

令和5年度

(第36回)

若い研究者を育てる会研究発表会

研究論文集

令和6年3月11日(月)

於：ホテルグランテラス富山

若い研究者を育てる会

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

本書は下記の研究機関の指導のもとに作成された。

記

富山県産業技術研究開発センター
富山大学学術研究部工学系
富山大学先進アルミニウム国際研究センター
富山県立大学工学部

ごあいさつ

会長 高木章裕

「若い研究者を育てる会」第36回研究論文集の発刊にあたり、一言ごあいさつを申し上げます。

当会では、昭和62年の発足より、その時々社会課題の解決に向けた最先端の研究と、次世代のイノベーションを担う人財の育成に取り組み、今日に至るまでその伝統が脈々と受け継がれてまいりました。本年度も参加研究者の熱意が込められた論文集を発刊することができましたのは、ひとえに富山県産業技術研究開発センターをはじめとする各研究機関並びに日頃より当会の運営に携わっていただいている会員企業及び研究者各位の多大なお力添えの賜物であると、心より感謝申し上げます。

さて、経営の世界においてイノベーションのメカニズムを説明する際に重要視される要素として「知の探索」と「知の深化」が挙げられます。一方、当会の設立目的は、「研究活動の実践を通じ、科学技術に対する深い洞察力と広い視野、そして研究への強い信念をもった若い研究者を育てること」とされており、この「広い視野」と「深い洞察力」は、まさにイノベーションの原点である「知の探索」と「知の深化」に合致するものといえます。研究者の皆さんは、所属組織における日々の業務を通じて、洞察力を背景とした「知の深化」を遂げられています。そして当会は、そのような知と、それとはまた別の知が巡り合うことでイノベーションが生まれるという、そのプロセスに身を置くことのできる絶好の場です。皆さんは、1年間の活動を通してこのことを十分に実感され、研究へのより確固たる信念を育まれたことと思います。

知と知のぶつけ合いや掛け合わせによって生み出された研究成果の数々は、今後更なる探索と深化を経て、世界と対等に渡り合える強い日本企業を築き上げてくれるのではないかという希望を感じさせるものです。会員企業として当会に携わり、微力ながら皆さんの活動を応援できたことを心より嬉しく思うとともに、皆さんが当会で得た「知」を糧として、更なる成長と飛躍を遂げられることを願ってやみません。

次年度も、若いマインドを持った研究者が時代のニーズに適ったテーマを選定し、先輩方に負けないユニークな研究に挑戦されることを楽しみにしております。当会は引き続き、研究者と会員企業にとってイノベーションの出発点となれるよう各種事業を進めてまいります。関係各位におかれましては、今後とも当会の活動により一層のご理解をいただきますとともに、変わらぬご指導ご鞭撻を賜りますようお願いして、発刊のごあいさつとさせていただきます。



研究の概要

「若い研究者を育てる会」(以下、「若研」)の研究発表会は今年度で36回目を迎えた。本論文集は「若研」に参加する企業(現在の会員企業数12社)と会員企業の若手技術者が5つの研究テーマについて、令和5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(4企業参加)が実施してきた研究成果をまとめたものである。ここでは、今年度実施した5テーマの研究概要を述べる。

富山県産業技術研究開発センター ものづくり研究開発センター 水野 渡

①「リグニン系バイオマス製品の開発に関する研究」の研究グループ(参加企業1社)では、地球温暖化や化石資源の枯渇といった環境問題の解決のため、バイオマス資源を活用することを目的に、植物中に比較的多量に含まれているリグニンを用いた製品の開発を目標として、バイオマス資源からのリグニン抽出方法の最適条件の検討と抽出リグニンを混合した塗料の評価を行った。

リグニン抽出方法の検討では、もみ殻を用いた場合、165℃でリグニンの分解が十分に進行するのに対し、木粉では200℃でも二量体の含有量が多いことから、木粉はもみ殻に比べてより高温条件で反応が進行する傾向が見られた。また、抽出物中の芳香族化合物の種類は草本系であるもみ殻の方が多いため、もみ殻は針葉樹であるスギ木粉よりもリグニンが複雑な構造であることが分かった。実用化に向けた検討として、市販塗料とリグニンを混合したものについて評価を行ったが、本検討では耐候性や密着性が向上する傾向は得られなかった。



富山県産業技術研究開発センター ものづくり研究開発センター 寺澤孝志

②「小型マイクロ波無線給電システムの開発」の研究グループ(参加企業2社)では、これからの現実社会とデジタルの一体化した世界におけるものづくりを念頭に、2.45GHz帯マイクロ波無線給電技術のIoTデバイスへの普及を目的に、要素デバイスである受電アンテナと整流回路を検討した。受電アンテナでは、伝送路の電磁界シミュレーションを行いマイクロストリップ(MS)アンテナを設計し、放射特性と利得を測定/評価した。整流回路では、シングルシャント型整流回路を作製し、自動測定系を構築して、高周波電力から直流電力への変換効率を測定/評価した。また、変換効率の向上を目指し、インピーダンスシミュレーションを行いマッチング回路を追加した整流回路2を作製/評価した。さらに、MSアンテナと整流回路を機能的に接続し、アンテナで受電したマイクロ波を整流変換し直流電力を得るレクテナを作製/評価したところ、整流回路2で作製



したレクテナでは良好な出力電圧と変換効率を示し、IoT デバイスの駆動に目途が立った。レクテナの更なる効率化には、受電アンテナのアレイ化と整流回路におけるマッチング回路の重要性が示唆された。IoT デバイスへの 2.45GHz 帯マイクロ波無線給電技術の実用化に近づいた。

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) 鍋澤浩文

③「プラスチック製品の性能向上のための設計技術と評価に関する研究(2)」の研究グループ(参加企業 1 社)では、FRP 製品の構造解析の精度向上を目的として、均質化解析に用いる樹脂とガラスの物性を FRP 基板

の材料試験結果から逆解析により求める手法を開発した。逆解析に要する計算時間を短縮するため、有限要素均質化法を再現できる代理モデルを構築した。これを用いた最適化計算から樹脂とガラス繊維の物性値を求めたところ、樹脂の弾性係数やガラスのポアソン比で文献値と大きな差異が認められた。計算値を FRP 基板の均質化解析に用いたところ、連続繊維材、不連続繊維材に関わらず、文献値の物性値より実験値に近い値が得られた。これらの値をハット型成形品の剛性解析に用いたところ、不連続繊維／不連続繊維サンプルにおいては文献値の均質化解析で得られた解析結果よりも実験値



に近い結果が得られ、本手法の有効性を確認することができた。一方で、連続繊維／不連続繊維においては文献値の解析結果と同程度の誤差にとどまったが、基板の成形工程に起因する不連続繊維材の分布状態によるものと推定され、今後検証が必要である。

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) 鍋澤浩文

④「衝撃応答特性の測定および解析による電子部品の信頼性向上」の研究グループ(参加企業 1 社)では、電源装置の耐衝撃性向上を目的に、電源搭載部品で耐衝撃性に劣るフェライトコアについて、CAE 解析と落下衝撃試験により、破損原因の特定から改善策の立案と絞り込み、改善モデルによる検証までを行った。製品に宇宙ミッションの要求仕様値を上回る衝撃を負荷し破面観察したところ、E コア外脚部付け根を起点として亀裂が進行していることが推定され、それを裏付けるように CAE 解析においても同一箇所で最大主応力を示したことから、耐衝撃性向上には E コア割れの防止が有効と考えられた。4 つの改善策について CAE で検討したところ、ヒートシンク追加モデルとコア位置反転モデルにおいて E コアの最大主応力の低減が確認されたため、これらについて改善モデルを試作した。衝撃試験を行ったところ、ヒートシンク追加モデルは機械的破損や電気的特性の異常が見られず、改善策として有効であった。コア反転タイプは、E コアの割れは低減した一方で、製品の衝撃試験で見られなかった基板-I コアの接着剥離がみられたため、基板-I コア間の接着力を含めた検討が今後の課題として残った。



富山県立大学 工学部 情報システム工学科 博士(政策・メディア) 岩本健嗣

⑤「製造業におけるデジタルツインを活用した業務改善」の研究グループ(参加企業 2 社)

では、製造業に対する業務改善を目的にデジタルツインの活用方法の検証を行った。本研究では、製造現場と販売現場での業務の改善として、2つのユースケースについて検討した。

製造現場においては生産ライン工程における仕掛品の停滞について着目した。センサを用いて成形機の稼働状態や作業者の動線データ、成形品の重量データをセンシングし、仮想空間上に生産ラインを再現することによって水すまし作業者に最適なフィードバックを与える手法を検討した。

次に、販売現場においては提案ツールとして普及が進むバーチャルショールームの拡張に着目した。本研究では、デジタルツインを用いて、仮想空間上のバーチャルショールームに遮蔽物の変化に応じた日射の影響を表現し、現実空間上で家具表面温度をユーザーにフィードバックを与えることによる最適な提案手法の構築を目指す。ヘッドマウントディスプレイと実験装置を組み合わせることで、映像に応じて実空間の机上面温度が変化する没入感の高いシステムを開発した。ユーザーに本システムを体感させた実験により、視覚と触覚を組合せる提案手法は有効な手段となり得ることが確認できた。



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実施した36年間に221テーマの研究を実施しており、修了生は405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す。

研究グループの構成

I. リグニン系バイオマス製品の開発に関する研究の研究グループ

研究担当者 **天池 夏希 (三協立山株)**

○出村奈々海 (産業技術研究開発センターものづくり)

☆水野 渡 (産業技術研究開発センターものづくり)

II. 小型マイクロ波無線給電システムの開発の研究グループ

研究担当者 **高嶋 翔太 (コーセル株)**

田開 孝祐 (北陸電気工業株)

○奈須野雅明 (産業技術研究開発センターものづくり)

宮田 直幸 (産業技術研究開発センターものづくり)

室 慧悟 (産業技術研究開発センターものづくり)

☆寺澤 孝志 (産業技術研究開発センターものづくり)

III. プラスチック製品の性能向上のための設計技術と評価に関する研究 (2) の研究グループ

研究担当者 **田中 和馬 (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)

吉江真太郎 (産業技術研究開発センター機械電子研)

☆鍋澤 浩文 (産業技術研究開発センター機械電子研)

IV. 衝撃応答特性の測定および解析による電子部品の信頼性向上の研究グループ

研究担当者 **林 怜汰 (コーセル株)**

松田 修人 (コーセル株)

○吉江真太郎 (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)

中村 陽文 (産業技術研究開発センター機械電子研)

☆鍋澤 浩文 (産業技術研究開発センター機械電子研)

V. 製造業におけるデジタルツインを活用した業務改善の研究グループ

研究担当者 **諸岡 哲史 (三協立山株)**

中村 宙夢 (株タカギセイコー)

☆岩本 健嗣 (富山県立大学工学部)

註：○印は各研究グループのチーフ

☆印は研究幹事

目 次

I. リグニン系バイオマス製品の開発に関する研究	1
1. 緒言	1
2. リグニンについて	1
3. バイオマス原料からのリグニン抽出 最適条件検討	1
4. 実用化に向けた検討	5
5. 結言	7
II. 小型マイクロ波無線給電システムの開発	8
1. 緒言	8
2. 実験方法	8
3. 実験結果・考察	12
4. 結言	14
III. プラスチック製品の性能向上のための設計技術と評価に関する研究 (2) ..	15
1. 緒言	15
2. 研究対象	15
3. FRP 基板の材料物性値評価	16
4. ハット型成形品の剛性評価	20
5. 結言	21
IV. 衝撃応答特性の測定および解析による電子部品の信頼性向上	23
1. 緒言	23
2. 研究対象	23
3. 現状評価	24
4. CAE 解析	26
5. 改善策の立案及び実施	27
6. 結言	30
V. 製造業におけるデジタルツインを活用した業務改善	31
1. 緒言	31
2. 製造業におけるデジタルツイン	31
3. システム設計と実装	33
4. 実験手法及び実験結果	34
5. 結言	36

○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-24
○入会申込書	-----	付-26

I. リグニン系バイオマス製品の開発に関する研究

Research on the Development of Lignin-based Biomass Products

天池 夏希 出村 奈々海 水野 渡

AMAIKE Natsuki DEMURA Nanami MIZUNO Wataru

Abstract

In recent years, the use of biomass resources has been promoted to solve environmental problems such as global warming. Plants contain about 20 - 35% lignin, but its chemical structure varies depending on the type of plant and growing conditions, so its utilization is currently limited. In this research, the ultimate goal was to develop products that use lignin, a component derived from plants, and in this study, technologies for extracting lignin from biomass resources and investigated its basic physical properties were investigated. There was a tendency for the reaction to proceed with wood flour at higher temperatures than with rice husk. In addition, due to differences in the structure of lignin, the types of aromatic compounds that are lignin decomposition products in the extract are higher in herbaceous rice husks, and the lignin has a more complex structure than in cedar wood flour, which is a coniferous tree. When this extract was mixed with a paint and the weather resistance was evaluated, the performance of the resin paint deteriorated due to the mixture of the extract. On the other hand, it was found that wood paints can have roughly the same degree of weather resistance even if they are mixed with extracts.

1. 緒言

近年、地球温暖化や化石資源の枯渇といった環境問題の解決のため、バイオマス資源が注目され、その活用を目的とした研究が進められている。今回は、中でも比較的多量に含まれているリグニンに着目し、その工業的な利用を検討した。リグニンは、芳香族高分子の構造を有し、植物中の主成分であるセルロースやヘミセルロースを繋ぐ接着剤のような役割を担っている。リグニンは一般的に植物中に20~35%程度含まれているものの、難分解性であること、植物種によって得られる化合物やその割合が異なることなどから、工業的な利用が困難であることが課題となっている。現在は、主にパルプの漂白時に排出されるリグニンを含む溶液である黒液がサーマルリサイクルの燃料として利用されているが、今後は石油などの代替資源としてケミカルリサイクルによる利用が求められると考えられる。

そこで本研究では、植物由来の成分であるリグニンを用いた製品の開発を最終目標とし、バイオマス資源からのリグニン抽出方法の最適条件の検討を行った。また実用化に向けた検討として、抽出したリグニンを市販塗料に混合した塗料について評価を行った。

2. リグニンについて

前述のとおり、リグニンは芳香族環を持つ高分子化合物であり、モノリグノールと呼ばれるモノマーが重合した構造を有する。このモノリグノールに対応する基本骨格はグアイアシル核(G核)、シリングル核(S核)、p-ヒドロキシフェニル核(H核)の3種類

が存在する⁽¹⁾⁽²⁾(表1)。構造と各植物に含まれる基本骨格は一般的にスギなどの針葉樹がG核、ケヤキなどの広葉樹はG核とS核、稲などの草本系はG核とS核、H核を有している。この基本骨格の割合は、同じ植物においても発育状況や採取部位によって異なる。尚且つラジカルカップリングにより様々な重合反応が起こることから、最終的には非常に複雑で不均一な構造となることが知られている。

表1 植物中に含まれる基本的なリグニン骨格
Table 1 Basic skeleton of lignin in plants

構造式	G核	S核	H核
植物種			
針葉樹	○	—	—
広葉樹	○	○	—
草本系	○	○	○

3. バイオマス原料からのリグニン抽出 最適条件検討

< 3. 1 > バイオマス原料

バイオマス原料として、草本系であるもみ殻と、針葉樹であるスギ木粉(以下、木粉)2種を用いて検討した。本検討で用いた材料について表2に示す。なお、もみ殻は入善町で栽培されたコシヒカリのものを、木粉は岸田木材(株)(氷見市)より購入した

ものを用いた。

もみ殻は稲の脱穀時に排出される非可食部であり、富山県においても年間約4万トンが排出されている。現在は農業用資材や燃料として利用されることもあるが、廃棄される割合も多いことから、未利用バイオマス資源の活用に向けた検討として選定した。

木粉については、スギが日本の森林面積全体の約20%を占めており、比較的安定して入手できること、表1に示す通り含有する基本骨格が1種類であることから、低分子化したリグニンを利活用する場合に概ね均一な構造を持つ芳香族化合物が得られる可能性が高く、工業的な活用法が見出し易いと考えられるため選定した。

表2 使用するバイオマス資源
Table 2 Biomass resources

	もみ殻	木粉
植物種	草本系	針葉樹
品種	コシヒカリ	スギ
リグニン含有率 (文献値)	約20%[3]	25~35%[2]
粒径	< 1.8mm	< 500 μ m
含水率	8%	9.7%

< 3. 2 > 実験・解析方法

本検討では二相系オルガノソルブ法にて各原料からのリグニン抽出の最適条件の検討を行った。この方法は原料中に含まれるリグニンを加水分解によって低分子化させ、この分解物を有機溶媒へ抽出し、未可溶のセルロース、ヘミセルロースと分離する方法である。水/有機溶媒の二相系にすることで、加水分解と同時にリグニン分解物を有機溶媒に抽出することが出来るため、再重合を抑制する効果があり、また酸やアルカリ試薬を用いないことからリグニン自体が化学変性し難いといったメリットがある。また反応に用いる有機溶媒は水と相分離し、リグニン分解物の溶解度が高いことが望ましいとされており、参考とした先行研究⁽⁴⁾の結果より本検討では1-ブタノールを使用することとした。

原料、純水、1-ブタノール（特級、富士フィルム和光純薬株）を混合したサンプルを図1(a)の加圧反応容器に入れ、恒温器にて表3に示す条件で反応を行い、抽出物をブタノール相に抽出した。加圧反応後の一例を図1(b)に示す。得られる抽出量により異なるが、抽出物は主に褐色を呈していた。加圧反応後、ブタノール相

を分離し、エバポレーターにて2度濃縮乾燥させ、得られた抽出物を115°C 雰囲気下で6時間乾燥させ、原料と抽出物の重量比を抽出率として算出した。

表3 反応条件
Table 3 Extraction condition

水/ブタノール比 (mol/mol)	固液比 (w/w)	反応温度 (°C)	反応時間 (h)
4:1	30:1	120~250	2~16

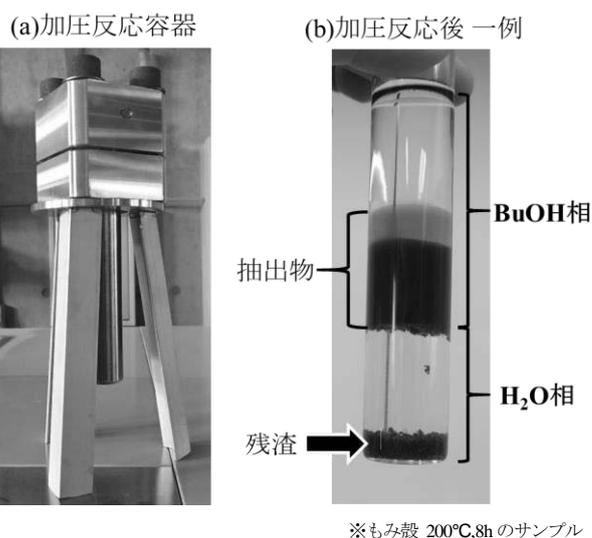


図1 加圧反応容器及び加圧反応後のサンプル
Fig. 1 Autoclave and sample after pressure reaction

得られた残渣については、日本分光製 フーリエ変換赤外分光光度計「FT/IR-6700」（以下、FT-IR）を用いて分析を行った。

得られた抽出物については、サーモサイエンティフィック製 ガスクロマトグラフ質量分析計（以下、GC-MS）を用いて、抽出物に含まれる化合物の同定を行った。表4に示す条件で測定し、得られたピークと保持時間を基に、データベース「NIST MS Search 2.0」にて各化合物の同定を行った。

表4 GC-MS 測定条件
Table 4 GC-MS measurement conditions

使用装置	サーモフィッシャーサイエンティフィック製「ISQ」 フロンティアラボ製「EGA/PY-3030D」
熱脱着条件	300°C
ガスクロマトグラフ条件	
カラム	Restek RTX-5MS (長さ30m×内径0.25mm×膜厚0.25 μ m)
注入口温度	300°C
カラム温度	40°C (2min保持) → 昇温: 10°C/min → 300°C (32min保持)
トランスファーライン温度	300°C
キャリアガス	He (1.0 mL/min)
スプリット比	50
質量分析条件	EI法 (イオン過電圧: 70eV、質量範囲m/z: 30-700)

＜3. 3＞ 最適条件検討 結果

各反応条件で得られた抽出率の関係を図2に示す。もみ殻については反応温度が165°C以上で長時間反応させることで抽出率の向上が見られた。一方、200°C以上では一定時間以上反応させることで抽出率が一定となった。

木粉については、165°Cでの反応において8時間まで抽出率の顕著な差が見られなかったため、反応時間を16時間としたが、抽出率に大きな変化は見られなかった。なお200°C以上では8時間以上反応させることで抽出率の向上が見られた。

表2より、各原料のリグニン量はもみ殻が約20%、木粉が25~35%であることから、残渣割合が極端に低い条件についてはリグニン以外の成分が分解し、その分解物が液相に抽出されている可能性があると推測される。

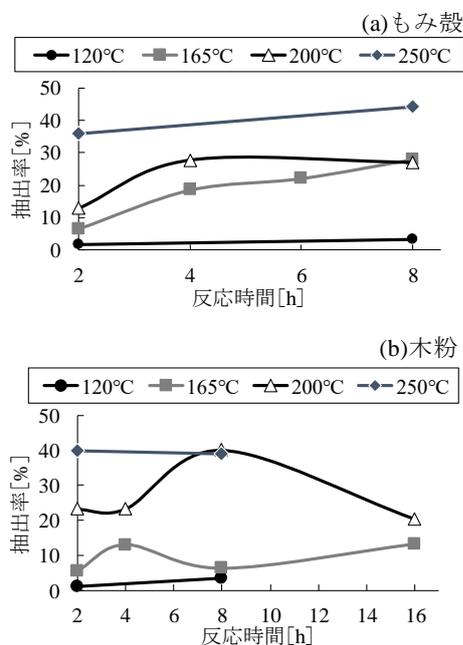


図2 反応時間の影響
Fig. 2 Effect of reaction time

また、反応前の原料はどちらも淡い褐色を呈しているが、各反応の残渣は褐色~黒色に変色しており、特に高温で反応させた水準においては黒く変色することに加え、残渣割合が減少する傾向が見られた。図3に120~250°Cで8時間反応させた時の抽出率と、残渣の割合の関係を示す。なお残渣の割合は反応前の原料と、反応後に回収した残渣の重量比から算出した。

また、反応前の原料と250°C、8時間の反応後の残渣のIRスペクトルを図4に示す。セルロース・ヘミセルロース・リグニンは、加圧反応によって加水分解が進行する以外にも、熱による変性や

溶媒の置換反応等が起こっていると考えられるため正確な同定は出来ないが、反応前後のピークを比較するとどちらの原料も特に1060 cm⁻¹付近のセルロース・ヘミセルロース由来のピーク⁽⁶⁾が大きく減少していることが確認できる。この測定結果より、セルロース・ヘミセルロースが分解し、液相に抽出されている可能性があると考えられる。

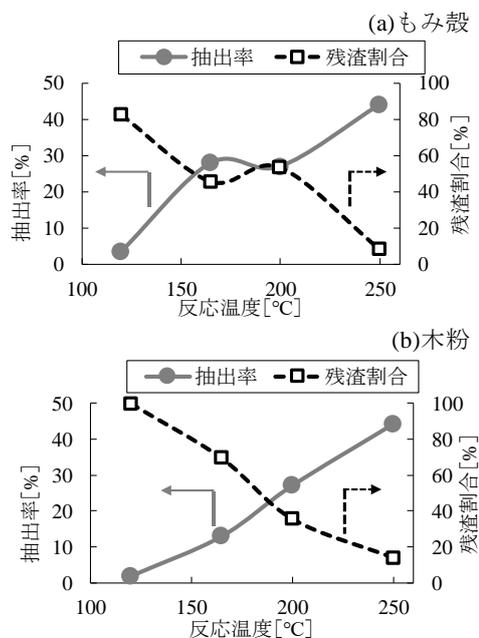


図3 抽出率と残渣割合
Fig. 3 Extraction rate and residue ratio

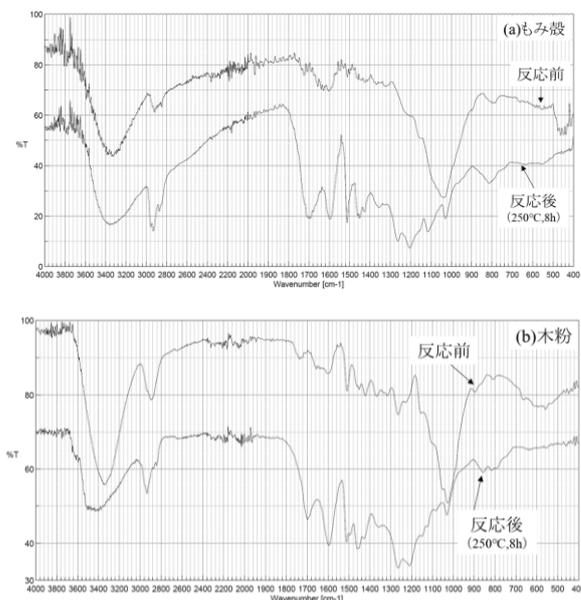


図4 残渣のIRスペクトル
Fig. 4 IR spectrum of residue

< 3. 4 > GC-MS による抽出物の分析

各条件で得られた抽出物を GC-MS にて測定し、分析を行った。なお、今回得られた結果は 300°C 以下で気化する化合物に限定されるため、300°C 以上で気化する化合物に関しては検出されておらず、測定未実施である。

本検討で得られた代表的な芳香族化合物と対応する GC-MS の保持時間を図 5 に示す。どちらの原料にも共通して、抽出物には芳香族化合物の単量体、多量体が含有していた。検出された多量体の多くは二量体であり、保持時間 20 分以降で確認された。

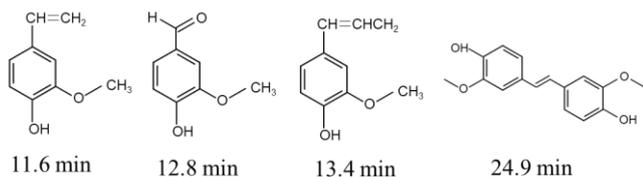


図 5 GC-MS で同定された芳香族化合物と保持時間

Fig. 5 Aromatic compounds identified by GC-MS and retention time

まず、もみ殻について 120~250°C で 8 時間反応させた時の抽出物の GC-MS の結果を図 6,7 に示す。図中のピーク上に記載した丸印は、芳香族化合物であることを示す。200°C 及び 250°C の条件では多数のピークが検出され、脂肪族化合物の割合が増加した。これは主成分であるセルロース、ヘミセルロースの分解開始温度が約 240°C⁽⁶⁾、約 180°C⁽⁶⁾であることから、リグニンの分解が進行すると同時に主成分の分解も進行し、これらの低分子化したものが有機溶媒中に抽出されたためと考えられる。

図 6,7 の結果より、脂肪族化合物の割合が低い 165°C を最適温度とした。

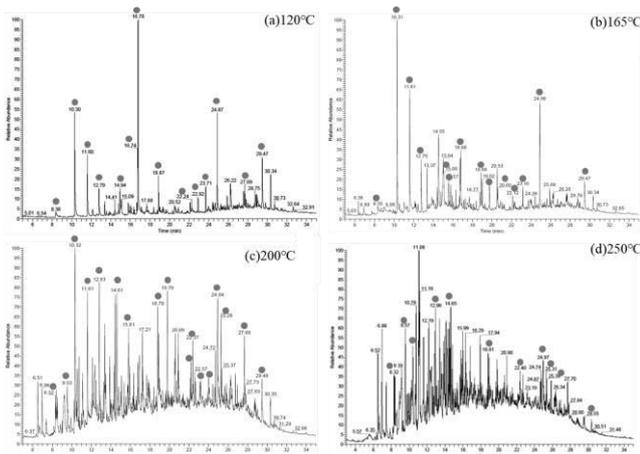


図 6 もみ殻から得られた抽出物の GC-MS スペクトル
(反応時間 8 時間、GC 保持時間 5~35 分)

Fig. 6 GC-MS spectrum of extract obtained from rice husk
(pressure reaction time 8 h, retention time 10-35min)

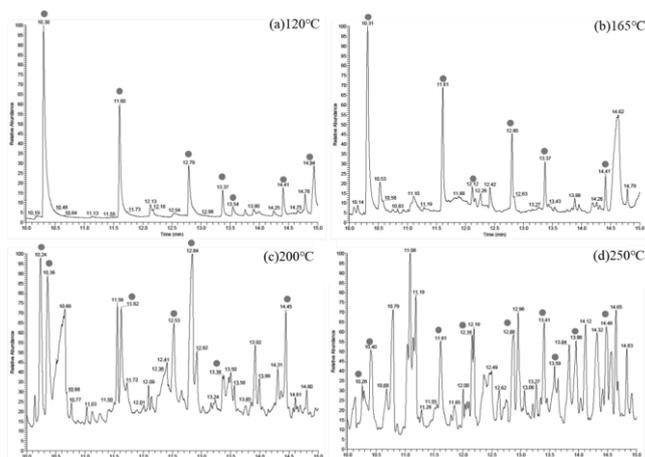


図 7 もみ殻から得られた抽出物の GC-MS スペクトル
(反応時間 8h、保持時間 10~15 分)

Fig. 7 GC-MS spectrum of extract obtained from rice husk
(pressure reaction time 8 h, retention time 10-35 min)

次に、165°C で 4 時間または 8 時間反応させた時の結果を図 8 に示す。保持時間 10.5 分や 14.5 分で検出されている脂肪族化合物 (図 8 ▲のピーク) は、反応時間が 4 時間の時に 8 時間よりもピークが小さいことから、反応時間を短縮することで抽出物中に含まれる脂肪族化合物の割合を減少させることが出来ると考えられる。

以上の結果および図 2 の結果を合わせ、もみ殻の最適条件を反応温度 165°C、反応時間 4 時間とした。

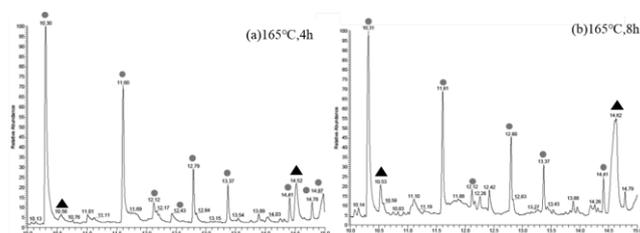


図 8 もみ殻から得られた抽出物の GC-MS スペクトル
(反応温度 165°C、保持時間 10~15 分)

Fig. 8 GC-MS spectrum of extract obtained from rice husk
(Pressure reaction temperature 165°C, retention time 10-15 min)

次に木粉の結果を示す。もみ殻の最適条件であった 165°C、4 時間と同条件で得られた木粉からのリグニン抽出物の結果と、同条件のもみ殻の結果を図 9 に示す。芳香族のピークの量のもみ殻と比較して木粉の方が少ない傾向にあった。またもみ殻は単量体のピークが最大であったが、木粉は二量体のピークが最大であったことから、抽出率の結果も踏まえ、木粉に対しては 165°C では温度が低く加水分解反応が進行し難い条件であったと推測される。なお高温で反応させることでリグニンの分解は

進行しやすくなるが、250°C で反応させた場合はもみ殻同様に残渣の割合が極端に低くなることからセルロース、ヘミセルロースの分解物が有機相に抽出されている可能性が高い。そのため165°Cと200°C条件を比較し、最適な温度を決定することとした。

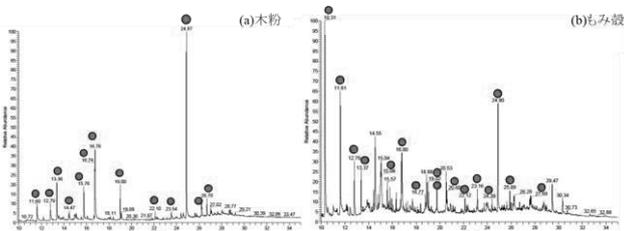


図9 木粉ともみ殻からの抽出物のGC-MSスペクトルの比較
(反応温度165°C、反応時間4時間、保持時間10~35分)

Fig. 9 Comparison of GC-MS spectra of extracts from wood flour and rice husk
(Reaction temperature 165°C, reaction time 4 h, retention time 10-15 min)

165°Cまたは200°Cで4時間反応させた時の抽出物の分析結果を図10に示す。得られるピークの大きさに違いはあったが、同定できた化合物に顕著な差はなく、セルロース、ヘミセルロース由来のピークもほとんど検出されなかった。

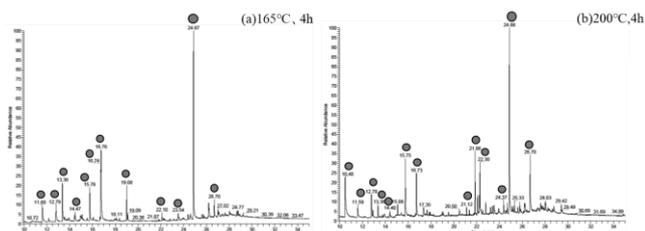


図10 木粉から得られた抽出物のGC-MSスペクトル
(反応時間4時間、GC保持時間10~35分)

Fig. 10 GC-MS spectrum of extract obtained from wood flour
(Reaction temperature 165°C, reaction time 4 h, holding time 10-15 min)

次に、反応温度200°C、反応時間が2時間及び4時間の結果を図11に示す。時間を変化させても得られる化合物は概ね同じであった。もみ殻の結果も踏まえ、反応時間が短いほうがセルロース・ヘミセルロースの分解が抑えられると考え、木粉の最適条件を200°C、2時間とした。

木粉については165°Cと200°Cで抽出率が10%程度違っていたが、GC-MSの結果が概ね同じであった理由として、抽出物中に300°C以上で気化しない化合物が含まれていたためであると考えられる。GC-MSの分析結果から、芳香族化合物の二量体を多く検出していることから、リグニンの多量体が残存していると推測される。また、加圧反応温度が200°Cであることから、もみ殻と

同様にセルロース・ヘミセルロースの分解物が含まれている可能性があると考えられる。

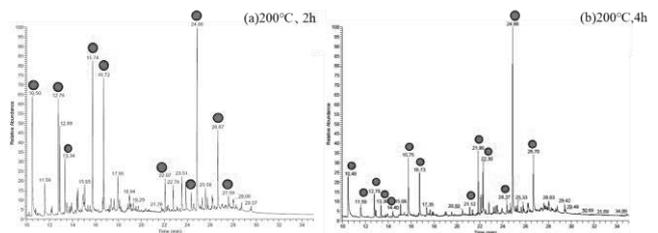


図11 木粉から得られた抽出物のGC-MSスペクトル
(反応温度200°C、GC保持時間10~35分)

Fig. 11 GC-MS spectrum of extract obtained from wood flour
(Reaction temperature 200°C, retention time 10-15 min)

< 3. 5 > リグニン抽出最適条件の検討

2種類のバイオマス原料からのリグニン抽出について、高温条件や長時間での反応において、リグニン分解物以外に主成分である糖(セルロース・ヘミセルロース)の分解も進行し、有機溶媒に抽出される傾向が見られた。原料により適切な温度や時間は異なるが、もみ殻のほうが木粉よりも低温条件で糖由来の成分が抽出される傾向にあった。またGC-MSの結果より、もみ殻では得られる芳香族化合物の種類が木粉よりも多かった。これはもみ殻に含まれるリグニンの基本骨格が3種類と複雑な構造であったためと考えられる。

各結果を踏まえ最適条件はもみ殻が反応温度165°C、反応時間4時間、木粉が反応温度200°C、反応時間2時間とした。

4. 実用化に向けた検討

建材などに使用する塗料の基材は、アクリル樹脂やポリウレタン樹脂などといった石油由来の樹脂を含むものが多い。そこで樹脂成分の代替品としてリグニン抽出物を利用し、バイオマス度を上げることで、環境にやさしい塗料として利用できる可能性が考えられる。本検討では実用化に向けた研究の1つとして、リグニン抽出物と市販の塗料を混合した塗料について評価を行った。

< 4. 1 > 実験方法

本検討で使用した2種類の塗料の詳細を表5に示す。抽出物は濃縮乾固しているため、固体のまま塗料と混合すると溶解しない可能性があったことから、エタノール:アセトン混合溶液(10:1)で溶解し、抽出物が10 mass%となるように塗料と混合した。その後刷毛を用いて2度塗布し、乾燥後に超促進耐候性試験(以下、耐候性試験)にて塗料の劣化形態を確認した。木材用塗料の基材には木材試験片を、樹脂用塗料の基材にはASA樹脂及びABS樹脂を使用した。

耐候性試験には、岩崎電機製メタルハライドランプ式促進耐候性試験機「アイスーパーUV テスター W-161」(以下、S-UV)を使用した。S-UVでは太陽光の約10倍の紫外線を発するランプを採用しており、且つ温湿度条件が設定可能であることから、屋外での環境を人工的に再現可能で短時間で劣化を確認できるため、S-UVで試験を実施することとした。試験条件詳細を表6に示す。

劣化の指標として、試験24時間毎に目視及び拡大観察による外観評価と、色調の変化を確認した。表面の観察にはキーエンス製デジタルマイクロスコープ「VHX-7100」、色調の測定はコニカミノルタ製色彩色差計「CR-400」を使用した。

表5 使用した塗料
Table 5 Paint and varnish

	屋外木材用	樹脂用
塗料種	油性	水性
タイプ	浸透性	造膜性
販売元	大阪ガスケミカル	大日本塗料
商品名	キシラデコール	サンデーペイント
色調	白	無色透明

表6 S-UV試験条件
Table 6 S-UV test conditions

照度	150 mW/cm ²
照射時温度	63℃
照射時湿度	50%
サイクル条件	照射4時間 ⇄ 結露4時間
試験時間	48時間

まず木材用塗料の塗布後の色差及び耐候性試験後の色差の結果を表7に示す。

抽出物を含有した塗料については、塗布した段階で茶褐色を呈した。また耐候性試験48時間において、塗料の塗布に関わらず基材である木材自体が茶褐色に変色し、最終的には概ね同じ色味となった。本試験においては、抽出物を混合しても塗料性能に顕著な差はなく概ね同等の結果が得られたが、基材である木材の変色により詳細な変化を確認できなかったため、試験条件等の検討が必要であると考えられる。

次に樹脂用塗料の塗布後の色差及び耐候性試験後の色差の結果を表8.9に示す。木材用塗料と同様、抽出物と混合した塗料は茶褐色を呈していた。

耐候性試験結果について、どちらの樹脂試験片においても24時間で表面の塗料が剥がれ落ちたことで、色差が大きく変化したと考えられる。また試験48時間で、抽出物を含有した塗料については、拡大観察で塗料に亀裂が見られた(図12)。この結果から、抽出物を塗料と混合させることで塗料の性能が低下する結果となった。抽出物が均一に混合できていなかったことや、塗料と

の混合時に、溶媒にて抽出物を溶解させているが、この溶媒の量が多いと塗料自体が析出し、密着性等に影響したと考えられる。混合方法やリグニン含有率については検討が必要である。

表7 色差変化 結果(木材試験片)
Table 7 Results of color difference change (wood test pieces)

	木材のみ				塗料のみ			
	L*	a*	b*	ΔE*ab	L*	a*	b*	ΔE*ab
塗料 塗布前	—	—	—	—	82.6	4.7	21.6	—
塗料 塗布後	—	—	—	—	81.5	4.6	22.7	1.5
S-UV 0時間	81.2	5.6	22.2	0.0	81.5	4.6	22.7	0.0
S-UV 24時間	66.0	13.3	36.0	22.0	62.6	15.1	37.8	26.3
S-UV 48時間	60.8	15.4	35.1	26.1	57.7	17.3	36.7	30.4

	塗料+木粉リグニン				塗料+もみ殻リグニン			
	L*	a*	b*	ΔE*ab	L*	a*	b*	ΔE*ab
塗料 塗布前	85.7	3.5	18.4	—	85.8	3.1	19.2	—
塗料 塗布後	73.0	10.3	33.4	20.8	73.4	9.3	32.3	19.0
S-UV 0時間	73.0	10.3	33.4	0.0	73.4	9.3	32.3	0.0
S-UV 24時間	65.4	14.0	38.5	9.9	64.3	14.4	38.9	12.4
S-UV 48時間	59.3	16.8	37.1	15.6	58.4	16.9	37.6	17.7

表8 色差変化 結果(ABS樹脂試験片)
Table 8 Results of color difference change (ABS resin test pieces)

	塗料なし(ABS)				塗料のみ			
	L*	a*	b*	ΔE*ab	L*	a*	b*	ΔE*ab
塗料 塗布前	—	—	—	—	79.9	-2.9	4.4	—
塗料 塗布後	—	—	—	—	78.8	-2.9	4.8	1.2
S-UV 0時間	79.9	-2.8	4.2	0.0	78.8	-2.9	4.8	0.0
S-UV 24時間	78.8	-3.4	9.4	4.6	79.6	-1.9	9.8	5.2
S-UV 48時間	77.2	-2.9	15.3	10.6	74.8	-2.3	15.7	11.6

	塗料+木粉リグニン				塗料+もみ殻リグニン			
	L*	a*	b*	ΔE*ab	L*	a*	b*	ΔE*ab
塗料 塗布前	79.9	-2.8	4.2	—	79.9	-2.8	4.0	—
塗料 塗布後	61.4	4.8	24.0	28.1	65.8	3.5	25.4	26.4
S-UV 0時間	61.4	4.8	24.0	0.0	65.8	3.5	25.4	0.0
S-UV 24時間	74.1	-0.4	19.2	14.6	74.5	2.9	17.9	11.5
S-UV 48時間	74.8	1.3	10.8	19.1	75.8	1.2	8.2	20.1

表9 色差変化 結果(ASA樹脂試験片)
Table 9 Results of color difference change (ASA resin test pieces)

	塗料なし(ASA)				塗料のみ			
	L*	a*	b*	ΔE*ab	L*	a*	b*	ΔE*ab
塗料 塗布前	—	—	—	—	92.0	-0.9	1.5	—
塗料 塗布後	—	—	—	—	91.0	-1.2	3.0	1.9
S-UV 0時間	92.0	-0.9	1.5	0.0	91.0	-1.2	3.0	0.0
S-UV 24時間	91.9	-0.8	1.4	0.2	90.9	-1.5	5.0	2.0
S-UV 48時間	92.0	-1.0	2.1	0.6	90.9	-1.6	7.1	4.1

	塗料+木粉リグニン				塗料+もみ殻リグニン			
	L*	a*	b*	ΔE*ab	L*	a*	b*	ΔE*ab
塗料 塗布前	92.0	-0.9	1.5	—	92.0	-0.9	1.4	—
塗料 塗布後	72.2	6.5	27.1	33.2	78.7	3.6	24.0	26.5
S-UV 0時間	72.2	6.5	27.1	0.0	78.7	3.6	24.0	0.0
S-UV 24時間	89.0	-1.6	13.2	23.3	89.0	-1.6	13.2	15.8
S-UV 48時間	84.3	2.3	14.6	17.9	84.6	2.1	15.7	10.2

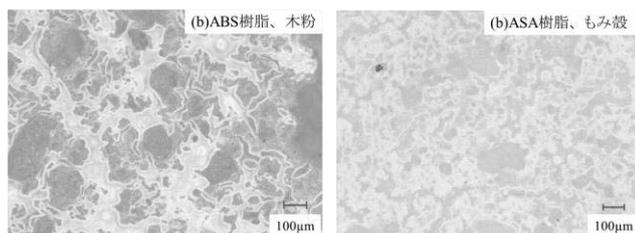


図 12 耐候性試験 48 時間後の抽出物含有塗料の表面状態
 Fig. 12 Surface condition of extract-containing paint after 48 h
 of weather resistance test

5. 結言

本研究では、植物由来の成分であるリグニンを用いた製品の開発を最終目標とし、バイオマス資源からのリグニン抽出技術の最適条件の検討を行った。その結果、もみ殻では 165°C でリグニンの分解が十分に進行するのに対し、木粉では 200°C でも二量体の含有量が多いことから、もみ殻に比べてより高温条件で反応が進行する傾向が見られた。また、リグニンの構造の違いにより、抽出物中のリグニン分解物である芳香族化合物の種類は草本系であるもみ殻の方が多く、針葉樹であるスギ木粉よりもリグニンが複雑な構造であることが分かった。

また実用化に向けた検討として、市販塗料とリグニンを混合したものについて評価を行ったが、本検討では耐候性や密着性が向上する傾向は得られなかった。塗料との混合方法が原因の 1 つと考えられるため、今後検討が必要である。

文 献

- (1) J. Ralph, K. Lundquist, G. Brunow, F. Liu, H. Kim, P. F. Schatz, J. M. Martina, R. D. Hatfield, S. A. Ralf, J. H. Christensen, and W. Boerjan, *Phytochemistry Reviews*, 3, 29 (2004)
- (2) 高野俊幸、ネットワークポリマー, 31(5), pp.803-809 (2010)
- (3) 近畿大学工学部研究報告 No.42, pp.1-5(2008)
- (4) 川又勇来、「二相系オルガノソルブ法による木質・草本バイオマスの全量資源化に関する研究」、北海道大学、博士論文(2020)
- (5) 片岡厚、木材保存, 26(6), pp. 255-265(2000)
- (6) 栗山旭、材料, 16(169), pp. 16-20(1967)

II. 小型マイクロ波無線給電システムの開発

Development of Compact Microwave Wireless Power Transmission System

高嶋 翔太 田開 孝祐 奈須野 雅明
TAKASHIMA Syota TABIRAKI Kosuke NASUNO Masaaki
宮田 直幸 室 慧悟 寺澤 孝志
MIYATA Naoyuki MURO Keigo TERASAWA Takashi

Abstract

Microwave wireless power transmission (MWPT) is a technology that wirelessly transmits microwave energy in space. MWPT can effectively solve the problem of energy supply for IoT devices. In this study, a receiving antenna and rectifier circuits for the 2.45 GHz MWPT systems were prototyped. The antenna was classified as a microstrip antenna. The rectifier circuits were classified as single-shunt rectifier circuits and fabricated by assembling double-side PCBs, Schottky barrier diodes and Multi-Layer Ceramic Capacitor. An automatic measurement system for evaluating the rectifier circuits were constructed with Python and VISA library. The antenna was measured in electromagnetic anechoic chamber. As a result, the gain of the antenna was 5.5 dBi. The rectifier circuit reached a conversion efficiency of 18 % with a load of 1 kΩ and an input of 19 dBm. The maximum voltage of the assembled rectenna was 1.3 V with a load resistance of 1 kΩ and an E-field strength of 19.4 V/m.

1. 緒言

マイクロ波無線給電 (MWPT : microwave wireless power transmission) はマイクロ波を用いて非接触で電力を供給する技術であり、アンテナを用いて空間中にマイクロ波を伝搬させるため、通信同様に遠方への給電も可能である^(1,2)。さらに我が国において2022年から「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム」という名称で920 MHz帯、2.4 GHz帯、5.7 GHz帯における制度整備が進んでいる⁽³⁾。

グローバル IoT 市場については成長が予想されている⁽⁴⁾。そのため、IoT デバイスに MWPT 技術を適用することで、バッテリーレスによる IoT システムの設置経費の低減、多数のデバイスへの一斉給電や遠隔デバイスの給電と制御が可能となる。

MWPT システムを構成する要素のうち、受電アンテナはマイクロ波エネルギーを効率よく空中から収集し、可能な限り少ない損失で整流回路へ供給する必要がある。整流回路はマイクロ波を直流電力に変換し、IoT デバイスに電力を供給する重要な役割を担っている。本研究では、2.4 GHz 帯の電波により IoT デバイスへの給電を目的とし、2.45 GHz で受電するアンテナ、整流回路の検討を行い、マイクロ波を直流電力に整流変換するアンテナ (レクテナ : rectenna ; rectifying antenna の略) を試作し、特性を評価した。

2. 実験方法

< 2. 1 > 受電アンテナ

本研究では受電アンテナとして、マイクロストリップアンテナ (MS アンテナ) を用いた。MS アンテナは平面構造を持つアンテナの一種であり、MS アンテナの概要と外観を図1に示す。

MS アンテナの素子面の形状は四角形であり、その一辺の長さ l は、式 (1) によって決定される。

$$l = \frac{C_0}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

C_0 は光速、 f は受電する電波の周波数、 ϵ_r は誘電体層の比誘電率である。この式から、比誘電率が異なる基板を用いることにより、一辺の長さを調節することができる。

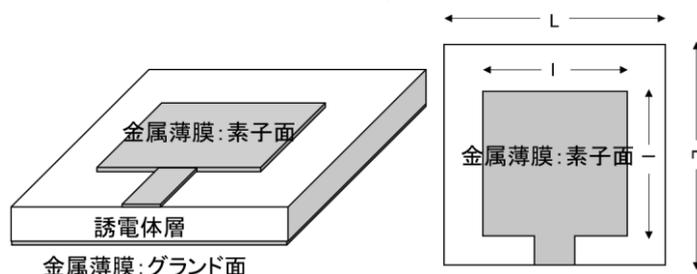


図1 MS アンテナの概要

Fig.1 Overview of MS antenna

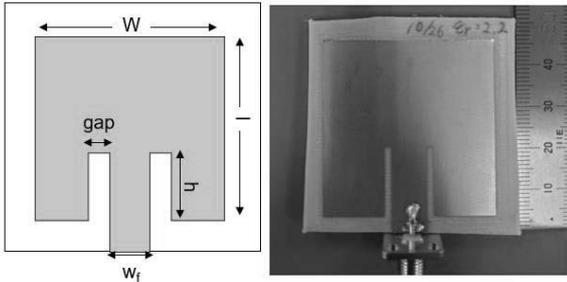


図2 MSアンテナの設計と外観

Fig. 2 MS antenna design and appearance

MS アンテナの試作には、プリント基板（日本ビラー製 NPC-H220）を使用した。低誘電率プリント基板の仕様を表 1 に示す。また、MS アンテナは、MS 線路のインピーダンス（50Ω）を合わせる必要があるため設計を行った。MS アンテナの設計諸元を表 2 に示す。

表 1 プリント基板の仕様

Table 1 Specifications of PCB

	NPC-H220	CS-3376C
比誘電率 ϵ_r	2.17	3.3
誘電正接 $\tan\delta$	0.0005	0.003
銅箔厚み t [mm]	0.035	0.035
基板厚み T [mm]	3.15	0.8

表 2 MS アンテナの諸元

Table 2 Specifications of MS Antenna

記号	数値[mm]
w	38
l	40.5
h	15.5
gap	1.5
w _f	7

受電アンテナの試作にあたり、電磁界シミュレーションソフト（University of Duisburg-Essen 公開 openEMS 0.0.35）を用いて、伝送路の S_{11} パラメータをシミュレーションした。プリント基板を CNC ルーターで切削加工して受電アンテナを試作し、 S_{11} 特性と放射特性の評価を行った。 S_{11} の定義式を式 (2) に示す。 a_1 は入射波、 b_1 は反射波である。

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (2)$$

次に放射特性を測定する。放射特性は電波暗室（TDK 製 床面フェライトの 6 面電波暗室）内にて行った。電波暗室の概要を図 3 に示す。放射特性測定機器と測定諸元を表 3 に示す。

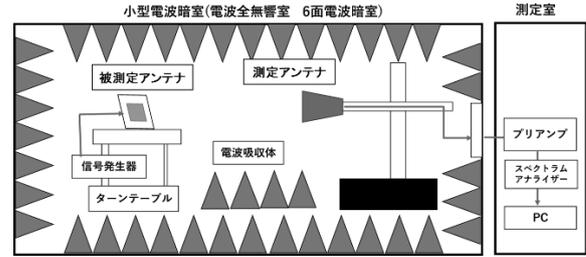


図 3 電波暗室の概要

Fig. 3 Overview of electromagnetic anechoic chamber

表 3 放射特性測定機器と測定諸元

Table 3 Radiation measurement equipment and specifications

種類	メーカー	型名
信号発生器	KEYSIGHT	N5171B
ホーンアンテナ	Schwarzebeck	BBHA9120B
スペクトラムアナライザ	ROHDE&SCHWARZ	FPL1007
標準ダイポール	Anritsu	MA5612B4
設置高 [m]	1.0	
アンテナ間の距離 [m]	3.0	

放射特性測定においては、同時にアンテナ利得を算出するため標準ダイポールアンテナの放射特性が必要である。式 (3) に従い、試作した MS アンテナの利得値を算出する。なお、式 (3) 中 V_m [dBμV] は MS アンテナの測定値、 V_d [dBμV] は標準ダイポールの測定値、 G_d は標準ダイポールの公称利得値であり、今回使用したダイポールアンテナにおいては 2.0 dBi である。

$$G = (V_m - V_d + G_d) \quad [\text{dBi}] \quad (3)$$

< 2. 2 > 整流回路

交流から直流に変換する整流回路には様々な方式があるが、本研究では、シングルシャント型の整流回路を用いた。回路の伝送線路は、マイクロストリップライン型とした。この線路型はマッチング回路やフィルタ回路を組み込みやすいこと、また、MS アンテナと同構造であることから受電アンテナと同一基板上で作製しやすくなるために採用した。

シングルシャント整流回路の回路図を図 4 に示す。受電アンテナからマイクロ波が入力され、DC カットのためのコンデンサ C_0 を介し、一つのダイオードをグランドにシャント接続する。ダイオードと並列に $\lambda/4$ 線路、出力平滑コンデンサ C_L が設けられ、 C_L に並列に接続された負荷抵抗 R_L によって構成した。

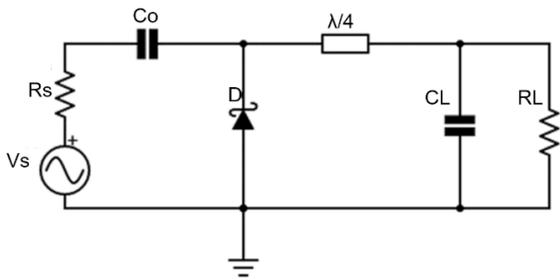


図4 シングルシャント整流回路の回路図

Fig. 4 Schematic diagram of single shunt rectifier circuit

整流回路のプリント基板には、低誘電率基板（利昌工業製 低電送損失基板 CS-3376C）を用いた。プリント基板の諸元を表1に示す。試作した整流回路を図5に示す。整流回路1は、図4の整流回路の回路図の通りに試作したものである。

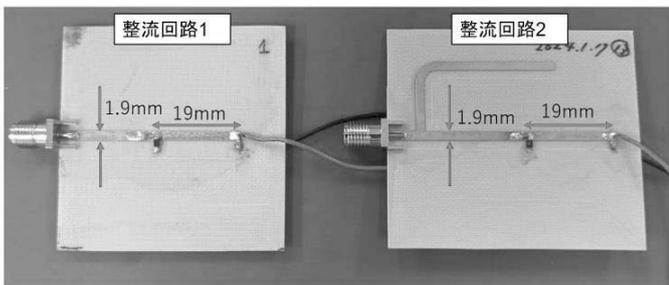


図5 整流回路の外観

Fig. 5 Appearance of single shunt rectifier circuit

線路幅1.9mmと $\lambda/4$ 線路の長さ19mmについては高周波回路シミュレータ（QUCS: QucsStudio Transmission Line Calculator 4.3.1）を用いて算出した。整流回路は、MSアンテナと同様にCNCルータで切削加工し、ショットキーバリアダイオード（SBD: 東芝製ISS315）、コンデンサ、SMAコネクタ及びリード線を実装して作製した。DCカットコンデンサ、出力平滑コンデンサは、1608サイズの積層セラミックコンデンサで、容量はそれぞれ $10\mu\text{F}$ 、 1pF のものを用いた。図5の整流回路2は、整流回路の S_{11} パラメータの低減を目的にマッチング回路を追加したものである。マッチング回路は、SMAコネクタとDCカットコンデンサの間の線路長の調整と先端を開放した線路（オープンスタブ）を計算により追加で構成したものである。

< 2. 3 > 整流回路の特性評価に使用する測定系の自動化

整流回路の変換効率の評価には、入力信号の信号発生器、パワーメータ、デジタルマルチメータ等の機器を使用した。評価を効率的に行うため、測定系を構築し自動化を図る必要がある。整流回路は、回路の調整による設計変更を行い、試作を複数回行うこ

とが想定される。そのため、測定系及び自動測定プログラムを作成することで測定時間の短縮を狙った。また、入力電力や負荷等の条件により効率が変わるため、IoTデバイスを駆動させる最適条件を探し出すことも考慮して測定系を構築した。

測定系のイメージ図を図6に示す。矢印で示した測定器をPCで制御し、入力電力、進行電力、反射電力、直流出力電圧を測定する。実際には受電MSアンテナから入力されるが、整流回路単体の特性を測定するため信号発生器で電力を印加した。方向性結合器を入れることで進行電力の測定をした。また、サーキュレータを挿入し、整流回路からの反射電力を測定した。

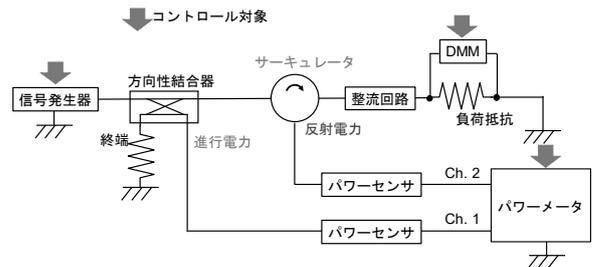


図6 測定系のイメージ図

Fig. 6 Conceptual diagram of measurement system

イメージ図を元に測定器を接続し測定系を構築した。整流回路の測定系の外観を図7に示す。測定系は、シールドルーム内に設置し、制御PC、信号発生器、パワーセンサを2個接続したパワーメータ、デジタルマルチメータ（DMM）、試作した整流回路となっている。使用した測定器一覧を、表4に示す。

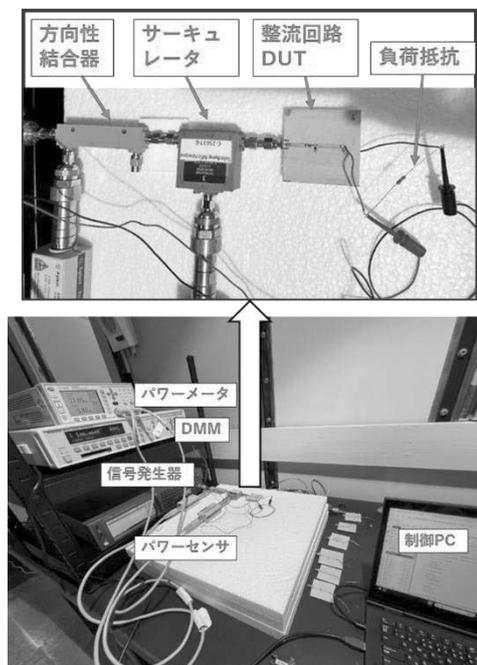


図7 整流回路の測定系の外観

Fig. 7 Measurement of rectifier circuit

表 4 使用した測定器一覧

Table 4 List of measuring instruments used

種類	メーカー	型名
信号発生器	KEYSIGHT	N5171B
方向性結合器	MCLI	CB2-20
パワーメータ	Agilent	N1914A
パワーセンサ	KEYSIGHT	E9304A
DMM	ADVANTEST	R6581
サーキュレータ	TELEDYNE MICROWAVE	C-2563T-6

< 2. 4 > 整流回路の変換効率の定義

整流回路は、受電アンテナから得られた高周波電力を直流電力に変換し、IoT デバイスを想定した負荷に供給するものであり、高周波電力から直流電力への変換効率 (RF-DC 変換効率) は重要な指標である。変換効率は以下の式で定義し算出することとした。

また、変換効率 η [%] を求めるために、直流の出力電力 P_{out} [mW] は式 (4) とする。

$$P_{out} \text{ [mW]} = \frac{V_{out} \text{ [V]}^2}{R_L \text{ [\Omega]}} \times 10^3 \quad (4)$$

ここで、 V_{out} [V] は整流回路の出力電圧で R_L [Ω] は負荷抵抗である。信号発生器の出力電力 P_{in} [dBm] は、整流回路に入力する電力となる。信号発生器の出力電力 P_{in} の単位を [dBm] から [mW] に換算し、式(4)の電力 P_{out} [mW] を用いて変換効率 η [%] を式 (5) とする。

$$\eta \text{ [%]} = \frac{P_{out} \text{ [mW]}}{P_{in} \text{ [mW]}} \times 100 \quad (5)$$

< 2. 5 > 自動測定プログラム

Python を使用し、測定器制御と測定値取得を自動で行う測定プログラムを作成した。プログラムの動作について、フローチャートを図 8 に示す。測定開始後に、周波数掃引しながら測定を繰り返すプログラムとなっている。あらかじめ測定周波数を各列に入力した CSV を作成しておき、それを読み込んでデータフレームを作成し進行波電力・反射波電力・DC 電圧の記録用の列を追加し、パワーメータ、DMM の読み値を周波数ごとに順次格納することとし、測定終了後に CSV ファイルとして測定値を保存した。

今回の測定プログラムに使用した Python (3.11.1) のデータ解析ライブラリ及びバージョンを表 5 に示す。

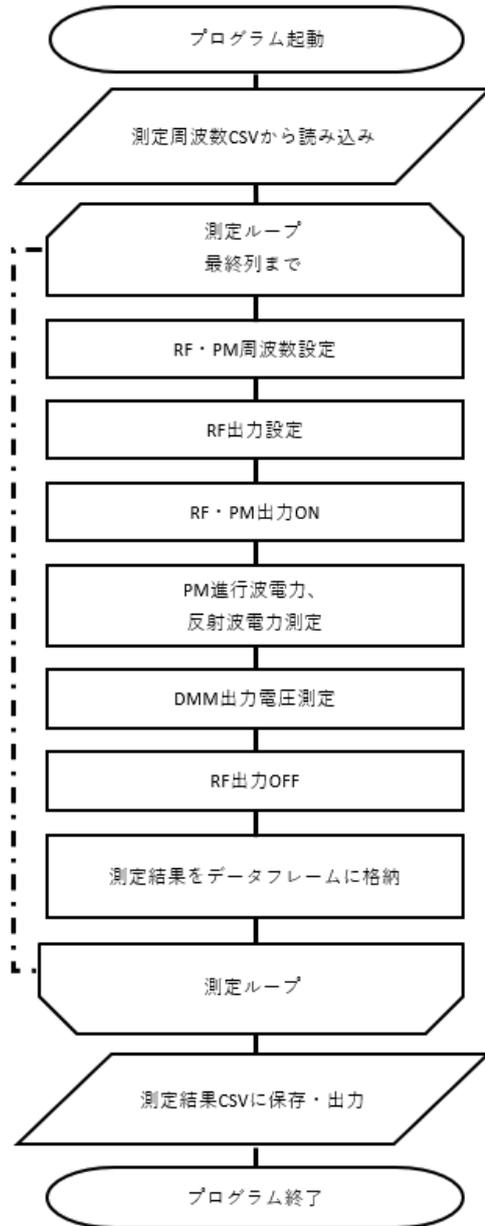


図 8 測定プログラムのフローチャート

Fig. 8 Flowchart of measurement program

表 5 使用した Python ライブラリ

Table 5 Python libraries in this research

ライブラリ名	バージョン
pandas	2.0.3
PyVISA	1.13.0
PySimpleGUI	4.60.5

VISA ライブラリは National Instruments 製 (2023 Q2) を使用した。

< 2. 6 > レクテナの動作試験

試作した MS アンテナと整流回路を接続してレクテナを構成し、2.45 GHz のマイクロ波を MS アンテナに照射し、整流回路の出力直流電力の測定を行った。試験は電波暗室で行い、電磁波照射にはイミュニティ試験システム（テクノサイエンスジャパン製）を用いた。レクテナ特性の測定器と測定諸元を表 6 に、レクテナ特性の試験風景を図 9 に示す。MS アンテナと整流回路はセミリジッドケーブルで接続した。電界強度測定のための電界センサは、受電アンテナの 15cm 横に配置した。

表 6 レクテナ特性の測定器と測定諸元

Table 6 Measuring equipment and specifications for rectenna

種類	メーカー	型名
信号発生器	ROHDE&SCHWARZ	SMCV100B
高周波電力増幅器	テクノサイエンスジャパン	HDR200-1G6GR
電界センサ	Lumiloop	LS Probe1.2 E
電磁界発生アンテナ	SCHWARZBECK	STLP9149
DMM	FLUKE	116
設置高 [m]	1.5	
アンテナ間の距離 [m]	3.0	

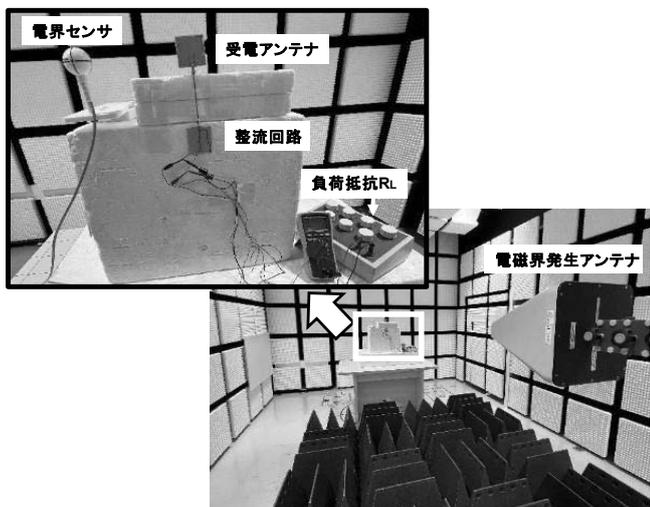


図 9 レクテナ特性の試験風景

Fig. 9 Test scene of rectenna characteristics

3. 実験結果・考察

< 3. 1 > 受電 MS アンテナの測定結果

試作した受電 MS アンテナの $|S_{11}|$ シミュレーション結果とベクトルネットワークアナライザ (VNA) による測定結果を図 10 に示す。

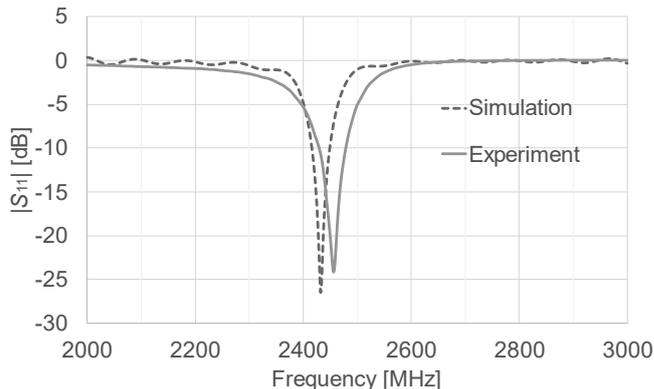


図 10 MS アンテナの $|S_{11}|$ シミュレーション結果および実測値

Fig. 10 $|S_{11}|$ simulation result and actual measurement of MS antenna

MS アンテナの $|S_{11}|$ 測定結果 (2456 MHz) は、シミュレーション結果 (2432 MHz) に比べて高周波側にシフトした。これは加工精度が原因と考えられる。試作した MS アンテナの $|S_{11}|$ は -24 dBm であり、アンテナが受電し、負荷側に供給する電力のうち 1% 程度が反射してアンテナ側に戻ることが判った。

MS アンテナの利得は、式 (3) により求めた。MS アンテナの放射パターンを図 11 に示す。試作した MS アンテナはアンテナ素子面側に電波を放射する利得値 5.5 dBi の MS アンテナであることが確認できた。

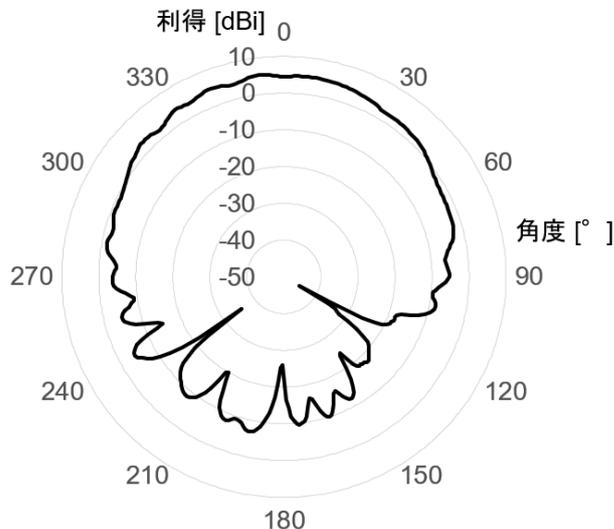


図 11 MS アンテナの放射パターン

Fig. 11 Radiation pattern of MS antenna

< 3. 2 > 整流回路の測定結果

試作した整流回路 (図 5 参照) の整流回路 1 及び整流回路 2 を < 2. 3 > の測定系及び < 2. 5 > の自動測定プログラムで評価した結果を、図 12 に整流回路の出力電圧特性を、図 13 に整流回路の反射電力特性をそれぞれ示す。整流回路に入力する信号発生器の電力は 0 dBm (1 mW)、出力電圧を測定する抵抗負荷は 1 k Ω とした。整流回路 1 は、測定した周波数領域では、3.0 GHz で最大出力電圧 0.38 V、反射電力は -6 dBm (0.25 mW) であり、目標とする 2.45 GHz では、出力電圧 0.16 V、反射電力 -10 dBm (0.1 mW) であった。2.45 GHz の出力電圧の向上を図るため、整流回路 1 にマッチング回路を設けた整流回路 2 では、2.45 GHz で反射電力 -12 dBm (0.06 mW) であり、出力電圧は 0.36 V であった。この結果は、2.45 GHz において反射電力の減少以上に出力電圧が向上したと言える。マッチング回路により、整流部に高周波電力が効率よく流れ、出力電圧が向上したためと推察される。マッチング回路の効果を詳細に調べ、回路の評価モデルを構築し、出力電圧を向上させることが課題である。

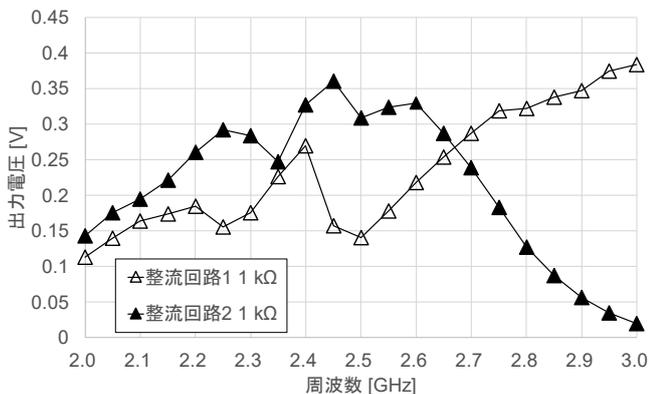


図 12 整流回路の直流出力電圧特性

Fig. 12 DC output voltage characteristics of rectifier circuit

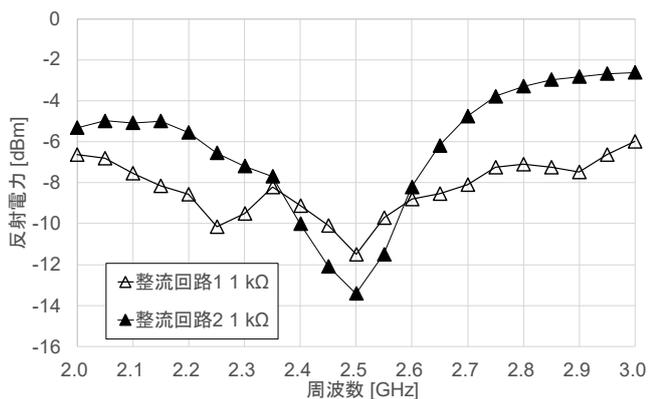


図 13 整流回路の反射電力特性

Fig. 13 Reflected power characteristics of rectifier circuit

整流回路 2 について、周波数を 2.45 GHz に固定し、負荷抵抗 (100 Ω 、1 k Ω 、10 k Ω) を変化させたときの直流出力電圧—入力電力特性を図 14 に、変換効率—入力電力特性を図 15 に示す。直流出力電圧は、負荷抵抗が 10 k Ω のとき最も高くなっており、入力電力 19 dBm、最大出力電圧 4.6 V となった。変換効率は、負荷抵抗が 1 k Ω のとき、最も高くなっており、入力電力 19 dBm、変換効率 18 % であった。

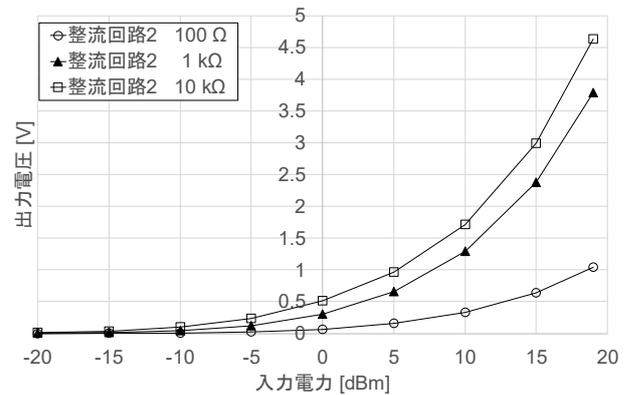


図 14 整流回路の直流出力電圧—入力電力特性

Fig. 14 DC output voltage of rectifier circuit vs. input power

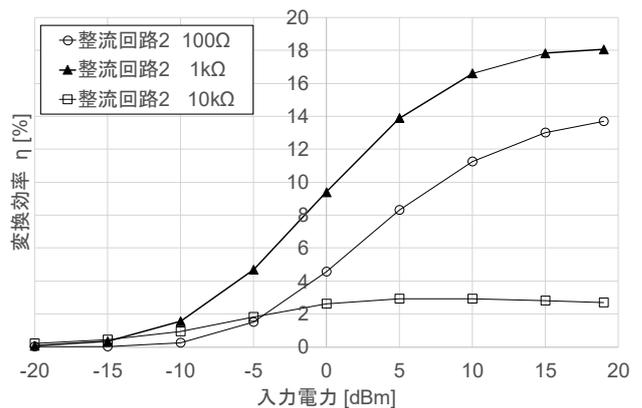


図 15 整流回路の変換効率—入力電力特性

Fig. 15 Conversion efficiency of rectifier circuit vs. input power

< 3. 3 > レクテナの動作試験結果

レクテナの出力電圧—電界強度特性を図 16 に示す。電界強度は電界センサによる実測値である。電界強度に比例して、出力電圧が向上しており、試作した MS アンテナと整流回路 2 を組み合わせて動作することを確認した。出力電圧は、負荷の抵抗値の増加に伴い大きくなる。負荷抵抗 1 k Ω では電界強度 19.4 V/m 時に最大 1.3 V の電圧が得られた。IoT デバイスの駆動に必要な電力に合わせて、送電力、伝送距離、アンテナの受電面積等の調整が必要となる。

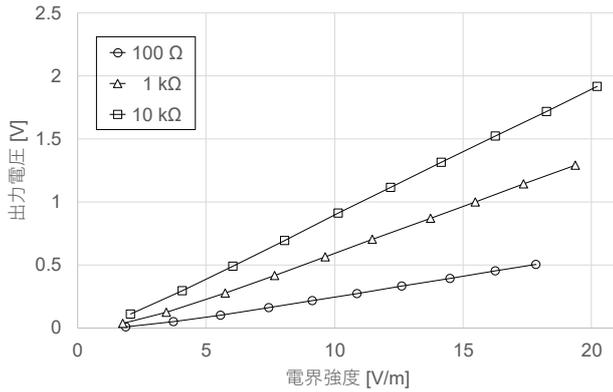


図 16 レクテナの出力電圧特性

Fig. 16 DC output voltage characteristics of rectenna

< 3. 4 > レクテナの特性について

試作した MS アンテナおよび整流回路を接続して構成したレクテナで、マイクロ波を受電した場合に出力される直流出力電圧について考える。フリスの伝達公式を式 (7) に示す⁵⁾。

$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_R G_T P_T \quad (7)$$

ここで、 P_R は受電電力、 G_R は受電アンテナ利得、 G_T は送電アンテナ利得、 P_T は送電電力である。

また、総務省の技術的条件から、周波数 2.45 GHz における送電について送電電力を 41.8 dBm (15 W)、送電アンテナ利得を 24.0 dBi とする⁶⁾。さらに、電波の伝搬路は自由空間であるとし、送電アンテナから 5 m 離れた位置にモジュールを設置した場合に、フリスの伝達公式から、利得 5.5 dBi の試作 MS アンテナは 17.1 dBm の電力を出力すると予想できる。この電力が 1 kΩ の負荷を接続した整流回路 2 に供給される場合に得られる電圧は図 14 を基に計算でき、3.03 V が出力されることが予測できる。前述した出力電圧が得られるならば一般的なマイコンやセンサ類を駆動させることは可能であると言える。

5. 結言

MWPT システム用に 2.45 GHz で動作する受電 MS アンテナ、整流回路を試作評価した。また、整流回路測定用の自動測定系を構築した。

- (1) 受電アンテナでは、シミュレーション結果を基に MS アンテナを試作評価した結果、利得値 5.5 dBi を得た。
- (2) 整流回路では、シングルシャント型の整流回路を試作評価した結果、負荷抵抗 1 kΩ 接続、入力 19 dBm 時に変換効率 18% を得た。
- (3) 整流回路の測定系及び自動測定プログラムでは、測定系を構

築し、目標とした評価項目の自動測定が可能となった。

- (4) レクテナでは、試作した MS 受電アンテナと整流回路を接続して動作確認した結果、負荷抵抗 1 kΩ 接続、電界強度 19.4 V/m 時に最大 1.3 V の電圧を得た。

課題は、アンテナでは、必要な受電力に合わせたアンテナの利得の確保であり、複数のアンテナを使用するアレイ化が、整流回路では、マッチング回路の追加とその最適化による変換効率の向上が、レクテナでは、IoT デバイスの安定駆動と、社会実装がそれぞれ挙げられる。

文 献

- (1) 篠原真毅. 無線電力伝送の技術. 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), 2010, 130.2: 145-148.
- (2) 居村岳広 他, 非接触電力伝送における電磁誘導と電磁界結合の統一的解釈. 電気学会自動車研究会, VT-09-007, 2009, 35-40.
- (3) 総務省. 諮問第 2043 号「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」のうち「構内における空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」に関する一部答申, 2020.
- (4) IoT-ANALYTICS. Global IoT market size to grow 19% in 2023-IoT shows resilience despite economic downturn, 2023 (online)(<https://iot-analytics.com/iot-market-size/>)
- (5) 明山 哲 他, 電波伝搬ハンドブック, リアライズ(1999)

Ⅲ. プラスチック製品の性能向上のための 設計技術と評価に関する研究(2)

Research on Design and Evaluation Methodology for Plastic Products-(2)

田中 和馬 中村 陽文 吉江 真太郎 鍋澤 浩文
TANAKA Kazuma NAKAMURA Takafumi YOSHIE Shintaro NABESAWA Hirofumi

Abstract

In recent years, composite materials such as fiber-reinforced plastics (FRP) have been used in various industries due to their high mechanical properties. The use of computer-aided engineering is expected to reduce the cost required to develop FRP products. However, there are difficulties in structural analysis of FRP such as acquisition of anisotropy material properties and creation of analytical model. The homogenization analysis is considered effective for analyzing macroscopic mechanical properties from the substructure of the FRP. However, the accuracy of the homogenization analysis depends on the physical properties of the individual materials. Therefore, the purpose of this research is to establish a design methodology using the homogenization analysis which is improved the accuracy by inverse analysis from tensile test results in a specific direction, through the structural analysis of the glass FRP hat shaped member as experimental objects. As a result, it was found that the bending stiffness of the hat shaped member with discontinuous/discontinuous configuration was closer to the experimental values when homogenized material properties with inverse analysis were used than when homogenized material properties based on literature data of individual materials were used.

1. 緒言

近年、繊維強化プラスチック（以下 FRP）を代表とする複合材料は、高い比剛性・比強度を有していることから、金属の代替材料として輸送機器を中心とする構造部材に広く用いられつつある。FRP は、母材に強化材として複合化される繊維の配向によって材料物性が変化する異方性材料であり、一般的には繊維層を複数枚重ねた積層材として使用される。現状、FRP 製品開発に際しては試作を繰り返し行うことで強度評価を行っており、開発期間の長期化、試作費用の増加が問題となっている。この解決方法としてコンピューター支援工学（以下 CAE）を用いた有限要素法解析の利用が考えられるが、FRP は内部を構成する繊維が非常に細かく、内部構造をすべてモデル化すると有限要素分割数が膨大となり、解析時間が極端に長くなるため、設計現場での活用が困難となる。そのため最近では、FRP に含まれる樹脂・繊維の単位構造をモデル化し、デジタル空間上で材料試験を行うことで、樹脂・繊維の物性と構造を考慮した巨視的に等価な異方性材料物性の計算を行う均質化解析が注目されるようになった⁽¹⁾。均質化解析の精度は、繊維・樹脂の物性値に依存するが、実際の繊維・樹脂単体の物性値の取得は容易ではない。例えば、前年度に行った研究⁽²⁾では、FRP 基板とそれを使用した成形品を用いて均質化解析の検証を実施したが、大半の物性値を文献値に基づいて決定しており、FRP 基板の物性予測に関して解析精度の改善が見込めないことが問題

となっていた。一方、一般的な FRP 基板は、面内方向の材料物性値であれば引張試験で比較的簡単に測定可能であることから、引張試験で測定可能な物性値から均質化解析の逆解析を行い、繊維・樹脂単体の実際の物性値を推測することで、均質化解析の物性予測精度の向上を図ることができるものと考えられる。

そこで本研究では、CAE による FRP 製品の構造解析の精度向上を目的として、引張試験結果を用いた均質化解析の逆解析をガラス繊維 FRP に適用し、FRP 基板の材料物性値評価、ならびにスタンピング成形により作製されたハット型成形品の曲げ剛性について有限要素法による構造解析および実験的評価を行った。

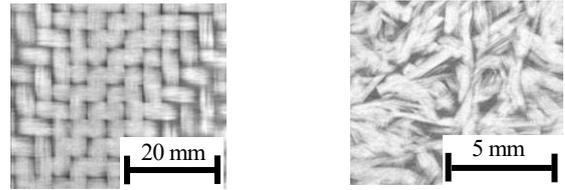
2. 研究対象

本研究で研究対象としたハット型成形品の外観を図 1 に示す。本品を選定した理由は、自動車のバンパーやピラーと類似した形状であり実製品を想定した検証が可能となることである。本研究では本品を用いてバンパーやピラーへの物体の接触を想定した曲げ剛性を評価し、CAE 解析との比較を行った。ハット型成形品は高速スタンピング成形法にて作製した。高速スタンピング成形とは 2 枚の FRP シートを加熱し可塑性を与え、温度調整をした金型に投入後、圧縮成形機で圧縮成形をし、成形加工する手法である⁽³⁾。この方法では、熱可塑性樹脂を基材とするスタンパブルシート
の板厚などのバラつきに対応するため、各工程の設備の選択と必

要な制御技術、また異なる種類のスタンパブルシート of 軟化状態での搬送、配置技術の開発により成形システムの自動化が実現されたシステムとなっており、量産に適した成形法となっている⁽⁴⁾。

ハット型成形品は図 1(a)のようにキャビティ側に連続繊維材、コア側に不連続繊維材を使用したサンプル（以下、連続/不連続）と図 1(b)のようにキャビティ側コア側の両方が不連続材料を使用したサンプル（以下、不連続/不連続）の 2 パターンを作製した。使用材料は、連続繊維材は Tepex dynalite102（Bond-Laminates GmbH）、不連続繊維材は Tepex Flowcore102（Bond-Laminates GmbH）とした。図 2 に、使用した連続繊維材および不連続繊維材の、内部構造の X 線 CT 画像を示す。連続繊維材の Tepex dynalite102 は、図 2(a)に示すようにマトリクス樹脂の PA6 中にガラス繊維束が 2 方向に編み込まれた材料で、繊維束の方向に対して高い強度を持つ特徴がある。一方、不連続繊維材の Tepex Flowcore102 は、図 2(b)に示すようにマトリクス樹脂の PA6 中にガラス繊維束が不織布状に散りばめられた材料である。連続繊維材と比べて繊維束が短く、流動性が高い特徴がある。

ハット型成形品は、板厚 2 mm の連続繊維材または不連続繊維材の材料基板を 2 枚重ねた状態でプレスされ、最終的に板厚は 3



(a) Continuous fiber materials (b) Discontinuous fiber materials

図 2 GFRP の X 線 CT 画像

Fig. 2 X-ray CT images of the GFRP

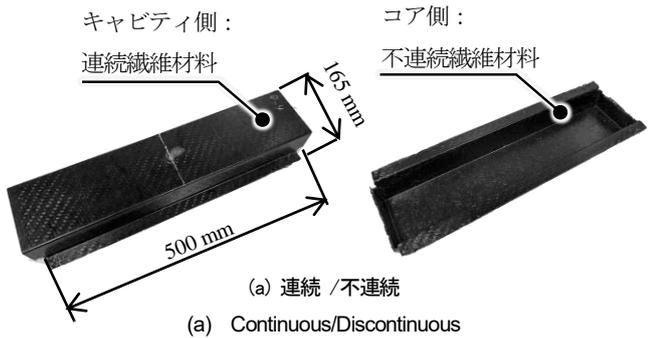
mm に成形される。そのため、ハット型成形品の表面サイズに対して材料基板サイズを少し小さく設定し、プレスの際に押し広げて不足部分に流しこむような形で成形していく。連続/不連続構成のハット型成形品では、連続繊維材は流動性がよくないため、連続繊維材のサイズはハット型成形品の表面サイズと同等とし、不連続繊維材を小さめに設定し、不足部分の不連続繊維材を押し広げて流しこむことで成形される。ここで、連続繊維材と不連続繊維材の体積割合は 2:1 とした。

3. FRP 基板の材料物性値評価

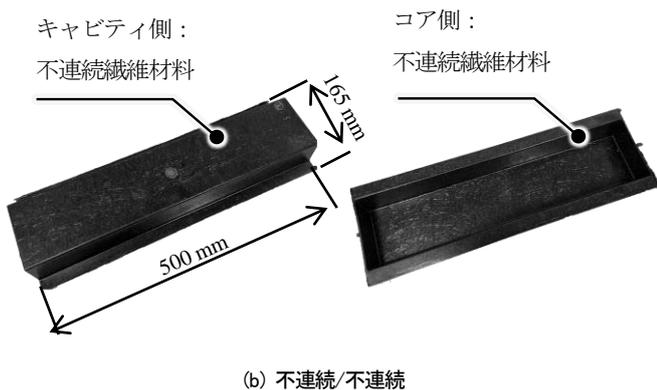
< 3. 1 > 概要

FRP の CAE 解析を行う際の問題点として、樹脂と繊維の異種材料のモデル構造が複雑であり、1 繊維を再現するために膨大な要素数と解析時間がかかることが挙げられる。例えば、繊維直径は約数十 μm であり、モデルを再現するためには繊維の要素は 1 辺当たり数 μm で生成する必要がある。

このような問題点を解決するために、微視的な構造が周期的に繰り返されている場合に、巨視的に等価な材料物性を求める均質化解析を用いた手法が提案されている。前述したように、均質化解析の精度は、繊維・樹脂の物性値に依存するが、FRP 基板中の繊維・樹脂は、基板作製工程を経て、元の物性値から変化する可能性があり、これらの取得は容易ではない。そこで、本研究では、FRP 基板の強度試験結果から樹脂・繊維単体の材料物性を求める逆解析を用いることで、解析精度の向上を図る。本研究で実施する逆解析の概要を図 3 に示す。今回使用する連続繊維材および不連続繊維材は、互いに直交する 3 つの方向で特有の機械的特性を有する直交異方性材料であるため、均質化解析では材料物性として、弾性係数 (E_1, E_2, E_3)、ポアソン比 ($\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}$)、せん断弾性係数 (G_{12}, G_{23}, G_{31}) の計 9 つの物性値を計算する。ここで、各物性値の添字について、1, 2 方向は面内、3 方向は面外方向を示すこととする。これら 9 つの物性値のうち、まずは引張試験で取得可能な面内方向の 4 つの物性値を実験により測定する。次に、均質化解析の結果について、実験で取得した 4 つの物性値に合うように最適化計算を行うことで樹脂・繊維単体の物性値を合わせ



(a) Continuous/Discontinuous



(b) Discontinuous/Discontinuous

図 1 ハット型成形品

Fig. 1 Hat shaped member

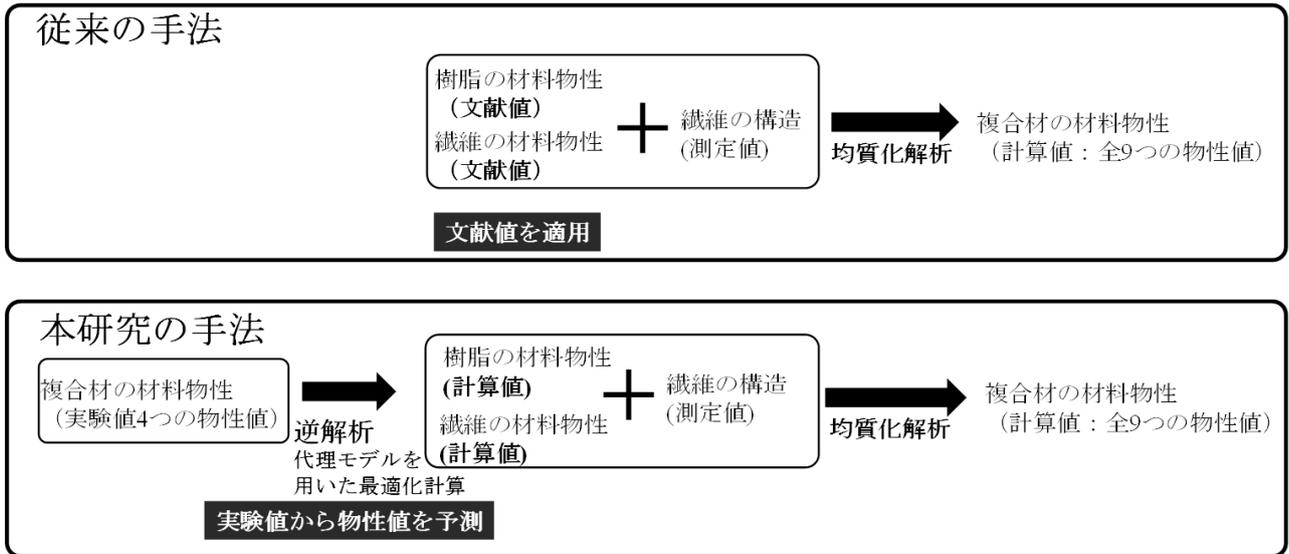


図3 逆解析の概要

Fig. 3 Procedure of the homogenization analysis with inverse analysis

こむ。最後に、合わせこんだ樹脂・繊維単体の物性値で均質化解析を行い、9つの物性値すべてを計算する。通常の均質化解析では、樹脂・繊維の物性値には文献値等を用いるが、本研究では実験に基づく計算値に置換することで均質化解析の精度向上を図る。

< 3. 2 > 均質化解析

均質化解析は複数の材料からなる単位構造の、一定のひずみに対する応答性を評価する手法である。本研究では、連続繊維材の均質化解析には有限要素均質化法を用いた。有限要素均質化法の詳細は文献⁽¹⁾に記述されているため、ここでは概略を参考上記述する。均質化法では、周期的な単位構造となるユニットセルを考えた際に、下記式で示されるように、マクロ構造の応力 Σ は、ミクロ構造の応力 σ のユニットセル領域 Y 内における平均値であるとされている。

$$\Sigma = \frac{1}{|Y|} \int_Y \sigma dY \quad (1)$$

ここで、 $|Y|$ はユニットセルの体積を表す。ユニットセルに対してあるマクロひずみ E を与え、適切な境界条件で構造解析を行い、式(1)で得られるマクロ応力と下記式を用いてマクロ構造の等価な弾性係数行列 D^H を求める。

$$\Sigma = D^H E \quad (2)$$

実際に有限要素法を用いた計算を行う場合の手順を説明する。ユニットセルの周囲境界は周期境界条件を与え、ユニットセルのX、Y、Z、XY、YZおよびXZ方向それぞれに単位量のひずみを与えた有限要素解析を行う。そして、求めたい弾性係数行列成分に対応する応力成分のユニットセル内における平均値を計算することでマクロ構造の弾性係数を得ることができる。

図4に連続繊維材で実施した均質化解析の概要を示す。連続繊維

材の均質化解析は2段階で行った。まず、図4(a)に示す1本の繊維の一部分をユニットセルとした繊維束モデルで均質化解析を行い、次に図4(b)に示す綾織構造をユニットセルとした綾織モデルで均質化解析を行った。綾織モデルの繊維束部には、繊維束モデルの均質化解析で得られた物性値を入力した。綾織モデルの3D-CADモデル作成はノッティンガム大学で作成されたオープンソースソフトウェア TexGen⁽⁶⁾を用い、有限要素均質化解析はCOMSOL AB社製 COMSOL Multiphysics 5.6を用いて行った。繊維束モデルは3角柱2次要素、綾織モデルは6面体2次要素を使用し、綾織構造の繊維束の各寸法はX線CT画像で得た情報をもとに決定した。

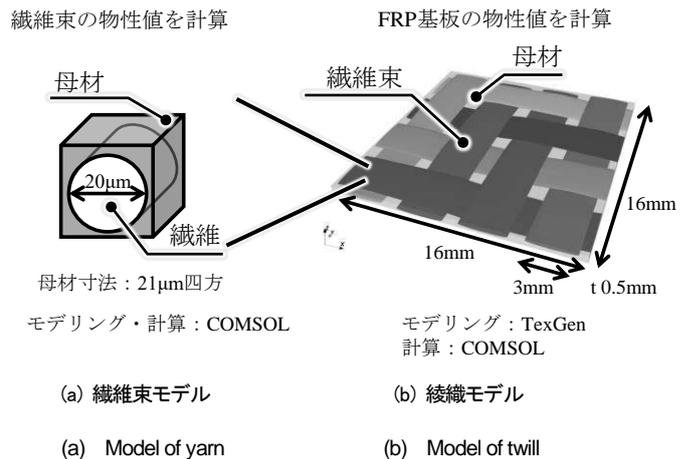


図4 連続繊維材均質化解析の概要

Fig. 4 Unit cell models of the homogenization analysis for the continuous fiber material

一方、不連続繊維材の均質化解析には Hexagon 社製 Digimat-MF 2021.1 を用いた。Digimat-MF は平均場均質化法による均質化解析を行うソフトウェアであり、短時間で材料物性予測が可能という特徴をもつ。繊維などの介在物は、含有率や長さ、配向を定義できるが、形状を回転楕円体で表現することや均一分散であることを仮定するなどの制限も有している。不連続繊維材の均質化解析で設定したモデル特性値を表 1 に示す。これらは材料物性表および X 線 CT 画像を基にして決定した。

表 1 不連続繊維材 モデル特性値

Table 1 Characteristic values of discontinuous fiber materials

項目		特性値
繊維含有率	[%]	47
繊維半径	[mm]	1
繊維アスペクト比	[-]	2500
PA6 密度	[g/cm ³]	1.8
ガラス繊維密度	[g/cm ³]	2.54

< 3. 3 > 逆解析による材料物性の合わせこみ

< 3. 3. 1 > FRP 基板の材料物性取得

逆解析で樹脂・ガラス繊維の物性値を求めるため、FRP 基板の材料試験で取得できる 4 つの物性値を測定した。図 5 に各試験片の形状を示す。インストロン製万能試験機 (5567) により、引張特性試験は JIS K7161⁶⁾、せん断特性試験は JIS K7019⁷⁾ に準拠して行い、引張弾性係数、ポアソン比、およびせん断弾性係数を算出した。また、比較として、樹脂・繊維の物性値に文献値⁸⁾⁹⁾を適用した均質化解析を実施した。使用した樹脂・繊維の物性値を表 2 に示す。

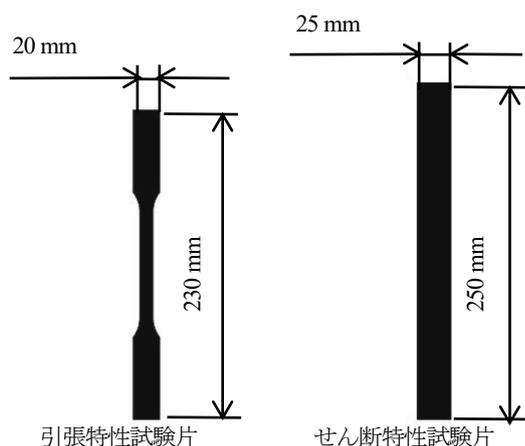


図 5 引張・せん断試験片

Fig. 5 Tensile/shear test piece

表 2 樹脂・ガラスの文献値

Table 2 Literature data of resin and glass

項目		特性値
PA6 弾性係数	[GPa]	2.6
ガラス弾性係数	[GPa]	72.0
PA6 ポアソン比	[-]	0.36
ガラス繊維ポアソン比	[-]	0.24

表 3 に連続繊維材の実験値と文献値を用いた均質化解析値、表 4 に不連続繊維材の実験値と文献値を用いた均質化解析値を示す。連続繊維材、不連続繊維材ともに、せん断弾性係数は実験値と文献値を用いた均質化解析値で大きく異なっている。

表 3 実験値と文献値での均質化解析値(連続繊維材)

Table 3 Experimental properties and homogenized ones using literature data (continuous fiber materials)

項目		実験値	文献値での均質化解析値
$E_1 E_2$	[GPa]	20.3	20.24
G_{12}	[GPa]	1.4	2.95
ν_{12}	[-]	0.11	0.15

表 4 実験値と文献値での均質化解析値(不連続繊維材)

Table 4 Experimental properties and homogenized ones using literature data (discontinuous fiber materials)

項目		実験値	文献値での均質化解析値
$E_1 E_2$	[GPa]	15.4	15.91
G_{12}	[GPa]	5.1	2.95
ν_{12}	[-]	0.35	0.31

< 3. 3. 2 > 逆解析による繊維・樹脂物性値の算出

逆解析では、引張試験で取得可能な 4 つの物性値について、実験で得た値に近くなるように、最適化計算を用いて、均質化解析に入力する母材と繊維の物性値を推測する。連続繊維材の最適化計算は遺伝的アルゴリズムを用いて行った。遺伝的アルゴリズムは、生物の進化にヒントを得た最適化アルゴリズムであり、大域的最適解への探索能力が高く、勾配情報を用いることのできない場合でも適用可能という特徴を有する。一般的な遺伝的アルゴリズムは、①パラメータの組み合わせをランダムに複数決定し、②最初のパラメータの適合度をもとに、改めてパラメータを決定、という流れで実行される。図 6 にパラメータの決定方法の概要を示す。選択では、1 世代前のパラメータの組み合わせから適合度の高いものをそのまま次の世代に選び、交叉では 1 世代前の複数

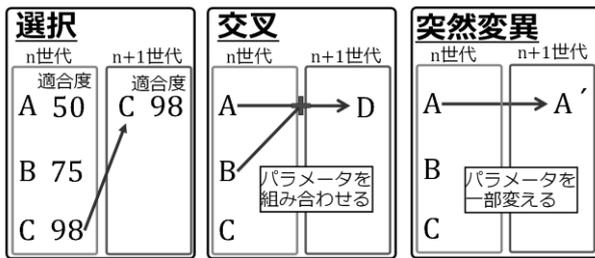


図6 パラメータ決定方法の概要

Fig. 6 Overview of determination of the parameters

のパラメータの組み合わせを入れ替えて新たな組み合わせを次の世代に作成、突然変異では1世代前のパラメータの組み合わせの一部を変化させて次の世代を作成する。本研究では MathWorks 社製 MATLAB 2021 の Global Optimization Toolbox に付属の遺伝的アルゴリズム *ga* を用いた。最適化を行う際の樹脂・繊維単体の物性値の組み合わせの範囲を表5に示す。樹脂・繊維単体の合計4つの物性値について、表5に示される範囲で1世代あたり50個の組み合わせパターンが作成され、300世代を経て最適化される。

表5 最適化のパラメータ範囲

Table 5 Parameters range for the optimization

Parameter		Min.	Max.
PA6 弾性係数	[GPa]	0.4	5
PA6 ポアソン比	[-]	0.2	0.4
ガラス繊維弾性係数	[GPa]	35	140
ガラス繊維ポアソン比	[-]	0.2	0.4

遺伝的アルゴリズムの最適化計算において、各パラメータの組み合わせにおける適合度の計算は、図4の有限要素均質化法を行うことに相当する。本研究の有限要素均質化法は、1回の計算に約70秒かかることから、1世代のパターン数50で300世代の計算を行った場合、計算には約290時間かかることになる。この計算時間は、複数回の最適化の検証を行うことを考えると作業効率が悪くなると判断し、本研究では有限要素均質化法を再現できる計算時間の短い代理モデルを事前に作成することとした。代理モデルは、少数のサンプリングデータをもとに、元の入出力関係を再現するモデルである。代理モデルを少数のサンプリングデータをもとに作成し、代理モデルを利用して遺伝的アルゴリズムの計算を行うことで、計算時間を大幅に短縮することが可能になる。代理モデルは、クリギング法⁽¹⁰⁾を用いて作成した。クリギング法は応答曲面法のひとつであり、統計的手法で入力と出力の関係を近似する。クリギング法は非線形関係をもつ入出力関係であっても近似しやすいという特徴をもつことから今回は選択した。クリギング法のプログラム作成は MATLAB を用いて行い、サンプリングデータは200パターンとした。

一方、不連続繊維材の逆解析は、Hexagon 社製 Digimat-RP2021.1 を用いた。Digimat-RP では、前述の平均場均質化法による均質化解析と組み合わせ、実験値に合うような母材と繊維の物性値の最適化を可能とする機能を有する。

上記の手法を用いて、逆解析で合わせこんだ樹脂・繊維単体の物性値を図7に示す。連続繊維材では樹脂の弾性係数、ポアソン比、ガラス繊維の弾性係数、不連続繊維材ではガラスのポアソン比が文献値と解析結果で大きな違いが認められる。また、合わせこみ後では、樹脂・繊維単体の弾性係数およびポアソン比は連続繊維材と不連続繊維材で異なった値となっている。この原因としては、連続繊維材と不連続繊維材の製造方法の違いによる物性の変化や解析モデルと実形状の不一致などが考えられる。

合わせこみを行った樹脂・繊維の物性値を用いた連続繊維材と不連続繊維材の均質化解析値をそれぞれ表6、表7に示す。文献値を用いた均質化解析では、連続繊維材では G_{12} と ν_{12} の値、不連続繊維材では G_{12} の値が実験値と大きく離れているが、合わせこみ後の均質化解析値は実験値に近づいた。また、合わせこみ後の均質化解析値は連続繊維材では実験値と比較して±1%以内の誤差で収まっているのに対し、不連続繊維材は実験値と比較して E_1 は-3.0%、 G_{12} は+11.8%、 ν_{12} は-8.6%となっている。すなわち、合わせこみ後の均質化解析値は、不連続繊維材の方が連続繊維材よりも実験値との誤差が大きい。この原因としては、解析モデルと実形状の不一致によって、すべての実験値と一致するような繊維・樹脂単体のパラメータが存在しないことが考えられる。また、不

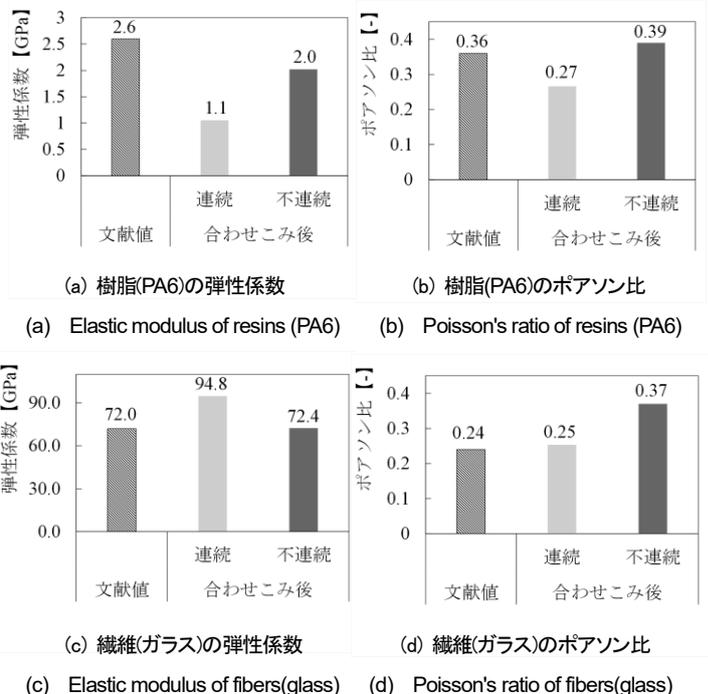


図7 樹脂と繊維単体の物性値

Fig. 7 Physical property of resins and fibers

表 6 合わせこみ後の均質化解析結果(連続繊維材)

Table 6 Homogenized properties with inverse analysis (continuous fiber materials)

項目		実験値	合わせこみ後の均質化解析値	文献値での均質化解析値
E_1	[GPa]	20.31	20.35	20.24
E_2	[GPa]	20.31	20.35	20.24
E_3	[GPa]	-	3.41	9.02
G_{12}	[GPa]	1.45	1.44	2.95
G_{23}	[GPa]	-	0.95	2.06
G_{31}	[GPa]	-	0.95	2.06
ν_{12}	[-]	0.06	0.06	0.15
ν_{23}	[-]	-	0.237	0.31
ν_{31}	[-]	-	0.04	0.14

表 7 合わせこみ後の均質化解析結果(不連続繊維材)

Table 7 Homogenized properties with inverse analysis (discontinuous fiber materials)

項目		実験値	合わせこみ後の均質化解析値	文献値での均質化解析値
E_1	[GPa]	15.42	14.96	15.91
E_2	[GPa]	15.42	14.96	15.91
E_3	[GPa]	-	6.72	7.63
G_{12}	[GPa]	5.05	5.65	6.05
G_{23}	[GPa]	-	1.82	2.34
G_{31}	[GPa]	-	1.82	2.34
ν_{12}	[-]	0.35	0.32	0.31
ν_{23}	[-]	-	0.36	0.33
ν_{31}	[-]	-	0.16	0.16

連続繊維材の均質化解析では平均場均質化法を用いているため、繊維の形状を回転楕円体で表現しているという点もモデルの不一致の要因のひとつとなっていると考えられる。

4. ハット型成形品の剛性評価

< 4. 1 > ハット型成形品の剛性評価試験

ハット型成形品の剛性評価は、連続/不連続サンプルと不連続/不連続サンプルを用いて図 8 に示す概略図のように、三点曲げ試験により評価した。試験は東京衡機試験機社製万能試験機 (RU-1000) で行った。試験条件は変位速度を 1 mm/min、支点間距離を 240 mm とした。試験結果より得られた荷重-変位曲線から、変位が 0.3 mm から 0.8 mm の範囲の傾きを剛性として算出した。

< 4. 2 > ハット型成形品の有限要素解析

実験と同様の条件となるようにハット型成形品の有限要素法解析を実施した。解析ソルバーには Hexagon 社製 MARC2022.1 を使用した。図 9 に剛性解析に用いた有限要素モデルを示す。本モデルは 1/4 対称で、要素は 3 次元厚肉シェル 4 角形 2 次要素とした。連続/不連続構成のハット型成形品は、前述のとおり、全体積に対して連続繊維材と不連続繊維材の割合は 2:1 で作製されているため、解析モデルではハット型成形品の板厚 3 mm に対して、連続繊維材および不連続繊維材の厚み方向の割合を 2:1 とした。

解析評価は中央の圧子の変位が 0 mm から 1 mm の範囲の傾きを剛性として算出した。

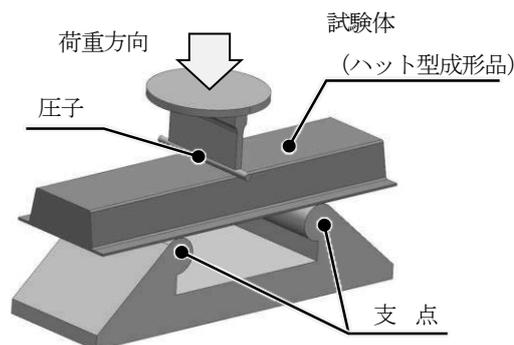


図 8 剛性評価の概略図

Fig. 8 Schematic diagram of stiffness evaluation

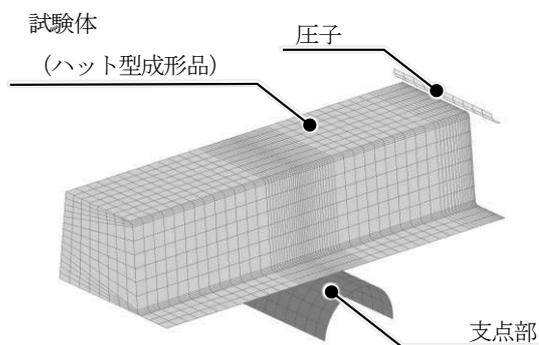


図 9 ハット型成形品の剛性評価の有限要素モデル(1/4 対称モデル)

Fig. 9 Finite element model for stiffness evaluation of hat shaped member (1/4 model)

< 4. 3 > 実験結果と解析結果の比較

連続/不連続サンプルの曲げ剛性の実験結果と解析結果を図 10、不連続/不連続サンプルの剛性の実験結果と解析結果を図 11 に示す。連続/不連続のサンプルのハット型成形品の曲げ剛性は、実験値と比較して、合わせこみを行った均質化解析値は -11.8%、文献値を用いた均質化解析値は 12.3%の誤差となっており、実験値との誤差は同程度となった。不連続/不連続のサンプルのハット型成形品の曲げ剛性は、実験値と比較して合わせこみを行った均質化

解析値は 3.8%、文献値を用いた均質化解析値は 14.5%の誤差となっており、合わせこみを行った均質化解析値の方が文献値を用いた均質化解析値と比較して実験値に近い結果となった。

連続/不連続サンプルの曲げ剛性解析値が実験値との誤差が同程度となった要因としては、実際のハット型成形品が場所によって不連続繊維材の占める割合が変化していることが考えられる。連続/不連続構成のハット型成形品は、使用する連続繊維材の材料基板の 1/2 の大きさの不連続繊維材の材料基板を、連続繊維材の材料基板の中央部に重ねた状態でプレス成形されている。そのため、連続/不連続構成のハット型成形品では、中央部に不連続繊維材が多く含まれることで、合わせこみを行った均質化解析が実験値に対して小さくなったのではないかと考えられる。

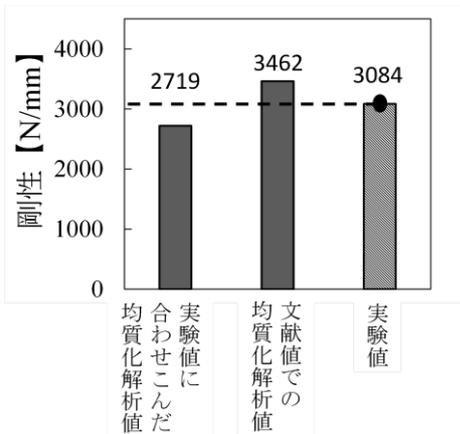


図 10 連続/不連続サンプルの剛性結果

Fig. 10 Stiffness results for continuous/discontinuous hat shaped member

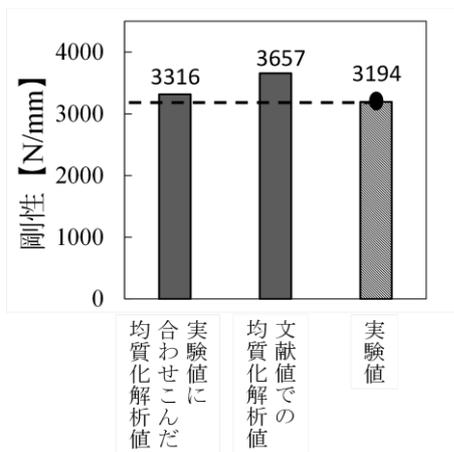


図 11 不連続/不連続サンプルの剛性結果

Fig. 11 Stiffness results for discontinuous/discontinuous hat shaped member

5. 結言

本研究では、CAE を用いた FRP 製品の構造解析の精度向上を目的として、引張試験結果を用いた均質化解析の逆解析をガラス

繊維 FRP に適用し、FRP 基板の材料物性値評価、ならびにスタンピング成形により作製されたハット型成形品の曲げ剛性について CAE および実験的評価を行った。以下に得られた知見を示す。

【逆解析による材料物性の合わせこみ】

- 連続繊維材、不連続繊維材ともに、文献値を用いた均質化解析値と実験値でせん断弾性係数 G_{12} が大きく異なる結果となった。
- 逆解析で合わせこんだ樹脂・繊維単体の物性値は文献値と比較して大きな違いが見られる物性値があった。合わせこみ後の樹脂・繊維単体の弾性係数およびポアソン比は連続繊維材と不連続繊維材で異なった値となっており、その原因としては連続繊維材と不連続繊維材の製造方法の違いによる物性の変化や解析モデルと実形状の不一致などが考えられる。
- 文献値を用いた均質化解析値で実験値と値が大きく離れていた連続繊維材の G_{12} と ν_{12} の値、不連続繊維材の G_{12} の値について、合わせこみ後の均質化解析値では実験値に近づいた。
- 合わせこみ後の均質化解析値は連続繊維材より不連続繊維材の方が実験値との誤差が大きい。原因として、解析モデルと実形状の不一致によって、すべての実験値と一致するような繊維・樹脂単体のパラメータが存在しないことが考えられる。

【ハット型成形品の剛性評価】

- 連続/不連続のサンプルのハット型成形品の曲げ剛性は、合わせこみを行った均質化解析値と文献値を用いた均質化解析値と同程度の誤差となった。原因として、実際のハット型成形品が場所によって不連続繊維材の占める割合が変化していることが考えられる。
- 不連続/不連続構成のハット型成形品の曲げ剛性は、合わせこみを行った均質化解析値の方が、文献値を用いた均質化解析値より実験値に近づく結果となった。

【引張試験結果から逆解析する均質化解析の有効性】

- 逆解析を行うことにより、文献値を使用した均質化解析より実際の複合材物性値に近い物性値を算出することが可能であることが示された。ただし、解析モデルの精度によって実験値への合わせこみ精度も変化するため、実際のモデルの再現性も重要であると考えられる。

今後の課題

連続/不連続構成のハット型成形品が場所によって連続繊維材不連続繊維材の割合が変化しているのかを調査し、連続/不連続構成のハット型成形品の曲げ剛性の誤差が大きい要因となっているかを検証する。実証された場合、複数の材料の割合が部分的に変化する製品の解析方法の検討を行う必要がある。

文 献

- (1) 寺田賢二郎, 平山紀夫, 山本晃司, 数値材料試験, 丸善出版 2020
- (2) 田中和馬, 大上戸勇馬, 永井孝紀, 中村陽文, 吉江真太郎, 能登亜里彩, 清水孝晃, 鍋澤浩文, プラスチック製品の性能向上のための設計技術と評価に関する研究, 若い研究者を育てる会 研究論文集 2023
- (3) 強化プラスチック協会, 基礎からわかる FRP・繊維強化プラスチックの基礎から実用まで, コロナ社 2016
- (4) 彌武朋也, 安原重人, 内田忠行, 上坂聡, 井波克之: 繊維形態の異なる熱可塑性 FRP の高強度・成形自由度を両立した複合同時成形技術の開発. 成形加工 第31巻 第10号 2019 P388
- (5) TexGen (Version 3.12.1), University of Nottingham 2014.
<http://doi.org/10.5281/zenodo.4537855> [viewed 05.01.2024]
- (6) JIS K 7161, プラスチック —引張特性の試験方法—
第4部: 等方性及び直行異方性繊維強化プラスチックの試験条件
- (7) JIS K 7019, 繊維強化プラスチック ±45° 引張試験による面内せん断特性の求め方
- (8) 株式会社 KDA, PA6(6 ナイロン)樹脂 物性表 6N(6 ナイロン)樹脂の物性の詳細について,
https://www.kda1969.com/materials/pla_mate_pa6b.htm
- (9) 株式会社光和, VMP ガラス繊維,
<http://www.kowaweb.com/vmp-glass/>
- (10) Alexander I.J. Forrester, András Sóbester and Andy J. Keane, Engineering Design via Surrogate Modelling, John Wiley & Sons 2008

IV. 衝撃応答特性の測定および電子部品の信頼性向上

Measurement of Shock Response Characteristics and Improvement of Reliability of Electronic Components

松田 修人

MATHUDA Shuto

吉江 真太郎

YOSHIE Shintaro

中村 陽文

NAKAMURA Takafumi

林 怜汰

HAYASHI Ryota

羽柴 利直

HASHIBA Toshinao

鍋澤 浩文

NABESAWA Hirofumi

Abstract

In recent years, with the expansion of the use of consumer products in the aerospace field, various electronic components are being required to have high shock resistance. In addition, electronic components used in satellites, etc. need to be evaluated using the shock response spectrum (SRS), so designing the shock resistance of electronic components in consideration of the natural frequency has become an issue. However, as power supplies composed of various electronic components are designed for use in environments where shock is not anticipated, there is little knowledge about their shock resistance. In this research, we use a drop shock tester to measure and observe the shock response characteristics of electronic components (Ferrite cores) mounted in power supplies, and create a CAE analysis model to predict shock resistance performance. Furthermore, based on the analysis results, we estimate the design conditions for improving the shock resistance performance, and verify whether or not the improvement of the shock resistance performance has been achieved in the prototype electronic components.

1. 緒言

近年、航空宇宙分野における民生品活用の拡大を背景として、各種の電子部品についても高い耐衝撃性が求められるようになりつつある。また、人工衛星等に用いられる電子部品では、衝撃応答スペクトル (SRS) を用いた評価が必要であることから、固有振動数を考慮し、様々な周波数帯における電子部品の耐衝撃性を測定・設計する技術の確立が課題となっている^①。このうち、様々な電子部品から構成されている電源装置は、衝撃を受けない環境下での使用を前提としているため、耐衝撃性に関する知見は少ない。実際に、一般的な産業機械用で使用される電源装置の耐衝撃性の仕様値は 20~50G 程度であり、航空宇宙分野で必要とされる数千 G 程度の仕様には及ばず、現在の製品設計及び製造手法では、宇宙航空分野で要求される耐衝撃性の仕様に対応することが極めて困難な状況にある。

そこで本研究では、電源装置における耐衝撃性を向上させるための設計条件 / 製造手法の確立を目的とし、落下衝撃試験機 (神栄テクノロジー株式会社製、MDST-300) を用いて電源装置に使用されている電子部品 (フェライトコア) の衝撃応答特性の測定及び観察等を行い、CAE 解析による仮想的な落下衝撃試験から耐衝撃性を高めるための設計条件 / 製造手法を推定した。さらに、試作したサンプルにおいて耐衝撃性能の向上が実現できたか否かの検証を行った。

2. 研究対象

< 2. 1 > フェライトコアの概要

本研究で研究対象としたフェライトコアとは、電子機器で使用される磁性材料の一種であり、電源装置内では電圧や電流を効率よく変換することや発生するノイズを小さくすることを目的としたトランスやコイルとして、一般的に広く使用されている。主な組成は、Mn-Zn 系 / Ni-Zn 系である。

< 2. 2 > 対象選定

本研究では、図 1 に示す電源装置「CHS380 モデル (コーセル株式会社製、以下 CHS380)」のトランスに使用されているフェライトコアを研究対象とした。このトランスは、図 2 に示すように E コア(a)、I コア(b) の 2 つのフェライトコアから構成されている。



-仕様-

・入力電圧 DC36 - 76 [V]

・出力電圧 DC10 / 12 [V]

・外形寸法 58.4 × 11.0 × 22.86 [mm]
(W × H × D)

・質量 38 [g]

図1 電源装置(CHS380モデル)

Fig. 1 Power supply (CHS380 model)

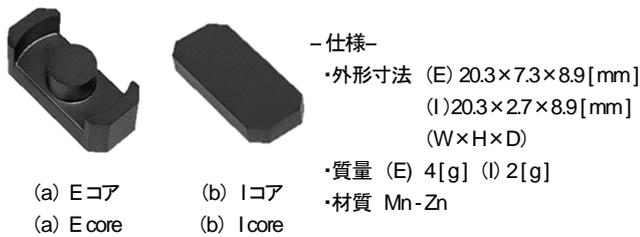


図2 フェライトコア
Fig.2 Ferrite core

本品を選定した理由は、下記の3点である。

- (1) 航空宇宙分野では DC-DC 電源の使用実績があり、CHS380 も同様に DC-DC 電源である⁹⁾。
- (2) 予備実験として CHS380 で衝撃試験を実施した結果、E コア及び I コアに機械的破損が発生し、他の部品には機械的破損が見られなかった。
- (3) E コア-I コアの構成は、一般的である。

3. 現状評価

< 3. 1 > サンプル製造方法

現品の評価を実施するためには、評価用サンプルを複数製造する必要がある。実際の電源装置は様々な電子部品が実装されているが、本研究では対象をフェライトコアに絞っているため、基板にフェライトコアのみを実装したサンプルを製造した。サンプルの外観及び製造工程フローを図3, 4, 5に示す。フェライトコア実装工程や熱硬化条件は実際の生産工程と同等とし、接着剤はディスペンサー装置の使用で塗布量や位置を管理することで製造要因のばらつきが小さくなるよう製造を行った。

また、衝撃試験時に意図した衝撃をサンプルに加えられるように、電源実装ピンにあたる4か所にφ3の通し穴を開け、M3ボルト及びスペーサー (h=10mm) で衝撃試験機と固定できるようにし、固定の際はトルクドライバーでトルク管理を行った。衝撃試験時におけるサンプルの固定状態を図6に示す。

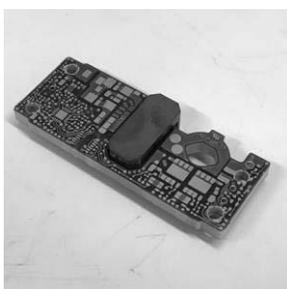


図3 評価サンプル外観
Fig.3 Sample appearance

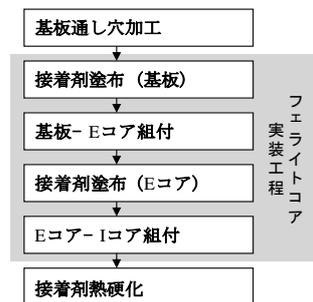


図4 製造工程フロー
Fig.4 Manufacturing process flow

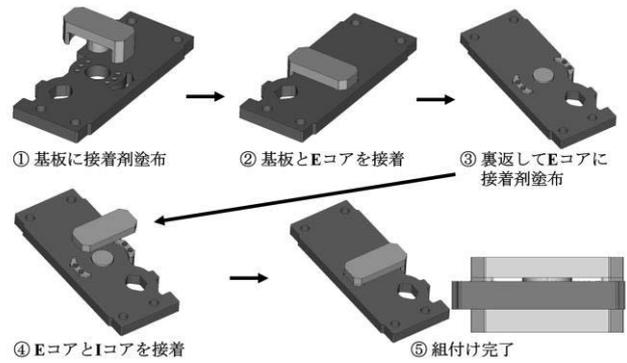
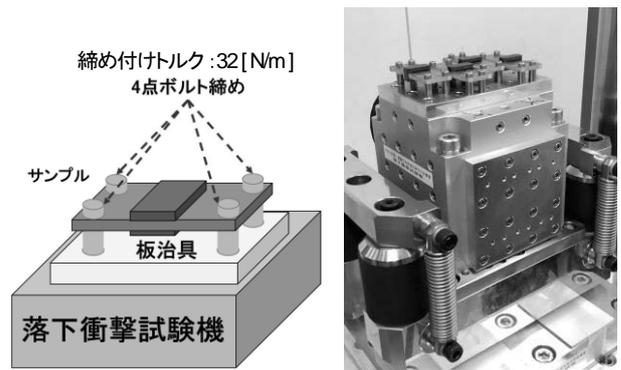


図5 フェライトコア実装工程フロー
Fig.5 Implementation flow of ferrite core



(a) 固定イメージ (a) Fixed Image
(b) 実際の固定状態 (b) Actual Steady State

図6 衝撃試験時のサンプル固定状態

Fig.6 Fixation of the sample during the shock test

< 3. 2 > 評価方法

衝撃試験の条件を表1に示す。本研究では、フェライトコアの焼結状態や製造工程時のばらつきを考慮し、1水準につき n = 20個とした。また、1サンプルにつき3回繰り返し試験を実施した。

表1 衝撃試験の条件
Table 1 Shock test conditions

項番	項目	条件
1	落下方向	基板面に対して垂直
2	最大加速度 [G]	1,890
3	作用時間 [ms]	0.32
4	サンプル数 (個)	20
5	1サンプルの試験回数	3

試験時に印加する衝撃は、宇宙ミッションにおける要求仕様値 (SRS) を上回る条件で実施した。SRS とは、入力された衝撃パルスが異なる固有振動数の部品にどのように伝搬するかを表したグラフ (x: 周波数, y: 加速度) であり、入力する衝撃パルス波形を変換することで、周波数ごと (固有振動数) の最大応答値をプロットしたものである。本研究で実施した衝撃試験の SRS と衝撃波形を図7に示す¹⁰⁾。

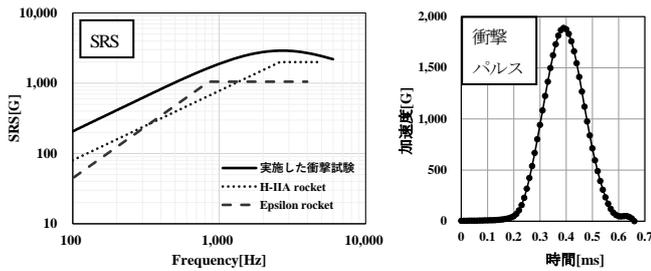


図7 本研究で実施した衝撃試験のSRSと衝撃パルス
Fig. 7 SRS and shock waveform of the shock test performed

また、試験時は高速度カメラでサンプルを撮影し、フェライトコアの状態を確認できるようにした。

製造後及び衝撃試験後におけるサンプルの良品判定は、外観の検査及び電気的特性の評価の2点で行った。外観の検査は、目視でフェライトコアに割れや欠け、接着部の剥離などを確認した場合に不良品とした。電気的特性の評価は、トランスのインダクタンス値（以下L値）が仕様を逸脱した場合、あるいは、衝撃試験前後で計器誤差以上に変わった場合を不良品とした。L値測定にはLCRメータ（三和電気計器株式会社製、LCR700）を使用した。評価フローを図8に示す。

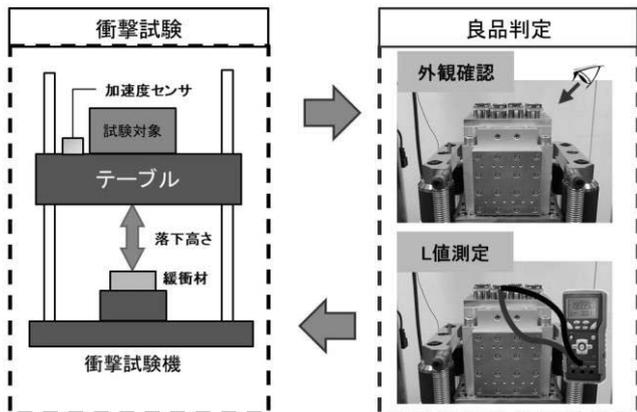


図8 評価フロー
Fig. 8 Evaluation flow

< 3. 3 > 現状サンプルの衝撃試験結果

現状サンプル（耐衝撃性向上の試作なし）の衝撃試験結果を図9に示す。サンプル20個中6個においては、外観の検査で破損を確認し、不良品判定であった。機械的破損が生じたサンプル以外の電気的特性において、不良品判定はなかった。これらより、現状サンプル不良率は30%である結果を得た。

外観異常を確認したサンプルの内訳は、Eコアの割れによるものが4件、Iコアの割れによるものが1件、基板-Eコア間の接着剤剥離によるものが1件であった。

図10に外観異常を確認したサンプルの一例を示す。Eコアの割れはすべてにおいて、接着面ではないEコア外脚部の付け根で発生し、Iコア割れはIコア両端部の接着面で発生していた。

また、高速度カメラの映像より、破損したサンプルは、緩衝材との衝突による衝撃で基板に大きなたわみが発生し、破損していることが確認された。

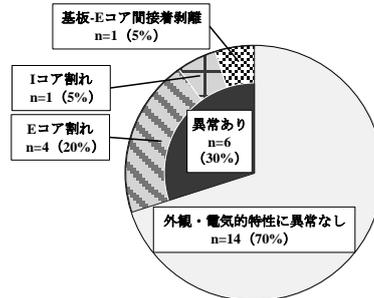
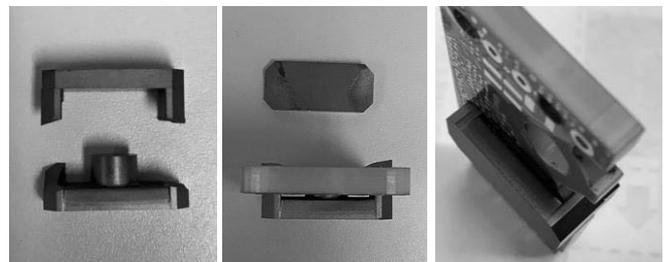


図9 現状サンプルの衝撃試験結果
Fig. 9 Shock test results of current sample



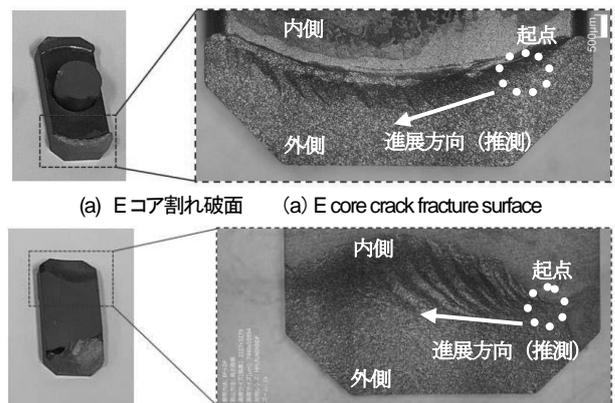
(a) Eコア割れ (a) Crack of E core
(b) Iコア割れ (b) Crack of I core
(c) 接着剤剥離 (c) Adhesive peeling

図10 破損サンプルの外観

Fig. 10 Appearance of damaged samples

< 3. 4 > 破面観察

顕微鏡を用いて破損サンプルの破面観察を実施した結果を図11に示す。Eコア割れ/Iコア割れともに、内側に破面模様の間隔が狭い部分を起点として、矢印の方向に亀裂が進展したような破面となっていることが確認できた。そのため、Eコアは外脚部付け根の内側端部、IコアはEコアとの接着面内側端部を起点として割れが発生したことが示唆された。



(a) Eコア割れ破面 (a) E core crack fracture surface

(b) Iコア割れ破面 (b) I core crack fracture surface

図11 破面の状態

Fig. 11 Fractured surface condition

< 3. 5 > 評価結果の考察

Iコア割れや基板-Eコア間の接着剥離は、接着面での破損であることから接着剤の熱硬化不良といった製造時の問題である可能性が考えられる。それに対し、Eコア割れは接着面以外の箇所破損していることから製造時の問題ではなく、フェライトコアの本来の強度を超える外力が印加されたことにより破損したものと考えられた。また、他の破損形態と比較しても発生率が高いことを踏まえると、耐衝撃性を向上させるためにはEコア割れを防止する必要があると考えられた。

Eコア割れの破面観察結果から、破損形態の推定を行った。破損形態を以下に示すように推定した(図12)。

- ① サンプルは落下中、重力による加速度を受け落下する。
- ② 衝撃が加わった直後、フェライトコアはそのまま落下し続けようとするのに対し、基板は衝撃の反動を受け、上向きの力が働く。この時、フェライトコアには上下反対の力が働くことで引張応力が急激に増加する。
- ③ ②で発生した引張応力に耐えきれずフェライトコアが破損する。また、引張応力はEコア外脚部の付け根に集中した。

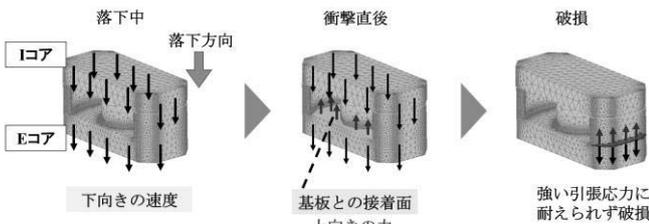


図12 破損形態の推定

Fig. 12 Estimation of damage form

4. CAE解析

< 4. 1 > 解析モデル

< 3. 5 > に示す考察を検証するために、CAE解析を実施した。現状評価用の解析モデル(以下現状モデル)を図13に示す。フェライトコアには、基板を介して応力が加わるため、Eコア、Iコアだけでなく、基板を合わせた計3点のモデルを作成した。

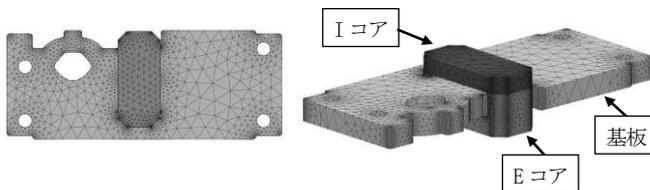


図13 現状モデル

Fig. 13 Current analysis model

< 4. 2 > 材料物性及び解析条件

フェライトコア及び基板の材料物性は表2のように、①ヤング率、②ポアソン比、③密度の3点を使用した。フェライトコアの材料物性はコアメーカーのデータベースから抜粋した値を用い^③、基板は引張試験(n=2)の平均値を用いた。

解析条件を表3に示す。境界条件の加速度は、衝撃試験を再現するため、衝撃試験で得た衝撃パルスのデータから、(x:時間、y:加速度)のデータセットを100点抽出(0.01ms間隔、計1ms)し、基板通し穴内部に境界条件として与えた。また、初速度は、加速度変化量の積分から速度の変化量を算出できることから、図14に示す衝撃試験で得た衝撃パルスを頂点以前の加速度を積分することで算出した。さらに解析結果として最大主応力が出力されるように設定した。評価に用いる解析出力値として最大主応力を選定した理由は、下記の2点である。

- (1) セラミック材料の強度評価のためのCAE解析では最大主応力が一般的に多く使用される。
- (2) 表4のようにフェライトコアの圧縮強度、曲げ強度、引張強度を比較した場合、引張強度が他に比べて非常に小さい^④。

表2 材料物性

Table 2 Material properties

項番	項目	フェライトコア (Eコア/Iコア)	基板
1	ヤング率 [MPa]	120,000	33,500
2	ポアソン比	0.25	0.25
3	密度 [kg/m ³]	5,000	1,400

表3 解析条件

Table 3 Analysis conditions

項番	項目	条件
1	解析タイプ	動解析
2	要素タイプ	四面体二次要素
3	要素サイズ [mm]	0.25
4	境界条件	初速度:1,828 [mm/s] 加速度:図13参照 加速度印加箇所:基板通し穴内部 時間:1.0 [ms]
5	解析出力値	最大主応力

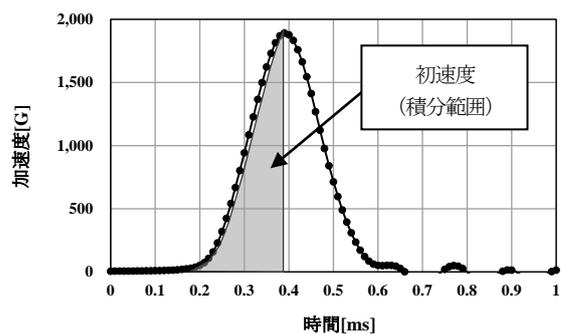


図14 衝撃試験で得た衝撃パルス

Fig. 14 Shock pulses obtained from shock test

表4 フェライトコアの強度
Table 4 Strength of ferrite core

項番	項目	強度
1	圧縮強度 [MPa]	800
2	曲げ強度 [MPa]	100
3	引張強度 [MPa]	20

< 4. 3 > CAE 解析結果と考察

応答パルス頂点到達時（加速度が最大となる瞬間）の CAE 解析結果を図 15、E コア外脚部付け根の節点における最大主応力の時間推移を図 16 に示す。図 15 より、応答パルスの頂点到達時において、現状モデル内で最大主応力が最も大きくなった箇所は、E コア外脚部の付け根に位置する節点であった。また、図 16 より、E コア外脚部の付け根では約 1,489 MPa もの最大主応力が生じていることが確認できる。

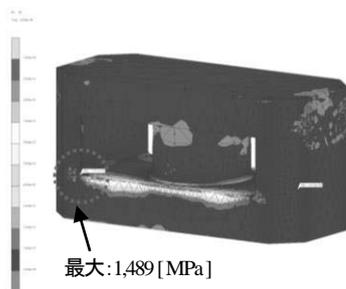


図 15 応答パルス頂点到達時の CAE 解析結果(現状モデル)

Fig. 15 Results of CAE analysis when the response pulse reaches its apex (Current model)

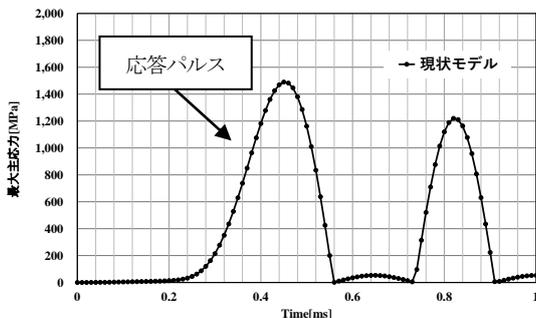


図 16 応答パルス頂点到達時の CAE 解析結果(現状モデル)

Fig. 16 Results of CAE analysis when the response pulse reaches its apex (Current model)

なお、E コア外脚部の付け根で最大主応力が最も大きくなることが確認できたため、< 3. 5 > で前述した考察は適切であったと考えられる。従って、E コア外脚部の付け根に生じる最大主応力を低減することで、フェライトコアの耐衝撃性を向上させることができると考えられる。

5. 改善策の立案及び実施

< 5. 1 > 改善策の検討

E コア外脚部の付け根に生じる最大主応力を低減するため、改善策を検討した。今回研究対象としたフェライトコアは既製品であり、かつ、焼結体であるため、形状の再設計や追加加工は難しい。本研究ではフェライトコア自体の形状や材質は変えず、印加される衝撃を緩和する方法を検討した。また、改善策検討後に事前検証を実施するため、CAE 解析モデルの作成を行った。

< 5. 1. 1 > 弾性接着剤追加による改善の検討

フェライトコアの周囲を弾性接着剤で補強する方法を検討し、作成した解析モデル（以下、弾性接着剤追加モデル）を図 17 に示す。弾性接着剤には、電気部品用である SX720WH（セメダイン製）を使用した。SX720WH は、主成分がシリコンの一液常温湿気硬化型の接着剤であり、耐震、絶縁を目的として電源で使用されている。材料物性は、ダンベル型試験片を作製し、引張試験（n=3）の平均値を用いた（表 5）。

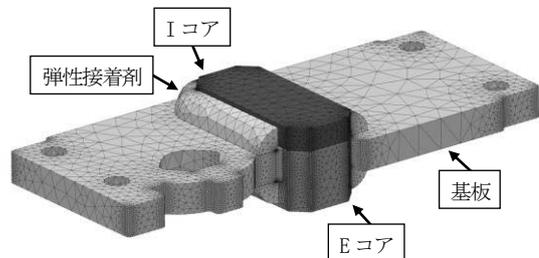


図 17 弾性接着剤追加モデル

Fig. 17 The elastic adhesive additional model

表 5 弾性接着剤の材料物性

Table 5 Material properties of elastic adhesive

項番	項目	弾性接着剤
1	ヤング率 [MPa]	39.9
2	ポアソン比	0.35
3	密度 [kg/m ³]	1,590※

※は文献値、そのほかは実験値

< 5. 1. 2 > 放熱ゲルシート挿入による改善の検討

E コア外脚部に加わる衝撃を緩和することを意図して、厚さ 0.5 mm の放熱ゲルシートで I コア - 基板間の隙間を埋める方法を検討し、作成した解析モデル（以下、放熱ゲルシート挿入モデル）を図 18 に示す。放熱ゲルシートには、COH シリーズ（タイカ製）を採用した。放熱ゲルシートは主成分がシリコンであり、主に熱を効果的に伝導し、冷却ファンやヒートシンクを介して放熱することを目的として使用される。材料物性はダンベル型試験片を作製し、引張試験（n=2）の平均値を用いた（表 6）。

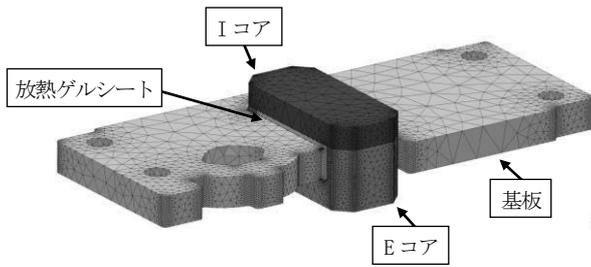


図 18 放熱ゲルシート挿入モデル
Fig. 18 The gel sheet insertion model

表 6 放熱ゲルシートの材料物性
Table 6 Material properties of gel sheet

項番	項目	放熱ゲルシート
1	ヤング率 [MPa]	1.06
2	ポアソン比	0.16
3	密度 [kg/m ³]	2,800※

※は文献値、そのほかは実験値

< 5. 1. 3 > ヒートシンク組み付けによる補強

ヒートシンクを電源に這わせて補強し、基板のたわみを小さくすることを意図し、作成した解析モデル（以下、ヒートシンク追加モデル）を図 19 に示す。簡易的なヒートシンクを模した部材として、厚さ 5 mm のアルミプレート（材質：A5052）を採用した。材料物性は、A5052 の文献値を用いた（表 7）。

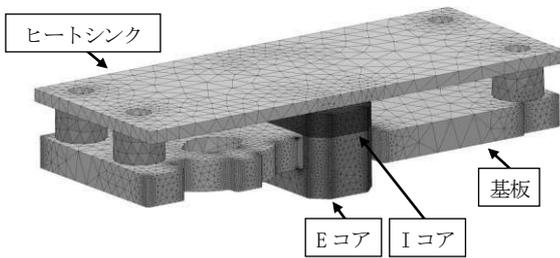


図 19 ヒートシンク追加モデル
Fig. 19 The additional heat sink model

表 7 材料物性
Table 7 material properties of heat sink

項番	項目	ヒートシンク
1	ヤング率 [MPa]	71,000※
2	ポアソン比	0.33※
3	密度 [kg/m ³]	2,680※

※は文献値

< 5. 1. 4 > 基板-Iコア接着による改善の検討

E コア外脚部に加わる応力を小さくするため、E コアと I コアの組付位置を反転させ、基板と I コアを接着する方法を検討した。E コアと I コアの組付位置を反転させた解析モデル（以下、コア位置反転モデル）を図 20 に示す。基板及び E コアの接着剤塗布は現状モデルと同様としている。

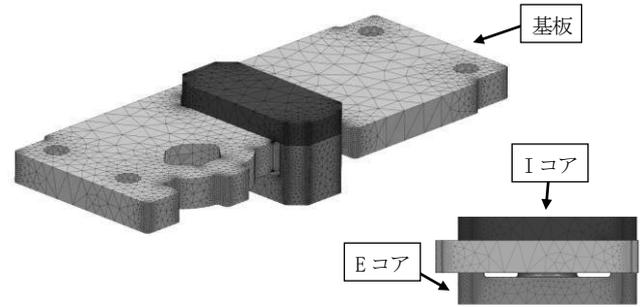


図 20 コア位置反転モデル
Fig. 20 The position inversion model

< 5. 2 > 改善策の CAE 解析結果

< 4. 2 > の各条件を使用し、図 17 から図 20 のモデルに対して CAE 解析により、仮想的な落下衝撃試験を行った。解析結果において、コア位置反転モデル（図 20）以外の解析モデルでは、いずれも現状モデルと同様、E コア外脚部の付け根で最大主応力が最も大きくなることが確認できた。

E コア外脚部付け根の節点における最大主応力の推移（全モデル）を図 21 に示す。弾性接着剤追加モデルは最大主応力が約 1,521 MPa となり現状モデルより大きくなる結果であった。一方で、放熱ゲルシート挿入モデルは約 1,415 MPa、ヒートシンク追加モデルは約 1,270 MPa、コア位置反転モデルは約 63 MPa と現状モデルより小さくなる結果となった。

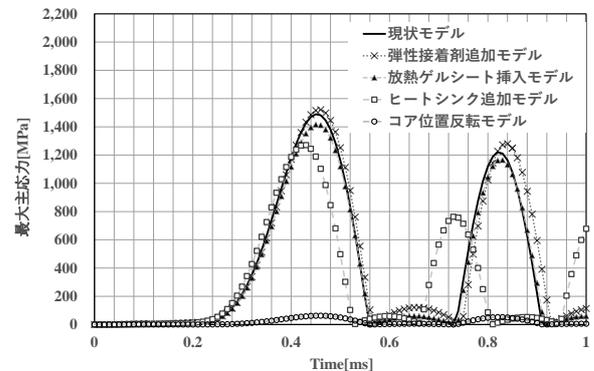


図 21 各モデルの最大主応力推移
Fig. 21 The maximum principal stress for each model

また、コア位置反転モデルに関しては、E コア外脚部付け根の最大主応力は小さくなったが、I コア端部の最大主応力が最も大きくなった。I コア端部の節点における最大主応力の推移を示した図 22 において、現状モデルでは最大主応力が約 21.9 MPa であるのに対し、コア位置反転モデルでは約 226.8 MPa である。

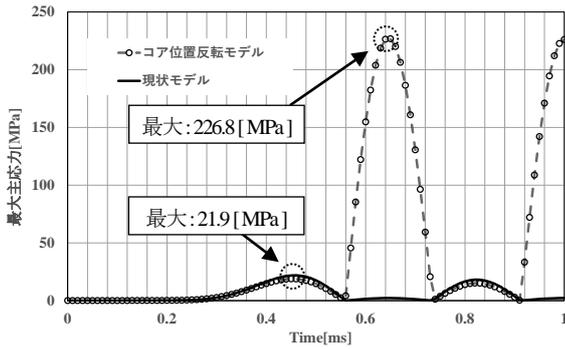


図 22 コア位置反転モデルの最大主応力推移 (1コア)

Fig. 22 Maximum principal stress transition of core position inversion model (1 core)

< 5. 3 > CAE 解析結果の考察

CAE 解析結果より、基板とフェライトコア間を補強するような改善モデル（弾性接着剤追加モデル、放熱ゲルシート挿入モデル）は、現状モデルと最大主応力がおおよそ同等であり耐衝撃性向上が見込めなかった。一方で、ヒートシンク追加モデルは図 21 に示すように最大主応力が小さくなっていることから、若干の向上を見込めた。これは基板を補強することで衝撃印加時の基板たわみが小さくなり、発生する引張応力が小さくなったと推測される（応力推移の周期が小さくなっていることから基板たわみが小さいと推察される）。

コア位置反転モデルも E コアの最大主応力が大幅に小さくなっており、耐衝撃性向上が見込める結果となった。これは基板と E コアの接着面をなくしたことで、衝撃印加時の基板たわみによって発生する E コアの引張応力が小さくなったためと推測される。また、基板と I コアを接着したことで I コアの引張応力は大きくなったものの、I コアは E コアと比較して、角のない平坦な形状であるため、一箇所に応力が集中しにくく、現状モデルよりも最大主応力が小さくなったと考えられる。

< 5. 4 > 改善策の衝撃試験

CAE 解析結果より、今回の改善策検討においては E コア外脚部の付け根における最大主応力が最も低減したコア位置反転モデルに耐衝撃性向上を期待できる。しかし、一方で I コア端部の最大主応力が現状モデルよりも増加しているため、I コアの破損など、現状とは別の形態の破損が起こる可能性も懸念された。そのため、現状モデルと I コア端部の最大主応力が同等で、かつ、次点で E コア外脚部の付け根における最大主応力が低減したヒートシンク追加モデルを加えた 2 つを改善策としてサンプルを製造し、衝撃試験を実施した。

< 5. 4. 1 > コア位置反転モデルの衝撃試験結果

コア位置反転モデルの衝撃試験を実施した結果、図 23 に示すように 20 個中 18 個のサンプルで外観検査において不良品と判定した。なお、不良品と判定したサンプル以外の電気的特性に異常はなかった。

外観検査で不良品と判定した 18 個の内訳は、E コアの割れによるものが 2 件、基板 - I コア間の接着剥離によるものが 16 件であった。コア位置反転モデルでは E コア割れによるフェライトコア破損の発生率は半減したものの、基板 - I コア間の接着剥離の発生率が多発したため破損率が 90% となり、現状モデルよりも破損率が増加する結果となった。

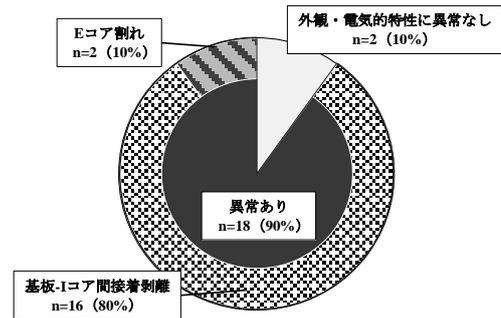


図 23 コア位置反転モデルの衝撃試験結果

Fig. 23 Shock test results of core position inversion model

< 5. 4. 2 > ヒートシンク追加モデルの衝撃試験結果

ヒートシンク追加モデルは、衝撃試験において図 24 に示すように、20 個のサンプルすべてで外観検査と電気的特性検査で異常は見られず破損率が 0% という結果となった。

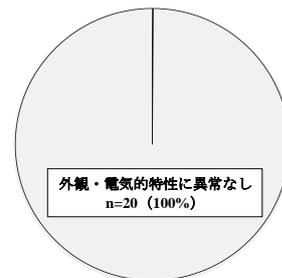


図 24 ヒートシンク追加モデルの衝撃試験結果

Fig. 24 Shock test results of model with additional heat sink model

< 5. 5 > 改善モデルの衝撃試験結果考察

ヒートシンク追加モデルにおいて、CAE 解析で得た最大主応力が小さくなる見込み通りの試験結果となった。

一方で、コア位置反転モデルにおいては、実際の衝撃試験において大多数で基板とフェライトコア間の接着剤が剥離することが問題となった。図 10 では見られなかった破損形態であり、I コア - 基板間の接合状態（接着剤等）はモデル化せずに CAE 解析を行ったことから、今回の結果は予測できなかった。今後の CAE 解析では、接着剤や界面の条件までをもおよそ作りこむことが求められる。

また、今回は衝撃試験を $n=20$ で実施しているが、実際に航空宇宙分野で使用することを考慮すると、より詳細な評価を得るために n 数を増やして追加評価をしていく必要があると考えられる。また、今回はチップ部品が搭載されていない基板を使用している点や衝撃試験の落下方向を 1 つに絞って実施している点から、実用化していくためには実製品での追加検証を実施する必要があると考えられる。

6. 結言

本研究では、民生用電源装置を航空宇宙分野で活用するため、耐衝撃性向上を目的とし、電源装置に使用されている電子部品（フェライトコア）の衝撃応答特性の測定及び観察等を行い、CAE 解析を用いて耐衝撃性を高めるための設計条件 / 製造手法を検討した。さらに、検討した設計条件 / 製造手法を用いて試作を行い、耐衝撃性能の向上が実現できたか否かの評価を行った。

電源の衝撃応答特性の観察は、高速度カメラを用いて DIC 計測により実施した。E コア割れが発生したサンプルにおいて、E コアと接着している基板に大きなたわみが発生したことで E コア外脚部に大きな引張応力が発生しているものと推定された。

E コア割れ発生の際の原因推定を行うため、CAE 解析を実施したところ、衝撃印加時に E コア外脚部の付け根に最大主応力が加わることがわかり、観察結果を裏付ける結果が得られた。

E コア外脚部に最大主応力がかかりにくい改善策を考案・検証するにあたり、試験コストと期間短縮のために、弾性接着剤の追加、放熱ゲルシートの挿入、ヒートシンクの組み付け、I コア-基板接着（コア位置反転）の 4 つの改善策について CAE 解析で効果を確認した。このうち、ヒートシンクの組み付けと I コア-基板接着の改善案で有効性が認められたため、これらのサンプルを製造し、衝撃試験による検証を行った。

I コア-基板接着について衝撃試験を実施したところ、E コアの割れによる破損は改善されたが、基板 - I コア間の接着剥離が多発し、今回の解析モデルでは考慮しなかった基板 - I コア間の接合状態のモデル化に課題を残した。一方でヒートシンク組み付けによる改善手法は、実際の宇宙ミッション要求仕様値を満たす条件で衝撃試験を実施 ($n=20$) した結果、すべての試験サンプルで機械的破損及び電気的特性の異常は見られず改善の効果が

見られた。ただし、これについては、より詳細な評価を得るために n 数を増やして追加評価をしていく必要がある。また、実用化していくためには実製品を用いた追加検証や別方向からの衝撃による評価も併せて実施していく必要があると考えられる。

文 献

- (1) 振子式衝撃試験装置の性能評価および MCP の衝撃耐性評価」宇宙航空研究開発機構 2020 年 2 月
- (2) 宇宙用耐放射線性 POLDC/DC コンバータの開発
<https://jpn.nec.com/techrep/journal/g11/n01/pdf/110123.pdf>
- (3) Mn-Zn 系フェライト材質特性 (TDK)
https://product.tdk.com/ja/system/files?file=dam/doc/product/femite/femite/femite-core/catalog/femite_mn-zn_material_characteristics_ja.pdf
- (4) Mn-Zn ソフトフェライト (NJ コンポーネント株式会社)
https://www.njcomponents.co.jp/product/cd/catalog/femite_catalogi.pdf

V. 製造業におけるデジタルツインを活用した業務改善

Improving Operations by Utilizing Digital Twin in the Manufacturing Industry

中村 宙夢 諸岡 哲史 岩本 健嗣
NAKAMURA Hiromu MOROOKA Satoshi IWAMOTO Takeshi

Abstract

Against the background of social issues such as the population aging and worker shortage, the use of sensing technology to visualize factories and communication tools for online business negotiations has been progressing because the digital devices became low prices. In the manufacturing industry, Digital Twin and virtual reality (VR) technologies can provide the entire easy-to-understand information by visually express. In addition, Digital Twin can realize providing the high effective user experiment (UX) by reproducing the environment in which products are installed in the virtual space. Sales representatives can suggest the product that clients request by communicate with customers using presenting the actual environment in which they use the products in the virtual space. As described above, digitalization has been introduced to the manufacturing industry, and DX has become an indispensable approach to strengthen the competitiveness of companies. However, the information-gathering process, which has a great impact on idea generation and decision-making, is still left to individual capabilities, and digitalization is not progressing well. In the manufacturing industry, there is a need for continuous input of the latest information and technologies to accelerate the development and manufacturing processes. Therefore, in this study, we construct a method of business improvement utilizing by Digital Twin and VR technology for manufacturing operations and confirm its effectiveness.

1. 緒言

高齢化や人手不足といった社会的な課題や、情報通信技術の進展に伴う情報端末の低コスト化を背景に、工場の見える化を目的としたセンシング技術の活用や、オンライン商談を目的としたコミュニケーションツールの導入が進んでいる。また、製造業において、デジタルツイン及び VR 技術を用いることで、業務や工場の全体情報を視覚的に分かりやすく表現できる。加えて、仮想空間上で商品を導入した環境を再現可能にすることで、顧客へ実際の利用環境を提示したうえでコミュニケーションでき、商品の販促に資するなど、ニーズに一致した高い UX の提供が可能となる。

このように、製造業にデジタル化が導入されるようになり、企業の競争力強化のためには DX が欠かせない取り組みとなってきた中、アイデアの創出や意思決定などに大きな影響を与える情報収集プロセスは未だ個人の能力に委ねられ、デジタル化が上手く進んでいない現状もある。製造業において、開発・製造プロセスを加速させるために最新情報や技術を常にインプットし続ける必要がある。そこで本研究では、製造業における業務に対してデジタルツイン及び VR 技術を活用した業務改善手法を構築し、その有効性を確認する。

2. 製造業におけるデジタルツイン

< 2. 1 > デジタルツイン

デジタルツインとは、現実空間に存在する製品や製造設備の情報、及び環境情報などを IoT 技術の活用によりリアルタイムに収集し、それを仮想空間に送ることで、得られた情報をもとに現実空間と全く同じ状態・状況を再構築する技術概念のことを言う¹⁾。

また、デジタルツインでは現在の状態を評価するだけでなく、将来的に起こり得ることを仮想空間上に再現された環境で分析・シミュレーションを行うことで推測・予測できる。シミュレーション環境の実装後は、現実空間での動作結果を仮想空間上のモデルに反映して分析する、さらに現実空間にフィードバックすることで、継続的な改善を可能とする。図 1 にデジタルツインの構成図を示す。これは製造業を中心に多様な分野で活用されている。

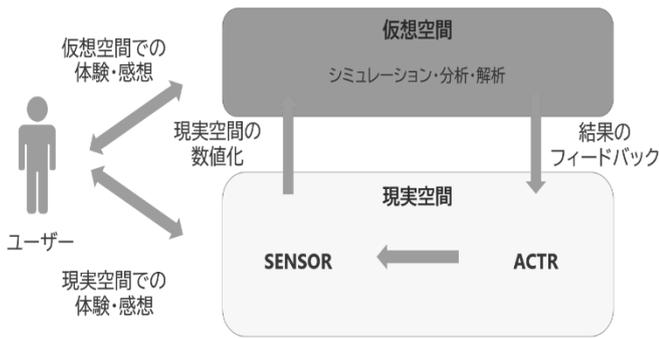


図1 デジタルツインの構成図

Fig.1 Digital Twin Configuration Diagram

< 2. 2 > デジタルツインと IoT 技術

デジタルツインにおいて、時間とともに変化する対象や周囲の環境状態を仮想空間上でリアルタイムに再現するためには IoT 技術によるデータの収集が重要となる。従来では、現実空間の膨大なデータを収集する際、多くの人手と労力を要していた。これに対し、現在は IoT の普及によりセンサ技術を活用したデータの収集が高精度かつ瞬時に行うことができ、収集できるデータの種類が多様化するとともに、現実空間のデータをよりリアルタイムにデジタルツイン上の環境に反映可能となった。

< 2. 3 > デジタルツインの活用例

デジタルツインは、航空産業や製造ラインなど、製造業のユーザーを中心に活用が始まり、現在では国土計画や都市計画、防災など幅広い分野で活用されている⁹⁾。

デジタルツインによって再現する対象は工場や都市、業務および製造プロセスなど様々ある。デジタルツインの活用例として、工場や都市の 3D モデル上に機械の稼働状況や交通状況を可視化して工場における生産ラインの変更や都市開発を行うケース、



図2 Omniverse の活用事例⁴⁾

Fig.2 Omniverse application examples

ヒトの動きを可視化して動線を分析することによりヒトの動きのムダを削減するケースがある。例えば、アメリカの大手半導体メーカーである NVIDIA 社が開発した 3D 空間を構築する為のプラットフォーム「Omniverse (オムニバース)」では、BMW 自動車工場の生産ラインシミュレーションを実現している。(図 2) Omniverse では、現実空間にある工場を共有プラットフォームに作成し、仮想空間上にリアルな工場を再現する。これによって、Omniverse の仮想空間にある工場生産ラインを事前にテストシミュレーションすることも可能である⁹⁾。

< 2. 4 > 本研究の対象

前節で述べたデジタルツインの再現対象である工場や都市、業務および製造プロセスは、一般的なデジタルツインの活用例であるが、今日、販促事業での活用例はあまり目立っていない。

販促業務では、顧客の興味喚起の為に、顧客の情報を分析するなど、顧客ごとに最適な提案をする必要がある。そこで、顧客の行動や思考などをより精緻に把握することができれば顧客との関係性構築や利益の向上につながる。

そこで、本研究では、デジタルツインの代表的な再現対象である製造現場と再現対象としてあまり目立っていない販促業務をターゲットとした下記 2 つのユースケースについて取り組んだ。

ユースケース 1 : 射出成形現場における効率的な成形機運用

ユースケース 2 : エンドユーザーに対する販促表現

ユースケース 1 では、製造現場の生産ライン工程における仕掛品の停滞について着目した。生産ライン工程では、成形機(図 3)や作業場の前に仕掛品が停滞する場合があります、それを水すまし作業者が対応する。しかし、仕掛品がどの場所にもどの程度停滞しているかをリアルタイムに把握するのは難しい。そこで、成形機の稼働状態や作業者の動線データ、成形品の重量データをセンシングし、仮想空間上に生産ラインを再現することによって水すまし作業者にフィードバックを与える手法を考案した。

しかし、データ収集対象となる成形品の種類が多いことや成形機や作業者に多くのセンサを設置する必要があることから、実証実験を進める上では、現場への負担が非常に大きくなるのが課題となった。以上のことから、本実証実験では現場でのセンシングは困難であると判断し、ユースケース 1 での検証を実施することはできなかった。

ユースケース 2 では、デジタルツインを用いたバーチャルショールームの拡張に着目した。バーチャルショールームでは、仮想空間内を移動しながら、3D モデルで再現した製品やソリューションを確認できる。そのため、地理的かつ時間的な制約がないこと、カタログのような媒体よりリアルな体験を提供できるため、顧客体験の向上が利点となる。しかし、仮想空間上であるため、商品に直接触れたり操作感を実際に確認したりすることはできず、質感を感じることができないことが欠点となる。この課題を解決するために、現実空間上と仮想空間上のショールームを組み合わ

せることを目指す。例えば、仮想空間上で商品に触れた際に、現実空間上の同じ商品に触れさせることができれば、バーチャルショールームに質感要素を加えることが可能となる。

本研究では、リアルなショールームを仮想空間上で再現し、オーニングの可変に応じた日射の影響を可視化する。それに応じた家具表面温度をユーザーにフィードバックすることにより、ユーザーに対して最適な提案が可能になることを目指す。



図3 射出成形機⁵⁾

Fig. 3 Injection molding machine

3. システム設計と実装

本研究では、日射遮蔽物の効果を提示する手法としてデジタルツインを用いることが有効か検証するため、視覚と触覚への刺激を組み合わせた体験型システムを構築する。本章では、リビングにおける机の表面温度に着目し、仮想空間上における遮蔽物の有無と現実空間の机上面温度が連動するシステム設計について述べる。

< 3. 1 > 体感型システムの概要

本研究で効果を検証する体感型システムの全体概要を図4に示す。本システムはセンサ(図4上. SENSOR)及びアクチュエータ(図4上. ACTR)からなるハード部と、ハード部を制御するマイクロコントローラ及び仮想空間を描写するPCのソフト部によって構成される。仮想空間上に再現された太陽の軌跡と室内に差し込む日差しに合わせ、現実空間の机上面の温度がACTRであるヒーターにと冷却ファンによって変化する。

本システムは図5のようなフローで処理されており、開始と同時にACTRであるヒーターの加熱とセンサによる計測が起動し、映像が再生される。ヒーターは所定温度まで加熱され、その後所定時間が経過するまで温度を維持する。所定時間が経過した後、ファンによって冷却され、映像の終了とともに動作を完了する。

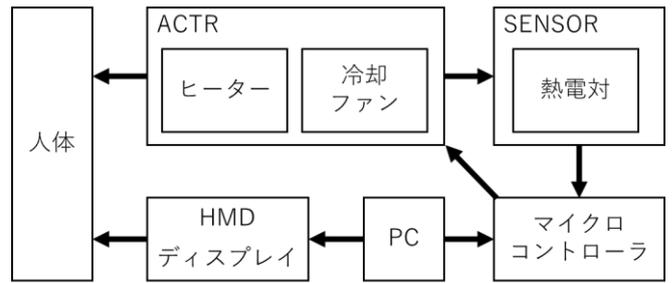


図4 システムの全体構成

Fig. 4 Overall system configuration

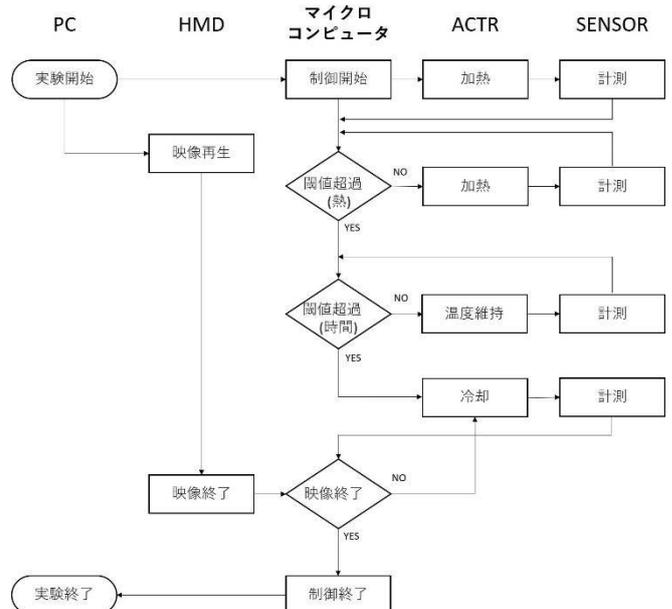


図5 フローチャート

Fig. 5 Flowchart

< 3. 2 > 利用する空間の選定と仮想空間の構築

デジタルツインでは、仮想空間上に現実空間と同様の環境を3Dモデルとして準備する必要がある。そこで本研究では、図6に示す建物内に建てられた実物大の建築見本であるモデルルームを用いる。モデルルームは実住宅に比べ設備が簡素化されているが、机上面温度の表現に必要な要素は室内空間及び窓面の近くに置かれたテーブルであることから、3Dモデルは実住宅でなくとも十分実験は可能であると考えた。

選定した空間を3Dモデル化する手法は様々存在するが、本研究ではMatterport社のプラットフォームとMatterport Pro3カメラを使用した⁶⁾。Matterport Pro3カメラは134.2Mpixのパノラマ画像撮影と同時にLiDARによって点群データを収集し保存することができる。また、本プラットフォームは、Matterport Pro3で撮影したパノラマ画像と点群データを基に自動で3Dモデルを出力できることを特徴とする。Matterportから出力された3DモデルをUnreal Engine⁷⁾(UE)に取り込み映像処理したものを図7に示す。UEはEpic

Games 社が公開するゲーム開発用のプラットフォームであるが、近年では即応性や光の描写の正確性が着目され、建築や自動車業界においても利用される事例が増加している。



図6 モデルルーム
Fig.6 Show apartment



図7 3Dモデル化したモデルルーム
Fig.7 Digital model of show apartment

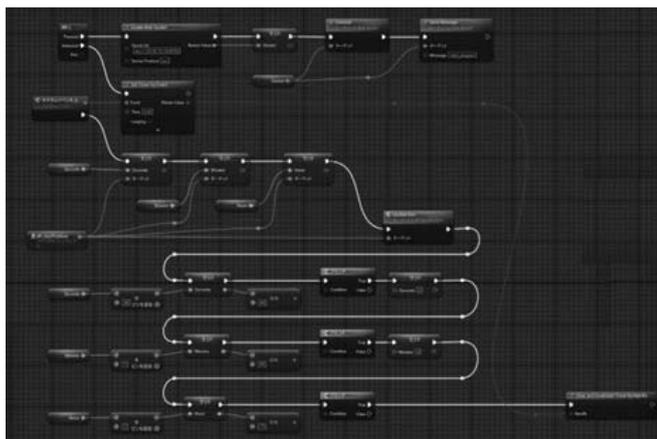


図8 ブループリント
Fig.8 Blueprint scripting

本研究では、UE で提供される建築テンプレート環境へ 3D モデルを取りこみ、太陽の軌道は Sun Position Calculator のプラグインを用いて実現した。本プラグインは、地理的に正確な太陽の位置を自ら計算し定義しようとする場合に長大となる計算式⁹⁾をパッケージ化し提供されるものである。時間経過とともに太陽の位置を移動させるため、UE の機能の一つであるビジュアルスクリプト Blueprint を用いた。図 8 に示すよう、一定間隔で時間を加算し、時刻を Sun Position Calculator に引渡すことで太陽の移動を実現した。

＜3. 3＞ 机上面温度の測定と再現装置の作成

本研究では、3.1 節で述べたとおり、机上面温度の変化をヒーターによって実現する。その際、実空間の窓面において測定した温度波形を基に実験装置のヒーターを制御した。実空間の温度測定は、窓が南に面した空間に机を模擬した試料片を設置し、室内の雰囲気温度が大きく変化しないようエアコンを冷房 27°C の連続運転とした空間にて測定した。試料片は市場で流通する机と同様とすべく、中密度繊維板 (Medium Density Fiberboard, MDF) に木目柄のラミネートを張り付けたものとした。本条件下において、試料片の表面温度を 24 時間測定した結果が図 9 である。

図 10 に示す机上面温度を再現する実験装置は、木目柄のラミネートシートを張り付けた 1mm×600mm×450mm のアルミ平板にヒーター⁹⁾を取り付け、120mm ファン、熱電対、熱電対アンプモジュール¹⁰⁾、Raspberry Pi を用いて構成されており、日射の変化がある朝方から夕方までの測定波形と一致するよう制御した。なお、制御時間は映像の速度に依存するため、事前に適切な再生時間を予備実験にて検討した。結果、8 分と 5 分では再生時間が長すぎ変化が分かりづらく、1 分では変化が速すぎることから、評価の高かった 3 分を採用している。図 11 は実験装置の表面温度と実空間での測定波形とを重ね合わせた結果である。被験者が違和感なきよう、室温より温度を上昇させているため、開始後 20 秒程は実測値と差異が発生したが、時間経過に伴い日射に照らされ熱された机上面の温度が上昇し、最高で 50 度を超えることを再現できたことがわかる。

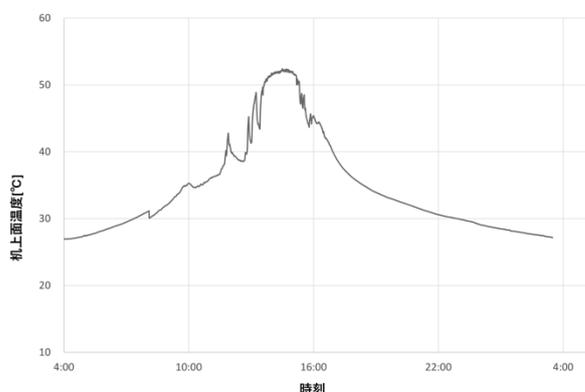


図9 夏環境の測定結果
Fig.9 Summer measured waveform

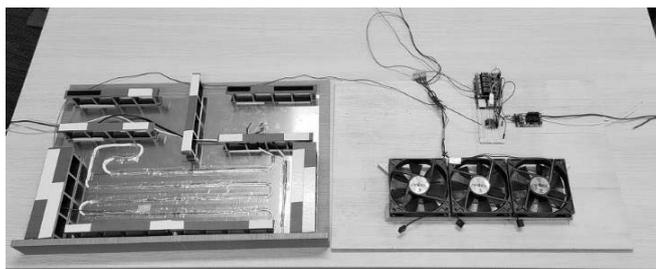


図 10 実験装置
Fig. 10 Experiment device

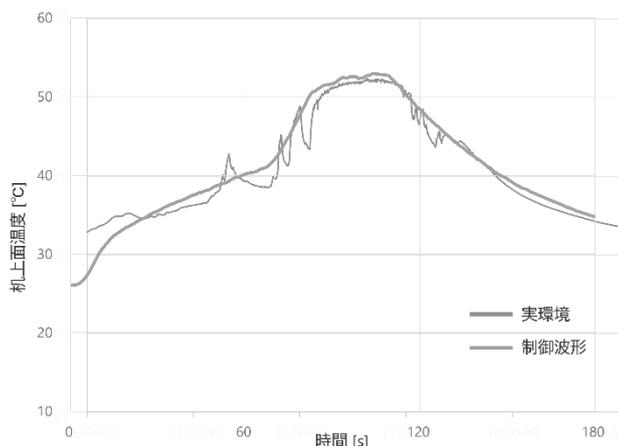


図 11 実測波形と制御波形
Fig. 11 Measured and controlled waveforms

4. 実験手法及び実験結果

本章では、評価として、視覚と触覚への刺激を組み合わせた提案手法が被提案者へ与える影響と、ユーザビリティの有効性について述べる。

< 4. 1 > 実験環境

図 12 に前章で設計した実験装置を用いた実験環境を示す。本研究では、将来的にデジタル活用がさらに発展された社会において活用されることが目的であるため、被験者はデジタル技術への親和性が高く、将来の購買層にあたる 20 代に限定することとし、富山県立大学の学生 10 名を対象に実施した。被験者には、実験装置とヘッドマウントディスプレイ (Head Mount Display, HMD) である Meta 社 Quest3⁽¹⁾ や液晶ディスプレイを組み合わせたコンテンツを体験させ、大きく分けて以下の 4 項目についてアンケート回答させた。

- ① 視覚情報のみでの暑さの体感
- ② 予測温度と接触における認識のズレ
- ③ 紙媒体とデジタル媒体での提案の好ましき
- ④ HMD 環境と液晶ディスプレイ環境での好ましき



図 12 実験環境
Fig. 12 Experiment environment

< 4. 2 > 実験結果と考察

4.1 節で述べたアンケート回答の結果を図 13 に示す。4.1 問①は、HMD 上で全く日射の入らない日陰のリビングと日射が入り続ける日射のリビングの映像を見比べた結果である。基本的に視覚情報のみによる体感温度の差は発生しないことが分かるが、「明るいので暖かく感じた」という回答が複数あるように明暗を付けることも重要であることが分かる。

図 14 に示す映像を用い、4.1 問②-1 は日陰の机上面温度を予測し室温の実験装置を触れた結果、4.1 問②-2 は日射の机上面温度を予測し 50 度に加熱した実験装置を触れた結果である。日陰、日向環境ともに 9 名の被験者が実際の環境より低い温度を予測したが、日陰環境では予想より冷たく、日向環境では予想より熱く感じる結果となった。このことから、日常生活において接触物の温度を人間は正確には把握しておらず、体温と接触物との温度差によって冷たさや熱さを感じていると推測される。そのため、季節や試験環境により実験結果が変化する可能性がある。一方で、実測温度まで冷却や加熱をなさずとも有効な体験型システムが構築の可能性があることがわかった。

4.1 問③は販促活動においてユーザーが提案を受けたい媒体の調査結果である。本実験では、被験者を 20 代に限定したこともあり、映像媒体での提案が多数を占める結果となった。紙媒体を選択した被験者の中には、「数値的な記載や根拠が紙媒体にはある」との回答があったため、映像の中にそれらの情報を組み込むことで紙媒体の良さも取り込める可能性がある。また、4.1 問③にて映像媒体と回答した 8 名に対し HMD と液晶ディスプレイのどちらが好ましいかの調査した結果が 4.1 問④である。本研究では、HMD を用いた視覚と実験装置を用いた触覚への刺激を用いる提案手法が優位になることを想定していたが、ディスプレイが優位の結果となった。しかし、その理由としては、「HMD を装着しなれていないため」や「日射以外の周囲環境に変化がないため」と

いった回答があがっており、これはデバイスの装着感や作成した3Dコンテンツのクオリティに起因することであり、提案手法自体が否定されたとは言えないと考える。今後、より自然に装着可能なデバイスを活用することや事前の装着への適応の期間を設ける、コンテンツをよりリッチなものとする等の対策を講じること、より正確な評価を行えるという知見を得ることができた。

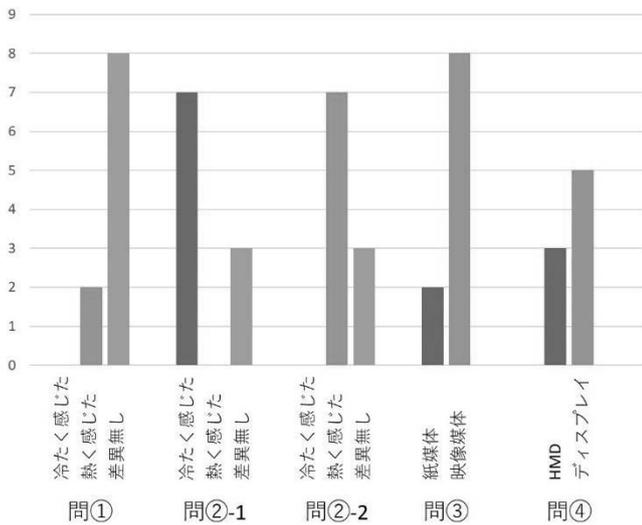


図 13 被験者アンケートの回答結果

Fig. 13 The result of questionnaire in participants



図 14 被験者アンケートの映像(左:日陰, 右:日向)

Fig. 14 The picture of questionnaire in participants
(Right side : shade, Left side : sunny place)

5. 結言

本研究では、デジタルツイン技術を用いた製造現場と販促業務への活用について検討し、研究を行った。製造現場での活用は、射出成形現場における効率的な成型機運用をユースケースに取り上げたが、実証実験を行う際に現場の負担が非常に大きくなることから実施できなかった。

次に販促業務への活用では、日射遮蔽物の効果を提示する手法について検討した。視覚と触覚への刺激を組み合わせた体験型システムが有効であるか実験装置を用いて調査した。4.2節で述べたように、①視覚情報のみでの暑さの体感、②予測温度と接触に

おける認識のズレ、③紙媒体とデジタル媒体での提案の好ましさ、④HMD環境と液晶ディスプレイ環境での好ましさの流れで調査し、視覚と触覚を組み合わせる提案手法は有効な手段となり得ることが確認できた。HMDと液晶ディスプレイの評価は性差や年代により評価が大きく分かれることが予測されるため、液晶ディスプレイと温度変化装置の組み合わせた体験型システムが基本構成とし、より没入感を得たい被提案者に対してHMDを用いることが有効であると考えられる。

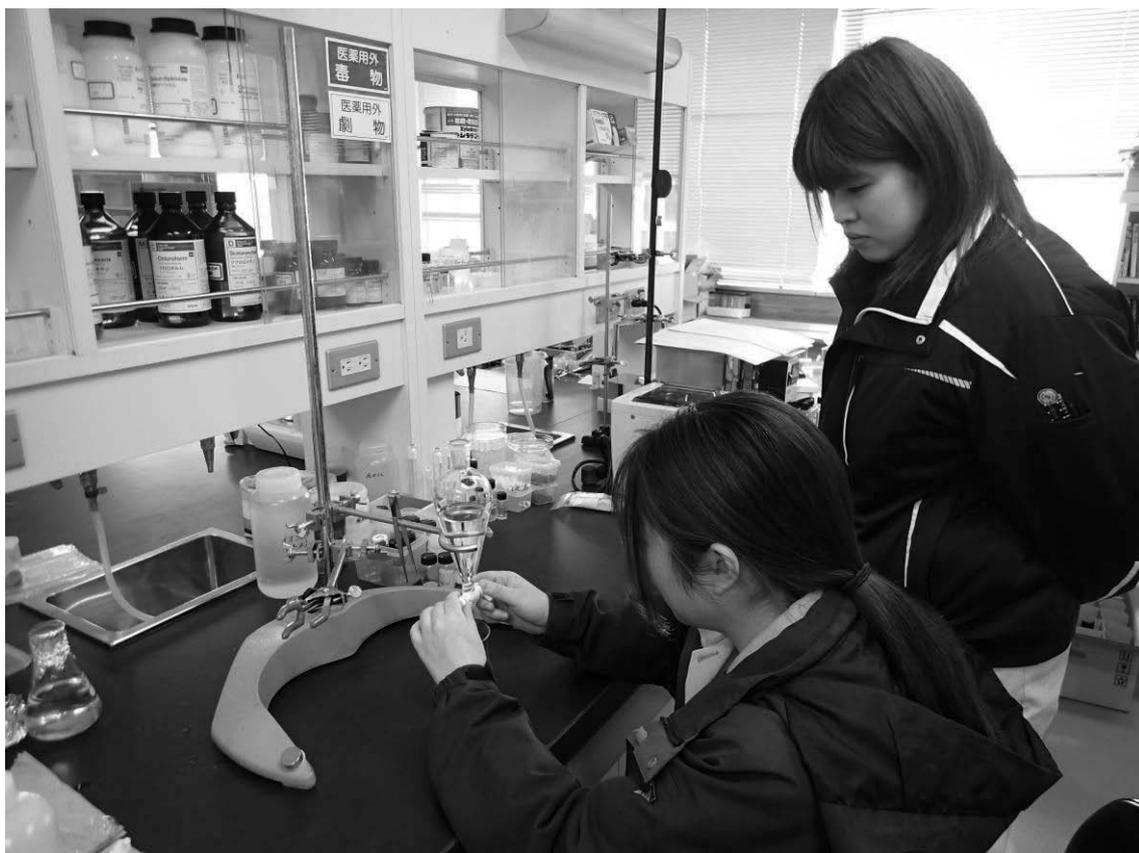
今後の課題として、映像媒体での提案力強化には数値や文字情報の挿入が必要となるが、視覚的に混雑しないよう効果的な挿入手法を見つける必要があると考えられる。また、冬条件の再現には冷却装置の性能が十分でないことがすでに分かっているが、4.2節の調査結果より、実環境まで温度を下げずとも体温から±10度程度の温度差があれば十分刺激を与えられる可能性が、被提案者へ効果的かつ安全な提案が可能となると考えられる。

また、今回は実施できなかった製造現場への活用についても、実証実験の対象とする機材や業務についてより特定することで、現場の負担を考慮した研究方法を検討し、デジタルツインのさらなる活用を検討することが必要であると考えられる。

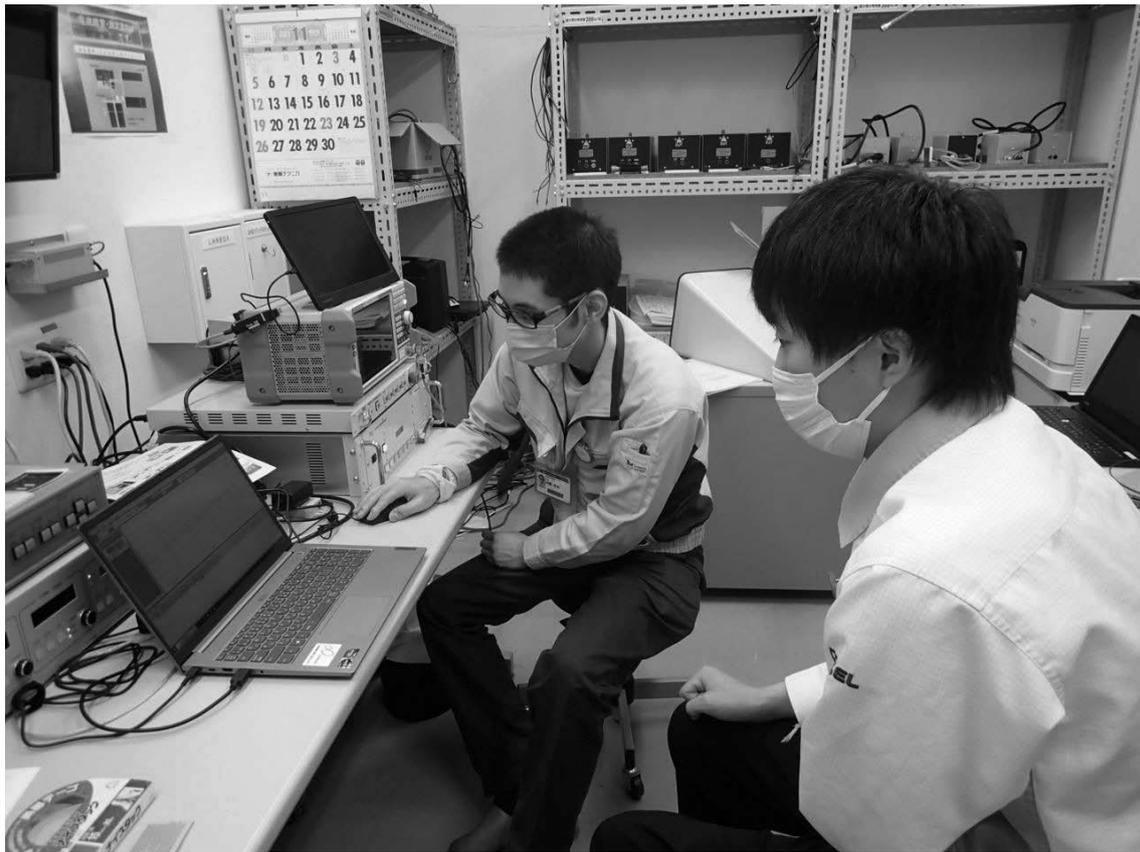
文献

- (1) 製造業におけるデジタルツインとは?_2021
https://linkwiz.co.jp/topics/column/digital-twin_20210322/
- (2) 総務省「情報通信白書」令和5年版_2023
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/pdf/index.html>
- (3) Omniverse(オムニバース)とは?_2024
<https://www.ask-corp.jp/biz/colimn/nvidia-omniverse.htm>
- (4) NVIDIAとBMW、現実世界と仮想世界が融合された未来の工場を上演_2021
<https://blogs.nvidia.co.jp/2021/05/10/nvidia-bmw-factory-future/>
- (5) タカギセイコー “願い”を“カタチ”に
<https://www.takagi-seiko.co.jp/technology/>
- (6) Matterport Pro3_MatterPort <https://support.matterport.com/s/article/Overview-of-Pro3?language=ja>
- (7) Unreal Engine 5_UnrealEngine
<https://www.unrealengine.com/ja/unreal-engine-5>
- (8) 太陽位置の計算_株式会社机上データシステム
https://www.metds.co.jp/wp-content/uploads/2019/03/TE_SunPosition_160401.pdf
- (9) 製品カタログ_大科電器株式会社
<https://www.taika-taika.co.jp/img/products/00.pdf>
- (10) 熱電対アンブモジュール_スイッチサイエンス
<https://www.switch-science.com/products/2977>
- (11) Oculus Quest3_Meta
<https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/>

「リグニン系バイオマス製品の開発に関する研究」グループの研究活動風景



「小型マイクロ波無線給電システムの開発」グループの研究活動風景



「プラスチック製品の性能向上のための設計技術と評価に関する研究（２）」グループの研究活動風景



「衝撃応答特性の測定および解析による電子部品の信頼性向上」グループの研究活動風景



「製造業におけるデジタルツインを活用した業務改善」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

- 36年間の研究テーマ数：221テーマ（昭和62年度～令和5年度）
- 参加研究員延べ人数：405名（指導機関の研究員を除く）

☆昭和62年度（第1回）研究テーマと研究参加者（3テーマ、12名）

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

☆昭和63年度（第2回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、21名）

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

☆平成元年度（第3回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、19名）

1. 樹脂・ファイバー複合材に関する研究

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. ZnO系セラミックス薄膜に関する研究～圧電薄膜音響光学素子の開発

小西孝浩（タカノギケン㈱）、滝川義弘・煙田不二男（燐化学工業㈱）、平能 司（㈱和泉電気富山製作所）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 焦電型赤外線センサに関する研究～RFマグネトロンスパッタ法によるチタン酸鉛薄膜の作製

山田義昭（東洋化工㈱）、吉田孝一（㈱タカギセイコー）、吉野正浩（吉田工業㈱、現YKK㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. Co-Nb-Zrアモルファス軟磁性薄膜に関する研究

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

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

古瀬正浩（㈱インテック）、堀井 孝（エルコー㈱、現コーセル㈱）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

6. 超音波メガネの研究

中村 亮（北日本電子㈱）、中山正明（㈱和泉電気富山製作所）

◎指導機関：富山大学工学部

☆平成2年度（第4回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、16名）

1. 磁性薄膜の応用に関する研究～倍周波型磁気センサの開発

越浜哲夫（㈱不二越）、高島 誠（エルコー㈱、現コーセル㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 仕上げ面粗さ自動測定装置の開発に関する研究

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

3. 圧電シートを用いた簡易超音波診断装置の開発に関する研究

尾畑哲史（㈱和泉電気富山製作所）、山田義昭（東洋化工㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. 拡散型光導波路を用いた音響光学素子に関する研究

煙田不二男（燐化学工業㈱）、若林成喜（北陸電気工業㈱）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 画像による寸法計測に関する研究

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

西浦慎一・村井哲雄（㈱タカノギケン）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 超音波杖の研究

中村 亮（北日本電子㈱）、堀登紀男（㈱和泉電気富山製作所）

◎指導機関：富山大学工学部

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

☆平成3年度（第5回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、14名）

1. 強誘電体薄膜の応用に関する研究～光書き込み型メモリの開発
玉川 勤（北陸電気工業株）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. 仕上げ面粗さ自動測定装置の開発に関する研究
桜栄和則（株タカギセイコー）、田村正行（吉田工業株、現YKK株）、柳原 潔（株黒田精型）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部
3. 画像による円筒内面検査装置の開発
荒木満男（株タナカエンジニアリング）、西浦慎一（株タカノギケン）、
山本達生（エルコー株、現コーセル株）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
4. 圧電シートを用いた簡易超音波診断装置の開発に関する研究
尾畑哲史（株和泉電気富山製作所）、山田義昭（東洋化工株）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
5. 薄膜微細加工技術の研究
飴井俊裕（エルコー株、現コーセル株）、竹端精己（株不二越）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
6. 視覚障害者のための音声点字変換装置に関する研究
岩田雅明（北日本電子株）、島野英明（株インテック）
◎指導機関：富山大学工学部
7. 障害者のための学習性を有するマンマシンシステムの研究～完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究
土田隆一（立山科学工業株）
◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成4年度（第6回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、12名）

1. マイクロマシンの研究
白石信行（コーセル株）、新谷哲也（北陸電気工業株）、吉井靖岳（株タナカエンジニアリング）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
2. 薄膜微細加工技術の研究～トランスの試作
伊勢寿夫（コーセル株）、戸田雅規（株不二越）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
3. 形状測定装置の開発に関する研究
野末昌朗（立山アルミニウム工業株）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
4. 透明プラスチック製品の欠陥検査装置の開発
大岩秀徳（三協アルミニウム工業株）、長峰浩幸（株タカギセイコー）、本堂 裕（株斎藤製作所）
◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所
5. 単音節認識による音声～点字変換
北喜靖規（北日本電子株）、島野英明（株インテックシステム研究所）
◎指導機関：富山大学工学部

6. 完全埋め込み型機能的電気刺激システムの研究

土田隆一（立山科学工業株）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成5年度（第7回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、12名）

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

伊東 守（コーセル株）、森田智之（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. マイクロマシンの研究

川西和昭（三協アルミニウム工業株）、後藤 肇（コーセル株）、佐々木啓充（株タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 有機電子材料の研究

雨野孝信（株タカギセイコー）、堀田正人（東洋化工株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. リン酸塩系セラミックス固体電解質の開発～Agイオン固体2次電池の試作

黒川寛幸（北陸電気工業株）、山口 睦（磷化学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. RIMのCAEに関する研究

杉田孝嗣（三協アルミニウム工業株）、中村和禎（株タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 障害者のための屋内環境制御装置の開発に関する研究（1）

五十嵐隆治（立山アルミニウム工業株）

◎指導機関：高志リハビリテーション病院

☆平成6年度（第8回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、16名）

1. 視覚システムを持つ移動ロボットの開発

小山直人（株タカギセイコー）、寺本正夫・杉谷 健（コーセル株）、

中村厚平（エヌアイシ・オートテック株）、松田英雄（株タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 機能性薄膜と半導体の複合素子の開発

高柳 毅（コーセル株）、田村雅英（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. リン酸系エッチング液の基礎研究

山口 睦（磷化学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. 傾斜機能膜素子の開発

市川良雄（富山軽金属工業株）、福本 滋（北陸電気工業株）、三松克次（株タカギセイコー）、

山下慎也（株タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 3次元入力デバイスの開発

細木文夫（三協アルミニウム工業株）、横山 大（長岡技術科学大学）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 障害者のための屋内環境制御装置の開発に関する研究(2)

五十嵐隆治(立山アルミニウム工業株)、米谷庄一(三協アルミニウム工業株)

◎指導機関:高志リハビリテーション病院

☆平成7年度(第9回)研究テーマと研究参加者(8テーマ、15名)

1. 視覚システムを持つ移動ロボットの開発(2)

大浦真司(三協アルミニウム工業株)、高田謙一(コーセル株)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

2. 金属製品の鍛造成形シミュレーションに関する研究

永森和久(株タナカエンジニアリング)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

3. 電子回路用ウェットエッチング液の研究

山口 睦(燐化学工業株)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

4. 形状記憶合金薄膜を用いたマイクロアクチュエータの開発

高橋伸忠(株タカギセイコー)、能村輝一(北陸電気工業株)、山下慎也(株タナカエンジニアリング)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

5. 微動機構による機械の高度化の研究

佐野仁一(東洋化工株)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

6. 薄膜超磁歪素子の研究

酒井隆正(コーセル株)、谷上英樹(北陸電気工業株)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

7. レドックス型太陽発電システムの開発

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

長谷川益夫(富山県林業技術センター木材試験場)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

8. 障害者のための屋内環境制御装置の開発に関する研究(3)

五十嵐隆治(立山アルミニウム工業株)

◎指導機関:高志リハビリテーション病院

☆平成8年度(第10回)研究テーマと研究参加者(6テーマ、15名)

1. 形状記憶合金膜を用いたマイクロポンプの開発

三松克次・笹島和明(株タカギセイコー)、田島正康(株タナカエンジニアリング)

田中 篤(北陸電気工業株)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

2. 鍛造成形の簡易シミュレーションに関する研究

松井裕昭(株タナカエンジニアリング)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

3. レドックス型太陽発電システムの開発(2)

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

長谷川益夫(富山県林業技術センター木材試験場)

◎指導機関:工業技術センター機械電子研究所

4. 複数のロボットによる協調制御の研究

金田淳也（コーセル株）、森田裕之（立山アルミニウム工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

5. 多孔質シリコンの形成に関する研究

石川秀人（北陸電気工業株）、安田純子（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 高輝度蓄光性蛍光板の開発

佐野仁一（東洋化工株）、二見泰雄（三協アルミニウム工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

☆平成9年度（第11回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、18名）

1. レドックス型太陽発電システムの開発（3）

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 複数のロボットによる協調制御の研究（2）

森田裕之（立山アルミニウム工業株）、渡辺暁信（株タナカエンジニアリング）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

3. 生活環境用臭センサの開発

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

4. 電力変換用圧電セラミックストランスの開発

堀井一宏（コーセル株）、柳川 新（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 局所的レーザー処理による形状記憶合金膜アクチュエータの開発

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 電気自動車の開発

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成10年度（第12回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、11名）

1. 圧電素子を用いた制振機構の研究

稲垣 聡（北陸電気工業株）、渡辺暁信（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. コーティング工具の密着性向上に関する研究

野上拓也（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 生活環境用においセンサの開発（2）

星野昌則（コーセル株）、南 政克（北陸電気工業株）、山田浩美（東洋化工株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

4. 電気自動車の開発 (2)

坂本雅美 (株斉藤製作所)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. 微細放電加工の研究

太田光則 (株斉藤製作所)、橋本 明 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

6. 電磁シールド材の基礎研究

高橋伸忠 (株タカギセイコー)、福田隆之 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成11年度 (第13回) 研究テーマと研究参加者 (8テーマ、14名)

1. エンジンの動弁機構における構造解析及び強度評価

島村和孝 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. コーティング工具の密着性向上に関する研究 (2)

高田智哉 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 深層水及び藻類を利用した太陽光発電の基礎研究

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

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

4. 山岳遭難者探索システムの探索性能向上に関する研究

前田智博 (立山科学工業株)、高瀬 洋 (県警察本部)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

5. インテリジェントにおいセンサの研究

小森一哉 (北陸電気工業株)、石川勝巳 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

6. 微細放電加工の研究 (2)

太田光則 (株斉藤製作所)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県立大学工学部

7. 機能性高分子を用いたアクチュエータの開発

小中稔正 (YKK株)、山田浩美 (東洋化工株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

8. プラスチック上のハードコーティング技術の研究

高橋伸忠 (株タカギセイコー)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成12年度 (第14回) 研究テーマと研究参加者 (5テーマ、8名)

1. エンジンの動弁機構における構造解析および強度評価 (2)

島村和孝 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. インテリジェントにおいセンサの研究 (2)

小森一哉 (北陸電気工業株)、谷口真也 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

3. 高摩擦係数材料の研究

高田智哉 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. 木粉末を配合したプラスチックリサイクル材の研究

酒井康弘 (株タカギセイコー)、前田健二 (立山アルミニウム工業株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

5. 低温駆動小型燃料電池の開発に関する基礎研究

高橋雄一 (コーセル株)、山田浩美 (東洋化工株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成13年度(第15回)研究テーマと研究参加者(8テーマ、14名)

1. 滑雪板(着雪防止板)の開発

河井牧夫(田中精密工業株)、高橋伸忠(株タカギセイコー)、野田耕司(三協アルミニウム工業株)、
石井 雅(富山県土木部)

◎指導機関：工業技術センターP J・中央研究所

2. 分子機能材料を用いた光電池の研究開発

濱口 誠(コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 高摩擦係数材料の研究(2)

高田智哉(田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

4. 木粉末を配合したプラスチックリサイクル材の研究(2)

酒井康弘(株タカギセイコー)、前田健二(立山アルミニウム工業株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所、富山県立大学工学部

5. ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発

小出哲雄(コーセル株)、坂本雅美(株斉藤製作所)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部

6. 体質診断等DNAチップと測定装置の開発

水島昌徳(立山科学工業株)、川上浩美(東洋化工株)

◎指導機関：工業技術センターP J・機械電子研究所

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

桑原大輔(北陸電気工業株)

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

8. アルミ表面解析技術の高度化に関する研究

澤井 崇(武内プレス工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成14年度(第16回)研究テーマと研究参加者(8テーマ、13名)

1. ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発(2)

石見雅美(株斉藤製作所)、稲澤直子(コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

2. 体質診断等DNAチップの開発(2)

碓井洋平(立山科学工業株)、水原 崇(コーセル株)、米嶋勝宏(東洋化工株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・P J・中央研究所

3. MEMSを応用した高精度温度センサの開発

今村徹治（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・P J、富山大学工学部

4. アルミ飲料容器の形状評価手法の開発

清水 歩（武内プレス工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・P J

5. 超小型4サイクルエンジンの開発

杉森雅一（エヌアイシ・オートテック株）、中西智英（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

6. 滑雪機構の改善に関する研究

河井牧夫（田中精密工業株）、野田耕司（三協アルミニウム工業株）

◎指導機関：工業技術センターP J・中央研究所

7. 圧電トランスを用いたマイナスイオン発生装置の開発

山田英子（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

8. 有機材料を用いた排ガス吸着材料の検討

酒井康弘（株タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター生活工学研究所、機械電子研究所

☆平成15年度（第17回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、9名）

1. ダイレクトメタノール小型燃料電池の開発（3）

石見雅美（株齊藤製作所）、魚谷一成（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

2. 生活習慣病等体質診断用DNAチップの検出精度向上に関する研究（3）

碓井洋平（立山科学工業株）、中山 均（コーセル株）、中林俊幸（東洋化工株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

3. 薄膜超低温度特性抵抗器の開発

桑原大輔（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学工学部

4. 小径穴加工システムの開発

手嶋成市（株タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

5. 超小型4サイクルエンジンの開発（2）

花崎 大（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

6. インクジェット法による電子部品作製に関する基礎研究

増山智英（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

☆平成16年度（第18回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、12名）

1. 大型色素増感太陽電池の開発

廣田和也（株タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

2. 交流法を用いたバイオセンサの開発

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・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（立山科学工業株式会社）

◎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（コーセル株式会社）、石見雅美（株式会社斉藤製作所）

◎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（北陸電気工業株式会社）

◎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式会社）

◎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（田中精密工業株式会社）

◎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（コーセル株式会社）、太田光則（株式会社斉藤製作所）

◎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（コーセル株式会社）、深沢正樹（立山マシン株式会社）、中田守人（東洋化工株式会社）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・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（北陸電気工業株式会社）

◎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（立山科学工業株式会社）

◎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（田中精密工業株式会社）

◎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（立山科学工業株式会社）

◎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（株式会社タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

☆平成18年度（第20回）研究テーマと研究参加者（9テーマ、11名）

1. メタボリック症候群関連遺伝子検出装置の開発

三宅正浩（コーセル株）、深沢正樹（立山マシン株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山県新世紀産業機構

2. マイクロTASチップの開発

嶋 将伸（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・P J推進担当・機械電子研究所

3. 陽極酸化皮膜を用いたナノ構造体の開発

清水裕也（株タカギセイコー）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・P J推進担当

4. インクジェット法による電子回路パターンの作製

篠原おりえ、田中裕美（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

5. 小径穴仕上げ加工

高岡利尚（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センターP J推進担当・中央研究所・機械電子研究所

6. ナノポーラス構造薄膜の作製とセンサーへの応用研究

中野貴之（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所、富山大学工学部

7. 高温耐熱型サーミスタの開発

山野 博（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

8. 低域UHF帯用小型指向性アンテナの開発

徳島達也（立山科学工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

9. 機械部品の洗浄に関する研究

杉森雅一（エヌアイシ・オートテック株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・P J推進担当

☆平成19年度（第21回）研究テーマと研究参加者（8テーマ、10名）

1. 電子回路用ウェットエッチング液の研究

曾根宏信（燐化学工業株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所、富山県立大学工学部

2. 肉盛ステライトの硬さに影響を与える溶接条件の研究

田中隆尚（田中精密工業株）、長柄大介（長柄鉄工株）

◎富山県工業技術センター中央研究所・P J推進担当、富山大学芸術文化学部

3. インクジェット法を用いたアンテナの作製

廣島大三（立山科学工業株）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

4. 燃料電池用超小型水素発生器の開発

川端基裕（コーセル株）、遠藤 亮（三協立山アルミ株）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

5. 三次元座標測定機における測定信頼性向上に関する研究
中橋秀記（立山マシン(株)）
◎富山県工業技術センター中央研究所・企画管理部
6. ナノポーラス構造薄膜の作製とセンサーへの応用研究（2）
石橋孝裕（北陸電気工業(株)）
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所
7. 陽極酸化皮膜を用いたナノ構造体の応用研究
清水裕也（(株)タカギセイコー）
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・P J 推進担当
8. マイクロTASチップの開発（2）
石村和雄（コーセル(株)）
◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所・生活工学研究所

☆平成20年度（第22回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、8名）

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

☆平成21年度（第23回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、9名）

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

5. スクリーン印刷法による低コスト色素増感太陽電池の開発

斉藤洋輔（コーセル(株)）、若林 傑（立山科学工業(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

☆平成22年度（第24回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、8名）

1. ミニロボット群による水田防除草システムの開発

上田将志（コーセル(株)）、古川和明（立山科学工業(株)）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

2. CMM（三次元測定機）用簡易検査器の開発

広地信一（立山マシン(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所、富山大学芸術文化学部

3. 高耐摩耗性を有する熱可塑性樹脂複合材料の開発

須田誠（田中精密工業(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所・企画管理部

4. CAEによる仮想振動試験の信頼性評価への適用

澤田修平（コーセル(株)）、細川修宏（株）タカギセイコー）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

5. 光触媒による自立型水質浄化浮遊物の開発

高見和志（コーセル(株)）、新川翔平（北陸電気工業(株)）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部・中央研究所

☆平成23年度（第25回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、7名）

1. CMM（三次元測定機）用簡易検査器の開発（2）

広地信一（立山マシン(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所、富山大学芸術文化学部

2. LED照明のEMC・ノイズ対策に関する研究

平田哲郎（コーセル(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

3. 積層鋼板の磁気特性に関する研究

堀田哲朗（田中精密工業(株)）、杉本考行（コーセル(株)）

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

4. シリコンアーマチュアデバイスの研究開発

木澤裕志（立山科学工業(株)）、岩滝幸司（北陸電気工業(株)）

◎富山県工業技術センター中央研究所、富山大学大学院理工学研究部

5. 精密切削加工による表面機能創成に関する研究

藤井美里（株）タカギセイコー）

◎富山県工業技術センター中央研究所

☆平成24年度（第26回）研究テーマと研究参加者（7テーマ、10名）

1. MDF木屑からのバイオエタノール抽出技術の開発

羽根新太郎（三協立山(株)）

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

2. マグネシウムイオン2次電池に関する研究

作道千枝 (燐化学工業株)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所

3. ナノインプリントを応用した微細電極パターンの形成に関する研究

大門貴史 (北陸電気工業株)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部

4. 小水力発電システムの研究

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

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・企画管理部

5. 受動的歩行ロボットの開発

水上慎太郎 (コーセル株)、若崎祥人 (立山マシン株)

◎富山県工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

6. 積層鋼板の磁気特性に関する研究 (2)

藤岡英示 (田中精密工業株)

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

7. SW電源の電磁ノイズのシミュレーション

野口拓 (コーセル株)

◎富山県工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

☆平成25年度 (第27回) 研究テーマと研究参加者 (6テーマ、7名)

1. 接着剤を用いない異種材料の超音波接合に関する研究

猪原 悠 (田中精密工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、元工業技術センター

2. スイッチング電源における電磁界ノイズシミュレーション実用化の研究

野口 拓 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター中央研究所・機械電子研究所

3. 単層カーボンナノチューブに関する研究

大門貴史 (北陸電気工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

4. 極低容量水力発電システムの研究

住和大輔 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

5. マグネシウム燃料電池の開発

安田 剛 (三協立山株)、山崎鉄平 (株タカギセイコー)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

6. ナノインプリント技術による金属ナノドットパターン形成に関する研究

升方康智 (立山科学工業株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・企画管理部、県商工労働部

☆平成26年度 (第28回) 研究テーマと研究参加者 (6テーマ、12名)

1. トイレからの漏えい音低減に関する研究

中村将士 (コーセル株)

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

2. 切削加工シミュレーションに関する研究

水野輝章（田中精密工業株）、若林武司（立山マシン株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所、元工業技術センター

3. 3Dプリンタを利用した簡易的なブロー成形樹脂型の製作に関する研究

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

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

4. エネルギーハーベスター利用システムに関する研究

浦山陽平（コーセル株）、中田智康（北陸電気工業株）

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

5. 量子ドット増感太陽電池の研究

山本尚人（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

6. 接着剤を用いない異種材料の超音波接合に関する研究（2）

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、元工業技術センター

☆平成27年度（第29回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、9名）

1. トイレからの漏えい音低減に関する研究（2）

杉森雄平（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

2. 3Dスキャナーを用いた形状測定と変形解析への適用

山崎諭史（コーセル株）、内山 肇（三協立山株）、金山侑司（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所

3. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究

山本貴之（コーセル株）

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

4. ハイブリッド樹脂粉末を用いた樹脂の特性改善

熊澤周士（株タカギセイコー）、黒河歩美（立山マシン株）

◎指導機関：工業技術センター中央研究所

5. ドリル切削加工における精度向上に関する研究

石澤剛士（田中精密工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

6. アルミ缶内面の腐食防食評価技術の高度化

筒井英明（武内プレス工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

☆平成28年度（第30回）研究テーマと研究参加者（6テーマ、9名）

1. 厚膜型圧電発電振動素子の開発に関する研究（2）

今井航平（北陸電気工業株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

2. 振動の簡便な測定法・低減法の開発

林 大清（コーセル株）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

3. 金属積層造形の基礎と造形物の評価に関する研究

永田直也（三協立山(株)、滝沢将史（コーセル(株)）

◎指導機関：工業技術センターものづくり研究開発センター・中央研究所

4. 容器用実用アルミ材の耐食性および腐食反応の解析に関する研究

深川裕之（武内プレス工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

5. エンドミル加工での工具寿命向上に関する研究

中嶋 謙（田中精密工業(株)）

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・生活工学研究所・中央研究所

6. ウェアラブル電源の開発

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

◎指導機関：工業技術センター機械電子研究所・中央研究所

☆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ー塗装

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

榎 正史 (コーセル株)

◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所、富山大学大学院理工学研究部

☆令和元年度 (第33回) 研究テーマと研究参加者 (5テーマ、8名)

1. 外観検査用画像処理の自動最適化に関する研究

中嶋 謙 (田中精密工業株)、田中智惟 (コーセル株)

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

2. 生産現場への行動認識及びマルチエージェントシミュレーションの適用

大上泰輝 (コーセル株)、三鍋香織 (立山科学工業株)

◎指導機関：富山県立大学工学部

3. フレキシブル薄膜二次電池の基礎研究

岩滝幸司 (北陸電気工業株)

◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所、富山大学学術研究部工学系

4. 遠隔モニタリングシステムを利用した製品評価技術の研究

小林寛治 (コーセル株)、吉澤 明 (株タカギセイコー)

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

5. CAEの構造最適化を用いた設計手法に関する研究

清田典秀 (株タカギセイコー)

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

☆令和3年度 (第34回) 研究テーマと研究参加者 (6テーマ、6名)

1. 基板トランスにおける交流抵抗の低減技術検討

萩中悠太 (コーセル株)

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

2. フッ素ガス表面処理によるガスケット高機能化の評価手法の研究

中山 翔 (株タカギセイコー)

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

3. 時系列データ分類のための誤分類低減手法

寺井太朗 (田中精密工業株)

◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所

4. 熱伝導式水素センサの加熱冷却曲線のシミュレーション

中野貴之 (北陸電気工業株)

◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所

5. 製品のヘルスマニタリングのIoT化に関する研究

西井渉太 (コーセル株)

◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所・ものづくり研究開発センター・生活工学研究所

6. 水の光分解に関する基礎研究

塚田成弘 (磷化学工業株)

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

★令和4年度（第35回）研究テーマと研究参加者（4テーマ、8名）

1. CNF 複合樹脂成形とめっき技術を用いた高性能部品の作製

朝日奈幸輝（コーセル株）

◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター

2. 表面微細構造による濡れ性制御に関する研究

杉田涼輔（北陸電気工業株）

◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター

3. プラスチック製品の性能向上のための設計技術と評価に関する研究

永井孝紀（コーセル株）、大上戸勇馬（株タカギセイコー）、田中和馬（株タカギセイコー）

◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所

4. デジタルツイン技術を活用した工場内の電波環境の改善

澤田直登（立山マシン株）、沙 悠輝（田中精密工業株）、長柄直樹（長柄鉄工株）

◎指導機関：富山県立大学工学部

★令和5年度（第36回）研究テーマと研究参加者（5テーマ、8名）

1. リグニン系バイオマス製品の開発に関する研究

天池夏希（三協立山株）

◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター

2. 小型マイクロ波無線給電システムの開発

高嶋翔太（コーセル株）、田開孝祐（北陸電気工業株）

◎指導機関：産業技術研究開発センターものづくり研究開発センター

3. プラスチック製品の性能向上のための設計技術と評価に関する研究（2）

田中和馬（株タカギセイコー）

◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所

4. 衝撃応答特性の測定および解析による電子部品の信頼性向上

林 怜汰（コーセル株）、松田修人（コーセル株）

◎指導機関：産業技術研究開発センター機械電子研究所

5. 製造業におけるデジタルツインを活用した業務改善

諸岡哲史（三協立山株）、中村宙夢（株タカギセイコー）

◎指導機関：富山県立大学工学部

○ 会 員 企 業

令和6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)	斉藤 盛雄	真野 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)	平能 正三	庵 真砂代	0766-20-2101
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 吉寿	高野 吉寿	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(株)	水口 勝史	森 喜代志	076-483-3088
8	立山マシン(株)	宮野 兼美	松井 和浩	076-483-4123
9	田中精密工業(株)	田中 英一郎	高井 正樹	076-469-9107
10	長柄鉄工(株)	長柄 大介	長柄 大介	0766-22-3170
11	北陸電気工業(株)	多田 守男	今村 徹治	076-467-1111
12	燐化学工業(株)	吉村 浩幸	下野 哲数	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 (佐山 利彦、高川 恭輔)

○ 研 究 幹 事

氏 名	所 属	役 職	学 位	電話番号
石黒 智明	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 上席専門員	博士 (工学)	0766-21-2121
石本 卓也	富山大学先進アルミニウム国際研究センター	教 授	博士 (工学)	076-411-4897
岩坪 聡	産業技術研究開発センター企画管理部	企画調整課 上席専門員	博士 (工学)	0766-21-2121
岩本 健嗣	富山県立大学工学部情報システム工学科	教 授	博士 (政経・メディア)	0766-56-7500
大寺 康夫	富山県立大学工学部電気電子工学科	教 授	博士 (工学)	0766-56-7500
小幡 勤	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
坂井 雄一	産業技術研究開発センター機械電子研究所	電子デバイス技術課 副主幹研究員	博士 (工学)	076-433-5466
塚本 吉俊	産業技術研究開発センター企画管理部	企画調整課 上席専門員		0766-21-2121
寺澤 孝志	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
中 茂樹	富山大学学術研究部工学系	教 授	博士 (工学)	076-445-6731
中橋 美幸	産業技術研究開発センター生活工学研究所	生活科学課 副主幹研究員	博士 (学術)	0763-22-2141
鍋澤 浩文	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
林 千歳	産業技術研究開発センター	次 長	博士 (工学)	076-433-5466
本保 栄治	産業技術研究開発センター生活工学研究所	所 長	博士 (工学)	0763-22-2141
水野 渡	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	センター長		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	齊藤 恵三 (平成 15 年度～平成 16 年度)	8 代会長	水口昭一郎 (平成 17 年度～平成 18 年度)
9 代会長	町野 利道 (平成 19 年度～平成 20 年度)	10 代会長	笠井 千秋 (平成 21 年度～平成 22 年度)
11 代会長	津田 信治 (平成 23 年度～平成 24 年度)	12 代会長	田中 一郎 (平成 25 年度～平成 26 年度)
13 代会長	武内 繁和 (平成 27 年度～平成 28 年度)	14 代会長	齊藤 行男 (平成 29 年度～平成 30 年度)
15 代会長	水口 勝史 (令和元年度～令和 2 年度)	16 代会長	谷川 正人 (令和 3 年度～令和 4 年度)
17 代会長	高木 章裕 (令和 5 年度～)		

○顧問 (50音順)

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

(様式1)

「若い研究者を育てる会」入会申込書

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

◎「若い研究者を育てる会」では会員企業を随時募集しています。

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

☆申し込み先

〒930-0866 富山市高田529

(公財) 富山県新世紀産業機構

「若い研究者を育てる会」事務局

TEL 076-444-5607

FAX 076-444-5630

発 行 者	若い研究者を育てる会
	〒930-0866 富山市高田529 (公財)富山県新世紀産業機構 プロジェクト推進課内
発 行 責 任 者	富山県産業技術研究開発センター 林 千歳 (公財)富山県新世紀産業機構 高川 恭輔
発 行 年 月 日	令和6年3月11日
印 刷 所	株式会社富士印刷

*無断転載を禁ずる。非売品。