が発生することから、はんだ接合部には、疲労損傷が進行し、最終的に、接合部が破断することとなる。そこで、熱サイクル試験を実施し、製品がどの程度の疲労強度を持つのかを評価し、製品の信頼性を確保する必要がある。

＜2. 2＞ 熱サイクル試験とその課題

実際に、熱サイクル試験を実施する際の温度プロファイルについて考える。図3は、電子機器の実際の使用環境を想定した温度プロファイルの例を示す。図は、電子機器の1日の温度変化を示しており、横軸が時間、縦軸が電子機器の温度である。このプロファイルでは、電子機器を使用する際に温度が80°Cまで上昇し、8時間機器を使用し電源を切る。電源を切ると温度が室温にまで下がり、翌日、機器の使用を再開するまで16時間、室温のままである。この温度プロファイルで、熱サイクル試験を実施する場

合、熱疲労損傷による機器の故障を確認するためには、実際の機器の寿命と同程度の非常に長い時間がかかることとなる。このため、実際には、現実よりも大きな温度振幅でかつ、短いサイクルの温度プロファイルを用いた加速試験が実施されることが多い。図4は、加速試験の温度プロファイルの例を示す。図に示す例では、低温保持温度-40°C、高温保持温度125°C、保持時間を30分としている。実際に熱サイクル試験を実施する際には、数百サイクルおきに、製品を温度槽から取り出して、その健全性を評価するのが一般的である。しかし、この手順では、製品の不具合を数百サイクル間隔でしか検出できず、製品を取り出すまでに無駄な熱サイクルを実施することになるという問題もある。特に、外部に委託して環境試験を実施する場合は、現地に赴いて製品の健全性を評価する必要があるため、評価の頻度を増やすのは容易ではない。

3. 試験機器集中管理システムについて

今回は、富山県産業技術研究開発センター 機械電子研究所に整備された試験機器集中管理システムを利用して熱サイクル試験を中断することなく、遠隔で試験体の健全性の評価を行うこととした。図5は、試験機器集中管理システムの概略図を示す。この試験機器集中管理システムは、恒温恒湿試験装置や、冷熱衝撃試験装置などの環境試験装置をネットワークで接続し、環境試験装置の運転状況や試験の進行状況、温湿度、カメラ画像、データロガーによる計測データなどを、インターネットを介して遠隔でモニタリングすることができる。富山県産業技術研究開発センターでは、各環境試験装置が、それぞれ接続アカウントやパスワード

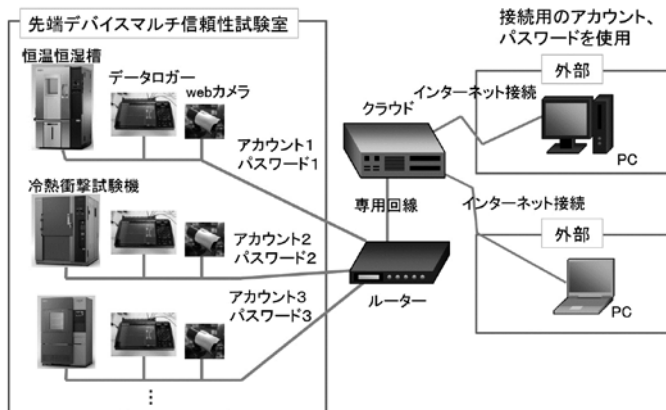


図5 試験機器集中管理システム

Fig.5 Schematic view of the remote monitoring system for environmental testing chamber.

ドが異なるネットワークに接続されており、接続用のアカウント、パスワードを使用することで、外部からインターネットを介して接続し、あたかもローカルネットワークに環境試験装置などの設備が接続されているかのようにアクセスすることが可能である。LAN 接続して使用することができる機器であれば、環境試験装置以外でも接続して外部から使用することができる。富山県産業技術研究開発センターでは、環境試験装置のほか、カメラやデータロガーといった機器が設置されている。

4. 実験方法

＜ 4. 1 ＞ 試験体及び熱サイクル試験

試験体は、直流安定化電源を使用した。図6は、今回、使用した試験体の外観を示す。この試験体は、縦 26.6 mm×横 36.2 mm×高さ 16.5 mm の樹脂製ケースの内部に、図7に示すような電子基板が入っており、シリコンゴムを充填して隙間が埋められている。交流 85～264 V あるいは、直流 120～370 V の入力に対して直流 12 V を出力するものである。今回、この直流安定化電源の現行機種に加え、より熱疲労寿命が短いと予想される旧機種を入手することができたため、実験では、この電源の現行機種と旧機種の 2 種類を試験体として用いた。この試験体に、JIS 規格 C60068-2-14 環境試験方法—電気・電子—第 2-14 部 温度変化方法³⁾に準拠した加速熱サイクル試験を実施した。この試験の温度プロファイルは、図4で示したものと同じく、高温保持温度 125°C、低温保持温度 -40°C、保持時間 30 min である。熱サイクル試験は、図8に示す冷熱衝撃試験機(エスベック製 TSA-71S-W)を使用した。

＜ 4. 2 ＞ 試験体の健全性評価方法と計測回路

使用した試験体は、メーカーの基準で、入力電力に対する出力電力の割合が、85%以上を満たしている必要がある。そこで、こ



図6 試験体外観写真

Fig.6 An overview of the specimen.

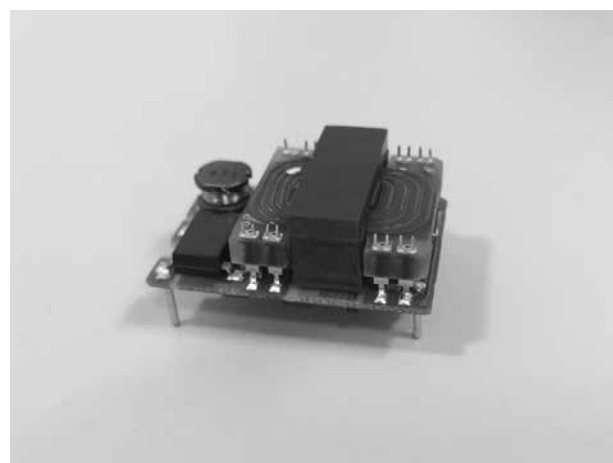


図7 試験体内部に封止されている基板

Fig.7 Substrate of the power supply sealed inside the specimen.



図8 使用した冷熱衝撃試験装置

Fig.8 Thermal shock chamber used in this work.

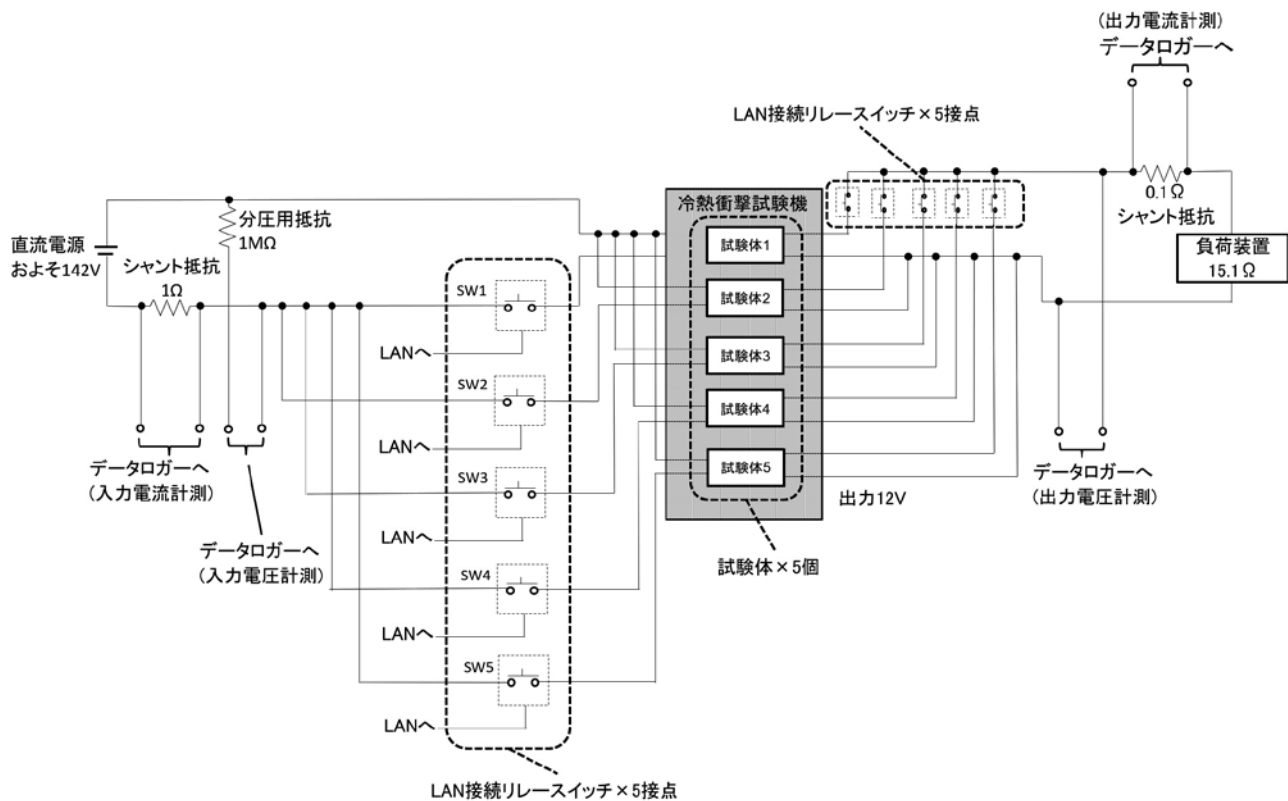


図9 計測回路

Fig.9 Circuit diagram for measuring voltage and current of the specimens.

の評価基準を試験体の健全性の評価に用いることとした。入力、出力のそれぞれの電力を求めるためには、入力、出力の電圧、電流を計測する必要がある。そこで、入力、出力のそれぞれの電圧、電流を計測するための計測回路を作成した。図9は、計測回路の回路図を示す。入力は、直流電源(松定プレジジョン製 PLE-250-0.3)を用いて、142 Vを印加する。入出力の電圧電流は、データロガー(グラフテック製 GL840)を用いて計測する。このデータロガーは、ネットワークを介して操作、計測、データの取得ができるものである。入力側の電圧は、データロガーの計測可能な最大電圧を超えるため、分圧用の抵抗 $1\text{ M}\Omega$ を用いて分圧し、実際の2分の1の電圧にして計測する。電流については、直接計測することはできないため、 $1\text{ }\Omega$ のシャント抵抗を挿入し、このシャント抵抗にかかる電圧を変換して電流を計測する。出力側には、電子負荷装置(高砂製作所製 FK-200L)を使用し $15.1\text{ }\Omega$ の純抵抗負荷を与える。出力電圧は、12 V 前後となるので、そのままデータロガーを用いて計測する。出力側の電流は、入力側と同様に $0.1\text{ }\Omega$ のシャント抵抗を用いて電圧を計測し、電圧を変換して電流を求める。最大5個の試験体を計測できるようにするため、5個の試験体を LAN リレースイッチ(ラインアイ製 LA-3R3P-P)を用いて遠隔で切り替えて計測できるようにした。この回路を用いて、おおよそ1日に1回、各試験体の入出力電力を測定した。

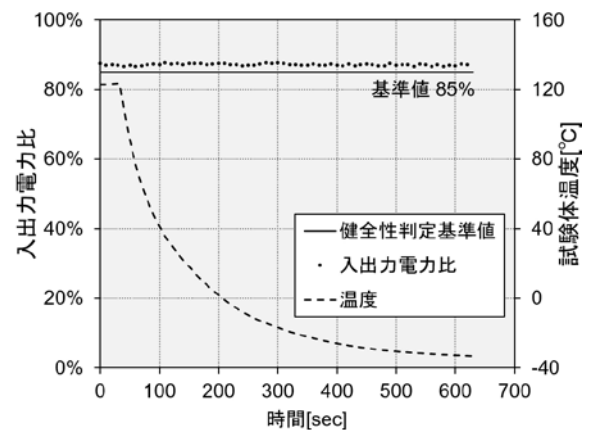


図10 試験体温度と入出力電力比との関係

Fig.10 The relation between temperature and input/output power ratio.

5. 入出力電力の温度依存性の確認

試験の効率向上のため、また、実使用状態にある電源をモニタリングするために、入出力電力の計測は、熱サイクル試験を停止させずに実施するのが望ましい。熱サイクル試験中は、30分おきに、絶えず高温(125°C)と低温(-40°C)の間を温度が変化している。

そこで、入出力電力比に温度依存性がないか確認を行った。入出力電力比は、熱サイクル試験が、高温から低温に切り替わるタイミングで、およそ 10 分間にわたり計測した。図 10 は、計測結果を示す。横軸は時間経過、縦軸左は、入出力電力比、縦軸右は、温度である。また図中の点線は、実際に計測した入出力の電圧・電流から求めた入出力電力比、実線は、健全性を判別する基準値(85%)、破線は、試験体表面に貼り付けた熱電対により計測した温度である。図から、入出力電力比に、わずかに揺らぎはあるものの、試験体の温度に依存した変化は見られない。このことから、熱サイクル試験の実施中に計測を行っても問題ないと判断した。計測時の温度条件を統一するために、温度変化中ではなく、高温側か低温側の温度が安定したところで計測するのが望ましい。使用した試験体の定格使用温度範囲は、-40℃～85℃ であるため、定格の範囲内である低温側(-40℃)の温度が安定した時点で計測を行うこととした。

6. 実験結果

< 6. 1 > 試験の効率化

遠隔での計測により、およそ 1 日に 1 回計測を実施することが可能となった。これにより、数百サイクルおきに計測を行った場合と比較して、無駄なサイクルを削減することが可能となった。そこで、実際に故障した時点から、入出力電力比を計測するまでの残サイクルについて、式(1)により平均残サイクルを求め、平均残サイクルがどの程度削減されたか確認した。

$$\text{平均残サイクル数} = \frac{\sum_{i=1}^N (N - i)}{N} \quad (1)$$

ここで、 N は、計測間隔をサイクル数で表したものである。また、式から明らかなように、故障は、1～ N サイクルで偏りなく発生するものと仮定した。試験機器集中管理システムを利用した遠隔計測の計測間隔を $N = 24$ サイクル(1 日 1 回計測)として計算した場合、平均残サイクル数は、11.5 サイクルとなる。これに対して、従来どおり、まとまったサイクル数実施してから計測した場合を想定して、100, 200, 300, 400, 500 サイクルの間隔で計測を行った場合と比較し、どの程度平均残サイクルを削減できたか確認した。表 1 は、各サイクル間隔での平均残サイクル数と削減できた割合

表1 平均残サイクル数の削減率

Table 1 Reduction rate for average number of remaining cycles.

計測間隔[サイクル]	平均残サイクル数	削減率
100	49.5	76.8%
200	99.5	88.4%
300	149.5	92.3%
400	199.5	94.2%
500	249.5	95.4%

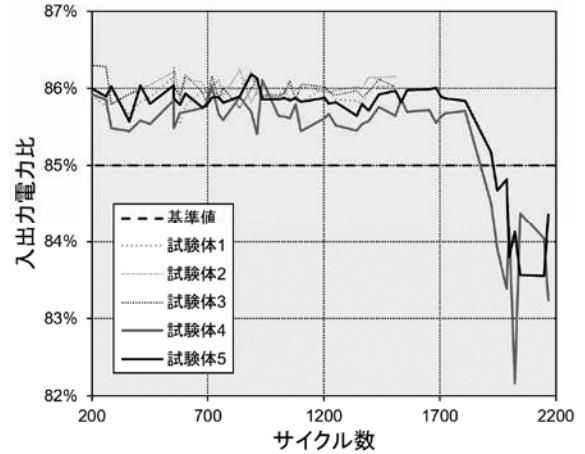


図11 現行機種のサイクル数と入出力電力比との関係

Fig.11 The relation between the number of cycles and input/output power ratio in the experiment of current model.

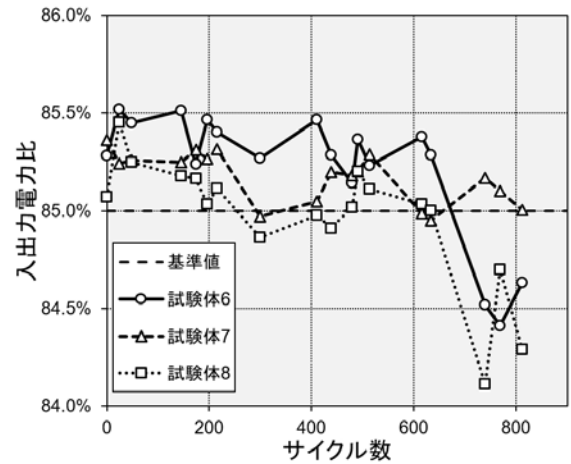


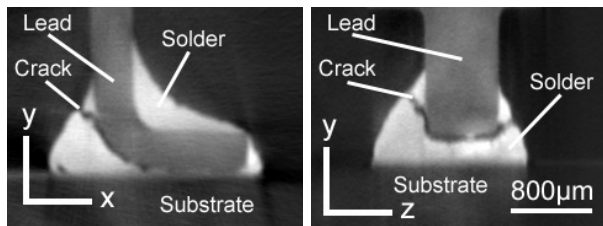
図12 旧機種のサイクル数と入出力電力比との関係

Fig.12 The relation between the number of cycles and input/output power ratio in the experiment of old model.

を示す。100 サイクルの間隔で健全性評価を行った場合、平均残サイクル数は、49.5 サイクルであり、削減率は、76.8%となった。間隔が大きくなるに従って削減率は上昇し、500 サイクル間隔の場合は、削減率は、95.4%となった。本研究で提示したシステムを用いることで、従来の方法と比較して無駄なサイクルを大幅に削減することが可能となった。

< 6. 2 > 入出力電力比の変化過程

図 11 は、現行機種の試験体における入出力電力比のサイクル数に対する変化を示す。横軸はサイクル数、縦軸は、入出力電力比であり、5 個の試験体の入出力電力比を示している。1500 サイクルまで、入出力電力比に変化が無かったため、試験体 1～3 に



(a) 基板と垂直でリードと平行な断面 (b) リード先端と垂直な断面

図13 試験体内部のはんだ接合部の CT 画像

Fig.13 CT images of the solder joint in a broken specimen.

については、その後、旧機種の試験体の計測に切り替えた。このため試験体 1～3 については、1500 サイクルまでのデータとなっている。試験体 4 および 5 については、いずれも 1800～1900 サイクルで入出力電力比が低下し、健全性の基準である 85%を下回っている。図から入出力電力比は、前兆なく急速に低下していることがわかる。また、一度基準を下回ると、増減はあるものの、その後は、基準を上回ることにはなかった。このことから、この試験体については、入出力電力比から、事前に故障を予測することが困難であることがわかる。また、メーカーの設定した判定基準は、非常に妥当なものであると考えられる。

より寿命が短いと予想される旧機種についても、入出力電力比の変化を確認した。図 12 は、旧機種の試験体における入出力電力比のサイクル数に対する変化を示す。3 個の試験体についての変化を示している。現行機種と比較すると旧機種は、初期状態から入出力電力比が小さく、基準値に近い値を示していることがわかる。また、試験体 6 および 8 については、700 サイクル前後で、現行機種と同様に急激な低下が見られる。しかし、試験体 7 および 8 については、それ以前の 300～650 サイクルでも基準値を下回っている箇所があり、正しい評価を下すのは難しい。計測のための測定回路で、若干の損失が発生するため、入出力電力比が実際よりも小さくなっている可能性がある。いずれにしても、旧機種については、初期状態から、現行機種と比較して入出力電力比が小さく、今回用いた計測システムでは、正確な評価が困難であった。

< 6. 3 > X 線 CT による破損部分の確認

今回使用した試験体について、内部のトランスのはんだ接合部において、熱疲労破壊が生じるものと推測される。そこで、入出力電力比の低下が明確に確認できた、図 11 で用いた試験体について、マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて、はんだ接合部の状態を確認した。図 13 は、試験体 5 におけるトランスのはんだ接合部を CT 画像で示す。図 13 の(a),(b)は、どちらも基板に垂直な断面で、それぞれ、リード先端部に平行な断面および、垂直な断面を示す。図 13(a)では、図のはんだ接合部左上のかかと部分からリードに向かって、き裂が確認できる。図 13(b)では、接合部左側から右側まで、リード下部を経て接合部全体にき裂が発生し

ているのが確認できる。このように、入出力電力比が基準を下回った試験体については、内部のはんだ接合部に大きなき裂が発生していることが確認できた。

< 6. 4 > 試験機器集中管理システムによるモニタリングの課題

実験の結果、試験機器集中管理システムによるモニタリングの課題も明らかとなった。今回の研究によって構築した遠隔モニタリングシステムでは、計測自体は、人の手で実施した。このため、試験体の健全性の確認は、1 日に 1 回程度にとどまった。計測自体を自動化することができれば、常時モニタリングすることが可能であり、効率を最大化することができる。今後、試験機器集中管理システムを最大限まで活用するためには、モニタリングの自動化が必須であると考えられる。また、今回は、健全性評価の際に、試験体自体に通電する必要があったため、測定回路の損失の影響が、計測結果に影響を及ぼした可能性がある。遠隔モニタリングシステムを適用する際には、このような対象毎に特有の問題についても検討する必要がある。

7. まとめ

本研究では、富山県産業技術研究開発センターに整備された環境試験装置などを遠隔モニタリングできる試験機器集中管理システムを用いて、熱サイクル試験を実施する際に、試験体を温度槽から取り出すことなく、任意のサイクルで、外部から遠隔で健全性の評価を行えるようにすることで、環境試験の効率化を試みた。その結果、100 サイクル間隔で健全性の評価を行った場合と比較して、無駄となる平均残サイクル数を 76.8%削減することができた。また、短い間隔で計測を行うことができることから、健全性の評価に用いる入出力電力比が、非常に短期間で急速に低下することが明らかとなった。今後、計測を自動化するなど、改善を行うことで、さらに効率を高めることができると考えられる。一方で、計測の際に通電する必要があることから、頻繁に通電することが寿命に及ぼす影響が不明であること、計測回路の損失の影響の評価が不十分で旧機種の試験体については正しく評価が行えなかったなど課題も残った。また、通電せずに評価が行える対象であれば、より容易に遠隔モニタリングシステムを運用することができるものとする。

文 献

- (1) https://www.jmfrri.gr.jp/content/files/Open/2019/20191004_IoT-Tools/57_okuma.pdf.
- (2) 鍋木哲志ほか：産業応用工学会全国大会論文集 (2019), pp.15-16.
- (3) JIS C60068-2-14, 環境試験方法—電気・電子—第 2-14 部 温度変化方法.

V. CAE の構造最適化を用いた設計手法 に関する研究

Research on Design Method Using CAE Structural Optimization

清田 典秀 中村 陽文 金森 直希 羽柴 利直
SEIDA Norihide NAKAMURA Takafumi KANAMORI Naoki HASHIBA Toshinao
住岡 淳司 山本 貴文 佐山 利彦
SUMIOKA Junji YAMAMOTO Takafumi SAYAMA Toshihiko

Abstract

Topology optimization is an excellent design method that has the potential to create highly flexible shapes composed of many holes and connections, unlike dimension or shape optimization. However, there are also problems that it is difficult to materialize by molding and machining, or that the shape cannot be realized as a structure. In this study, a practical CAE design process was proposed, examined, and verified the effectiveness in order to apply the highly flexible design using topology optimization to resin molded products by injection molding. Taking a chair as an example of a general structure, the following processes were implemented and examined: (1) search for topology-optimized shapes by minimizing mean compliance under volume restrictions, (2) conversion to 3D-CAD data for easy design change, and (3) shape design considering resin moldability such as shell structure. The final shape was converted into a solid using a 3D printer, and then the compliance was verified by static loading tests, and the strength of the structure was verified by fracture tests and structural analyses. As a result, it is concluded that this study has established a general design method that enables the introduction of topology optimization into the design process of resin molded products.

1. 緒言

機器・構造物の設計において、性能向上ならびに性能を満足した上での軽量化は重要な課題である。設計者の勘と経験に基づく試行錯誤による形状設計では、多大な時間とコストがかかり、また大幅な性能向上も困難を極める。そのため、数値計算を用いて、与えられた条件の下で最適な形状を設計する方法が開発されてきた。トポロジー最適化は、CAE (Computer Aided Engineering) を用い、目的の特性を満たす条件下で、最適な材料分布に到達する構造最適化手法のひとつである^①。従来の寸法、形状の最適化方法とは異なり、トポロジー最適化は穴のある形状など、自由度の高い最適化が可能であるため、構造設計への幅広い活用が期待されている。しかし、トポロジー最適化によって得られた形状は、機械加工等の製造方法が考慮されていないものであり、また想定以外の外的要因に対して却って脆弱な場合もあり、出力形状をそのまま実製品へ適用することは困難であるといえる。そこで本研究では、一般的な構造物や部材に対して、トポロジー最適化を活用した実用的な設計手法を確立することを目的とした。本研究では、最適化設計の対象として椅子をとりあげ、まず、トポロジー最適化および構造解析を用いて最適形状の探索を行った。その際、椅子の日本工業規格 (JIS)^②に想定される静的負荷条件下において、

可能な限り高い剛性と軽量化を実現することを目標とした。次に、得られたトポロジー最適化形状の 3D-CAD モデリングを行い、樹脂成形に適した形状設計について検討を加えた。最終的に得られた構造最適化モデルに対して、実験的検証を行うため、積層造形装置を用いて 3D 実体化を行い、静的負荷試験等を実施した。

2. 構造最適化について

<2.1>構造最適化の種類

構造最適化は、数学的根拠に基づき、構造物の最適な形状を求める方法論であり、設計変数の与え方によって、寸法最適化、形状最適化、およびトポロジー最適化に大別される。図 1 に、構造最適化法の分類を示す。まず、寸法最適化は、高さや長さ、断面係数等の寸法変数を設計変数とした最適化問題を解くことにより、最適構造を得る方法である。次に、形状最適化は、構造物の境界位置を設計変数とし、予め設定した外形形状の移動と変形により、最適構造を得る方法である。最後に、トポロジー最適化は、構造最適化問題を最適な材料分布の問題と捉え、予め設計された領域内部において、材料の有無を求める方法である。穴の増減も可能であり、最も自由度の高い構造最適化手法であるといえる。

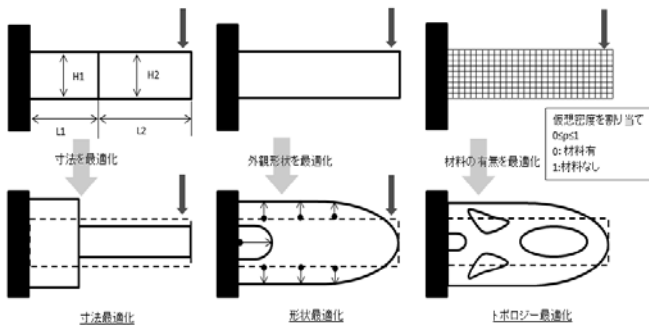


図1 構造最適化法の分類

Fig.1 Classification of structure optimization methods.

<2.2>構造最適化の問題点

寸法最適化は、寸法パラメータの範囲の中でしか最適化を行えないので、3種類の中では一番自由度は小さいといえる。形状最適化は、部材の寸法や形状を表す因子を設計変数として扱うものであるから、形態を変化させない範囲で、特定部分の形状の最適化を行うための手段として用いられる。一方で、トポロジー最適化は、最も自由度が高い最適化手法ではあるといえるが、問題点もいくつかある。例えば、特定条件での最適化形状であるため、想定外の外的要因に対して脆弱な場合がある点が挙げられる。また、樹脂成形品を想定した場合、出力形状のままでは金型による成形を全く考慮していないので、製品化できない形状であるという問題点がある。さらに、トポロジー最適化は、構造設計問題の定式化に依存している。そのため、例えば何を設計変数とし、何を目的関数とし、何を制約条件とするかについて適切な選択が重要となるが、その一般的な方法についてあまり議論されていないのが現状である。

3. 樹脂成形品の最適化方法の提案

<3.1>トポロジー最適化の優位性

トポロジー最適化は、寸法最適化および形状最適化と比較して、穴のある形状などの自由度の高い最適化が可能であるため、これまでにない優れた構造体を創出できる可能性を有する。樹脂材料は比較的柔軟な成形を可能とする素材であるため、トポロジー最適化に構造解析を組み合わせることで、多様な機能を有する優れた構造体としての製品開発を行うことができると考えられる。

<3.2>樹脂成形品の最適化設計方法

2章のトポロジー最適化の問題点でも述べたように、トポロジー最適化によって出力された形状をそのまま実製品へ適用することは難しい場合が多い。例えば、樹脂成形品の場合、アンダーカット等の型構造を考慮していない形状、あるいは、成形性を無視

した形状が出力される等の問題がある。そこで、簡易的なモデルの開発プロセスを通して、トポロジー最適化を開発現場で活用できるように、実用的な設計手法を確立することを目標とする。図2は、本研究において提案する設計プロセスのフロー図を示す。トポロジー最適化で出力された形状に対し、成形性を取り入れた形状にするために、いくつかのプロセスに分けて設計を行うこととした。設計プロセスは、①トポロジー最適化形状の探索、②3D-CADモデリング、③製造性考慮設計、および④3D実体化による検証という4つの工程によって構成される。

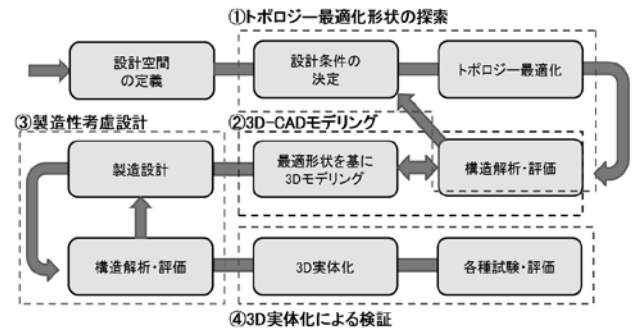


図2 樹脂成形品の実用的な最適化設計のプロセス

Fig.2 A practical optimization design process for resin molded products.

①トポロジー最適化形状の探索工程は、いくつかの設計条件を設定しトポロジー最適化、構造解析、および評価を繰り返しながらおおまかな形状を決めていく。②3D-CADモデリング工程では、得られた最適形状を基に、金型設計が可能である成形品の3Dモデル化を行っていく。③製造性考慮設計では、射出成形金型による樹脂成形を可能とすべく、構造解析を併用し、キャビティの設計を行う。④3D実体化による検証では、製造性考慮設計を終えたモデルを3Dプリンタによって実体化し、負荷試験による最適化の検証、破壊試験による構造体としての検証等を行う。

<3.3>研究対象の設定

本研究では、椅子を最適化設計の対象物とした。椅子を選定した理由は、要求仕様がJIS⁽²⁾で定められており扱いやすいこと、工業デザインの代表的な題材であり、形状に十分な自由度があることがあげられる。柔軟な設計案を創出するために、十分な設計自由度を確保する必要があるため、過剰な条件を設定しないものとした。具体的には、椅子の設計要件として、JIS⁽²⁾の静的強度試験に耐えられる強度を有して可能な限り軽量な形状であること、背もたれと座面のある単純な形状であること、射出成形を想定した製造性を考慮した形状であることに止めた。

4. トポロジー最適化について

<4.1> トポロジー最適化の原理

本研究で行うトポロジー最適化は、式(1)で定義される平均コンプライアンス $c(\rho)$ を式(2)の条件下で最小化する問題である。

$$c(\rho) = \mathbf{f}^T \mathbf{u} = \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} \quad (1)$$

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \leq V_0 \quad (2)$$

$$0 < \rho_i \leq 1 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{f}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{K}$ および V は、それぞれ荷重ベクトル、変位ベクトル、全体剛性マトリクス、および設計領域の体積である。 V_0 は、制約条件となる体積の値である。式(1)の平均コンプライアンスの最小化問題は、荷重が一定の場合は、荷重点における荷重方向変位の最小化に等しく、構造体の剛性を最大化することを意味する。

式(2)における ρ は各有限要素に配置された設計変数である。式(3)に示すように ρ は正規化された仮想的な材料密度と考えることができ、 $\rho=0$ の場合は空洞であることを表し、 $\rho=1$ の場合は材料が完全に充填されていることを表す。各要素における設計変数とマクロな材料物性との関係は、式(4)で示すように与える。

$$E = \rho^p E_0 \quad (4)$$

ここで、 E_0 は材料のヤング率、 p は中間的な材料密度に対するペナルティ係数である。

トポロジー最適化では、設計変数は各有限要素に設定するため、多くの設計変数を取り扱う必要がある。そのため、最適化を行うには目的関数の1階微分だけを用いて大規模な問題を解くことが可能な勾配法が適している。勾配法による最適化法には、最適性基準法、逐次線形計画法などがあり、中でも逐次凸関数近似法のひとつであるMMAが経験的によく用いられる⁽¹⁾。最適化の際に用いる目的関数および制約条件の設計変数に関する1階微分はそれぞれ式(5)および式(6)で与えられる。

$$\frac{dc}{d\rho_i} = -\mathbf{u}^T \frac{d\mathbf{K}}{d\rho_i} \mathbf{u} = -\mathbf{u}_e^T \frac{d\mathbf{K}_e}{d\rho_i} \mathbf{u}_e \quad (5)$$

$$\frac{dV}{d\rho_i} = V_i \quad (6)$$

ここに、 $\mathbf{u}_e$ および $\mathbf{K}_e$ はそれぞれ要素変位ベクトルと要素剛性マトリクスである。

図3は、トポロジー最適化のアルゴリズムのフローチャートを示す。有限要素法を用いて目的関数であるコンプライアンスと制約条件を求め、1階微分である感度を計算する。目的関数である平均コンプライアンスが最小となるよう許容設計領域内の密度分布を更新する。目的関数の変化量または反復回数などが設定した収束条件に達した段階でトポロジー最適化は終了する。

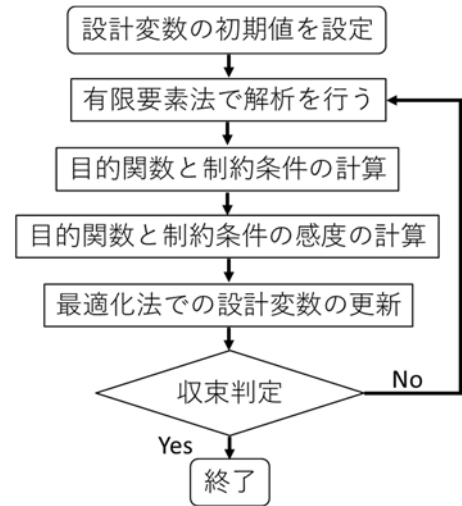


図3 トポロジー最適化のフローチャート
Fig.3 Flow chart of the topology optimization.

<4.2> 最適化の繰返しプロセスの検証

トポロジー最適化における、平均コンプライアンス最小化のプロセスを検証するために、MATLAB (MathWorks 社)を用いて簡易的な椅子のモデルに対して、トポロジー最適化を行った。最適化法は最適性基準法を用い、感度のフィルタリングを行った。また、体積を初期形状の30%以下となるように剛性最適化を行った。モデルの初期形状は高さ30 mm、幅20 mm、奥行き30 mmとし、座面と背もたれのなす角度は直角とした。荷重は座面に1100 N、背もたれに410 Nを負荷した。図4は、初期形状ならびに最適化の繰返し数が2、5および30回目における最適形状を示す。なお、図4の形状は設計変数が0.5以上の値をとる部分を表示している。また、図5は、最適化の繰返し回数による平均コンプライアンスの変化を示す。図4および図5に示されるように、最適化を行う回数の増加に伴い、平均コンプライアンスは急激に減少し、安定した最適形状が形成されていく。この例では目的関数は5回程度の反復でほぼ収束していることが分かる。30回目の反復を終了した際の目的関数の値は、初回の平均コンプライアンス54.67 Jに対して、約35分の1の1.58 Jであった。体積の制約条件を考慮すると、すべての要素について設計変数を基準に0.3の状態の値とした場合は、初期形状(体積100%)の平均コンプライアンスは1.48 Jとなる。この値を基準にとると、トポロジー最適化において、体積を30%に減少させながら平均コンプライアンスの増加を約6.5%に抑えた形状が得られたことになる。

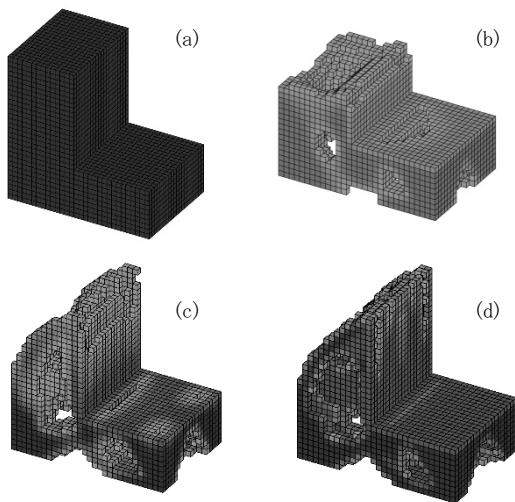


図4 設計変数 ρ の分布状態の変化 (a)初期形状、ならびに(b)2回目(c)5回目、および(d)30回目の最適化出力形状

Fig.4 Design variable distributions at (a)initial state, and the optimized output designs at (b)2nd, (c)5th and (d)30th iterations.

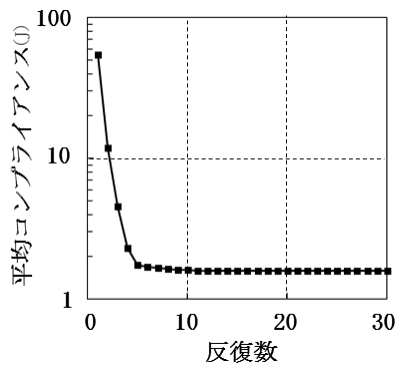


図5 目的関数である平均コンプライアンスと反復回数の関係

Fig.5 Relationship between the mean compliance as the objective function and the optimization iteration.

5. 樹脂成形品の最適化の工程

<5. 1>トポロジー最適化による最適形状の探索

<5. 1. 1>解析モデル設定と解析環境

図6は、トポロジー最適化を行う3Dモデルの模式図を示す。安定性を考慮して4ヶ所の脚を有する形状とした。JIS^②を参考に、座面および背もたれのそれぞれに、合力が1100 Nおよび410 Nとなる等分布荷重を負荷する状況を標準条件として設定した。座り心地を考慮して、座面と背もたれの角度はそれぞれ地面に対して6°および104°とした^③。トポロジー最適化は、FUSION360 (Autodesk 製) を使用して行った。設計領域、境界条件、および体積制約条件が最適形状に及ぼす影響を調べて、最終的な最適形状の探索を行った。収束条件は、設計変数の反復ごとの最大の変化量がある一定以下になったら停止するものとした。さらに、このトポロジー最適化の工程で得られた形状を、STL形式のデータ

で出力し、静的な構造解析を行った。解析に、NASTRAN (MSC software 製) を使用し、条件および荷重条件はトポロジー最適化を行った際の条件と同じとした。

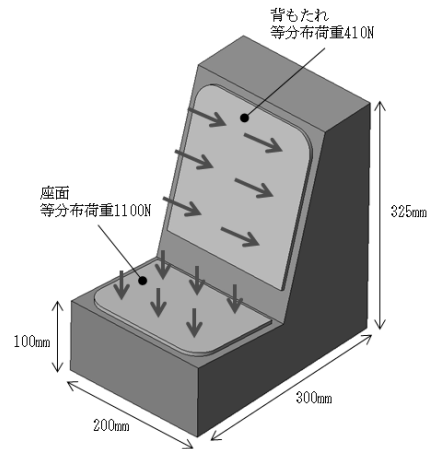


図6 トポロジー最適化を行う椅子の基本形状と荷重条件

Fig.6 A chair model and loading conditions for the topology optimization.

<5. 1. 2>固定位置の影響

椅子の固定位置がトポロジー最適化の出力形状に及ぼす影響を評価することを目的として、後ろ脚の位置を3パターンの条件に変更し、トポロジー最適化および構造解析を実施した。すなわち、後ろ脚の位置は、座面の下、座面の下から50 mm 後方および110 mm 後方の3条件とした。体積を元の形状の20%とするように設定した。図7は、各条件におけるトポロジー最適化で出力された形状および構造解析で得た最大変位量を示す。図より、後ろ脚の位置が後方へ移動するに伴い、背もたれの剛性が増加し、変位は減少している。そこで、変位が最も小さくなった座面下から110 mm 後方の位置に後ろ脚を固定して、次節以降の最適形状の探索を行うこととした。

<5. 1. 3>荷重の大きさおよびバランスの影響

座面と背もたれの荷重の大きさおよびバランスが、トポロジー最適化の出力形状に及ぼす影響を評価することを目的として、異なる荷重条件下において、トポロジー最適化を実施した。荷重条件は、標準条件 (座面 : 1100 N、背もたれ : 410 N)、標準条件の約1.8倍 (座面 : 2000 N、背もたれ : 760 N)、座面荷重のみを増加した場合 (座面 : 2000 N、背もたれ : 410 N)、背もたれの荷重のみを増加した場合 (座面 : 1100 N、背もたれ : 760 N) の4条件とした。図8は、各荷重条件におけるトポロジー最適化で出力された形状を示す。座面の荷重および背もたれの荷重を共に1.8倍にした場合である図8(b)は、標準条件図8(a) とほぼ同じ形状を得た。標準条件に対して座面荷重のみを増加させた場合、および背もたれの荷重のみを増加させた場合は、標準条件とは異なる形状が得られた。図8(c)に示すように、座面荷重を増加させた場合は、

座面後端から後ろの固定位置に脚がつながる形状となっている。一方、背もたれの荷重を増加させた場合は、図 8(d)に示すように、座面後端から前の固定位置に脚がつながる形状となっている。このことから、座面と背もたれの荷重のバランスは、座面と脚の形状のつながり方に大きく影響を及ぼしており、自由度の高い設計が可能であることが分かった。しかし、トポロジー最適化において複数の荷重条件を満たす最適形状を得ることは困難であることから、本研究では標準条件（座面：1100 N、背もたれ：410 N）の形状を基に最適化を進めていくこととした。

＜5. 1. 4＞体積制約条件の影響

体積制約条件は、トポロジー最適化の平均コンプライアンス最小化の過程において、設計領域の体積をどの程度まで減少させるかという割合を設定する条件である。前節までに設定した体積制約条件は、20%と設定しており、実際にどの程度まで小さく設定できるかを検討する必要がある。そこで、体積制約条件がトポロジー最適化の出力形状に及ぼす影響を評価することを目的として、体積制約条件の異なる条件下において、トポロジー最適化を実施した。図 9 は、体積制約が 20.0%、10.0%、7.5%および 5.0%の条件におけるトポロジー最適化で出力された形状および最大変位量である。図 9(c)に示されるように、体積制約を 7.5%とした場合は、座面から後方固定位置につながる部分は急激に体積減少することが分かる。体積制約を 5.0%にした場合は、座面から前方固定位置につながる部分もなくなった。加えて変位量が 50 mm 以上と急激に増加していることから、もはや構造体を維持できない、不完全な形状であるといえる。このように、体積制約条件が異なる場合は、トポロジー最適化の出力形状は大きく異なるものとなり、最大変位も急激に変化することが明らかとなった。

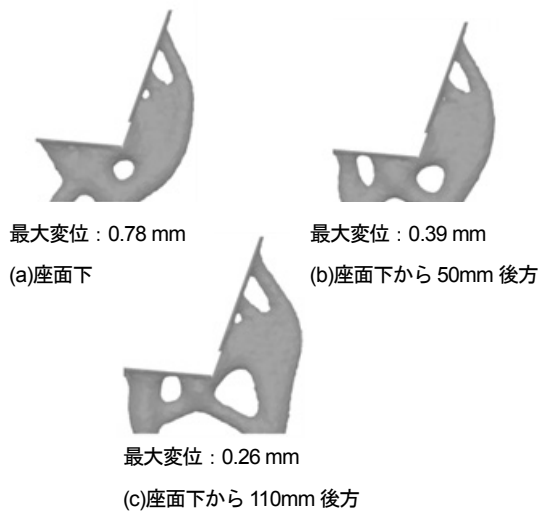


図 7 異なる固定位置により得られたトポロジー最適化形状

(a)座面下、(b)座面下から 50mm 後方、(c)座面下から 110mm 後方

Fig.7 Topology optimized shapes obtained under different fixed positions of chair hind legs:(a)vertically under the seat, (b)50mm behind, and (c)110mm behind.

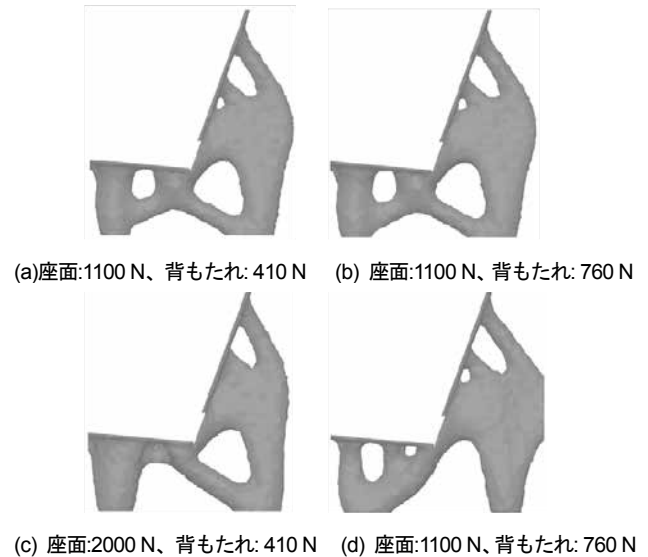


図 8 異なる荷重条件により得られたトポロジー最適化形状(a)座面:

1100N、背もたれ:410N、(b) 座面:2000N、背もたれ:760N、(c) 座

面:2000N、背もたれ:410N、(d) 座面:1100N、背もたれ:760N

Fig.8 Topology optimized shapes obtained under different loading conditions:(a)seat;1100 N, back rest;410 N, (b) seat;2000 N, back rest;760 N, (c)seat;2000 N, back rest;410 N, and (d)seat; 1100 N, back rest; 760N.

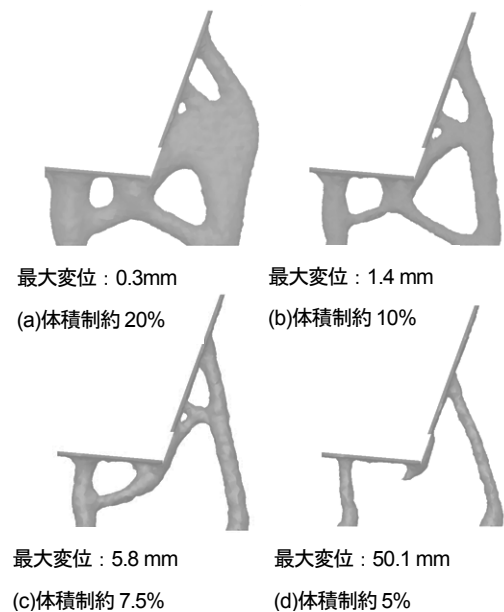


図 9 異なる体積制約条件により得られたトポロジー最適化形状

(a)20.0%、(b)10.0%、(c)7.5%、(d)6.5%

Fig. 9 Optimized shapes obtained under different conditions of

volume fractions:(a)20.0%, (b)10.0%, (c)7.5%, and (d)5.0%.

＜5. 1. 5＞トポロジー最適化形状の応力評価

トポロジー最適化によって軽量化のために、体積の制約条件下で平均コンプライアンスを最小化した形状が、構造体として

成立することを評価する必要がある。そこで最適化により得られた形状に対して構造解析を行った。荷重条件は、標準条件（座面：1100 N、背もたれ：410 N）とした。

表1は、異なる体積制約条件下により行われた相当応力の最大値を比較する。相当応力が最大値をとる箇所は、体積制約条件によって異なるものの、背もたれと座面との連結部、背もたれと背もたれを支える柱との連結部、座面と座面を支える柱との連結部であった。樹脂の積層造形を想定した場合、その代表的な材料である PA2200 の引張強度はカタログ値で 45 MPa である。表1により、体積制約条件が 5.0% の場合は、相当応力の最大値が 59 MPa であり、PA2200 の引張強度を超えてしまう。一方、体積制約条件が 7.5% の場合は、相当応力の最大値は引張強度の約半以下となるので、構造体として十分な強度を有していると考えられる。逆に、体積制約条件を 7.5% よりも大きくした場合は、過剰設計であるといえる。

さらに、実際に椅子の製品化においては、通常使用時の負荷だけでなく、想定外の荷重形態を考慮する必要がある。そこで、想定外の荷重に対する強度を評価する目的で、次の4つの荷重条件での解析、評価を実施した。すなわち、(a)背もたれ荷重を増加した場合（座面：1100 N、背もたれ：720 N）、(b)座面の荷重を増加した場合（座面：2000 N、背もたれ：410 N）、(c)座面後面から前方に 375 N を負荷した場合、(d)座面側面から 300 N を負荷した場合の4条件である。座面の後方および側面から負荷する形態は、JIS²⁾に規定されている脚の強度試験を参考に設定した。表2は、異なる荷重条件により得られた、相当応力の最大値比較である。表2により、いずれの荷重条件においても、相当応力の最大値は、PA2200 の引張強度の約半以下であることがわかる。

以上の結果より、体積制約条件を 7.5% とした場合の形状を最終的な最適形状とした。図 10(a)は、トポロジー最適化によって出力された最終形状を示す。標準条件（座面：1100 N、背もたれ：410 N）における最適形状は、他の荷重形態においても構造体として十分なものであったが、設定する条件によってはさらに、構造体として適切か否かの検討が求められる。

5. 2>3D-CAD モデリング

トポロジー最適化で出力される形状データは、主に STL 形式である。最適化の際には、メッシュに起因する凹凸が表面に形成されるので、このような STL 形式のデータを基に設計を進めることは困難である。そこで、設計変更が容易な 3D-CAD モデルへのデータ変換を行った。手順は、まず、三面図を参照しながら CAD 上で輪郭をトレースした。簡潔なモデリングとするため、構成面を可能な限り平面とし、かつ構成する境界線の数が少なくなるよう留意した。例えば、トレースする際、最適構造の凹凸の多い輪郭を正確に再現しようとせず、直線でトレースすることを心がけ、曲線は可能な限り作成しなかった。図 10(b)は、トレースした線を参照して 3D モデリングを行った形状を示す。

表1 異なる体積制約条件により得られた相当応力の最大値の比較

Table .1 Comparison of equivalent stresses obtained under different conditions of volume fractions.

体積制約条件	相当応力 (MPa)
20. 0%	1. 2
7. 5%	16. 6
5. 0%	59. 1

表2 異なる荷重条件により得られた相当応力の最大値の比較

Table .2 Comparison of equivalent stresses obtained under different loading conditions.

荷重条件	相当応力 (MPa)
標準条件	9. 8
a:座面 1100 N/背もたれ 720 N	22. 8
b:座面 2000 N/背もたれ 410 N	21. 9
c:座面後方から前方に 375 N	13. 4
d:座面側面から 300 N	10. 2

表3 3D-CAD モデル化および製造性考慮モデル化による相当応力の最大値の変化

Table .3 Comparison of equivalent stresses obtained by the 3D-CAD modeling and the model considering resin moldability.

荷重条件	相当応力 (MPa)	
	3D-CAD モデル	製造性考慮モデル
標準条件	9. 1	10. 5
a:座面 1100 N/背もたれ 720 N	17. 9	15
b:座面 2000 N/背もたれ 410 N	13. 6	19. 3
c:座面後方から前方に 375 N	6. 8	12. 2
d:座面側面から 300 N	9. 9	13. 3

5. 3>製造性考慮設計

樹脂製品については、実際の生産性を考慮すると、射出成形が可能であることが最も望ましい。そこで、3D-CAD モデルに基づいて射出成形で製造可能な形状を検討した。設計上考慮すべき課題は、抜き勾配等の金型構造に特有な形状を有すること、および樹脂成形時に不均一な冷却による反りやヒケ不良を回避すべく、5 mm 程度の均一な板厚構造にすることである。以上を踏まえ、図 10(c)は 3D-CAD モデルを基に製造性を考慮して設計したモデルの一例を示す。さらに、金型内の樹脂流動性に問題がないかを確認するために、Moldflow(Autodesk 社)を用いて流動解析を実施した。

5. 4>各工程最適化モデルにおける平均コンプライアンスの検証

トポロジー最適化によって最小化された平均コンプライアンスが、3D-CAD モデリングや製造性考慮モデルの過程を経て、どの程度変化したかを調べ、一連の実用的な最適化設計プロセスが有

効に行われたかを検証した。表 4 は、図 10 の 3 種類のモデル形状に対して、構造解析を実施し、座面と背もたれの等分布荷重および節点変位から平均コンプライアンスを求めて比較したものである。

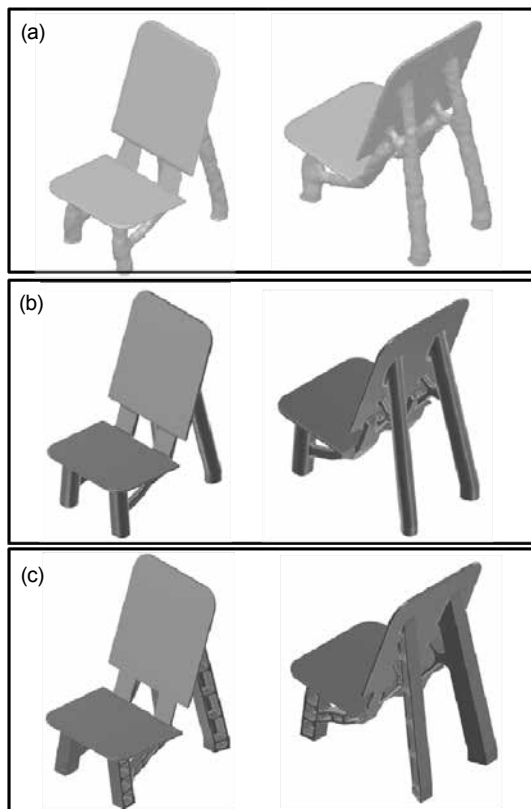


図 10 実用的な最適化設計プロセスにおける各工程モデル形状の比較

(a)トポロジー最適化形状、(b)3D-CAD モデル、(c)製造性考慮モデル

Fig. 10 Comparisons of some optimization models in a practical optimization design process; (a)direct shape of topology optimization, (b) 3D-CAD model, and (c)model considered for resin moldability.

表 4 実用的な最適化プロセスにおける各種モデル形状の平均コンプライアンス値の比較

Table 4 Comparison of mean compliances among some optimization models in a practical optimization resin process.

	a: トポロジー最適化出力形状	b: 3D-CAD モデリング	c: 製造性考慮モデル
平均コンプライアンス (J)	1. 411	1. 361	1. 463
体積 (cm ³)	794. 5	878. 6	705. 7

トポロジー最適化によって得られた形状を 3D-CAD モデル化した場合には、平均コンプライアンスは、3.5%減少というレベルに止められたが、体積が 794.5 cm³ から 878.6 cm³ へと 10.6%増加する結果となった。そこで、初期状態の 7.5%という体積制約条件

を満足させた上で、製造性を考慮したモデルを作成したところ、平均コンプライアンスを、3.6%の僅かな増加に抑えることができた。

6. 3D 実体化による最適化設計の検証

＜6. 1＞3D プリンタによる実体化

図 10 の(b)および(c)のモデル形状に対して、積層造形装置(EOS GmbH 製、Formiga P100)を用いて実体化を行った。図 11 は、製作した試験体の外観を示す。造形可能な寸法に制限があるため、実際の 50%の縮尺での製作を行った。また、X 線 CT による検査の結果、試験体は指示通りの寸法に造形され、内部には 1 mm 以上の大きな欠陥が存在しないことを確認した。

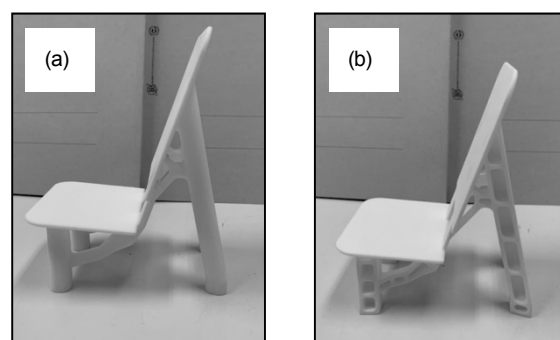


図 11 3D プリンタによる実体化の例 (a)3D-CAD モデル、(b)製造性考慮モデル
Fig.11 Example of materialization by 3D printing from (a)the 3D-CAD model and (b)the model considered for resin moldability.

＜6. 2＞静的負荷試験によるコンプライアンスの検証

これまで述べた実用的な最適化設計プロセスにおいて得られた各種モデルについて、設計通りのコンプライアンスが実現されているかを検証するために、3D プリンタによる実体化した試験体に対して静的負荷試験を行った。図 12 は、静的負荷試験の座面の負荷試験の外観を示す。押し治具と試験体の間には実際の接触状態を模擬するためのウレタンフォーム（厚さ 13 mm）を、試験体と底面の間にはすべりを抑制するためのゴムシート（厚さ 1 mm）を設置した。背もたれの静的負荷試験において、背もたれの面に垂直に荷重を加えるために、椅子を傾けた状態で試験体の座面と土台をクランプで固定した。また、座面および背もたれの変位量を計測するために、伸び計を設置した。試験体は、設計モデルの半分の縮尺で製作してあるため、弾性体の相似則により計算した荷重を負荷した。静的負荷試験を実施した結果、規定の繰返し負荷の後にも破損等の異常が認められないことから、製造性考慮モデルにおいて当初の目的である、JIS⁽²⁾の静的負荷試験に適合しているものと判断した。

次に負荷試験による変位量と解析による変位量を比較してコンプライアンスの設計が適切に行われていることを確かめた。表 5 は、同じ箇所において、負荷試験における伸び計による変位量と解析によって得られた変位量を比較する。解析の使用物性値については、樹脂の積層造形の代表的な材料である PA2200 のカタログ値を参照している。試験変位については、10 回目荷重時の弾性域における荷重 - 変位曲線を用いて評価することにした。結果として、座面 1100 N、背もたれ 410 N の標準条件の負荷時において、変位誤差は背もたれで 15.5%、座面で 6.3%となった。以上より、コンプライアンスを維持しつつ、製造性を考慮したモデルが作成できることを確認した。

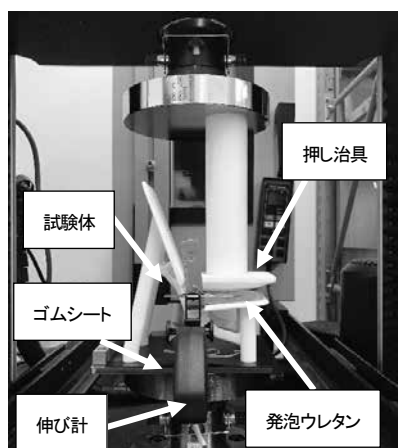


図 12 静的負荷試験の座面の負荷試験の外観
Fig.12 Overview of static loading test of the seat.

表 5 同一箇所における負荷試験による伸び計による変位量と解析による変位量の比較

Table .5 Comparison of measured displacement by the loading test and analytical displacement at the same point.

荷重条件 (標準条件)	試験変位 (mm)	解析変位 (mm)
背もたれ (410N)	2.76	2.33
座面 (1100N)	1.10	1.03

<6.3>静的破壊試験による構造解析結果の検証

弾性体の範囲を超えて、最大負荷まで負荷を行う静的破壊試験を実施した。表 6 は、破壊時の最大荷重と変位の結果を示す。また、図 13 は、製造性設計モデルにおける試験時の割れの様子と解析結果を比較したものを示す。座面への負荷、背もたれへの負荷、いずれにおいても破壊箇所は構造解析によって得られた応力集中部と一致していた。以上より、構造体としての設計が適切に

行われていることを検証できた。

表 6 静的破壊試験の結果

Table .6 Results of fracture static tests.

荷重条件	形状	最大荷重時の変位(mm)	最大荷重(N)
座面	試験結果	14.56	6342.9
	製造性考慮モデル	10.18	3896.0
背もたれ	3D-CAD モデリング	19.14	655.2
	製造性考慮モデル	18.27	673.8

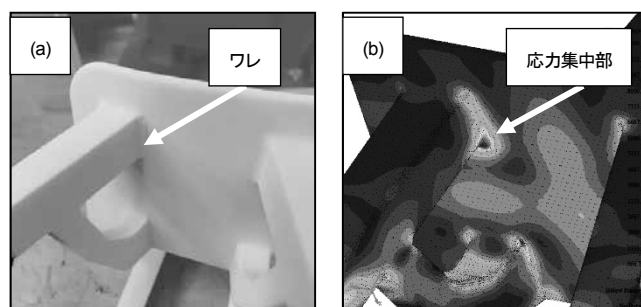


図 13 製造性考慮モデルにおける試験時の割れの様子と解析結果との比較
(a)座面負荷時の割れの様子、(b)解析結果

Fig.13 Comparison of cracking by the fracture test and the corresponding analysis result in the model considered for resin moldability:
(a) cracking under the seat, (b) the corresponding analysis result.

7. 結言

本研究では、一般的な構造体として椅子を例にとり、トポロジー最適化を活用した実用的な設計手法について検討した。本設計手法は、①トポロジー最適化形状の提案、②3D-CAD モデル化、および③製造性考慮設計のプロセスにより構成される。固定位置、負荷形態、体積制約等の多くの条件を考慮してトポロジー最適化を行い、構造体として成立しうる形状を見いだした。最終的に得られた形状について、3D プリンタを用いた実体化を経て、静的負荷試験によるコンプライアンスの検証を行った。

文 献

- (1) 西脇眞二 他：計算力学レクチャーコース トポロジー最適化、丸善出版 (2013)。
- (2) JIS S1203：1998, 家具—いす及びスツール—強度と耐久性の試験方法。
- (3) 花岡利昌 他：人間工学, Vol. 2, No. 5 (1966), pp. 30-38.
- (4) K.Svanberg, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, No. 5 (1987), pp. 359-373.

「外観検査用画像処理の自動最適化に関する研究」グループの研究活動風景



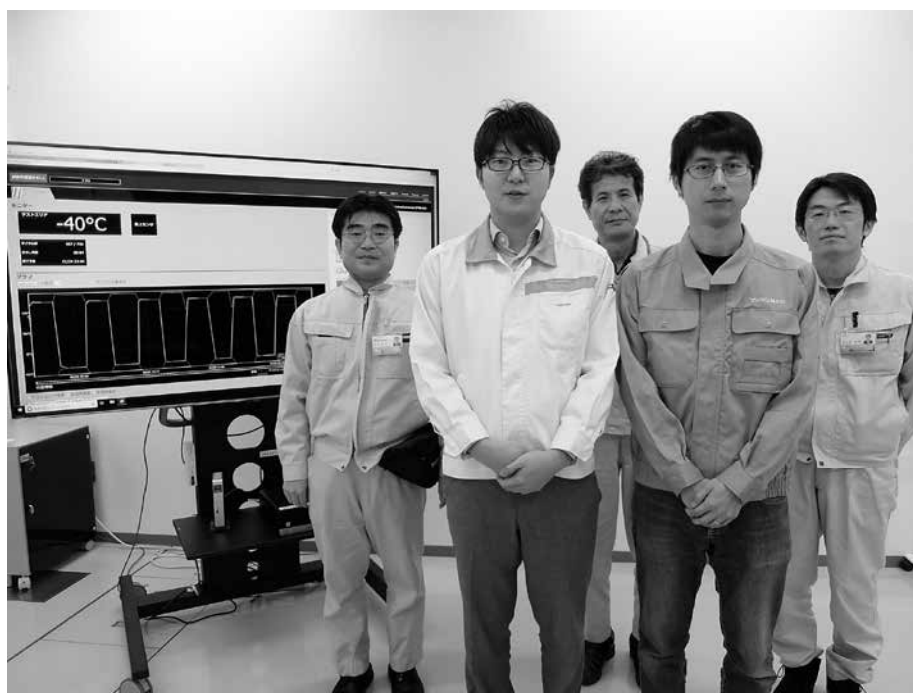
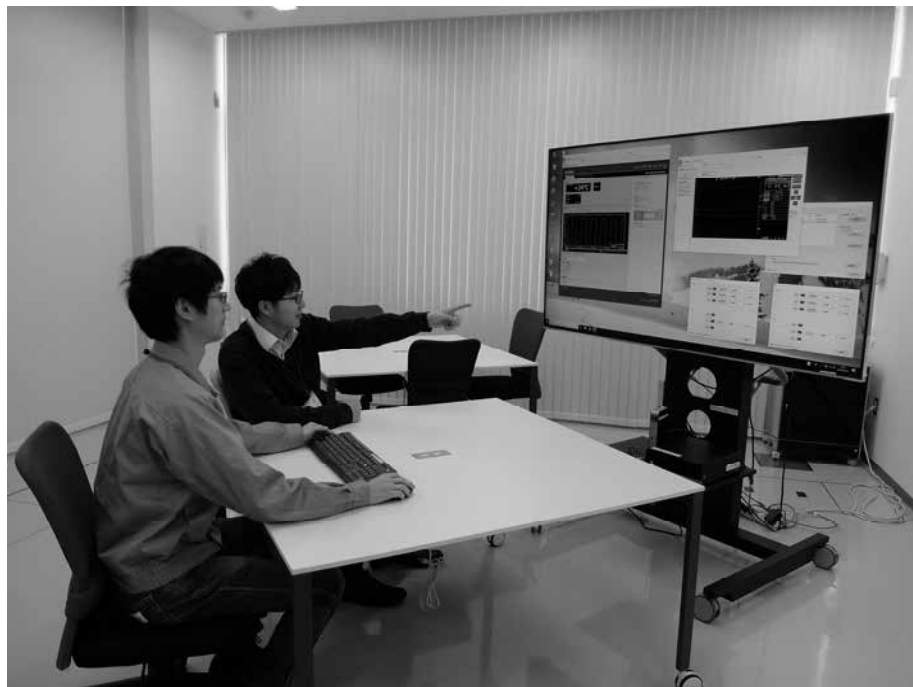
「生産現場への行動認識及びマルチエージェントシミュレーションの適用」グループの研究活動風景



「フレキシブル薄膜二次電池の基礎研究」グループの研究活動風景



「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」グループの研究活動風景



「CAE の構造最適化を用いた設計手法に関する研究」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

- 33年間の研究テーマ数：206テーマ（昭和62年度～令和元年度）
- 参加研究員延べ人数：383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・ファイバー複合材パネに関する研究

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㈱）

◎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㈱）、谷上英樹（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

7. レドックス型太陽発電システムの開発

市川良雄・大橋伸一（富山軽金属工業㈱）、三井清隆（㈱タナカエンジニアリング）

長谷川益夫（富山県林業技術センター木材試験場）

◎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㈱）

◎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（㈱タカギセイコー）、田島正康（㈱タナカエンジニアリング）

田中 篤（北陸電気工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 鍛造成形の簡易シミュレーションに関する研究

松井裕昭（㈱タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. レドックス型太陽発電システムの開発（2）

市川良雄（富山軽金属工業㈱）、田畑裕信（中越合金鋳工㈱）、三井清隆（㈱タナカエンジニアリング）、

長谷川益夫（富山県林業技術センター木材試験場）

◎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㈱）、森田裕之（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、富山県立大学工学部

5. 多孔質シリコンの形成に関する研究

石川秀人（北陸電気工業㈱）、安田純子（コーセル㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 高輝度蓄光性蛍光板の開発

佐野仁一（東洋化工㈱）、二見泰雄（三協アルミニウム工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

☆平成9年度（第11回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、18名）

1. レドックス型太陽発電システムの開発（3）

市川良雄（富山軽金属工業㈱）、田畑裕信（中越合金鋳工㈱）、野中義夫（㈲トヤマ技術開発研究所）、
長谷川益夫（富山県林業技術センター木材試験場）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 複数のロボットによる協調制御の研究（2）

森田裕之（立山アルミニウム工業㈱）、渡辺暁信（㈱タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

3. 生活環境用臭センサの開発

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

4. 電力変換用圧電セラミックストランズの開発

堀井一宏（コーセル㈱）、柳川 新（立山科学工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 局部的レーザー処理による形状記憶合金膜アクチュエータの開発

丹保哲也（北陸電気工業㈱）、野上拓也（㈱タナカエンジニアリング）、山田浩美（東洋化工㈱）、
滝川健太郎（金沢大学工学部）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 電気自動車の開発

坂本雅美（㈱斉藤製作所）、高橋 聡（㈱タナカエンジニアリング）、藤木和幸（㈱タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成10年度（第12回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、11名）

1. 圧電素子を用いた制振機構の研究

稲垣 聡（北陸電気工業㈱）、渡辺暁信（田中精密工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. コーティング工具の密着性向上に関する研究

野上拓也（田中精密工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 生活環境用においセンサの開発（2）

星野昌則（コーセル㈱）、南 政克（北陸電気工業㈱）、山田浩美（東洋化工㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

4. 電気自動車の開発（2）

坂本雅美（㈱斉藤製作所）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 微細放電加工の研究

太田光則（㈱斉藤製作所）、橋本 明（田中精密工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

6. 電磁シールド材の基礎研究

高橋伸忠（㈱タカギセイコー）、福田隆之（コーセル㈱）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成11年度（第13回）研究テーマと研究参加者（8テーマ、14名）

1. エンジンの動弁機構における構造解析及び強度評価

島村和孝（田中精密工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. コーティング工具の密着性向上に関する研究（2）

高田智哉（田中精密工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 深層水及び藻類を利用した太陽光発電の基礎研究

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

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

4. 山岳遭難者探索システムの探索性能向上に関する研究

前田智博（立山科学工業㈱）、高瀬 洋（県警察本部）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

5. インテリジェントにおいセンサの研究

小森一哉（北陸電気工業㈱）、石川勝巳（コーセル㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

6. 微細放電加工の研究（2）

太田光則（㈱斉藤製作所）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

7. 機能性高分子を用いたアクチュエータの開発

小中稔正（YKK㈱）、山田浩美（東洋化工㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

8. プラスチック上のハードコーティング技術の研究

高橋伸忠（㈱タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成12年度（第14回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、8名）

1. 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㈱）

◎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㈱）、谷口真也（コーセル㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

3. 高摩擦係数材料の研究

高田智哉（田中精密工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

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（㈱タカギセイコー）、前田健二（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

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㈱）、山田浩美（東洋化工㈱）

◎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㈱）、高橋伸忠（㈱タカギセイコー）、野田耕司（三協アルミニウム工業㈱）、
石井 雅（富山県土木部）

◎指導機関：工業技術センターP J・中央研究所

2. 分子機能材料を用いた光電池の研究開発

濱口 誠（コーセル㈱）

◎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㈱）

◎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㈱）

◎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㈱）、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㈱）、川上浩美（東洋化工㈱）

◎指導機関：工業技術センターP J・機械電子研究所

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

桑原大輔（北陸電気工業㈱）

◎指導機関：工業技術センターP J・機械電子研究所、富山大学工学部、J S T

8. アルミ表面解析技術の高度化に関する研究

澤井 崇（武内プレス工業㈱）

◎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㈱）

◎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㈱）、水原 崇（コーセル㈱）、米嶋勝宏（東洋化工㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・P J・中央研究所

3. MEMSを応用した高精度温度センサの開発

今村徹治（北陸電気工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・P J、富山大学工学部

4. アルミ飲料容器の形状評価手法の開発

清水 歩（武内プレス工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・P J

5. 超小型4サイクルエンジンの開発

杉森雅一（エヌアイシ・オートテック㈱）、中西智英（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

6. 滑雪機構の改善に関する研究

河井牧夫（田中精密工業㈱）、野田耕司（三協アルミニウム工業㈱）

◎指導機関：工業技術センターP J・中央研究所

7. 圧電トランスを用いたマイナスイオン発生装置の開発

山田英子（立山科学工業㈱）

◎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㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

2. 生活習慣病等体質診断用DNAチップの検出精度向上に関する研究（3）

碓井洋平（立山科学工業㈱）、中山 均（コーセル㈱）、中林俊幸（東洋化工㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

3. 薄膜超低温度特性抵抗器の開発

桑原大輔（北陸電気工業㈱）

◎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㈱）

◎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(株)）、碓井洋平（立山科学工業(株)）、深沢正樹（立山マシン(株)）、
宝泉重徳（東洋化工(株)）

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

3. インクジェット用機能性インクの開発

松田杏子（立山科学工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. 小型燃料改質器を用いた燃料電池の開発

澤田篤宏（コーセル(株)）、石見雅美（(株)斉藤製作所）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

5. 薄膜低温度特性抵抗器の開発（2）

桑原大輔（北陸電気工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部

6. 環境適応型インテリジェント窓の開発

堀 剛文・松田 力（立山アルミニウム工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

7. 高摩擦係数材料の研究（3）

上田修一（田中精密工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・生活工学研究所・機械電子研究所

☆平成17年度（第19回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、10名）

1. 小型燃料改質器を用いた燃料電池の開発（2）

小杉京平（コーセル(株)）、太田光則（(株)斉藤製作所）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

2. 交流法を用いたバイオセンサの開発（2）

上谷聡史（コーセル(株)）、深沢正樹（立山マシン(株)）、中田守人（東洋化工(株)）

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

3. 薄膜低温度特性抵抗器の開発（3）

津幡 健（北陸電気工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部

4. 圧電材料による起電力素子の研究

猪田明宏（立山科学工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

5. 高摩擦係数材料の研究（4）

山下剛史（田中精密工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・生活工学研究所・中央研究所

6. インクジェット技術の応用研究

田中裕美（立山科学工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

7. 大型色素増感太陽電池の開発（2）

廣田和也（(株)タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成18年度（第20回）研究テーマと研究参加者（9テーマ、11名）

1. メタボリック症候群関連遺伝子検出装置の開発

三宅正浩（コーセル株）、深沢正樹（立山マシン株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県新世紀産業機構

2. マイクロTASチップの開発

嶋 将伸（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・PJ推進担当・機械電子研究所

3. 陽極酸化皮膜を用いたナノ構造体の開発

清水裕也（株タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・PJ推進担当

4. インクジェット法による電子回路パターンの作製

篠原おりえ、田中裕美（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

5. 小径穴仕上げ加工

高岡利尚（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センターPJ推進担当・中央研究所・機械電子研究所

6. ナノポーラス構造薄膜の作製とセンサーへの応用研究

中野貴之（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部

7. 高温耐熱型サーミスタの開発

山野 博（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

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・PJ推進担当

☆平成19年度（第21回）研究テーマと研究参加者（8テーマ、10名）

1. 電子回路用ウェットエッチング液の研究

曾根宏信（燐化学工業株）

◎指導機関：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・PJ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㈱）
◎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㈱）
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所
7. 陽極酸化皮膜を用いたナノ構造体の応用研究
清水裕也（㈱タカギセイコー）
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・PJ推進担当
8. マイクロTASチップの開発（2）
石村和雄（コーセル㈱）
◎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㈱）、梅原洋平（コーセル㈱）
◎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㈱）、木下正之（立山科学工業㈱）
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・生活工学研究所
3. ダイカスト金型材料の接合技術の開発
花崎裕美（田中精密工業㈱）、古川万晃（㈱タカギセイコー）
◎富山県工業技術センター中央研究所・PJ推進担当、富山大学芸術文化学部
4. 局部加熱によるプラスチック表面の高機能化
吉田康子（㈱タカギセイコー）
◎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㈱）
◎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（㈱タカギセイコー）、中田裕一（北陸電気工業㈱）
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所
2. ハンダ付着性導電塗料を用いた試作基板作製法の開発
熊田泉実（コーセル㈱）、日出嶋宗一（立山マシン㈱）
◎富山県工業技術センター機械電子研究所
3. X線CTを用いた実寸計測に基づくCAE技術の研究
山根幸治（コーセル㈱）、細川修宏（㈱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㈱）
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学芸術文化学部

5. スクリーン印刷法による低コスト色素増感太陽電池の開発

斉藤洋輔（コーセル(株)）、若林 傑（立山科学工業(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

☆平成22年度（第24回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、8名）

1. ミニロボット群による水田防除草システムの開発

上田将志（コーセル(株)）、古川和明（立山科学工業(株)）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

2. CMM（三次元測定機）用簡易検査器の開発

広地信一（立山マシン(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所、富山大学芸術文化学部

3. 高耐摩耗性を有する熱可塑性樹脂複合材料の開発

須田誠（田中精密工業(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所・企画管理部

4. CAEによる仮想振動試験の信頼性評価への適用

澤田修平（コーセル(株)）、細川修宏（(株)タカギセイコー）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

5. 光触媒による自立型水質浄化浮遊物の開発

高見和志（コーセル(株)）、新川翔平（北陸電気工業(株)）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部・中央研究所

☆平成23年度（第25回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、7名）

1. CMM（三次元測定機）用簡易検査器の開発（2）

広地信一（立山マシン(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所、富山大学芸術文化学部

2. LED照明のEMC・ノイズ対策に関する研究

平田哲郎（コーセル(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

3. 積層鋼板の磁気特性に関する研究

堀田哲朗（田中精密工業(株)）、杉本考行（コーセル(株)）

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

4. シリコンアーマチュアデバイスの研究開発

木澤裕志（立山科学工業(株)）、岩滝幸司（北陸電気工業(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所、富山大学大学院理工学研究部

5. 精密切削加工による表面機能創成に関する研究

藤井美里（(株)タカギセイコー）

◎富山県工業技術センター中央研究所

☆平成24年度（第26回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、10名）

1. MDF木屑からのバイオエタノール抽出技術の開発

羽根新太郎（三協立山(株)）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

2. マグネシウムイオン2次電池に関する研究

作道千枝（燐化学工業株）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

3. ナノインプリントを応用した微細電極パターンの形成に関する研究

大門貴史（北陸電気工業株）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部

4. 小水力発電システムの研究

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

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部

5. 受動的歩行ロボットの開発

水上慎太郎（コーセル株）、若崎祥人（立山マシン株）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

6. 積層鋼板の磁気特性に関する研究（2）

藤岡英示（田中精密工業株）

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

7. SW電源の電磁ノイズのシミュレーション

野口 拓（コーセル株）

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

☆平成25年度（第27回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、7名）

1. 接着剤を用いない異種材料の超音波接合に関する研究

猪原 悠（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、元工業技術センター

2. スイッチング電源における電磁界ノイズシミュレーション実用化の研究

野口 拓（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

3. 単層カーボンナノチューブに関する研究

大門貴史（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

4. 極低容量水力発電システムの研究

住和大輔（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. マグネシウム燃料電池の開発

安田 剛（三協立山株）、山崎鉄平（株タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

6. ナノインプリント技術による金属ナノドットパターン形成に関する研究

升方康智（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・企画管理部、県商工労働部

☆平成26年度（第28回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、12名）

1. トイレからの漏えい音低減に関する研究

中村将士（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 切削加工シミュレーションに関する研究

水野輝章（田中精密工業株）、若林武司（立山マシン株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所、元工業技術センター

3. 3Dプリンタを利用した簡易的なブロー成形樹脂型の製作に関する研究

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

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

4. エネルギーハーベスター利用システムに関する研究

浦山陽平（コーセル株）、中田智康（北陸電気工業株）

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

5. 量子ドット増感太陽電池の研究

山本尚人（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

6. 接着剤を用いない異種材料の超音波接合に関する研究（2）

大浦秀剛（三協立山株）、山崎鉄平（株タカギセイコー）、林 達規（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、元工業技術センター

☆平成27年度（第29回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、9名）

1. トイレからの漏えい音低減に関する研究（2）

杉森雄平（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

2. 3Dスキャナーを用いた形状測定と変形解析への適用

山崎諭史（コーセル株）、内山 肇（三協立山株）、金山侑司（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究

山本貴之（コーセル株）

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

4. ハイブリッド樹脂粉末を用いた樹脂の特性改善

熊澤周士（株タカギセイコー）、黒河歩美（立山マシン株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

5. ドリル切削加工における精度向上に関する研究

石澤剛士（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

6. アルミ缶内面の腐食防食評価技術の高度化

筒井英明（武内プレス工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

☆平成28年度（第30回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、9名）

1. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究（2）

今井航平（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

2. 振動の簡便な測定法・低減法の開発

林 大清（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

3. 金属積層造形の基礎と造形物の評価に関する研究

永田直也（三協立山(株)）、滝沢将史（コーセル(株)）

◎指導機関：工業技術センターものづくり研究開発センター・中央研究所

4. 容器用実用アルミ材の耐食性および腐食反応の解析に関する研究

深川裕之（武内プレス工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

5. エンドミル加工での工具寿命向上に関する研究

中嶋 謙（田中精密工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・生活工学研究所・中央研究所

6. ウェアラブル電源の開発

関口貴彬（コーセル(株)）、天野久美子（北陸電気工業(株)）、坂井友樹（立山科学工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

☆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)斉藤製作所）

◎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. 工具寿命の机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

槇 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

○ 会 員 企 業

令和2年3月11日現在（50音順）

	企 業 名	代表者名	運営委員	電話番号
1	コーセル(株)	谷川 正人	万尾 達也	076-432-8151
2	(株)斉藤製作所	齊藤 行男	相馬 優	076-468-2727
3	三協立山(株)	山下 清胤	宇野 清文	0766-20-2322
4	(株)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)	高野 恵子	瀧森 幸浩	076-455-2525
6	武内プレス工業(株)	武内 繁和	澤井 崇	076-441-1856
7	立山科学工業(株)	水口 勝史	森 喜代志	076-483-3088
8	立山マシン(株)	宮野 兼美	東 一博	076-483-4123
9	田中精密工業(株)	金森 俊幸	高田 智哉	076-451-7651
10	東洋化工(株)	中田 守人	中田 守人	076-475-2125
11	長柄鉄工(株)	長柄 大介	長柄 大介	0766-22-3170
12	北陸電気工業(株)	多田 守男	小川 明夫	076-467-1125
13	燐化学工業(株)	大塚 肇	稲生 吉一	0766-86-2511
事務局：(公財) 富山県新世紀産業機構内 〒930-0866 富山市高田 529 TEL:076-444-5607 (二口友昭、源卓也)				

○ 研 究 会 員

氏 名	所 属	役 職	学 位	電話番号
研究幹事				
石 黒 智 明	産業技術研究開発センター企画管理部	企画調整課 上席研究員	博士(工学)	0766-21-2121
岩 坪 聡	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	デジタルものづくり課長	博士(工学)	0766-21-2121
岩 本 健 嗣	富山県立大学工学部	准教授	博士(政策・メディア)	0766-56-7500
佐 山 利 彦	産業技術研究開発センター機械電子研究所	所 長	博士(工学)	076-433-5466
関 口 徳 朗	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	製品・機能評価課長		0766-21-2121
高 林 外 広	産業技術研究開発センター	次 長	博士(工学)	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
西 村 克 彦	富山大学学術研究部都市デザイン学系	教 授	理学博士	076-445-6011
林 千 歳	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	機能素材加工課長	博士(工学)	0766-21-2121
本 保 栄 治	産業技術研究開発センター機械電子研究所	機械情報システム課長	博士(工学)	076-433-5466
松 田 敏 弘	富山県立大学工学部	教 授	博士(工学)	0766-56-7500
溝 口 正 人	産業技術研究開発センター企画管理部	部 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～)	

○顧 問 (50音順)

會澤 宣一 ((大) 富山大学・工学部長)
 島崎 慎一 ((公財) 富山県新世紀産業機構・専務理事)
 谷野 克巳 (元工業技術センター所長)
 鳥山 素弘 (産業技術研究開発センター所長)
 中島 範行 ((大) 富山県立大学・工学部長)
 二口 友昭 ((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長)
 町野 利道 (CS ポート (株)・代表取締役社長)

(様式 1)

「若い研究者を育てる会」入会申込書

企業名 (事業所名)
代表者名
住所・電話番号・ファクシミリ番号 〒 TEL : FAX :
連絡担当者所属・役職・氏名・E-mail address
上記のとおり貴会へ入会を申し込みます。 年 月 日 企業名 (事業所名) 印 「若い研究者を育てる会」 殿

◎「若い研究者を育てる会」では会員企業を随時募集しています。

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

☆申し込み先

〒930-0866 富山市高田 5 2 9

(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 5 2 9 (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 佐山 利彦 (公財)富山県新世紀産業機構 源 卓也
発 行 年 月 日	令和 2 年 3 月 1 1 日
印 刷 所	富山スガキ株式会社

＊無断転載を禁ずる．非 売 品．