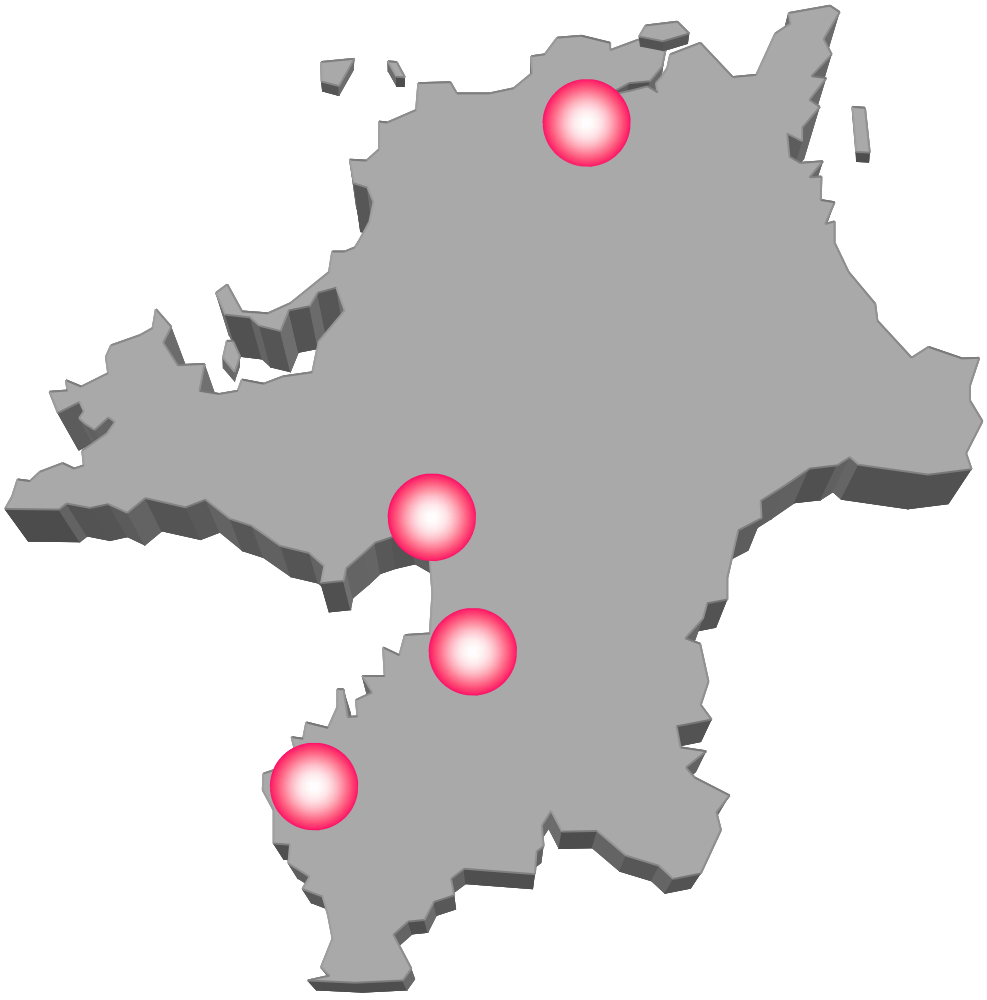
No.36（2026）

研　究　報　告



福岡県工業技術センター

福岡県工業技術センター研究報告 No.36 (2026)　目次

◆◆研究報文◆◆

センダン材の新たな魅力を引き出す家具デザイン ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１
－加熱処理による色味の制御と物性の評価について－

限本 あゆみ　楠本 幸裕　中嶋 観司　竹内 和敏　羽野 泰史　行田 那奈

Ti-6Al-4V合金の組織と機械的性質　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５
－引張方向，ひずみ速度，熱処理の影響－

菊竹 孝文　内野 正和

レーザ粉体肉盛法を用いたTiC肉盛技術の検討　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９
－TiCとFe合金の混合粉末肉盛－

島崎 良

ルテニウムめっきのスクラッチ試験法による密着力評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２

奥田 龍之介

金属粉末射出成形を活用した微細構造体の成形技術に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・１６

西澤 崇　田尻 智基　中村 憲和

ホットランナーを活用した金属粉末射出成形の生産性向上に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・２０

西澤 崇　田尻 智基　中村 憲和

構造解析と応答曲面法によるブラケットの設計最適化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２４

中井 太地　髙宮 義弘

熱流体解析における応答曲面法を用いた最適設計手法の構築 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２８

村田 顕彦　戸塚 陸美

トポロジー最適化を活用したヒートシンクの熱流体設計に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・３２

大内 崇史　村田 顕彦　山本 圭一朗

電磁力振動と音響信号による強磁性鋼管裏面スケール厚さの非接触測定 ・・・・・・・・・・・・・・３６

東原 純

◆◆技術報文◆◆

嗜好性に優れた冷凍原木シイタケの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４０

田﨑 麻理奈　遠藤 智哉　片山 秀樹　上田 京子　筒井 護

福岡県家具ブランド力向上支援事業　製品企画力高度化支援事業における製品開発事例 ・・・・・・・４３
－使い続けたくなるデザイン桐箱の開発－

楠本 幸裕　本 明子　井上 友子　藤井 博文　田村 渉　鈴木 康洋

福岡県家具ブランド力向上支援事業　製品企画力高度化支援事業における製品開発事例 ・・・・・・・４６
－現代のモダンなリビング空間にマッチするラタン製品の開発－
隈本 あゆみ　楠本 幸裕　本 明子　井上 友子　鹿田 和正　石橋 清志

福岡県家具ブランド力向上支援事業　製品企画力高度化支援事業における製品開発事例 ・・・・・・・４９
－「何に塗る？」漆で仕上げるプロダクト（アイテム・デザイン）の開発－
中嶋 観司　隈本 あゆみ　本 明子　井上 友子　近松 敏夫　溝口 瑛　溝口 京子

隔膜電解を用いた老化クロムめっき液からの不純物除去に関する検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・５２
古賀 弘毅　吉玉 和生

レーザ溶接の技術蓄積と最適条件の検討　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５６
－レーザによる鉄/アルミニウムの突合せ溶接－
小川 俊文

イオン交換樹脂を用いた可搬型装置による六価クロムめっき浴の再生 ・・・・・・・・・・・・・・・５９
中野 賢三　古賀 弘毅　深田 博智　深田 博志

ＣＦＲＴＰシートの成形に関するデータベースの作成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６３
小田 太

金属粉末射出成形における樹脂型の適用 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６６
田尻 智基　西澤 崇

インコネルの金属粉末射出成形における焼結条件と機械的性質に関する研究 ・・・・・・・・・・・・７０
田尻 智基　西澤 崇　中村 憲和

材料押出（MEX）方式による純銅積層造形部品の焼結変形抑制と材料特性に関する研究・・・・・・・・７４
山田 泰希　佐藤 惇　竹下 朋春

V字型形状の雨どいにおける排水時の砂の流動解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７７
山本 圭一朗　大内 崇史　松橋 洋子

IoT導入支援キットと連携可能な画像認識AIツールの試作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８０
前田 洋征

IoT導入支援キットを用いた簡易電力測定手法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８４
前田 洋征　古賀 文隆

◆◆学協会誌掲載論文の概要◆◆
分裂酵母におけるプロテインジスルフィドイソメラーゼPdi1pを用いた
異種タンパク質分泌生産系の構築 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８８
富永 陽大　小谷 哲也　渡邊 真宏　竹川 薫

研 究 報 文

センダン材の新たな魅力を引き出す家具デザイン
－加熱処理による色味の制御と物性の評価について－

隈本 あゆみ[*1]　楠本 幸裕[*1]　中嶋 観司[*1]　竹内 和敏[*1]　羽野 泰史[*1]　行田 那奈[*1]

Furniture Design Enhancing the Value of Sendan Wood
Color Control via Heat Treatment and Physical Property Evaluation

Ayumi Kumamoto，Yukihiro Kusumoto，Kanshi Nakajima，
Kazutoshi Takeuchi，Yasushi Hano and Nana Yukita

著者らは，国産センダンの利用拡大のため，課題とされているセンダンの色味のばらつきを加熱処理で解消し，家具材に活用することを目指している。本研究では，まず加熱処理によって暗色化したセンダンに対する色味のばらつきと魅力的な色味についてアンケート調査を行った。次に，所望の色味を再現する加熱処理条件を検討するため，加熱処理前の材色が加熱による暗色化へ与える影響について明らかにした。さらに，加熱処理センダンの物性を評価し，家具材として利用可能か検討した。その結果，色味のばらつきが気にならず，かつ魅力的な色味を有する加熱処理センダンの基準色を決定し，その基準色を再現するためには加熱処理前の材色に応じて加熱処理時間を調整する必要があること，加熱処理センダンは家具材として利用可能であることが分かった。

1 はじめに

昨今，円安やエネルギー価格の影響を受けて木材輸入コストが大幅に増加し，外材の価格が高騰している。このような状況下で，国内では国産材の利用が拡大しており，福岡県では協同組合福岡・大川家具工業会を中心に早生樹である国産センダンの活用が推進されている。しかし，センダンの色味は材内のばらつきに加え，個体差によるばらつきも大きく，家具材として用いる場合は，製品上に現れる色むらが意匠上の課題となっている。一方，木材は熱を加えることで暗色化し[1)]，一般的に人間の目では色の違いを知覚しにくくなる[2)]。そこで，センダンを加熱処理することで見た目の色味のばらつきが緩和され，さらには，暗色化によって重厚感が増すことで高級感が付与されるなど[3)]，センダンの新たな魅力に繋がると考えた。

本研究ではまず，加熱処理によって色味を変化させた加熱処理センダンを用いてアンケート調査を実施し，色味のばらつきが気にならない暗色化の程度と，最も魅力的に感じる加熱処理センダンの基準色を決定した。次に，基準色を再現するための加熱条件を検討するため，初期の材色の違いが暗色化に及ぼす影響について明らかにした。最後に，加熱処理がセンダンの物性に及ぼす影響について評価し，加熱処理センダンが家具用材として利用可能であるか検討した。

*1 インテリア研究所

2 研究方法

2-1 加熱処理センダンの色味に関する評価

色味のばらつきが気にならない，かつ最も魅力的に感じる色味（基準色）を決定するために，アンケート調査と色差計による測定を行った。

試験体寸法は幅100 ㎜，長さ250 ㎜，厚さ4 ㎜とし，240 ℃の乾燥機中に所定の時間静置した。

アンケート調査は，一般消費者30名（男性15名，女性15名）を対象に実施した。試験体を並べて提示し，「色味のばらつきが気にならないもの」，「一番魅力的な色味」という設問に対して，「色味のばらつきが気にならないもの」の設問には該当する全ての試験体を，「一番魅力的な色味」の設問には単一回答で該当する試験体を選択してもらった。

色差計による測定では，アンケートで使用した試験体の色味を日本電色工業株式会社製のポータブル色差計NK1を使って数値化（L*a*b*）した。

2-2 初期の材色と加熱処理後の色味の比較

初期の材色が異なる8種類のセンダンを用いて，幅100 ㎜，長さ250 ㎜，厚さ20 ㎜の試験体を240 ℃の乾燥機中に所定の時間静置し，各加熱時間における基

準色との色差を色差計で測定した。

2-3 加熱処理センダンの物性評価

表1に実施した評価項目と評価方法を示す。同一のセンダンの個体から評価項目ごとに厚さ35 mmの板材を，それぞれの評価項目で個体差を抑えるため，連続する試験体となるよう採取した。240 ℃の乾燥機中に静置し加熱処理した後，20 ℃，65 %RHの恒温恒湿器中で2週間養生した。

表1 実施した評価項目と評価方法

評価項目	評価方法
含水率	JIS Z 2101 木材の試験方法 4に準拠
密度	JIS Z 2101 木材の試験方法 5に準拠
曲げ強さ	JIS Z 2101 木材の試験方法 15を参考
表面硬さ(ブリネル硬さ)	JIS Z 2101 木材の試験方法 21を参考，追柾面12箇所
木ねじ保持力	JIS A5905 繊維板 7.14を参考，追柾面2箇所
接着せん断強さ	JAS 1152 集成材 5.4 ブロックせん断試験を参考 水性高分子イソシアネート系接着剤(株式会社 オーシカ製 鹿印ピーアイボンドTP-111)で接着

3 結果と考察

3-1 加熱処理による色味の変化と基準色の決定

加熱処理時間による色味の変化の経過を図1に示す。a*，b*値はほぼ横ばいで推移したが，L*値は加熱処理時間が長くなるほど低下しており，暗色化が進行していることが分かる。

アンケート調査の結果を図2，図3に示す。「色味のばらつきが気にならないもの」の設問では，加熱処理時間が長くなるほど「気にならない」という回答が増え，22分では過半数に達し，45分と60分では全員が「気にならない」と回答した（図2)。「一番魅力的な色味」の設問では，加熱処理時間0分から60分まで幅広い回答が得られたが，45分までは加熱処理時間と共に増加する傾向があった（図3)。

以上の結果から，色味のばらつきが気にならず，かつ「一番魅力的な色味」として最も多く選ばれた加熱処理時間45分の色味（L*=4.7，a*=7.4，b*=15.7）を加熱処理センダンの基準色に決定した。

参考までに，代表的な高級木材として知られるウォールナットとの類似性を調査したところ，加熱処理時間45分と60分のみが選択される結果となった。ウォールナットとの色差は，45分で3.6，60分で3.7であった。このことから，加熱処理センダンをウォールナットの代替として利用できる可能性が示唆された。

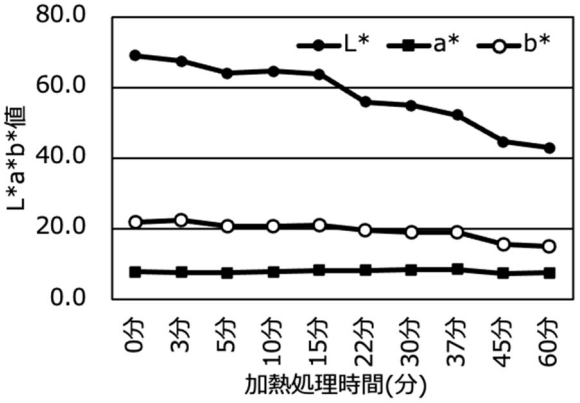


図1 加熱処理時間と色味の変化

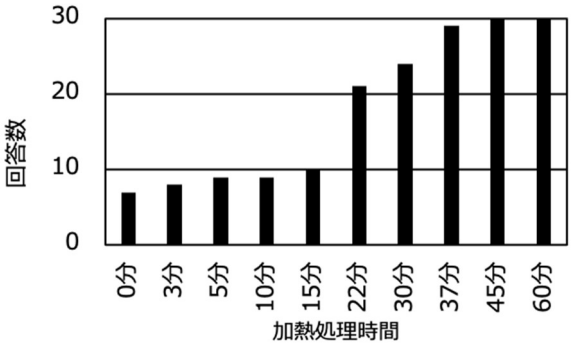


図2 「色味のばらつきが気にならないもの」の結果

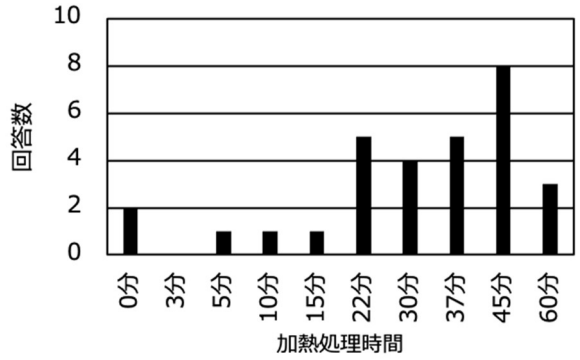


図3 「一番魅力的な色味」の結果

3-2 初期の材色と加熱処理後の色味の比較

表2に記載の初期の材色が異なる8種類のセンダンについて，加熱処理時間ごとの色差変化を図4に示す。試験体はL*の値が大きい順にA～Hとした。また，全ての色差（ΔE*ab）は基準色（L*=4.7，a*=7.4，b*=15.7）との色差である。

表2　各試験体のL*a*b*値と基準色との色差

試験体	L^*	a^*	b^*	ΔE^*ab
A	74.2	9.7	21.6	29.6
B	73.7	9.1	19.9	30.0
C	70.4	11.0	21.6	26.6
D	68.1	9.7	23.7	24.5
E	65.3	12.7	24.1	20.5
F	63.3	13.2	23.9	18.6
G	60.9	14.3	24.1	22.5
H	59.9	13.4	25.9	18.2

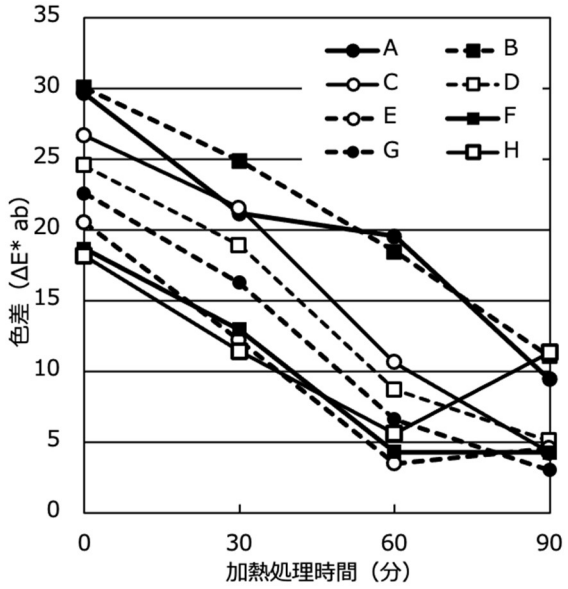


図4 加熱処理時間と基準色との色差

加熱処理前に色差が最も小さかった試験体Hでは，加熱処理時間60分まで色差が低下し，90分では増加に転じた。これは，基準色を超えて暗色化したため色差が大きくなったと判断できる。試験体EとFは60分まで色差が低下し，90分でもほぼ同じ値を示した。試験体C，D，Gは90分まで色差が低下し，90分の色差は試験体E，F，Hの60分の色差と同程度であった。試験体A，Bも90分まで色差が低下したが，90分でも10程度の色差であった。加熱処理による色差の変化速度は初期の色差によらず一定であったことから，初期の色差が小さいものは短時間，色差が大きいものは長時間加熱処理することで基準色に近い色を得られることが示唆された。また，試験体Hで見られたように，過度の加熱処理は暗色化が進行しすぎて色差が大きくなるため，適切な時間で加熱処理を止める必要がある。

3-3 加熱処理センダンの物性評価

図5に加熱処理センダンの含水率を示す。含水率は，加熱処理時間が長いほど低下した。加熱によるセルロースやヘミセルロースの疎水化の影響と考えられる。

図6に加熱処理センダンの密度を示す。加熱処理時間が長いほど密度は低下した。これは含水率の低下と揮発成分蒸散の影響であると推察される。

図7，8，9に加熱処理センダンの曲げ強さ，木ねじ保持力及び接着せん断強さを示す。加熱処理時間60分まで大きな変化が見られず，90分では強度が低下する傾向が見られた。

図10に加熱処理センダンの表面硬さ（ブリネル硬さ）を示す。表面硬さは，加熱処理時間が長いほど大きくなり，90分加熱では未処理材（0分）に比較して約1.4倍に向上した。

以上の結果から，加熱条件が240 ℃，60分までであれば，加熱処理がセンダンの物性に及ぼす影響は小さいことが分かった。先行研究において，未処理のセンダンは家具材として十分な強度を有していることを明らかにしており[4]，加熱条件が240 ℃，60分までの加熱処理センダンも家具材に利用可能と判断できる。

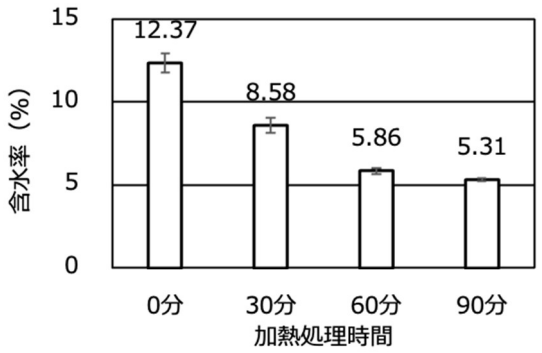


図5 加熱処理センダンの含水率

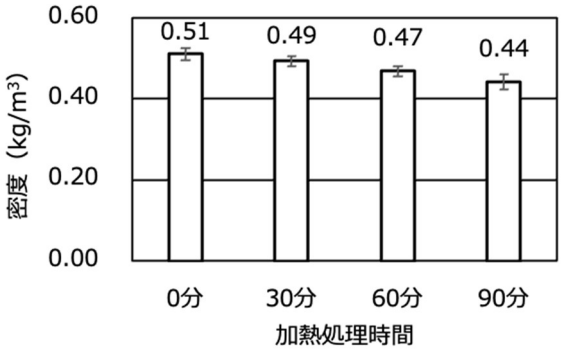


図6 加熱処理センダンの密度

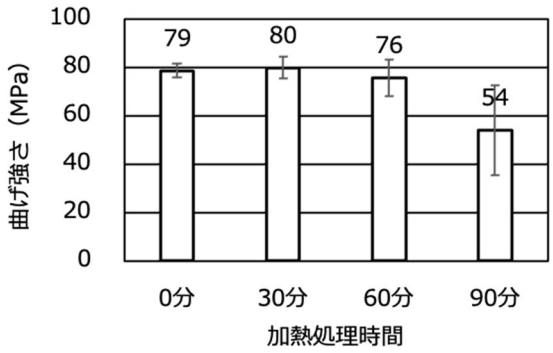


図7 加熱処理センダンの曲げ強さ

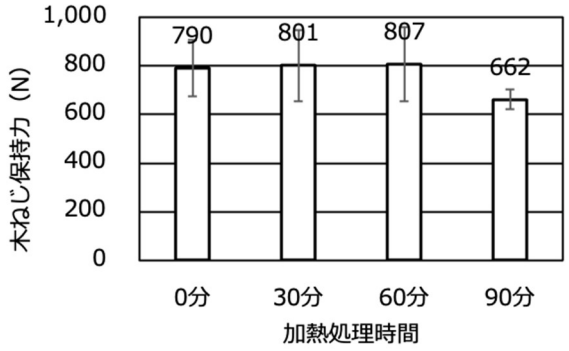


図8 加熱処理センダンの木ねじ保持力

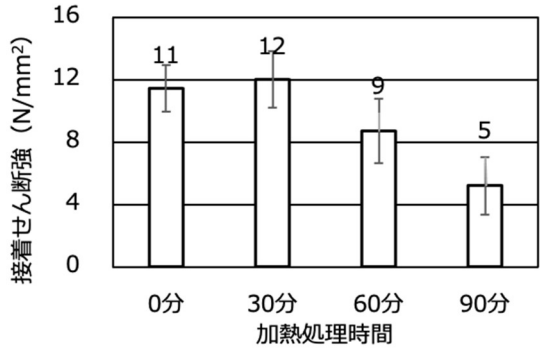


図9 加熱処理センダンの接着せん断強さ

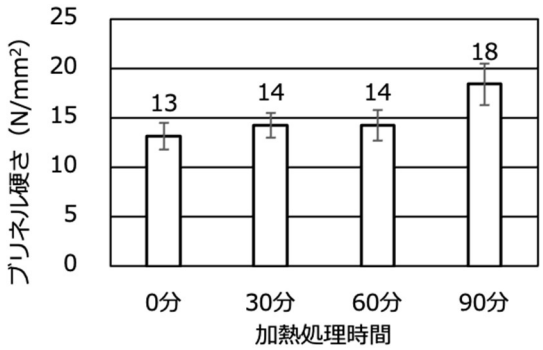


図10 加熱処理センダンのブリネル硬さ

4 まとめ

本研究では，国産センダンの課題とされていた色味のばらつきを加熱処理により解消し，材色の変化を家具デザインに活用することを目指し，①色味のばらつきが気にならず，かつ魅力的な色味を有する加熱処理センダンの調査，②初期材色のばらつきを考慮した加熱時間についての検討，③加熱処理センダンの物性評価と家具材としての利用可能性の検討を実施した。その結果，①センダンは加熱処理時間が長くなるほど暗色化し，色味のばらつきが気にならなくなること，適切な加熱処理により魅力を感じさせる材となり色味はウォールナットに類似していること，②加熱処理時間を初期の材色に応じて調整する必要があること，③240 ℃，60分までの加熱であれば物性に及ぼす影響は小さく，家具材として利用可能であることが明らかとなった。本研究を通して，加熱処理センダンは，センダンが抱える色味のばらつきという課題を解決でき，新たな魅力を持つ家具材となり得る可能性が示された。今後は，印象評価で得られたデータを元に，意匠面を含めた家具デザインプロセスについて検討する。

5 参考文献

1）独立行政法人森林総合研究所：改訂 4 版木材工業ハンドブック， pp.893-894，丸善(2004)

2）赤澤 智津子：千葉大学学位申請論文(2009)

3）栗田 愛子：日本心理学会年次大会論文集，81 号，pp.429(2017)

4）岡村 博幸：福岡県工業技術センター研究報告，No.33，pp.40-43(2023)

Ti-6Al-4V合金の組織と機械的性質
－引張方向，ひずみ速度，熱処理の影響－

菊竹 孝文[*1]　内野 正和[*1]

Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy
- Effects of Tensile Direction, Strain Rate and Heat Treatment -

Takafumi Kikutake, Masakazu Uchino

航空機部品としてよく用いられるTi-6Al-4Vを対象として，市販材の組織を詳細に解析した。また，引張試験を実施し，引張方向，引張ひずみ速度，大気熱処理条件等の影響について調査した。結果は，圧延方向に引張試験をした場合及び引張ひずみ速度が高い場合に引張強度が高くなることを示した。また，時効温度が高くなるにつれて，400 ℃をピークに引張強度が増加し，500 ℃では低下した。一方，時効温度が400 ℃までは降伏点が見られなかったのに対し，500 ℃の場合に明瞭に降伏点が発現した。

1 はじめに

機械電子研究所では，県内企業の航空機産業参入のための技術データベースを作成している。航空機部品には純チタンやチタン合金が多く用いられている。一般的に，強度特性はひずみ速度と温度環境に依存することが報告されている[1-3]。これまで，加熱炉及びデジタル画像相関法（DIC）[4]を組み合わせた手法を用いてTi-6Al-4V合金について調査してきた[5]。前報[5]にて，室温から250 ℃までの加熱を伴う引張試験計測を実施し，ひずみ速度と温度環境をパラメータとした応力－ひずみ曲線を取得した。ここで，最大試験温度の250 ℃においては，ひずみ速度依存性が見られなかった。本報では原因究明のため，まず市販材(以下，受入まま材という)の組織を詳細に解析する。次に，引張方向，引張ひずみ速度，熱処理条件等の影響について詳細に調査する。

2 実験方法

2-1 供試材及び引張試験片

供試材は，市販の板厚が1.0 mmのTi-6Al-4V合金を用いた。試験片形状はJIS 13B号とし，平行部の長さ70 mm，幅12.5 mm，厚み1 mmとした。試験片は，ワイヤー放電加工により作製した。試験片は，圧延方向に対して引張方向が平行になる向きを圧延方向（RD），RD方向に垂直な板幅方向（TD）とし，2種類を採取した。引張試験は，各条件で3本(一部2本)実施した。

*1 機械電子研究所

2-2 組織解析

断面を湿式研磨及びイオンミリング（CP:クロスセクション ポリッシャー）したRD断面試料を作成し，FE-SEM（JSM-7001F)による組織観察を行った。

結晶相の同定にはX線回折（D8 DISCOVER）によるθ-2θ法を用いた。X線管球は銅を用いた。

相比及び結晶塑性ひずみの評価には，EBSD解析における相マップ及びKAMマップ（0～4°）を用いた。解析データには，信頼性指数(CI値)0.1以上のものを使用した。

2-3 引張試験

引張試験は，DIC法[4]を用いた。図1にデジタルカメラで撮影した試料表面の画像を示す。本手法は試料表面に白と黒のスプレーでランダム模様を着け，この模様を基に表面の変位分布を計測する手法である[5]。

図2に計測時の様子を示す。前報[5]では加熱しながら測定を行ったが，装置の仕様上，温度上限があることに加え，長時間の加熱も困難である。そこで本報では，加熱による影響を明らかにするため，引張試験前の試料に長時間の熱処理を実施した。ひずみ速度は，0.01～1.0 mm/sとした。試験温度は室温とした。

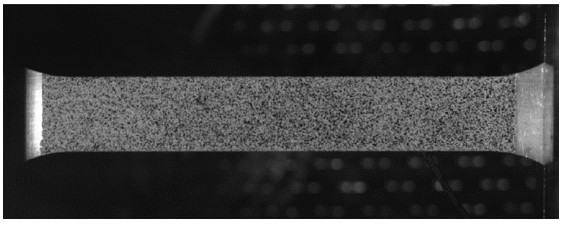


図1 試験片のデジタル画像



図2 DICによる計測の様子

2-4 熱処理

図3に熱処理炉の模式図を示す。雰囲気は大気中，温度は250～500 ℃，均熱時間は10及び100時間とした。試験片を引張試験片に加工後，試験片同士が重ならない様に並べた。シース熱電対を用いて試験片の温度を直接測定した。

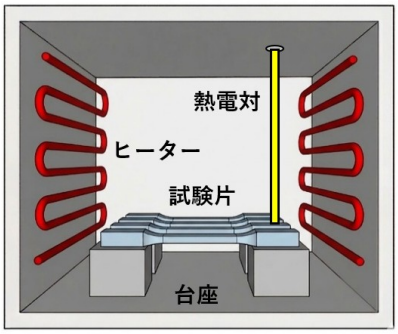


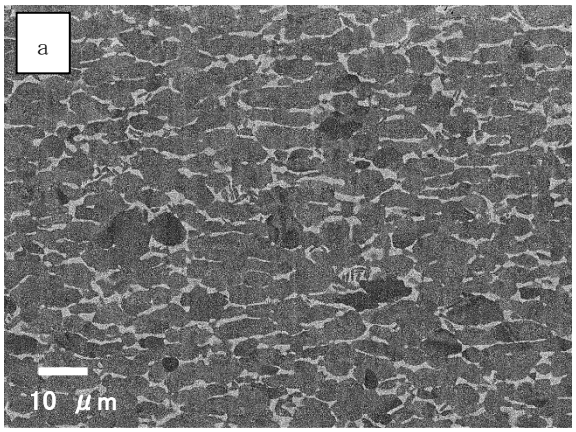
図3 熱処理炉の外観及び模式図

3 結果

3-1 受入まま材の組織解析

図4(a)に受入まま材の断面組織を示す。受入まま材は，2相組織であった。また灰色を示す組織が多く，白色を示す組織が少なかった。ここで，縦方向の白い線はCP加工に伴うカーテニングと呼ばれる現象の痕跡と考えられる。図4(b)に(a)を拡大した断面組織を示す。組織に析出物や微細な結晶相は観察されなかった。図5に受入まま材のX線回折測定結果を示す。受入まま材は，主にhcp構造のα相及びbcc構造のβ相の組織で構成されていた。

EBSD解析では構成相の結晶構造データを用いて方位解析するため，XRD測定の結果を用いてEBSD解析を実施した。図6(a)は相マップを示す。α相が多く，β相



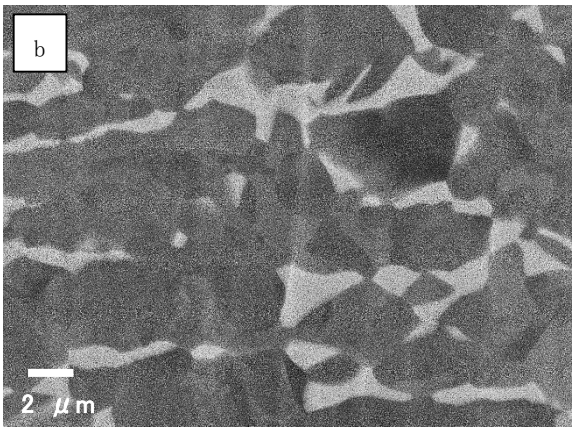


図4 受入まま材の組織観察結果．(a)1,000倍の観察結果，(b)5,000倍の観察結果．

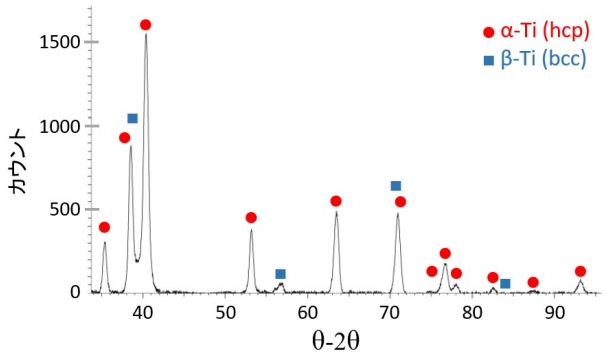


図5 受入まま材のX線回折結果

が少なかった。よって，SEM観察における灰色の相がα相，白色の相がβ相に対応することがわかった。また，β相はα相よりも結晶粒径が細かく，CI値が0.1未満の信頼性が低いピクセル(図中の黒い領域)が多く見られた。図6(b)にKAMマップ(0～4°)を示す。KAMマップにおいて，α相における塑性ひずみは線状及び点状に分布していた。相マップと同様に，β相はCI値が低いため，全体的に黒く表示された。よって，本試験ではKAMマップによるβ相の評価は困難であった。

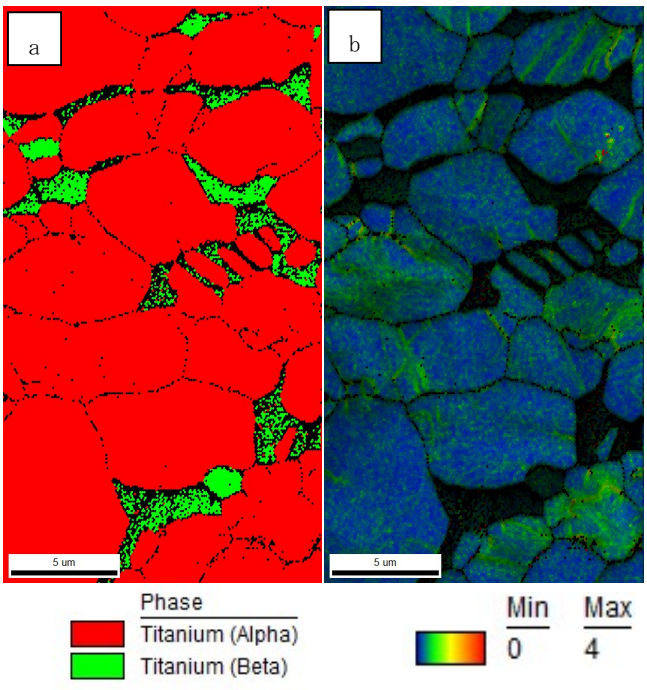


図6 受入まま材のEBSD解析結果(CI＞0.1).
(a)相マップ, (b)IQ+KAMマップ.

3-2 引張試験

図7に受入まま材及び250 ℃-10h熱処理材の引張試験結果を示す。TD方向において，受入まま材及び熱処理材のどちらも，ひずみ速度が増加するにつれて引張強さが上昇した。また，0.1 mm/secにおいて，TD方向とRD方向では，受入まま材及び熱処理材のどちらもRD方向の引張強度が高かった。TD方向の受入まま材よりも，RD方向の熱処理材は80 MPa以上も高い引張強さを示した。

次に，熱処理温度と時間の影響を調査するため，受入まま材を時効温度250～500 ℃，時効時間10h，100hで時効処理をした(一般的に，長時間の熱処理を施し，強度を上昇させる処理を時効熱処理と呼ぶため，以後，本熱処理を“時効”と表記する)。時効熱処理材の引張試験結果を図8に示す。時効温度が高くなるにつれて，また時効時間が長くなるにつれて強度が上昇した。400 ℃の時効熱処理が最大の引張強度を示し，室温の引張強度より100 MPa以上も高い値を示した。しかしながら，500 ℃の時効熱処理においては，400 ℃よりも40 MPa程度低い引張強度を示した。

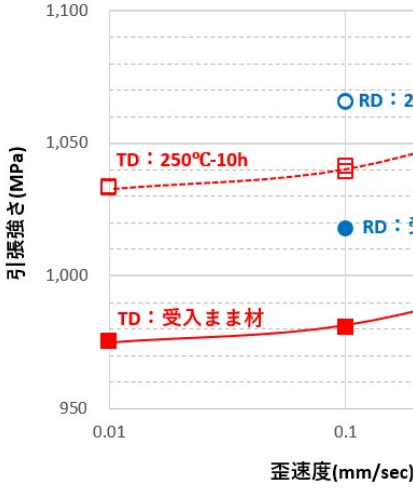


図7 引張試験結果(受け入れまま材及び250 ℃-10hの熱処理材)

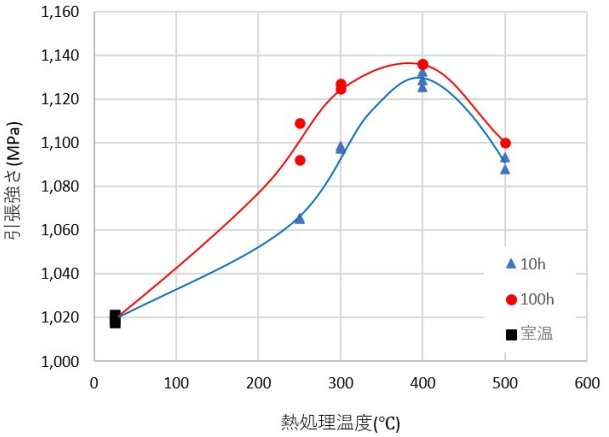


図8 時効熱処理した引張試験結果

図9に時効熱処理無し，時効温度が400 ℃及び500 ℃，時効時間が10h，100hにおける応力-ひずみ曲線を示す。500 ℃の時効熱処理材の強度は400℃のものより低下したが，ひずみは時効時間が10hの場合に，大きい値を示した。また，400 ℃以下で時効熱処理をした場合の変形は，降伏点が見られなかったのに対し，500 ℃では10h及び100hの双方で明瞭な降伏点が発現した。

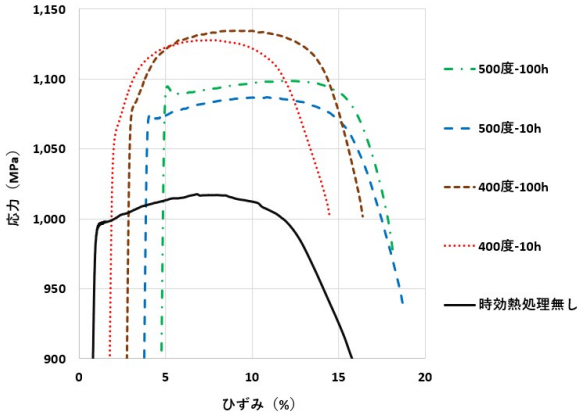


図9 時効熱処理材の応力-ひずみ曲線
(各曲線はひずみを1%ずつオフセットして表示)

4 考察

今回，250 ℃の時効熱処理において，ひずみ速度0.01～1.00 mm/sの全域で同程度の強度上昇が見られた(図7)。前報[5]では，250 ℃での加熱を伴う引張試験においては，ひずみ速度依存性は見られなかったことを報告した。この要因は，ひずみ速度が小さい方がより長時間加熱されるため，高ひずみ速度条件に比べて強度上昇が高かったためと推察される。その結果，ひずみ速度が高い場合と同等の引張強さが得られたと考えられる。

α+β型やβ型チタン合金の時効熱処理において，高温時効（600℃近傍）と低温時効（400℃以下）があることが報告されている[6]。β相から高温時効では微細α相が析出し，低温時効ではω相などの準安定相が析出することが確認されている[6]。また，八木等はTi-6Al-4V合金の低温時効によるω相の析出を報告している[7]。図8の引張試験結果は，八木等の硬さ試験結果[7]に近い時効曲線を示した。ω相は，低温時効によって，β相からα相へ変態する際に生じる遷移相であり[8]，図8の結果においてもω相の生成が強度に寄与したことが十分に考えられる。しかしながら，ω相は硬度が高いものの脆化相であるため，工業的に避けるべきであることも指摘されている[8]。本結果から，250 ℃における時効硬化が認められたことから，250 ℃程度の比較的低温環境であっても，脆化に注意が必要であることが示唆された。しかしながら，ω相は遷移相であるため，長時間または高温の使用環境ではω相がα相に変化し，延性及びじん性が改善する[6]。

図9において，500 ℃の時効熱処理において降伏点が発現した。図8より，500 ℃の時効温度は強度の最大値を過ぎており，微細α相の時効温度域[6]である。笹野等は，純チタン(α相)における，300～500 ℃の時効熱処理を実施し，ひずみ時効による降伏現象が発現することを示した[9]。また，笹野等は，置換型元素及び酸素の濃度増加によって降伏現象が顕著になることを報告している[9]。本合金の主要元素であるAlはα相，Vはβ相に多く分配される[10]ため，β相から生成した微細α相のV濃度は比較的高くなることが推察される。V濃度の上昇によって，降伏点が明瞭に現れたことが考えられる。また，図6(b)で示した受入まま材においても，α相に塑性ひずみが観察されていることに加え，大気中における熱処理であった点も降伏点が発現する要因と考えられる。これらの強度特性を正確に把握するためには，真空や不活性ガス雰囲気中で熱処理を実施し，詳細な組織解析が必要である。

5 まとめ

Ti-6Al-4Vに熱処理を施し引張試験を実施した。前報[5]における250 ℃での高温引張試験において，ひずみ速度依存性が見られなかったのは，加熱に伴う時効硬化による影響であると考えられる。加えて，本試験により下記の知見が得られた。

- TD及びRD方向に引張試験をした結果，RD方向の引張強度が高かった。
- ひずみ速度の上昇に伴い，引張強度が増加した。
- 時効熱処理温度において，400 ℃まで温度が上昇するにつれて引張強度が高くなり，500 ℃で低下した。
- 時効時間が10時間より100時間の引張強度が高くなった。
- 500 ℃の時効熱処理では，明瞭な降伏点が発現した。

6 文献

1) 稲垣 育宏，武智 勉，白井 善久，有安 望：新日鉄住 金技報，396号，pp.23-28 (2013)

2) 守谷 英明，長井 寿，河部 義邦，岡田 厚正：鉄と鋼，82巻，10号，pp.78-82 (1996)

3) 小川 鉄也，野島 武敏：材料，37 巻，421 号，pp.41-47 (1988)

4) M.A. Sutton, S. R. McNeill, J. D. Helen, and Y. J. Chao : Photomechanics Topics in Applied Physics, Springer-Verlag , vol.77 , pp.323-372 (2000)

5) 内野　正和，山田 圭一：福岡県工業技術センター研究報告，32号，pp.51-54 (2022)

6) 新家 光雄等：チタンの基礎と応用，pp. 60-62, 内田老鶴圃(2023)

7) 八木 芳郎等：日本金属学会誌，26巻，9号，pp.601-606 (1962)

8) 木村 啓造：鉄と鋼，72巻，1号，pp.113-122 (1985)

9) 笹野 久興，花木 道夫，木村 啓造：日本金属学会誌，41巻，9号，pp.927-933 (1977)

10) 小松 伸也：軽金属，41巻，5号，pp.344-352 (1991)

レーザ粉体肉盛法を用いたTiC肉盛技術の検討
－TiCとFe合金の混合粉末肉盛－

島崎　良[*1]

Examination of TiC Cladding Technology by Laser Metal Deposition
- Mixed Powder Cladding with TiC and Fe Alloy -

Ryo Shimasaki

レーザ粉体肉盛法はレーザで母材表面を溶融し，溶融池に粉末を投入することで肉盛溶接を行う方法であり，入熱を制御することで高品質な肉盛被膜が得られる。本研究では，耐摩耗性向上のためTiCを複合化した肉盛被膜を作製するためのレーザ粉体肉盛条件を検討した。TiC粉末のみでは被膜の割れやはく離が発生するが，バインダとしてFe合金を用いた場合，TiC率34 %以下で健全な肉盛が可能であった。

1 はじめに

レーザ粉体肉盛法はLMD（Laser Metal Deposition）とも呼ばれ，高出力レーザで加熱溶融した母材表面の溶融池に粉末を投射することで肉盛溶接を行う方法である。レーザは局所加熱が可能であることから，従来のアーク溶接による肉盛と比べて歪みが小さく高品質な被膜が得られる。過酷な摩耗環境で使用される土木機械や鉱物プラント機械の部品は高硬度の肉盛被膜を要するが，高硬度被膜は割れやすく，高品質な被膜を得ることが難しい。そこで，本研究では，LMDでこれらに対応した被膜を作製するため，高硬度のTiC粉末をバインダとなるFe合金と混合し，その加工条件を検討した。

2 実験方法

母材を50×50×板厚10 mmのSS400板とし，TiC粉末（ヘガネス，Amperit 570.002，粒径45～90 μm）にバインダとしてFe合金粉末（ヘガネス，forAM™ 16MnCr5，粒径53～150 μm）を様々な比率で混合してレーザ肉盛を行った。粉末のキャリアガスにはアルゴンガスを10 L/minで流した。レーザはYAGディスクレーザ（TRUMPF，TruDisk 5000）を使用し，肉盛ヘッド（PRECITEC，YC52）により加工した。スポット径約 3 mm，ワーキングディスタンス13 mm（標準），加工姿勢前進角15°，レーザ出力1,500 W，加工速度10 mm/sec，シールドガス流量20 L/minを固定条件とし，1.5 mm間隔で5本のビードを肉盛した。

作製した肉盛被膜は，肉盛方向に直交する横方向で中央付近を切断し，断面を鏡面研磨後，荷重1 kgf，10 secで被膜のビッカース硬さを測定した。また，3 %ナイタールで組織を現出させ組織観察を行った。

次に，被膜の上面を平面になるまで研削し，大越式迅速摩耗試験機（東京試験機製作所，OAT-U）による摩耗試験を行った。相手材には直径30 mm，厚さ3 mmのSUJ2調質材のディスクを用いた。試験条件は，速度1.14 m/sec，摩耗距離200 m，試験荷重3 kgfとした。その後，摩耗痕形状をレーザ顕微鏡で測定し，摩耗体積により耐摩耗性を評価した。

3 実験結果および考察

3-1 被膜の外観および断面

作製したTiC混合被膜のTiC割合を表1に，その外観を図1に示す。100 % TiCの場合，割れ，はく離等の欠陥が多数生じた。Fe合金を混合した90～50 % TiCでは，はく離せずに肉盛できたが，細かい横割れが生じた。34 % TiCでは，割れることなく健全な肉盛が可能であった。そこで，34 % TiCの多層肉盛を試みたところ，2層及び3層の肉盛でも割れずに加工することができた。

次に，各試験片のビード断面を図2に，そのビード中央部の拡大を図3に示す。100 % TiCは，肉盛層の一部に溶融した母材が入り込み，バインダの役割をしていたが，ビードを重ねると母材の溶け込みが不足し，はく離していた。Fe合金と混合した90～34 % TiCでは，数十～100 μmの比較的大きな未溶融TiC粒子と，一度溶解して再晶出した，10 μm以下の小さなTiCの2種類が見られた。未溶融TiCには，熱衝撃で生じた亀裂が

*1 機械電子研究所

生じており，90～50 % TiCでは，この亀裂が母相に伝播することで割れ易くなったと考えられる。一方，34 % TiCは未溶融TiCが少ないため母相への影響が小さく割れが抑えられたと考えられる。また，34 % TiC被膜のEPMA組成像を図4に示す。被膜内には，再晶出TiCとして初晶のデンドライト状TiCと共晶の板状TiCが晶出していた。

TiCとFe合金の混合被膜は，過去の研究[1]で作製したNi合金との混合被膜と比べると，割れの程度が軽く，気泡も見られなかった。これは，Fe合金には炭素が溶解できCOガスが発生しにくいことや，再晶出TiCの形状が角の丸いデンドライト状であり割れの起点になりにくいためと考えられる。

3-2 被膜の硬さおよび耐摩耗性

被膜断面のビッカース硬さを図5に示す。100 % TiC被膜の硬さはTiC自体の硬さ（約3,000 HV）よりもやや低い2,200 HVであり，溶融した母材による希釈の影響が見られた。90 % TiC被膜では大きく硬さが低下し，約990 HVとなった。少しでもFe合金を混ぜると未溶融TiC粒子同士が接触しなくなることで，母相の硬さが支配的になるためと考えられる。Fe合金の混合量が増えると徐々に硬さが低下し，34 % TiC被膜では約740 HVとなった。しかし，硬質クロムめっき（750～1,000 HV）に近い硬さが得られており，耐摩耗性を発揮するのに十分であると考えられる。

次に，健全な被膜が得られた34 % TiC被膜の耐摩耗性を大越式迅速摩耗試験にて評価した結果を図6に示す。比較材として，S50C，S50Cに硬質クロムフラッシュめっきを施したもの（S50C クロムめっき），TiCなし被膜（0 % TiC）についても合わせて評価した。34 % TiC被膜は，一般的な構造用鋼であるS50CやTiCなしの被膜と比べて摩耗体積が非常に小さく，優れた耐摩耗性を示した。よって，34 % TiC被膜でも耐摩耗性の向上には効果的である。また，クロムめっきはめっき層が摩耗すると耐摩耗性を維持できないが，肉盛被膜は1層で約1 mmの厚さがあり，ある程度の摩耗に耐えられると考えられる。従って，TiC粒子を含むLMD被膜の耐摩耗用途への適用は十分に期待できる。

表 1 TiC とバインダ（Fe 合金）の供給量

試験片	粉末供給量(g/min)		TiC率 (%)
	TiC	Fe合金	
100 %TiC	12.0	0.0	100.0
90 %TiC	12.0	1.2	90.9
50 %TiC	12.0	12.0	50.0
34 %TiC	6.2	12.0	34.1

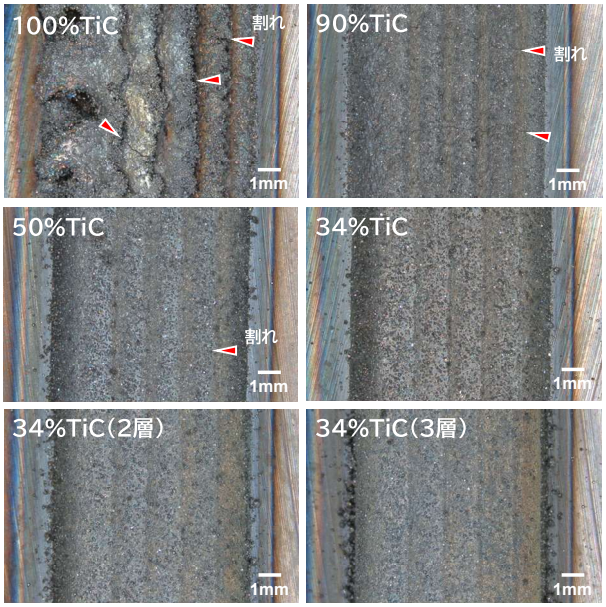


図 1 TiC-Fe 合金混合粉末の LMD 被膜外観
（写真右から左に 1.5 mm ピッチで 5 ビード加工）

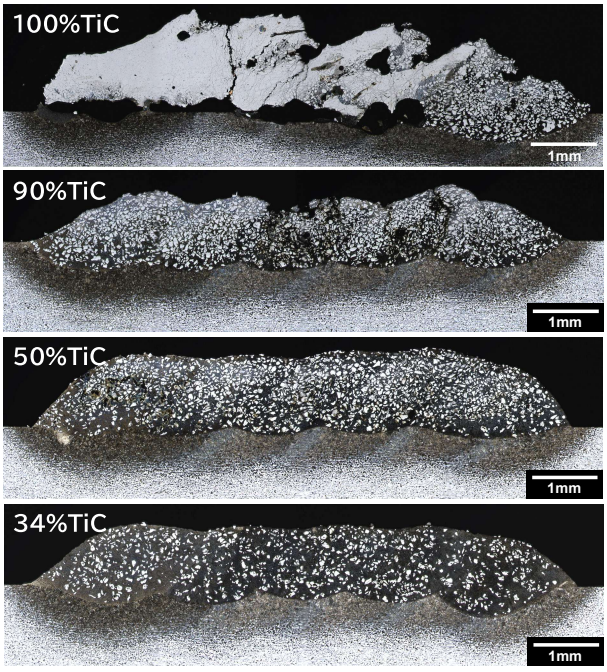


図 2 TiC-Fe 合金混合粉末の LMD 被膜断面
（3 %ナイタールでエッチング）

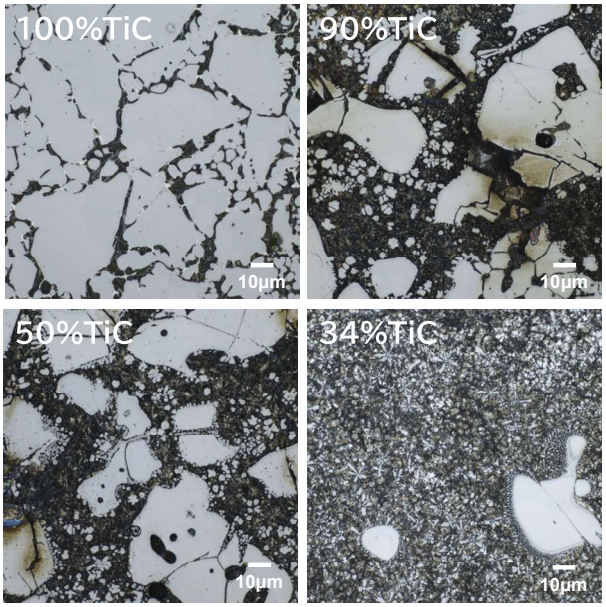


図 3 TiC-Fe 合金混合粉末の LMD 被膜内組織
（3 %ナイタールでエッチング）

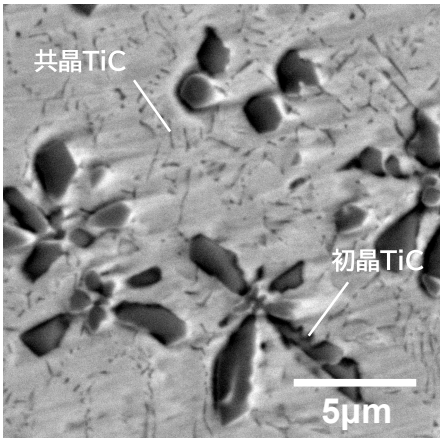


図 4 34 %TiC-Fe 合金 LMD 被膜の EPMA 組成像

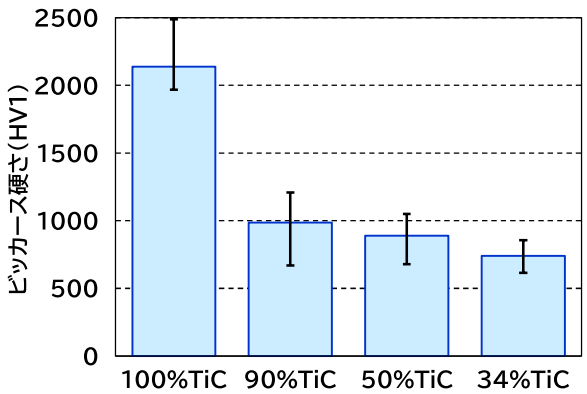


図 5 TiC-Fe 合金混合粉末の LMD 被膜硬さ

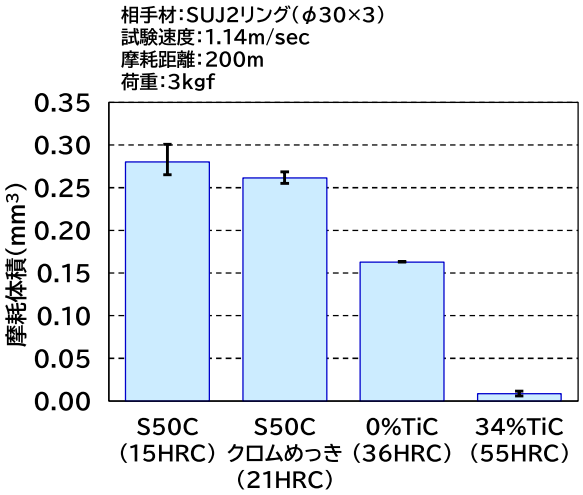


図 6 大越式迅速摩耗試験での摩耗体積による耐摩耗性評価

4 結論

TiC粉末をLMDで肉盛するためFe合金をバインダとして添加した場合，TiC率100～50 %では割れが発生するが，34 %では割れることなく多層肉盛が可能である。

Fe合金と混合されたTiC粉末粒子は，肉盛時に一部が溶融し，溶融した分は凝固時に再晶出する。その際，Fe合金の母相に炭素を溶解することでCOガス発生が抑えられる。また，晶出するTiCは角の丸いデンドライト状であり，割れを抑えられる。よって，Fe合金の使用は欠陥抑制に有効である。

34 % TiC-Fe合金被膜は硬さ，耐摩耗性ともに高く，耐摩耗用途への適用が期待できる。

5 参考文献

1） 島崎 良：福岡県工業技術センター研究報告，No.35，pp.38-39 （2025）

ルテニウムめっきのスクラッチ試験法による密着力評価

奥田 龍之介[*1]

Scratch Test Evaluation of Adhesion for Ruthenium Plating

Ryunosuke Okuda

ルテニウム(Ru)めっきは耐食性，耐摩耗性及び電気特性に優れることから，電子部品や接点材料への応用が期待されている。本研究では，銅基板上に形成したRuめっきハルセル試験板に対してスクラッチ試験を行い，電流密度および膜厚が密着性に与える影響を評価した。スクラッチ痕の光学顕微鏡像を白黒二値化処理し，Ruめっき残存率が50%となる荷重を50%剥離荷重（*Fn50*）と定義した。さらに，蛍光X線により膜厚を測定し，*Fn50*への影響を検討した。その結果，電流密度および膜厚により密着性が変化し，薄膜条件において高い密着性を示す傾向が確認された。

1 はじめに

Ruめっきは，優れた耐食性，耐摩耗性および電気特性を有することから，電子部品や接点材料への適用が期待されている[1),2)]。特に近年では，高耐久性が要求される機能性表面処理として注目されている[3)]。一方で，めっき膜の実用信頼性を確保するためには，基材との密着性評価が重要であり，密着力の定量的評価手法の確立が求められている。

めっき膜の密着性評価には，テープ試験，曲げ試験，スクラッチ試験など様々な方法が用いられている。このうちスクラッチ試験は，荷重を連続的に増加させながら膜の剥離挙動を評価できるため，薄膜材料の密着性評価法として広く利用されている[4),5)]。しかし，Ruめっきに関して電流密度や膜厚と密着力の関係を定量的に検討した報告は少ない。

また，ハルセル試験は，単一試験片上で広範囲の電流密度条件を再現できることから，めっき条件と皮膜特性の関係を効率的に評価する手法として有効である[6)]。特に，電流密度に依存した膜厚の変化や析出状態の違いが，密着性に及ぼす影響を系統的に調査する上で有用である。

そこで本研究では，銅基板上にRuめっきを施したハルセル試験板に対し，電流密度領域ごとにスクラッチ試験を実施した。スクラッチ痕の画像について白黒二値化処理を行って，Ruめっき残存率が50 %となる位置を求め，そのときの荷重を「50 %剥離荷重（以下，*Fn50*と表記する)」と定義した。さらに，各電流密度における膜厚を蛍光X線測定により求め，電流密度と*Fn50*の関係，ならびに膜厚と*Fn50*の関係を検討した。

2 実験方法

2-1 試験片作製

（株）山本鍍金試験器製てのりハルセル（並型ガラス製水槽）と白金陽極，希硫酸で洗浄済みの無酸素銅陰極板を試験に用いた。Ruめっき浴は大谷化学工業（株）より提供されたRuめっき試薬を用いて建浴した。基本浴であるめっき浴A，及び，高分子系添加剤を加えためっき浴Bの2種類を用い，それぞれ基本のめっき条件と，薄膜化条件の2条件を検討した。

2-2 試験片評価

Ruめっき膜厚は波長分散型蛍光X線装置（ブルカージャパン製S8 Tiger）を用いて算出した。硬さの評価には超微小押し込み硬さ試験機（(株）エリオニクス製ENT-NEXUS）を用いた。

スクラッチ試験は，スクラッチ試験機（(株）アントンパール・ジャパン製RST3）を用いて，荷重を連続的に増加させながら行った。スクラッチ試験による剥離状態を維持するため，スクラッチ痕の深さ確認のために最少荷重で表面をなぞるプレスキャンとポストスキャンは実施しなかった。スクラッチ条件を表1に示す。試験片の観察および形状測定はレーザー顕微鏡（(株）エビデント製OLS5100-EAT）を用いて行った。

*1 機械電子研究所

表1　スクラッチ条件

条件	設定値
初期荷重/N	1
最大荷重/N	20
負荷速度/N	19
スクラッチ距離/mm	5
スクラッチ速度/mm min^{-1}	5
ダイヤモンド圧子半径/μm	200

2-3 スクラッチ痕の解析

スクラッチ試験後の試験片に圧縮空気を吹き付け，剥離したRuめっき膜を除去した。図1に示すようにスクラッチ痕の光学顕微鏡像を用いて，表面から最も窪んだ位置を中心に幅60 μmの画像を切り取った。黒色がRuめっき膜，白色が銅基板となるように白黒二値化処理を行った。得られた二値化データをスクラッチ方向に垂直方向に平均化した。この画像を，画像解析ソフトウェアImageJを用いて数値化し，50 %付近を中心にスクラッチ距離1 mm区間について直線近似を行い，Ruめっき残存率が50 %となる位置を求めた。

さらに，スクラッチ距離と試験荷重との対応関係から，Ruめっき残存率が50 %となる時点の荷重を「50 %剥離荷重（*Fn50*)」と定義した。

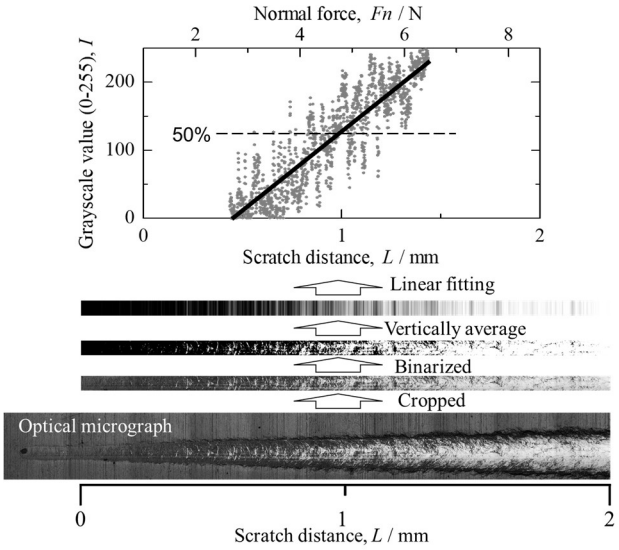


図1　*Fn50*の求め方の例

3 結果と考察

表2に硬さ試験の結果を示す。Ruめっき膜は銅基板と比較して著しく高い硬さおよび弾性率を示した。銅基板とRu膜の機械特性差は，スクラッチ試験時の応力分布や剥離挙動に影響を及ぼすと考えられる。

蛍光X線による膜厚測定結果を図2に示す。薄膜化条件でめっきしたデータに-thin filmを付す。薄膜化条件のめっき膜は基本浴の0.4～0.5倍の膜厚である。また，使用した高分子系添加剤が析出抑制作用を有しているため，めっき浴BのRu膜厚のほうがめっき浴Aよりわずかに薄くなっている領域が多かった。Ruのような貴金属めっきにおいては，大電流密度領域は水素発生の影響により電流効率が下がるため，膜厚の増加率が低下する傾向が現れている。

表2　硬さ測定結果

特性	銅基板	Ruめっき膜
押込み硬さH_{IT} / GPa	0.61±0.02	9.62±1.92
ビッカース硬さ換算値 *HV** / kgf mm^{-2}	56.5±1.7	889±177
押込み弾性率E_{IT} / GPa	2.39±0.12	167±33

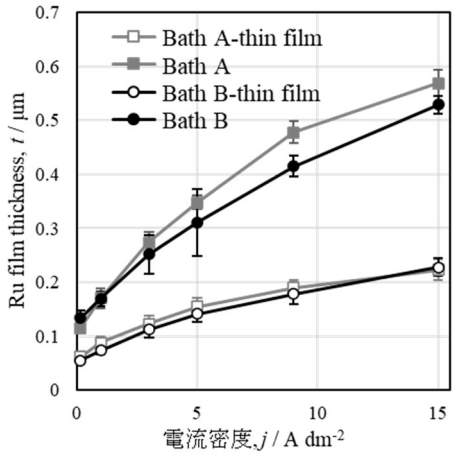


図2　各電流密度におけるRuめっき膜厚

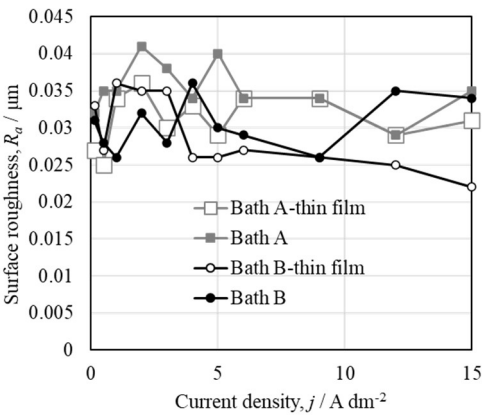


図3　各電流密度における表面粗さ（R_a）

図3にレーザー顕微鏡で測定したスクラッチ試験前試験片の表面粗さを示す。ハルセル試験では，試験片上の電流密度分布に応じて表面粗さが変化することが予想される。

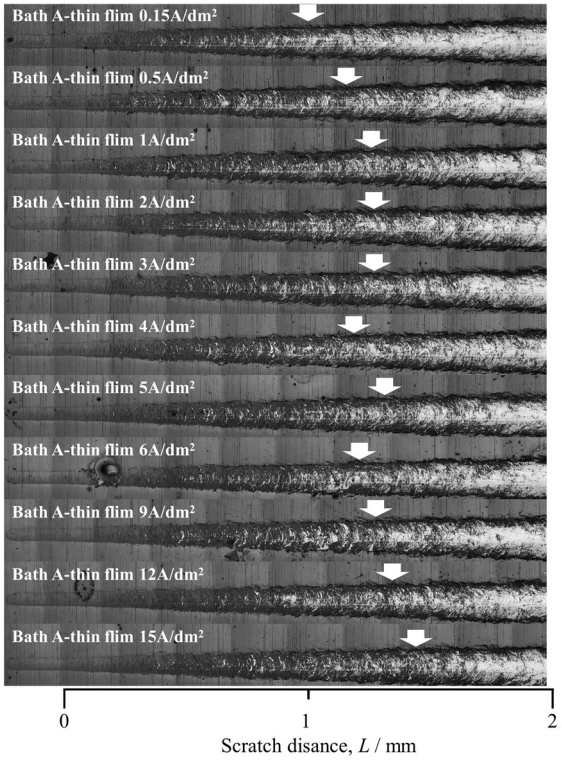


図4　めっき浴A（薄膜化条件）における*Fn50*の位置

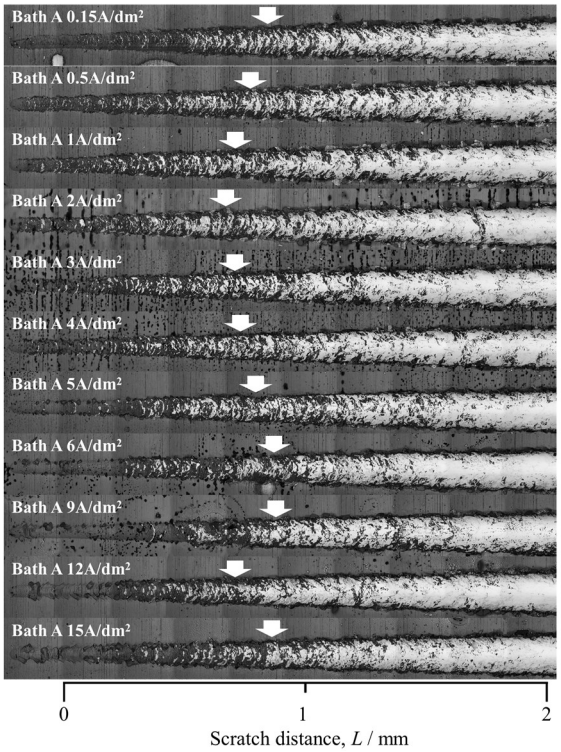


図5　めっき浴Aにおける*Fn50*の位置



図6　めっき浴B（薄膜化条件）における*Fn50*の位置

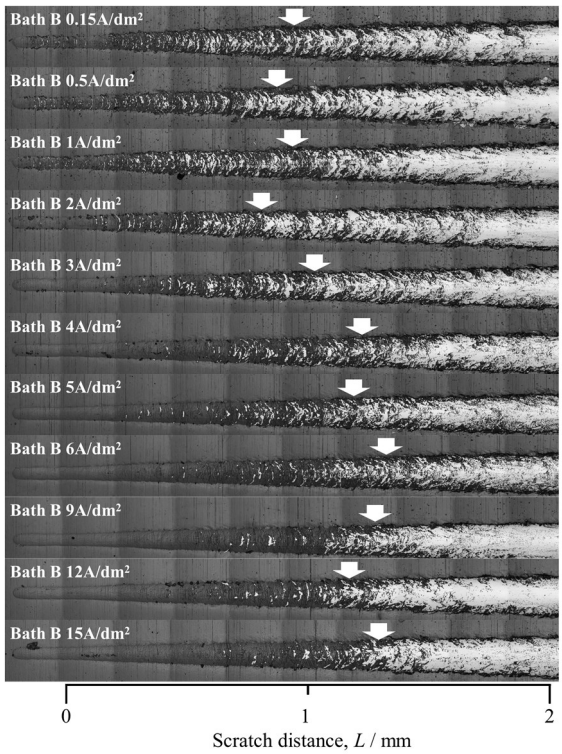


図7　めっき浴Bにおける*Fn50*の位置

試験片表面のRaは0.2～0.4 μmの範囲で変動した。しかし，スクラッチ痕の押込み深さ（数十μm）と比較して十分小さい値であることから，本検討における密着性評価への影響は限定的であると考えられる。図4

～7にめっき浴ごとの試験片の光学顕微鏡像と，解析によって得られた*Fn50*の位置を矢印で示した。画像中では，暗色のRuめっきが剥離して明色の銅基板が露出する位置に応じて矢印位置が変化していることが確認できた。このことから，採用した*Fn50*の解析法は妥当であると考えられる。

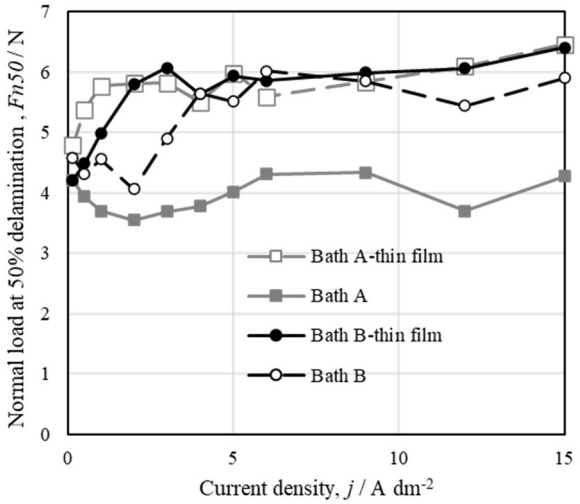


図8　各電流密度における*Fn50*

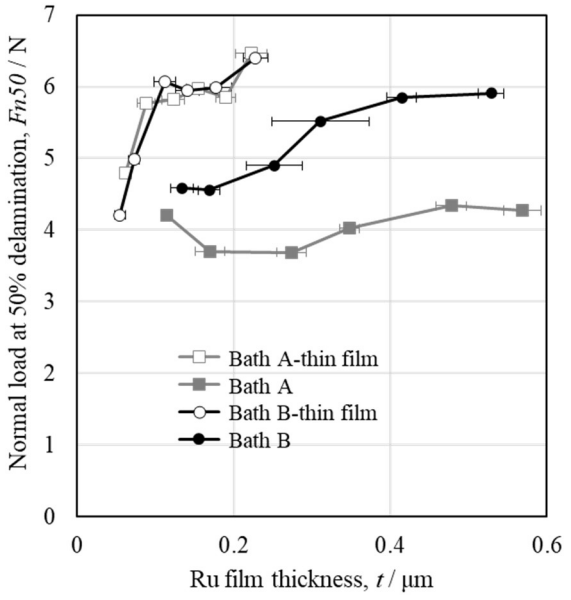


図9　膜厚ごとの*Fn50*

図8に各電流密度における*Fn50*を示す。電流密度が小さい領域では，*Fn50*が低く見積もられていることから，Ruめっきの銅基板に対する密着性が低くなっていることが示唆された。一方で，電流密度が大きい領域ではめっき浴A以外では*Fn50*が増加したことから，密着性が高まっていることが示唆された。図9に，膜厚ごとの*Fn50*を示す。一般に，硬質めっき膜では膜厚の増加に伴い膜強度が向上し，スクラッチ試験における剥離荷重も増加すると考えられる。しかし，本検討では薄膜化条件のほうが，*Fn50*が大きく，密着性が向上する傾向を示した。この原因として，膜厚が増加するとめっき膜の内部応力が増加するため，剥離しやすくなった可能性が示唆された[7)]。本検討では，Ru膜が極めて薄い膜であったため，X線回折を用いた残留応力測定法が困難であり，今後の検討課題であると考えている。

4 まとめ

銅基板上のRuめっきに対し，スクラッチ試験と画像解析を用いた*Fn50*の評価法を検討した。電流密度および膜厚によって密着性が変化し，薄膜条件で高い*Fn50*を示し，密着性が向上する傾向が確認された。本手法はRuめっきの密着性を定量的に評価する手法として有効である可能性が示された。

謝辞

本研究は大谷化学工業（株）の支援の下に行われた。

5 参考文献

1)M. C. Damayanti, T. Sritharan, Z. Gan et al. : Journal of The Electrochemical Society, vol. 153, No. 6, pp. J41-J45(2006)

2)Tai Chen Kuo, Yin Hsien Su, Wen Hsi Lee et al. : Microelectronic Engineering, vol. 162, pp. 27-33(2016)

3)Paul C. Hydes : Platinum Metals Review, vol. 24, No. 2, pp. 50-55(1980)

4)Benjamin Beake : Tribology International, vol. 39, No. 12, pp. 1443-1451(2006)

5)J. Valli : Journal of Vacuum Science and Technology A, vol. 4, No. 6, pp. 3007-3014(1986)

6)寺門　龍一，長坂　秀雄：金属表面技術，27巻，12号，pp. 676-680(1976)

7)P. Gopal Ganesan, M. Eizenberg : Materials Science and Engineering B, vol. 103, No. 3, pp. 213-218(2003)

金属粉末射出成形を活用した微細構造体の成形技術に関する研究

西澤 崇[*1]　田尻 智基[*1]　中村 憲和[*1]

Study on Microstructure Molding Technology Using Metal Injection Molding

Takashi Nishizawa, Tomoki Tajiri and Norikazu Nakamura

金属粉末射出成形(MIM)の活用による製品の高付加価値化を目指し，微細形状成形技術の確立を目的とした射出成形及び脱脂・焼結工程の各条件が微細突起の成形性に及ぼす影響を調査した。微細形状の高精度な転写には材料固化前の高速射出が不可欠であるが，調査結果から過剰な速度はエア排出不足による未充填を招くことが明らかになった。また，離型時の突起破損を防ぐには，金型温度を適度に低く保ち成形体強度を確保する必要があった。更に，平均粒径7 μmの金属粉末を用いて高さ74 μmの微細突起を作製できたことから，使用粉末の平均粒径に対し約10倍のスケールを持つ微細形状であれば，MIMによる成形が可能であることが示唆された。

1 はじめに

金属粉末射出成形(Metal Injection Molding，以下MIM)は，プラスチック射出成形と粉末冶金を組み合わせた製造技術である。複雑な三次元形状を高精度かつニアネットシェイプで量産できる利点があり，電子機器や医療機器業界等で広く注目を集めている[1)]。一方で，MIMは高い体積割合で金属粉末にバインダーを添加するため脱脂・焼結工程における収縮率が大きく，変形を生じやすいという課題がある。

当所ではこれまでに，ゲートフロー，厚肉部のヒケ，自重，及び試料と敷板間の摩擦拘束に起因する各変形メカニズムに対し，それぞれの変形抑制対策を講じることで基礎的なMIMプロセス技術を確立してきた[2)]。現在，この技術を基盤とし，微細構造を有する製品への適用が県内企業から求められている。

しかし，微細形状の成形においては，金型キャビティ内の微小空間への材料充填(転写性)や離型時の微細構造の破損(離型性)，更には脱脂・焼結時の微細部の形状維持など，通常の寸法スケールとは異なる技術的課題を解決する必要がある[3)]。そこで，本報告ではMIM技術を用いた製品の高付加価値化に向けた微細形状成形技術の確立を目的とし，射出成形工程及び脱脂・焼結工程の各種パラメータが微細構造の成形性に及ぼす影響を調査した結果を報告する。

*1 機械電子研究所

2 実験方法

2-1 使用MIM原料

本研究では，MIM用SUS316Lフィードストック(第一セラモ株式会社製，DM-2690H)を使用した。本原料に用いられている金属粉末の平均粒径は7 μmである。また，含有されるバインダーの添加割合は体積比で約35 vol%であり，標準的な収縮率は13.5 %である。

2-2 試料形状

本研究では，微細形状の転写性及び離型性を評価するため，図1に示す微細な凹部(成形体では突起となる形状)を有する評価用金型を使用した。表1に本金型における凹部の仕様を示す。突起を成形する金型寸法(深さ)は87.2 μmであり，使用する金属粉末の10倍以上のスケールである。なお，本金型にはキャビティ内のエアを排出するためのエアベントを設けておらず，充填時に金型の割り面やエジェクタピンの隙間からのみエアが排出される構造となっている。

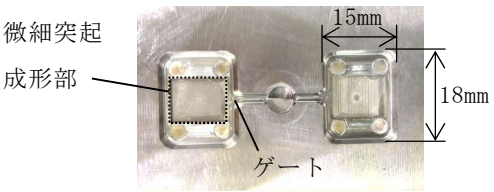


図1　微細突起成形用金型のキャビティ外観

表1　試料の微細突起仕様

形状	半球(SR108 μm)
高さ	87.2 μm
個数	1638個

2-3 成形品・焼結品の作製方法

射出成形には，小型射出成形機(株式会社メイホー製，μMIV-5)を用いた。射出成形条件を表2に示す。なお，微細形状における転写性及び離型性に与える影響を評価するため，主要な成形パラメータである金型温度と射出速度を変化させており，金型温度は30 ℃から50 ℃の範囲で，射出速度は30 mm/sから120 mm/sの範囲で設定した。

図2に脱脂・焼結条件を示す。得られた成形体は，窒素雰囲気中で加熱脱脂を行った後，真空及びアルゴン雰囲気中で焼結を行った。焼結温度は1350 ℃，保持時間は3時間とした。

表2　射出成形条件

射出温度(℃)	180
金型温度(℃)	30, 35, 40, 45, 50
射出速度(mm/s)	30, 35, 40, 50, 60, 80, 100
保圧(MPa)	80
保圧時間(s)	2
冷却時間(s)	30
型締力(kN)	48

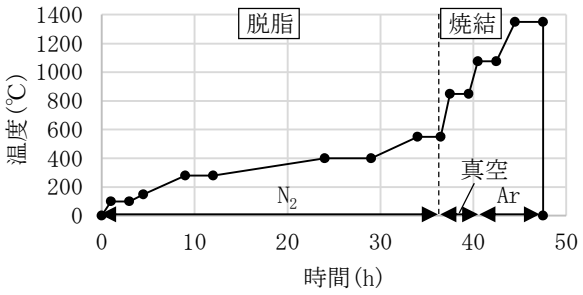


図2　脱脂・焼結条件

2-4　形状評価方法

成形体の離型時における破損有無の確認と，成形体及び焼結体における微細突起高さや三次元形状の測定にレーザー顕微鏡(株式会社エビデント製，OLS5100-EAT)を用いた。本研究では射出成形条件の影響を受けやすい流動末端側の微細突起を評価対象としており，微細突起の無い面を基準に突起高さを測定することで，測定者によるばらつきを低減している。

3 結果と考察

3-1 転写性の評価結果

微細形状を高精度に転写するには，微細部まで射出圧力を十分に伝播させること，エアの巻き込みを低減することが重要である。そこで，材料の固化及びエアの排出に大きく影響する射出速度を変化させ，キャビティ内の微小空間に対して材料充填が可能か検証した。

図3に微細突起高さの測定結果を示す。射出速度を60 mm/sから増加させると成形体の突起高さが増大し，100 mm/sにおいて金型寸法(87.2 μm)に最も近い値を示した。これは，MIM材の熱伝導率が高く，射出中に急速に固化が進むため，高速射出によって転写性が向上したためと考えられる。一方で，射出速度を120 mm/sとした場合には，逆に突起高さが減少する傾向が確認された。本金型にはエアベントを設けていないため，射出速度が過剰に高い場合はエアの排出時間が不足し，未充填を引き起こしたためと推察される。

以上より，微細突起形状を良好に転写するには，材料が固化する前に充填を完了させると共に，金型内のエア排出が追いつく適切な射出速度を選定することが有効であると考えられる。

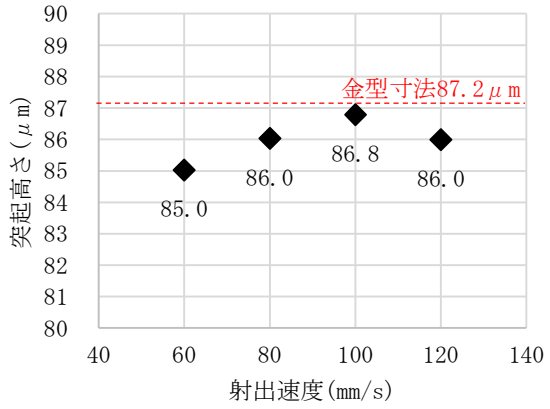


図3　微細突起高さ測定結果

3-2 離型性の評価結果

MIMの成形体は，体積比で約1/3を占めるバインダーによって形状を保っているため，焼結前の強度は低い。特に微細形状を有する成形体の場合，離型時に大きな応力がかかると微細形状が破損する懸念がある。そこで，成形体の離型強度に影響を与える温度に着目し，微細突起を破損無く離型できるか検証した。

表3に金型温度及び射出速度を変更した際の成形体外観の評価結果を示す。評価は，良品を「○」，材料の早期固化に起因する充填不良を「△」，離型時の微細突起の破損を「×」に分類した。評価の結果，金型

温度30 ℃かつ射出速度が低い条件においては，材料の急速な冷却・固化により充填不良が生じやすいことが分かった。一方，金型温度50 ℃において射出速度を高く設定した条件では，充填はされるものの，離型時に微細突起の破損が発生した。図4に破損が生じた成形体表面の高さ測定結果を示す。微細突起を配置した領域に陥没した箇所が観察されており，微細突起が破損していることを視覚的にも確認できる。この破損は，高速射出に伴う材料のせん断発熱により局所的な冷却が不十分となり，微細突起部の強度が不足する状態で離型されたことが原因と考えられる。

以上より，射出成形条件の調整によって微細突起の離型が可能であり，成形体の強度を保つためには，金型温度を十分低く設定すると共に，充填不良を防ぐために射出速度によるせん断発熱を利用して転写させることが有効であると考えられる。

表3　成形体外観評価結果

		射出速度(mm/s)					
		30	40	50	60	80	100
金型温度(℃)	30	△	△	○	○	○	○
	35	△	○	○	○	○	○
	40	△	○	○	○	○	○
	45	△	○	○	○	○	○
	50	○	○	○	○	×	×

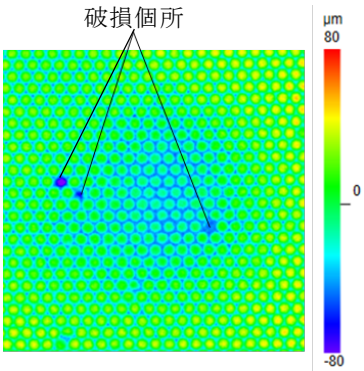


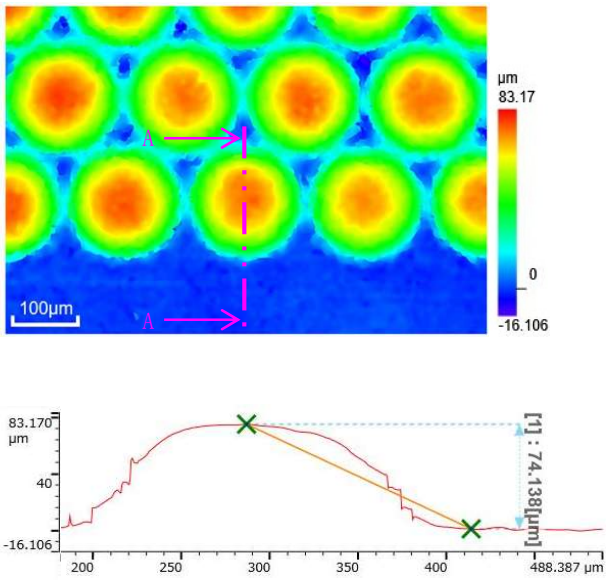
図4　離型時に破損した微細突起の高さ測定結果

3-3 焼結体の評価結果

得られた成形体の脱脂・焼結を行い，形状の維持性，ならびに平均粒径7 μmの金属粉末を用いた微細突起の成形可否を検証した。

図5に焼結体における微細突起形状を測定した結果を示す。微細突起の収縮率は17.3 %であり，最終的な突起高さは74.1 μmとなった。また，突起根元部分において形状の崩れが観察された。観察方向に対して観察点が，急勾配(85 ° 以上)であることによるレーザー顕微鏡の測定ノイズの影響も考えられるが，標準的な収縮率(13.5 %)を大きく上回った点が注目される。これらの要因として，射出時に材料が突起部へ流入する際，金属粉末よりも流動性の高いバインダーが先行して充填されることで金属粉末の密度が低下し，局所的な収縮率の増大，根元の形状崩れが引き起こされたことが推測される。根元の形状崩れの真の要因解明及び対策は，今後の課題である。

一方で，突起の先端側の形状は良好に維持されていた。本検証により平均粒径7 μmの金属粉末を用いた場合，最終的にSR74.1 μmの突起形状を成形・焼結できることが確認できた。以上の結果から，MIMにおいて微細形状を成形する際には，使用する金属粉末の平均粒径に対して約10倍のスケールを持つ形状であれば成形可能であることが示唆された。



A-A断面

図5　焼結体の微細突起高さ測定結果

4 まとめ

SUS316LのMIM原料を用いた微細突起形状の成形，脱脂・焼結を行った結果，以下の知見を得た。

(1) 金型の微細形状を精密に転写するには，材料の固化前に高速射出する必要がある。しかし，射出速度が過剰に大きい場合は金型内のエア排出が間に合わず，転写性が悪化する。

(2) 微細突起の離型においては，金型温度が高い状態で射出速度を大きくするとせん断発熱による冷却不足が生じ，離型時に突起が破損するリスクがある。金型温度を適度に低く保ち(45°以下)，成形体の強度を確保した状態で離型することが有効である。

(3) 微細突起は収縮率が17.3 %と標準より高く，根元に形状崩れが生じた。射出時にバインダーが先行充填したため，粉末密度の低下による局所的な収縮の増大を招いたと推測される。

(4) 平均粒径7 μmの金属粉末を用いることで，SR74.1 μmの突起形状を成形・焼結できた。使用する金属粉末の平均粒径に対し，概ね10倍のスケールを持つ微細形状であれば成形可能であることが示唆された。

5 参考文献

1) 京極 秀樹：成形加工，18巻，10号，pp.722-728 (2006)

2) 西澤 崇，田尻 智基，中村 憲和：福岡県工業技術センター研究報告 No.35(2025)

3) 松﨑 覚，田中 茂雄，西藪 和明：粉体および粉末冶金論文集52-1(2005)

ホットランナーを活用した金属粉末射出成形の生産性向上に関する研究

西澤 崇[*1]　田尻 智基[*1]　中村 憲和[*1]

Study on Improving Productivity in Metal Injection Molding Using Hot Runners

Takashi Nishizawa, Tomoki Tajiri and Norikazu Nakamura

金属粉末射出成形(MIM)は複雑形状部品をニアネットシェイプで量産可能であるが，射出成形工程におけるスプルー及びランナー発生による材料ロスが課題である。本研究では，MIMプロセスにおける材料歩留まりの向上を目的に，MIMにホットランナーを適用したスプルー・ランナーレス成形の有効性を検証した。独自設計のホットランナーによる成形を行った結果，従来のコールドランナーと同等の焼結体を得られることが確認できた。更に，材料ロスの解消によって射出成形工程における材料歩留まりは71 %から100 %へと飛躍的に向上し，冷却時間の削減によってサイクルタイムを49 %短縮できた。

1 はじめに

近年の原材料やエネルギー価格の高騰を背景に，中小製造業では自社内の生産性向上による競争力強化が喫緊の課題となっている。このような中，省資源型の加工技術として金属粉末射出成形(Metal Injection Molding，以下MIM)が福岡県内においても改めて注目を集めている。MIMは複雑な三次元形状の部品を高精度かつニアネットシェイプで量産できる利点を有する[1)]一方で，射出成形工程において生じるスプルー及びランナーが材料ロスを招くという課題を抱えている。

一般的に，プラスチックの射出成形と同様にスプルー及びランナーは粉砕してリサイクルする取り組みが行われている。しかし，MIM原料では射出成形時の熱履歴やせん断応力によるバインダーの劣化，更には金属粉末比率の変化が生じやすく，リサイクル材の使用が成形不良率を増大させる懸念が指摘されている[2)]。

そこで本研究では，MIMプロセスにおける抜本的な材料歩留まりの向上を目的に，プラスチック射出成形の分野で材料ロス削減に有効とされるホットランナーシステム[3)]をMIMに適用し，スプルー・ランナーレス成形の有効性を検証した結果について報告する。

2 実験方法

2-1 使用MIM原料

本研究では，MIM用SUS316Lフィードストック(第一セラモ株式会社製，DM-2690H)を使用した。本原料に含まれる金属粉末の平均粒径は7 μmであり，バインダーの含有割合は体積比で約35 vol%である。

2-2 試料形状

図1に試料形状を示す。本研究では，ホットランナーの導入による成形性への影響(特に合流部における不具合の改善効果)を検証するため，評価用試料として外径38 mm，内径28 mm，厚さ5 mmのリング形状を採用した。流動末端に合流部(ウェルドライン)が形成されるよう，ゲート部から左右に材料が分岐して充填されるゲート配置とした。

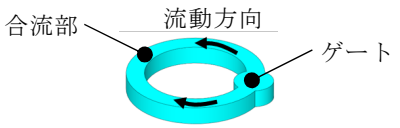


図1　試料形状

2-3 ホットランナー及び金型

一般的に，MIMに対するホットランナーの適用は困難とされている。その主な理由は，MIM特有の高粘度による流動性の低さ，温度低下に伴う固化のしやすさ，及び金属粉末を含有することによる流路の激しい摩耗が適用の課題となるためである。

これらの課題を解決するため，本研究では射出成形機(株式会社ソディック製，TR20EHV)に搭載可能なホットランナーを独自に設計・製作した。図2にホットランナーの断面図を示す。基本仕様として，ノズル数を2本，ノズルピッチを100 mmとし，オープンゲート方式を採用した。オープンゲート方式は，ノズル先端

*1 機械電子研究所

の温度設定によって材料の流動性を制御する仕組みであるが，MIM原料は温度変化による粘度(流動性)の変化が極めて大きいため，熱的に流動を制御する本方式を採用した。また，本ホットランナーの最大の特徴として，分岐流路を構成するマニホールドに分割式構造を採用したことが挙げられる。マニホールドを分割式とすることで，内部流路に精密な研磨やコーナーR(丸み)を付与することが容易となり，MIM原料の高粘度による流動抵抗を低減できる。更に，金属粉末による流路の摩耗が生じた際にも部分的な部品交換が可能となるため，運用上のメンテナンス性を大幅に向上できる構造となっている。

なお，試料形状を作製するための金型は2個取りとし，従来工法と比較評価を行うため，ホットランナー用に加えて，コールドランナー用の金型も製作した。

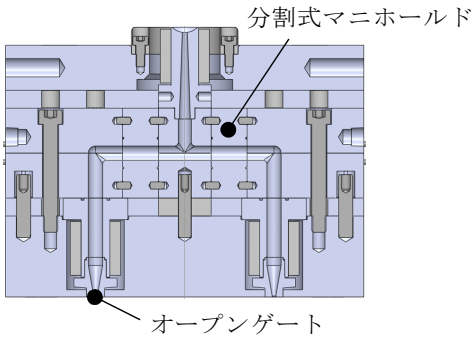


図2　ホットランナー断面図

2-4 射出成形条件及び脱脂・焼結条件

表1に本実験における主な射出成形条件を示す。合流部の外観品質に射出速度が大きく影響することから，射出速度を調整することで射出時間を0.5 sから1.0 sまで変化させて，ホットランナー及びコールドランナーのそれぞれで試料形状の成形体を作製した。

表1　主な射出成形条件

	ホットランナー	コールドランナー
射出温度(℃)	180	180
射出速度(mm/s)	35～80	35～90
射出時間(s)	0.5～1.0	0.5～1.0
保圧(MPa)	80	80
金型温度(℃)	45	45
冷却時間(s)	10	50
型締力(kN)	192	192

図3に脱脂・焼結条件を示す。得られた成形体は，窒素雰囲気中で加熱脱脂を行った後，真空及びアルゴン雰囲気中で焼結を行った。焼結温度は1350 ℃，保持時間は3時間とした。

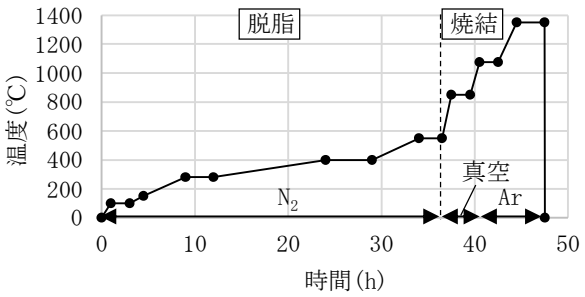


図3　脱脂・焼結条件

2-5　形状評価方法

焼結体の形状測定については，3Dスキャナ(GOM社製，ATOS5)を使用した。測定データは三次元形状で表現されるため，得られた3Dモデルを位置合わせして表面偏差から比較評価することが可能である。本研究では，ホットランナーとコールドランナーから得られた焼結体の形状を比較し，焼結体の品質評価に使用した。

3 結果と考察

3-1 ホットランナーを用いた射出成形可否の確認

本研究で設計・製作したホットランナーを用いて，スプルー・ランナーレス成形の実現可能性を検証した。

図4に示す温度条件により，リング形状の連続成形が可能であった。マニホールド分割面からのMIM原料の漏れも確認されなかった。一方で，2本のノズルにおける射出量を均等に制御するには，ノズル間で5～10 ℃の温度差を設定する必要があった。この射出量の不均衡は流路内径の微小な加工公差や流路壁面の表面粗さの個体差による流動抵抗のバラツキが要因と考えられる。主に金属粉末で構成されるMIM原料は，一般的なプラスチックに比べて圧力損失が大きく，わずかな寸法差が顕著な流動挙動の差となって現れる。そのため，バインダーの温度依存性を利用した粘度調整が必要となったものと推察される。更に，その他の課題として，ノズル先端から材料が垂れ落ちるドルーリング現象(ハナタレ)が確認された。これを抑制するためには，ノズル温度を150 ℃未満に制限する必要があり，成形条件の許容幅が狭小化する要因となった。

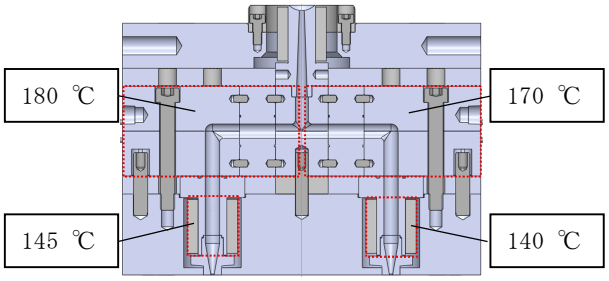


図4　ホットランナー温度条件

3-2 スプルー・ランナーレス焼結体の品質評価

ホットランナーとコールドランナーを用いて作製した焼結体を比較し，ホットランナーにおいて従来工法と同等以上の品質が得られるか検証した。

表2に相対密度と収縮率を測定した結果を示す。相対密度は両者でほぼ同等であったものの，収縮率には若干の差異が認められた。図5にホットランナーとコールドランナーによって得られた焼結体の表面偏差を示す。両者に有意な違いは認められなかった。

表2　焼結体の密度，収縮率測定結果

	ホットランナー	コールドランナー
相対密度	96.4 %	96.6 %
収縮率	12.7 %	13.0 %

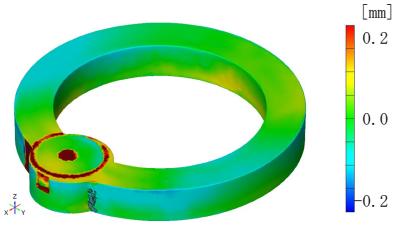


図5　焼結体の表面偏差測定結果

次に，射出時間を変化させ，ホットランナーとコールドランナーにおける合流部の状態を比較した。表3に射出時間を変更した時の合流部外観評価結果を示す。コールドランナーを用いた成形では，射出時間が0.5 sを超えると合流部が全く融合せずに割れが生じた。これに対し，ホットランナーを用いた成形では，射出に1 sを要した場合であってもウェルドラインは残存したものの，合流部が融合した成形品を得ることができた。このことから，ホットランナーの適用は合流部の融合不良に対して改善効果を示すものの，ホットランナーの導入のみでウェルドラインの解消に至るものではないことが確認された。

表3　合流部外観評価結果

		ホットランナー	コールドランナー
射出時間	0.5 s	ウェルドライン	ウェルドライン
	0.6 s	ウェルドライン	割れ
	0.8 s	ウェルドライン	割れ
	1.0 s	ウェルドライン	割れ

以上の結果から，ホットランナーにおいても従来プロセスと同等の品質を有する成形体が得られることを確認できた。

3-3 材料歩留まり評価結果

ホットランナーとコールドランナーを用いた射出成形工程における材料歩留まりを評価した。その結果，ホットランナーの導入によってスプルー及びランナー部が不要となったため，コールドランナーによる場合と比較して材料の流動長を71 mm短縮，2個取りに必要な材料を2097 mm^3削減することができた。これに伴い，射出成形工程における材料歩留まりが従来の71 %から100 %へと飛躍的に向上した。したがって，スプルー・ランナーレス成形はMIMの射出成形プロセスにおける材料ロス削減に極めて有効であると実証された。

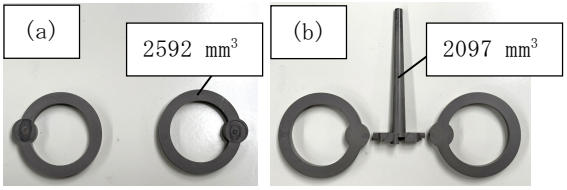


図6　成形体(a)ホットランナー (b)コールドランナー

3-4 サイクルタイム評価結果

ホットランナーとコールドランナーを用いた射出成形工程におけるサイクルタイムを評価した。図7にサイクルタイムの調査結果を示す。コールドランナーを用いた従来の成形において，スプルー部の破断を伴わずに確実な離型を行うためには，50 sの冷却時間を要していた。これに対し，ホットランナーを適用したスプルー・ランナーレス成形では，熱を持ちやすいスプルー部の冷却工程そのものが不要となる。これにより，製品部のみの冷却による安定した離型が可能となった結果，本試料形状では冷却時間を50 sから10 sに大幅に短縮することができ，射出成形工程全体のサイクルタイムを従来比で49 %短縮することに成功した。

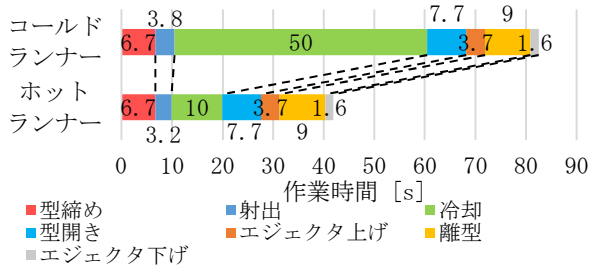


図7　サイクルタイム調査結果

4 まとめ

本研究では，MIMプロセスにおける材料歩留まりの向上を目的として，ホットランナーを活用したスプルー・ランナーレス成形について評価した。その結果，以下の知見を得た。

(1) ホットランナーを活用したスプルー・ランナーレス成形においても，従来のコールドランナーを用いた場合と同等の品質を有する焼結体が得られた。

(2) ホットランナーの活用によってスプルー及びランナー部が不要となり，材料ロスの削減による射出成形工程における材料歩留まりの大幅な向上が可能である。

(3) 離型時の破断の原因となるスプルー部が不要となるため，冷却時間及び射出成形工程全体のサイクルタイムの大幅な短縮を実現できる。

5 参考文献

1) 京極　秀樹：成形加工，18巻，10号，pp.722-728 (2006)

2) 川崎製鉄株式会社：特開平8-104903(1996)

3) 横井　秀俊：成形加工，37巻，11号，pp.440-443 (2025)

構造解析と応答曲面法によるブラケットの設計最適化

中井 太地[*1]　髙宮 義弘[*2]

Optimization of Bracket Design by Structural Analysis and Response Surface Method

Daichi Nakai and Yoshihiro Takamiya

経済性や省エネルギー化の観点から，軽量かつ高強度な構造は社会から常に要求されている。近年の積層造形技術の普及もあり，形状自由度を活かした様々な構造最適化技術が研究されている。本報告では，ブラケットを対象とした寸法最適化を行った。寸法最適化の方法として複数のパターンで構造解析を行い，その解析結果から近似関数を作成する応答曲面法を用いた。得られた最適寸法で造形し強度試験を行ったところ，構造解析と同等の剛性を持つことを確認できた。

1 はじめに

経済性や省エネルギー化の観点から，軽量かつ高強度な構造は社会から常に要求されている。近年の積層造形技術の普及もあり，形状自由度を活かした様々な構造最適化技術が研究されている。構造最適化の方法としては，寸法最適化，形状最適化，トポロジー最適化の 3 種類に大別される[1)]。寸法最適化は，構造的な寸法を設計変数として最適化を行う。形状最適化は，構造物の外形形状を設計変数として最適化を行う。形状最適化は，例えば孔の数などを変更することはできない点が次のトポロジー最適化と異なる。トポロジー最適化は材料分布を設計変数として最適化を行い，例えば孔の数が変化可能であるなど，高い自由度を持つ。

本報告では，ブラケットを対象として上記 3 つのうち最も基礎的とされる寸法最適化を行い，その形状を積層造形して実験による検証を行った事例を紹介する。

2 構造解析による最適化

2-1 解析条件

図 1，2 に本報告で設定したブラケットと圧縮治具の寸法をそれぞれ示す。解析対象のブラケットは板厚 X_1，リブ幅 X_2，リブ高さ X_3 の 3 つの設計変数を設定した。式(1)に，これらの設計変数がとりうる寸法の範囲を示す(単位 mm)。

$$2 \le X_1 \le 5, \quad 0 \le X_2 \le 3, \quad 0 \le X_3 \le 10 \tag{1}$$

ただし X_1，X_2，X_3 は連続の値ではなく，0.1 mm 毎の離散値のみをとるものとした。なお設計変数がとりうる X_1，X_2，X_3 の組み合わせは 97,061 パターンである $(31^2 \times 101)$。

図 3 に設定した解析条件の模式図を示す。圧縮治具は試験機の動きを想定して z 方向のみに動くものとした。また，ブラケットと圧縮治具の間の接触条件は，静止摩擦係数，動摩擦係数ともに 0.02 に設定した。

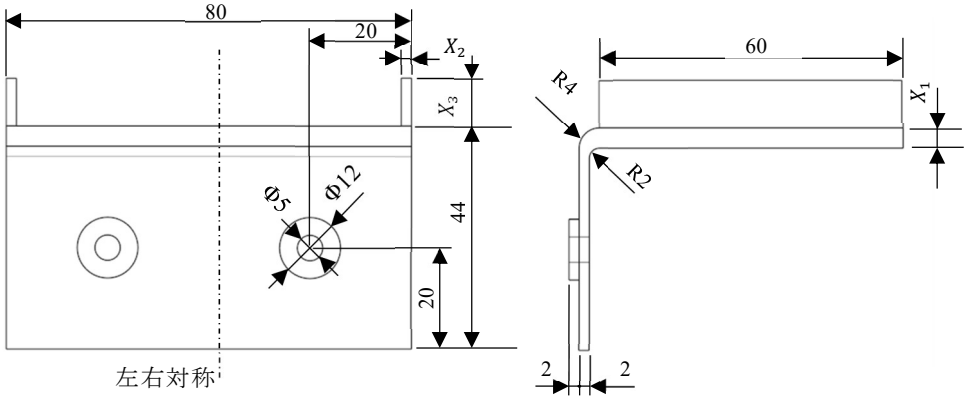


図 1　解析対象のブラケット(単位 mm)

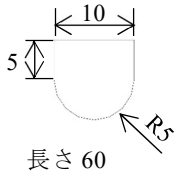


図 2　圧縮治具(単位 mm)

*1 機械電子研究所
*2 (公財)福岡県産業・科学技術振興財団

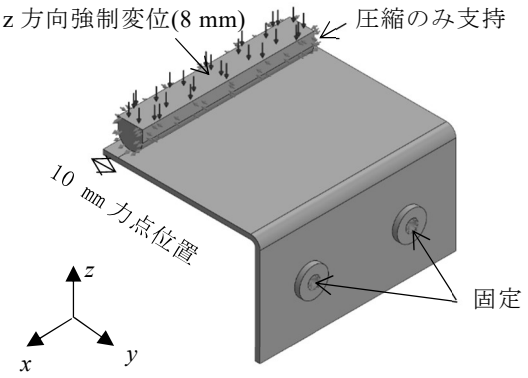


図 3　解析条件の模式図

表 1 に設定したブラケットの材料の物性値を示す。この物性値は，積層造形で一般的に使用される材料であるポリ乳酸(PLA)樹脂を想定して設定した。また圧縮治具はブラケットより十分に硬い材料を想定して，剛体とした。

表 1　ブラケットの物性値(解析).

ヤング率E_a	3,700 MPa
ポアソン比ν_a	0.33
質量密度ρ	1,270 kg/m^3

設定した最適化条件を式(2)に示す。

$$\begin{aligned} &\text{minimize } M \\ &\text{subject to } P_z \geq 25, \quad when\ |U_z| = 8 \end{aligned} \tag{2}$$

ただし，Mはブラケットの質量(g)，P_zは圧縮治具の z 方向の反力(N)，U_zは圧縮治具の z 方向の変位(mm)である。

式(2)の制約条件は圧縮治具に z 方向の 8 mm の強制変位を加えた際に z 方向の反力が 25 N 以上であることを要求する。換言すると，圧縮治具に 25 N の荷重を加えた時の z 方向の変位が 8 mm 以内となる制約条件で，ブラケットの質量が最小となる設計変数 X_1，X_2，X_3 を探索する最適化問題となる。

2-2 応答局面法による最適寸法の探索

先述の通り X_1，X_2，X_3 の組み合わせは 97,061 パターンに達し，すべてのパターンの解析を行うのは現実的ではない。そこで，本研究では応答局面法を用いて最適寸法を探索した。

応答局面法は数 10 から数 100 パターン程度の解析を行い，解析結果から近似関数を作成する。この近似関数より未解析の結果を予測し，最適な寸法の組み合わせを推薦する手法である [2]。今回の最適化問題の場合，質量を予測する近似関数$\widetilde{M}(X_1, X_2, X_3)$と反力を予測する近似関数$\widetilde{P_z}(X_1, X_2, X_3)$の 2 種が必要である。

図 4 に応答局面法による最適化のフロー図を示す。Ansys Mechanical 2022R2 を用いて，構造解析及び応答局面法による最適化を行った。図 4 の(1)では実験計画法として，最適空間充填設計を用いた。最適重点計画は設計パラメータを設計空間全体にわたって均等に分布できることに特徴がある [3]。また(3)に用いたニューラルネットでは隠れ層を 6 ノードに設定した。

図 5 に応答曲面$\widetilde{P_z}$の例を示す。図 5 は X_3 の寸法を 5 mm に固定して，X_1，X_2 の値を変化させたときの反力を示している。P_zは X_1，X_2 に対して非線形の関係であることが分かる。

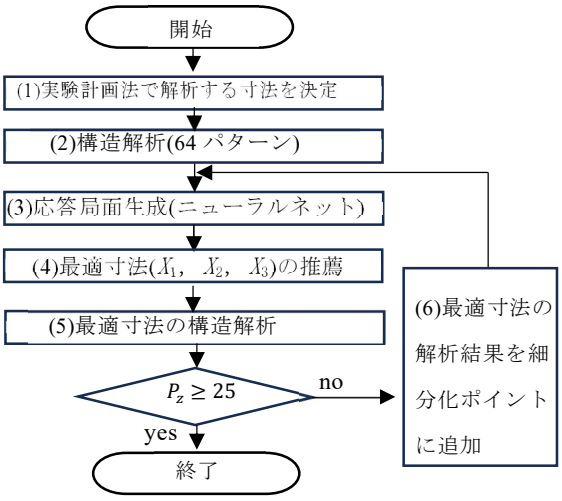


図4　最適化のフロー図

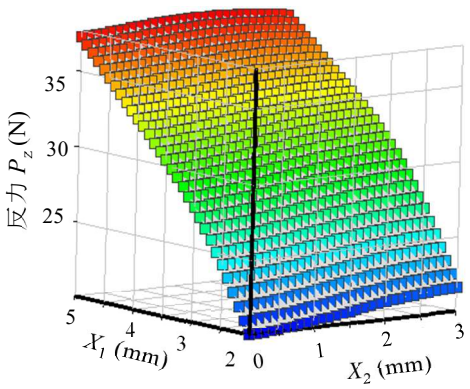


図 5　応答曲面$\widetilde{P_z}$の例(X_3=5 mm)

応答曲面法による最適化の結果，X_1，X_2，X_3 の値はそれぞれ 2.5，0.4，7.8 mm となった。得られた形状としては，X_2の値が小さくリブが薄いこと，またX_3の値は大きくリブが高いことに特徴がある。

図 6 に得られた最適寸法における解析結果を示す。図 3 に示すように y 方向の手前側より 10 mm 奥に圧縮治具を配置しているため，図 6 の y 方向の手前側では 8 mm以上の変位がある。また，この時の反力P_zは 25.08 N であった。

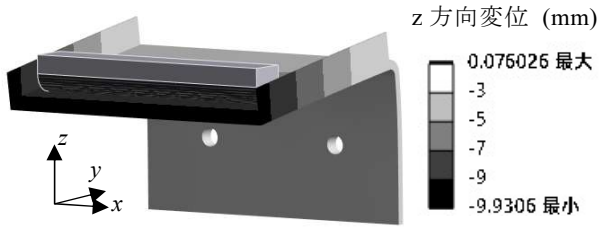


図 6 最適寸法での解析結果

3 実験による検証

2 章で得られた最適寸法の有効性を検証することを目的として，強度試験を行った。

3-1 ブラケットの造形

熱溶解積層方式の積層造形装置 PRUSA i3 MK3(Prusa Research)を用いてブラケットを造形した。造形したブラケットの例を図 7 に示す。積層造形装置の充填率を 100 %に設定し，材料内部に空洞が発生しないようにした。造形に用いた材料は PLA 樹脂とした。

表 2 にひずみゲージを用いて実測した物性を示す。表 2 の値は 3 回の引張試験による平均値である。表 1 に示した解析に用いたヤング率と比較して実験に用いた PLA のヤング率は低く，柔らかい材料であったことがわかる。

ブラケットは前章で得られた最適寸法の他に，比較対象として追加で 8 パターンを造形した。表 3 に造形した寸法を示す。

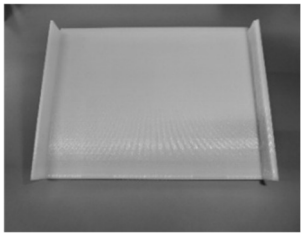


図 7　造形したブラケットの例

表 2　PLA の物性値(実験)

ヤング率E_e	2,851 MPa
ポアソン比ν_e	0.336

表 3 造形 CAD 寸法

	X_1 (mm)	X_2 (mm)	X_3 (mm)
最適寸法	2.5	0.4	7.8
Sample 1	2.3	0.5	2
Sample 2	2.3	0.5	8
Sample 3	2.3	1	2
Sample 4	2.3	1	8
Sample 5	2.6	0.5	2
Sample 6	2.6	0.5	8
Sample 7	2.6	1	2
Sample 8	2.6	1	8

3-2 実験方法

3Dプリンタにより造形したブラケットは精密万能試験機AG-100kNX(株式会社島津製作所)を用いて強度試験を行った。図8にブラケットの強度試験の写真を示す。ブラケットは十分に大きなアルミフレームにネジで固定した。圧縮治具には図2で示す寸法のものを用いた。図3に示すように，圧縮治具とブラケットが接する位置から試験を開始し，圧縮治具を下方向に移動させた。圧縮治具の試験速度は3 mm/minとし，圧縮治具に加わる荷重が25 Nになった時の圧縮治具の変位U_zを測定した。



図8　ブラケットの強度試験

3-3 実験結果

図9に実測したブラケット質量と強度試験の変位の関係を示す。ブラケットの質量が大きくなるほど，荷重25 Nを加えたときの変位$|U_z|$が小さくなることがわかる。また全てのブラケットでも閾値に設定した変位

8 mmより大きな値を示した。これは表1と2で示すように解析と実験で材料物性に差があるためと考えられる。

材料物性の差を考慮するために，実験の変位$|U_z|$にヤング率の比(E_e/E_a)を乗じた補正変位と実測質量の関係を図10に示す。最適寸法における補正変位は制約条件である8 mmとほぼ同じ値である。図11に25 Nの力を加えたときの解析変位と補正変位の関係を示す。解析の変位のほうが補正変位よりも多少大きい傾向にあるが，概ね一致している。

なお，本解析条件は大変形かつ接触条件を圧縮のみ支持としたため，非線形である。そこで実際にヤング率を2章で解析に用いたE_aから実験で求めたE_eに変更して解析してみたところ，U_zはほぼ(E_a/E_e)倍になった。すなわち今回の場合は，ヤング率をE_aからE_eに変更した際の非線形性の影響は小さく，実験の変位$|U_z|$に(E_e/E_a)を乗じて補正を行うことは解析的にも概ね妥当と考えられる。

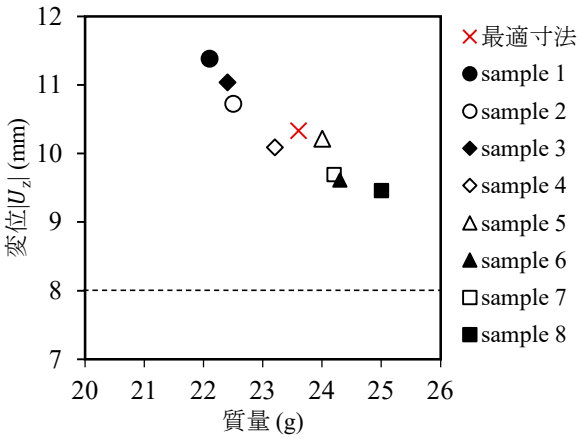


図9 実測質量と強度試験の変位の関係

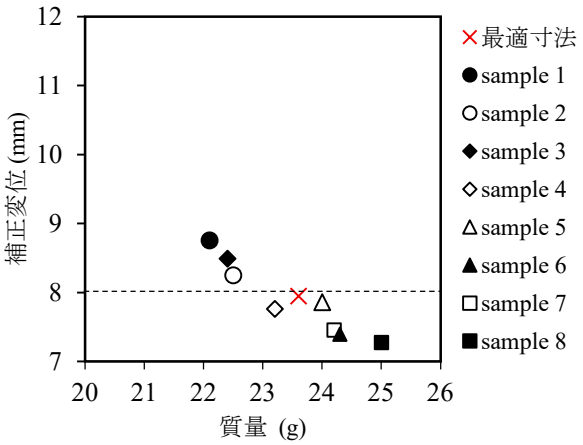


図10 実測質量と補正変位の関係

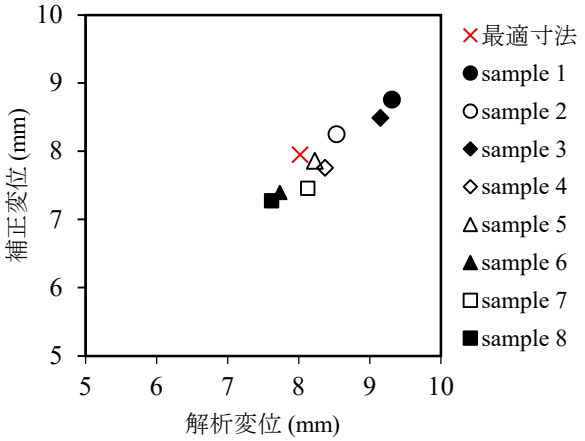


図11 解析変位と補正変位の関係

4 まとめ

ブラケットを対象に応答曲面法を用いた寸法最適化の検討を行った。最適化の結果，リブが薄く高い形状が得られた。解析で得られた最適化形状を積層造形装置で造形して，強度試験を行ったところ，解析で想定されるよりも柔らかいブラケットとなり，解析に設定した制約条件を満たすことができなかった。そこで，解析と試験に使用した材料のヤング率が異なっていたことから，実験結果を補正したところ，制約条件をほぼ満たす結果を得ることができた。

5 謝辞

本研究は九州地方知事会・政策連合「工業系公設試験研究機関の連携」の一環である「九州連携CAE研究会[4]」（デジタル情報を活用した生産工程の高度化に関する研究[R4-R6]）における共通課題として実施したものである。助言いただいた研究会のメンバーに，お礼申し上げます。

6 参考文献

1) 西脇 眞二，泉井 一浩，菊池 昇:トポロジー最適化， pp. 1-24，丸善出版（2012）

2) 倉本 紘彰: 福岡県工業技術センター研究報告，No. 29，pp. 37-40（2019）

3) ANSYS, Inc.: DesignXplorer ユーザーガイド 2022 R2，p. 79（2022）

4) 泉川 達哉，田中 徹，入江 直樹，土村 将範:設計工学，Vol. 60，pp. 244-250（2025）

熱流体解析における応答曲面法を用いた最適設計手法の構築

村田　顕彦[*1]　戸塚　陸美[*2]

Development of an Optimal Design Method Using Response Surface Methodology for Thermal Fluid Analysis

Akihiko Murata and Mutsumi Totsuka

近年，製品の省エネルギー化や高性能化に伴う，熱流体解析を活用した最適設計に対するニーズが高まっている。一方，3次元の複雑形状を対象とする熱流体解析は1回あたりの計算負荷が大きく，さらに，設計変数が多い最適設計では解析回数も増大するため計算コストが課題となる。そこで本研究では，熱流体解析における応答曲面法を用いた最適設計手法を構築した。具体的には，ふく射空調パネルを対象として寄与度分析による設計変数の絞り込みを行い，応答曲面モデルを比較・選定したうえで，遺伝的アルゴリズム（MOGA-Ⅱ）による多目的最適化を実施した。その結果，熱交換量の低下を4 %に抑えつつ，吸熱部体積を34 %低減できる有望形状を得た。また，計算時間は約160時間から約70時間に短縮され，本手法の有効性が確認できた。

1　はじめに

近年の，省エネルギー化や製品高性能化への要求の高まりにより，県内企業から熱流体解析を活用した製品設計の高度化が求められている。特に，熱交換性能の向上や小型化など，複数の要求を同時に満たすために熱流体解析を活用した最適設計の重要性が高まっている。

一方，3次元の複雑形状を対象とする熱流体解析は1回あたりの計算負荷が大きく，さらに，設計変数が多い最適設計では多数の解析が必要となるため，計算コストの増大が課題となる。このため，解析精度を維持しつつ解析回数を削減できる効率的な最適設計手法が求められている。

そこで本研究では，熱流体解析における応答曲面法を用いた最適設計手法を構築した。具体的には，ふく射空調パネルを対象として，寄与度分析による設計変数の削減及び応答曲面モデルの比較・選定を行ったうえで，遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化を実施した。

2　研究方法

2-1　解析対象及び解析条件

解析対象に一部形状を簡略化したふく射空調パネルを用いた。解析モデルを図1に示す。本モデルは，複数の単一ユニットを並列配置した構造を有する。各単一ユニットは，外枠等からなる構造部と，吸熱部で構成される。吸熱部は，中心に冷却水が流れる水管部と，

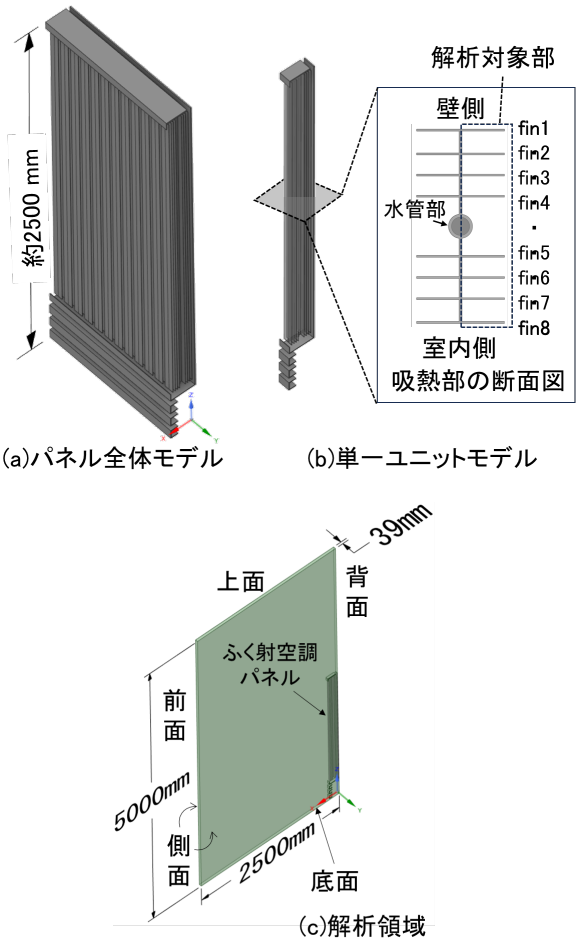


図1　ふく射空調パネル解析モデル

*1　機械電子研究所
*2　（株）エース・ウォーター

その前後に配置された板状部及びフィンから構成される。本研究では，解析負荷低減のため単一ユニットの半分を用い，その周囲の空気を含めて解析領域を設定した（図1(c)）。境界条件として，側面（単一ユニットの中心面及び隣接する単一ユニットとの中央面）には対称境界条件を適用し，前面及び上面は開放境界とした。また，背面，底面及び水管部内面は静止壁として熱伝達境界条件を設定した。主な解析条件を表1に示す。

本研究では，各フィンの長さを独立した設計変数とした。初期状態では全8枚のフィンに対応して8個の設計変数を設定し，後述する寄与度分析により最適化対象とする設計変数の絞り込みを行った。目的関数は，熱交換量の最大化及び吸熱部体積の最小化の2つとし，多目的最適化を実施した。

表1　主な解析条件

乱流モデル		SST k-ω
ふく射モデル		Surface to Surface
境界条件	前面，上面	開放境界（ゲージ圧0 Pa，外部温度27 ℃）
	側面	対称境界
	背面	熱伝達係数0.021 W/(m²・K)，外部温度27 ℃
	底面	熱伝達係数0.022 W/(m²・K)，外部温度27 ℃
	水管部内面	熱伝達係数5000 W/(m²・K)，冷却水温度10 ℃

2-2 最適設計手法

最適設計フローを図2に示す。初期状態は設計変数が8個と多く，解析コスト増大が懸念されたため，64ケースの熱流体解析結果を用いた寄与度分析を実施した。寄与度分析には平滑化スプライン分散分析（略語：SS-ANOVA）を用いた。次に，応答曲面の構築に用いるサンプリング手法に均等ラテン超方格法を採用した。サンプリング点は，各設計変数の最小値及び最大値を用いた多元配置による32点，均等ラテン超方格法による133点，及び応答曲面検証用の10点の合計175点とした。得られたサンプリング点に対して熱流体解析を実施し，応答曲面を構築した。応答曲面モデルには複数手法を適用し，精度評価により最適なモデルを選定した。その後，多目的遺伝的アルゴリズム（Multi-Objective Genetic Algorithm（略語：MOGA））[1] の考え方に基づくMOGA-Ⅱを用いて多目的最適化を実施した。

熱流体解析にはANSYS Fluent 2022 R1，最適化にはmodeFRONTIER 2024 R2を用いた。両者を連携させて自動解析及び最適化を実施した。計算には，Intel Xeon W-2255 @ 3.70 GHz，メモリ64 GBを搭載する解析用ワークステーションを用いた。

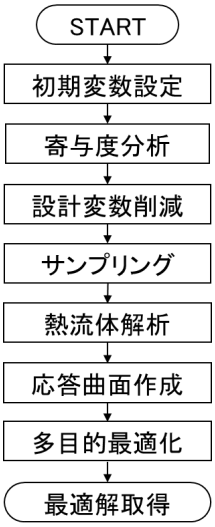


図2　応答曲面法を用いた最適設計フロー

3 結果と考察

3-1 寄与度分析結果

初期状態では，単一ユニット内の8枚のフィン長さを，独立した設計変数として設定した。設計変数が多い場合は最適化に必要な解析回数が増加し，計算コスト増大の要因となるため，寄与度分析による設計変数削減を実施した。64ケースの熱流体解析結果を用いたSS-ANOVAによる寄与度分析を行い，各設計変数の熱交換量に対する寄与度を評価した結果を図3に示す。体積については各フィン長さが同等に影響するため，熱交換量に対する寄与度に着目し，累積寄与度が8割以上となるよう設計変数を選定した。その結果，fin4～8を最適化対象に採用し，寄与度の低い壁側のfin1～3を削減対象とした。これにより，設計変数は8個から5個に削減され，以降の応答曲面構築及び多目的最適化における解析コストを低減できた。

3-2 応答曲面モデルの精度評価

熱交換量及び吸熱部体積について，それぞれ12種の応答曲面モデルを用いて予測モデルを構築し，検証用サンプリング点により精度評価を行った。主要な結果を表2に示す。評価指標には平均相対誤差及び決定係数を用いた。その結果，熱交換量では異方性クリギング（略語：AKR），SS-ANOVA，動径基底関数（略語：RBF）の順に高い精度を示し，吸熱部体積ではSS-ANOVA，多項式特異値分解法（略語：SVD），ステップワイズ回帰（略語：STEP）の順に高い精度を示した。最も高い予測精度を示した熱交換量のAKR及び吸熱部体積のSS-ANOVAを以降の多目的最適化に採用した。

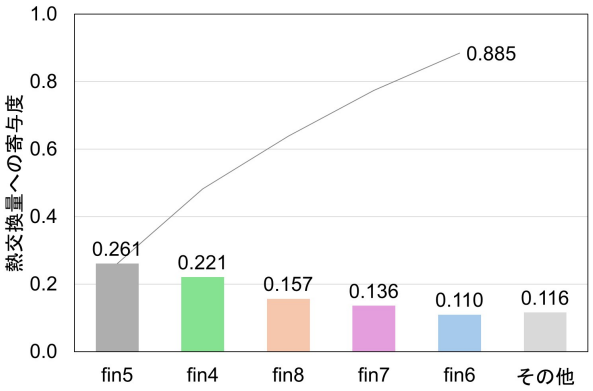


図3　熱交換量に対する各設計変数の寄与度分析結果

表2　主要応答曲面モデルの精度比較結果

(a)　熱交換量

モデル	平均相対誤差	決定係数
AKR	0.0117	0.964
SS-ANOVA	0.0120	0.960
RBF	0.0172	0.908

(b)　吸熱部体積

モデル	平均相対誤差	決定係数
SS-ANOVA	9.27×10^{-8}	1
SVD	1.37×10^{-7}	1
STEP	1.39×10^{-7}	1

3-3　多目的最適化結果

3-2で選定した応答曲面モデルを用いて，遺伝的アルゴリズムMOGA-Ⅱによる多目的最適化を実施した。パレート最適解分布を図4に示す。最適化の結果，熱交換量と吸熱部体積の間にトレードオフの関係が確認され，体積を削減するほど熱交換量が低下する傾向が示された。また，現行設計点に対して，体積と熱交換量の異なる複数のパレート最適解が得られた。なお，今回の検討条件において，応答曲面法を適用しない場合は約400ケースの熱流体解析が必要であるのに対し，本手法では応答曲面構築及び検証のための解析を含めて175ケースに削減できた。これにより，解析時間は約160時間から約70時間に短縮できた。得られたパレート最適解から熱交換量が最大となるものを選定し，熱流体解析による再計算を実施した。現行形状と最適形状の断面比較を図5に，性能比較結果を表3に示す。その結果，熱交換量は約4 %低下したものの，吸熱部体積を約34 %低減できることを確認した。最適形状では寄与度が低かったfin1～3を0としたうえで，fin4～6は長さが維持され，fin7はほぼ0，fin8は中程度の長さとなった。特に，水管部に近いfin4～6の長さが維持される傾向を確認できた。一方で，最も外側のfin8は，水管部から離れているものの，ふく射の影響が大きいため一定の長さが維持されたものと考えられる。

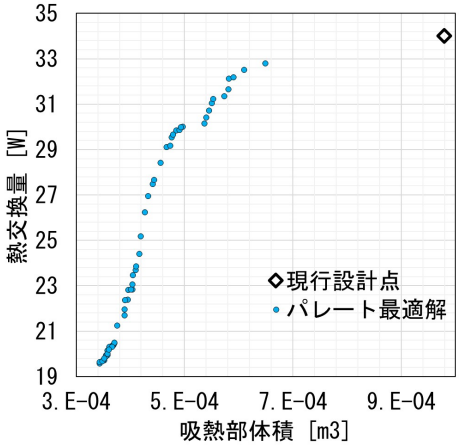


図4　パレート最適解分布

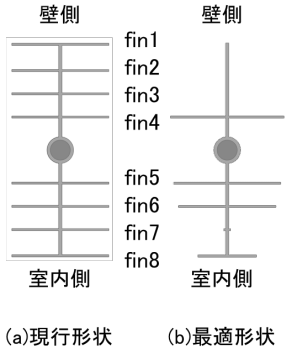


図5　現行形状と最適形状の断面比較

表3　現行形状と最適形状の性能比較

	現行形状	最適形状	変化率
熱交換量［W］	34.02	32.67	-4 %
吸熱部体積［m^3］	9.79×10^{-4}	6.49×10^{-4}	-34 %

4 まとめ

本研究では，熱流体解析における応答曲面法を用いた最適設計手法を構築した。ふく射空調パネルを対象として，寄与度分析により設計変数を8個から5個に削減するとともに，応答曲面モデルの比較・選定を行い，熱交換量にはAKRを，吸熱部体積にはSS-ANOVAを採用した。さらに，遺伝的アルゴリズム（MOGA-Ⅱ）を用いた多目的最適化を実施し，熱交換量と吸熱部体積のパレート最適解分布を取得した。その結果，熱交換量の低下を約4に抑えつつ，吸熱部体積を約34 %低減できる有望形状を得た。加えて，本形状の適用により製品全体として約21 %の重量低減が見込まれることが分かった。また，応答曲面法を活用することで，解析時間は約160時間から約70時間に短縮できることを確認した。今後は，本研究で構築した最適設計手法を他の製品設計課題にも適用し，技術支援への活用を図っていきたい。

5 参考文献

1)Carlos M. Fonseca, Peter J. Fleming: Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms, pp. 416-423(1993)

トポロジー最適化を活用したヒートシンクの熱流体設計に関する研究

大内 崇史[*1]　村田 顕彦[*1]　山本 圭一朗[*1]

Study on Thermal-Fluid Design of Heat Sink Using Topology Optimization

Takafumi Ouchi, Akihiko Murata and Keiichiro Yamamoto

熱流体機器における伝熱促進や，配管流路の圧力損失低減をはじめとする熱流体設計に，トポロジー最適化技術を活用する研究が進み，活用事例もみられるようになってきた。本研究では，熱移動と流体挙動の両者に関連する水冷及び空冷のヒートシンクを対象にしたトポロジー最適化を行い，取得した最適化形状それぞれに対する造形試作を行った。また，水冷ヒートシンクについては，製造の観点で図面化可能な矩形フィンを等間隔にダイヤ配置する場合のフィン寸法及び配置の寸法最適化を行い，トポロジー最適化による形状と比較検証した。その結果，本研究で得たトポロジー最適化形状と同等以上の性能を有する寸法形状が得られた。

1 はじめに

工業製品や生産設備などにおいては，配管などの流路における圧力損失低減または流量増大，熱流体機器における伝熱促進または断熱性向上，並びに温度や流量の均一化などを目的として，数値流体力学[1)]（Computational Fluid Dynamics，以下「CFD」という）を活用した熱流体設計を行うことが一般的になってきた。また，設計の最適化工程においては，構造強度設計で広まったトポロジー最適化[2)]技術が流体問題にも応用されるようになり（以下，当技術を単に「流体トポロジー最適化[3)]」という），特に近年では，当研究所が保有するCFDソフトウェアであるSTREAM（ソフトウェアクレイドル製）のような商用CFDソフトウェアに流体トポロジー最適化の機能が搭載されるようになっている。

流体トポロジー最適化は，圧力損失の最小化や熱交換量の最大化などの目的関数をあらかじめ設定し，これに対する設計領域内の流路の形状及び形態（トポロジー）を，数理的な最適化アルゴリズムによって導き出す技術である。当技術を各種流体デバイスの設計に活用することで，大幅な性能向上につながることが期待されている[4)]。一方で，得られる流路形状は複雑であり，3Dプリンタなどによる造形が前提となる。このような最適形状について，福岡県内企業に対する聞き取りでは，図面化が可能な形状に設計最適化したいというニーズもあった。そこで，本研究では，流体トポロジー最適化のモデルケースとして，熱移動と流体挙動の両現象が関与するヒートシンクを対象に，空冷と水冷の場合について，それぞれSTREAMを用いたトポロジー最適化形状を得るプロセスを検証し，3Dプリンタによる造形試作を行った。加えて，水冷ヒートシンクについて，トポロジー最適化形状に着想を得て，図面化が可能で工業上合理的な形状にフィンを寸法最適化し，トポロジー最適化形状と比較検証した。

*1 機械電子研究所

2 研究方法

2-1 水冷ヒートシンクのトポロジー最適化

水冷ヒートシンクのトポロジー最適化では，図1に示す一辺20 mm，厚さ1 mmのヒータと，その上面に設けた高さ1 mmの水冷流路からなる冷却機構を対象とした。水冷流路は，入口面及び出口面の幅が4 mmであり，半径10 mmの円弧でヒータ幅20 mmまで拡大・縮小する形状で，流路上面は断熱壁面とした。ヒートシンクの

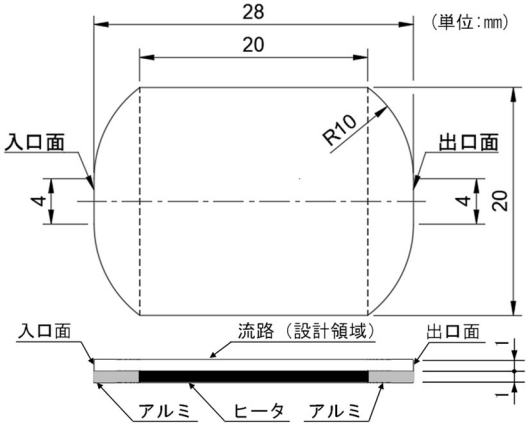


図1　解析対象の水冷ヒートシンク

設計領域は，出入口の拡大・縮小部を含む水冷流路全体とした。流れ方向に左右対称の構造であることから，解析負荷を低減するために，1/2のみを解析対象とし，ヒータ面方向を一辺0.1 mmの正方形で分割し，高さ方向には厚さ1 mmで分割して，ヒータ及び流路を対象として面方向に二次元の解析を行った。流路を満たす流体は非圧縮性の水で，流れは層流とし，物性値は20 ℃の定物性とした。水を入口面から20 ℃，0.05 m/sで流入させ，出口面に全圧0 Paの等圧面を設定して流出する設定とした。1/2領域のヒータ発熱量は80 Wとした。ヒートシンク設計領域内における流体領域の体積割合の上限値を80 %とし，設計領域全域が流体の場合に比べて圧力損失が10倍，20倍，40倍，100倍以内の4条件を制約条件として，それぞれの制約条件におけるヒータの平均温度最小化を目的関数として最適化を行った。なお，トポロジー最適化により生成される固体領域の熱伝導率は，純アルミニウムを想定した237 W/(m・K)とした。また，水は100 ℃を超過しても，20 ℃の物性値で液相のまま温度上昇することとした。

2-2 水冷ヒートシンクの寸法最適化

水冷ヒートシンクの寸法最適化については，図面化が可能かつ工業上合理的な形状として，矩形フィンを等間隔にダイヤ配置した場合について最適化を行った。フィン幅及びフィン間隔は，トポロジー最適化により得られた固体領域の輪郭数，及び固体領域の体積割合をもとに求めた。これを基準にして，フィン幅及び間隔を変えて解析を行い，解析結果から得られるヒータ平均温度及び圧力損失についてmodeFRONTIER(ESTECO製)によって応答曲面を作成した。この応答曲面を用いて，フィン幅及び間隔の条件を増やして最適解を探索し，ヒータ平均温度の最小化及び圧力損失の最小化に対するパレート最適解を得て，トポロジー最適化の場合と性能を比較した。

2-3 空冷ヒートシンクのトポロジー最適化

空冷ヒートシンクのトポロジー最適化では，図2に示す一辺10 mm，厚さ2 mmのヒータ上面に密着設置することとし，一辺10 mm，高さ5 mmの直方体をヒートシンクの設計領域とした。ヒートシンク周辺の解析空間は，ヒートシンク設計領域を水平方向の中心にして，一辺14 mm，ヒータ上面から高さ7 mmの直方体領域とした。空間を満たす流体は非圧縮性の空気で，生じる

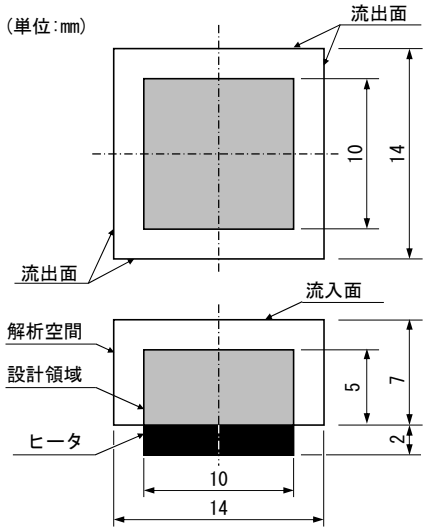


図2　解析対象の空冷ヒートシンク

流れは層流とし，空気の物性値は20 ℃の定物性とした。空気は解析空間の上面から20 ℃，0.5 m/sでヒータ方向に流入させ，解析空間の全側面に全圧0 Paの等圧面を設定して流出させた。なお，計算負荷低減のため，ヒータを含む解析領域を水平両軸方向の各中心断面で分割し，分割面に対称境界条件を与えて解析領域の1/4を対象とした。領域は一辺が0.1 mmの立方格子に等分割して三次元解析を行った。1/4領域のヒータ発熱量は0.1 Wとした。ヒートシンク設計領域における流体域の体積割合の上限値を75 %とし，ヒータ平均温度の最小化を目的関数とした。トポロジー最適化により生成される固体領域の熱伝導率は，アルミニウム合金を想定した130 W/(m・K)とした。なお，空冷ヒートシンクの寸法最適化については，今後の課題とした。

3 結果と考察

3-1 水冷ヒートシンクのトポロジー最適化

水冷ヒートシンクのトポロジー最適化において，圧力損失10倍以内を制約条件とした計算過程における流路形状を図3に示す。なお，流路表面の色は流体温度を示している。また，最終ステップの最適化形状を面方向に2.5倍，高さ方向に10倍拡大して金属積層造形装置（ニコン製lasermeister 100A）により出力したSUS316造形品写真を併せて示す。トポロジー最適化の計算が進むにつれて，流路形状が変化し，それに伴って温度の低下がみられた。また，圧力損失の制約条件を10倍，20倍，40倍，100倍以内としたトポロジー最適化によって得た，圧力損失とヒータ平均温度の関係

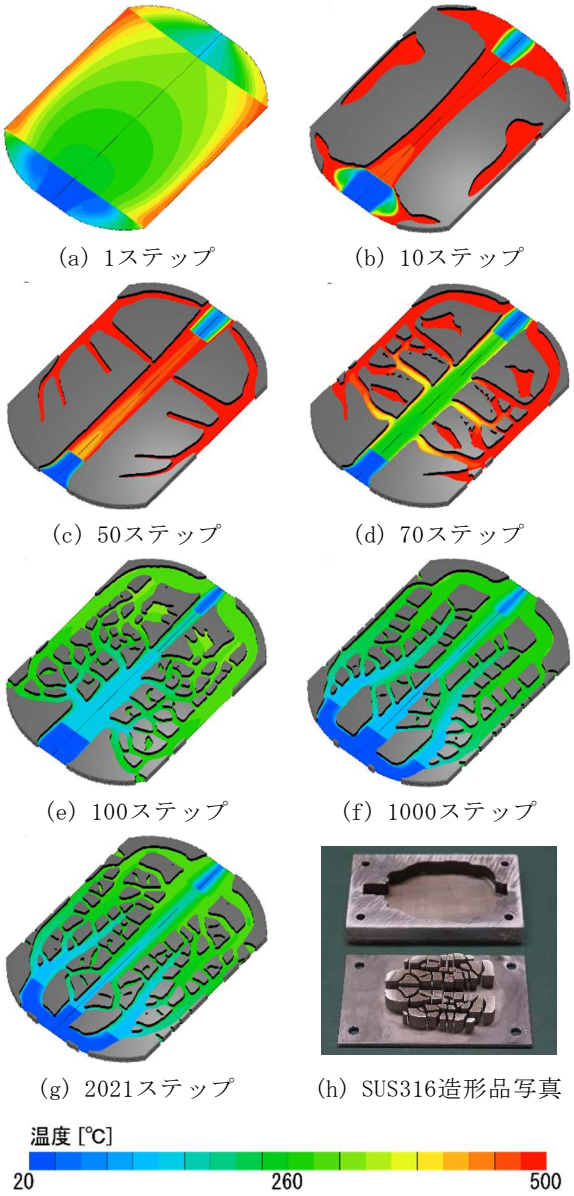


図3　水冷ヒートシンクの計算過程

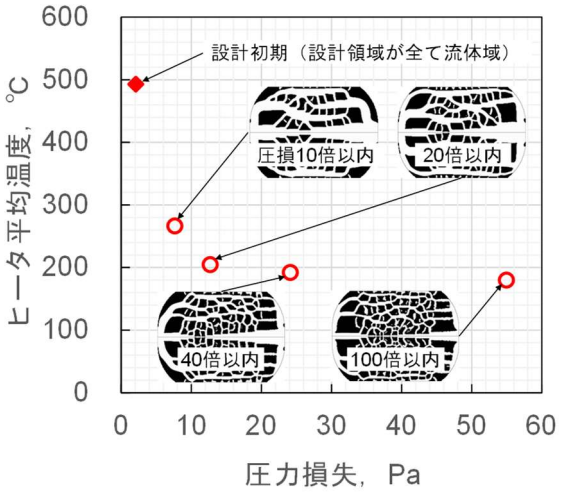


図4　水冷ヒートシンクのトポロジー最適解

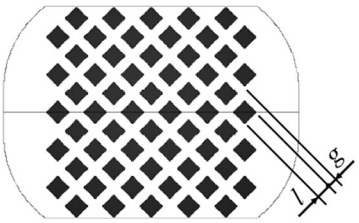
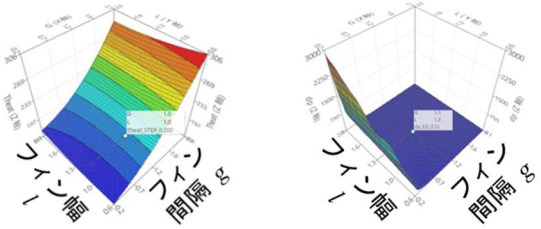


図5　水冷ヒートシンクの設計変数



(a) ヒータ平均温度　(b) 圧力損失

図6　水冷ヒートシンクの応答曲面

を図4に示す。なお，各条件において得られた流路形状は吹き出しで示している。許容する圧力損失を大きくすることで流路が細くなり，ヒータ平均温度は低下するが，今回の解析条件の場合では，170 ℃付近が温度低下の限界値とみられる。

3-2　水冷ヒートシンクの寸法最適化

図3(g)に示すトポロジー最適化形状から得られた固体領域の輪郭数及び固体体積割合をもとに，矩形フィンを等間隔にダイヤ配置した場合のフィン幅*l*及び間隔*g*を設計変数の基準とした。この基準値でのフィン形状を図5に示す。これを基準に，フィン幅を0.6 mmから2 mmまで0.2 mm刻み，間隔を0.2 mmから2 mmまで0.2 mm刻みとした80ケースの熱流体解析を行い，それぞれのヒータ平均温度及び圧力損失を得た。これらの結果のうち，64条件の結果を教師データ，残りの16条件の結果を検証用データとする応答曲面を作成した結果を図6に示す。なお，ヒータ平均温度はステップワイズ回帰，圧力損失は進化的デザインがそれぞれ検証用データを良好に再現できたため，選定した。

これらの応答曲面を用いて，フィン幅と間隔を2000ケースに増やして最適解を探索し，得られたヒータ平均温度及び圧力損失の関係を「最適解探索」として図7に示す。なお，応答曲面による最適解探索のうち，ヒータ平均温度最小化及び圧力損失最小化に対するパレート最適解を「パレート最適解」として図示した。また，熱流体解析を行って直接得たヒータ平均温度及び圧力損失は「教師データ」として図示している。

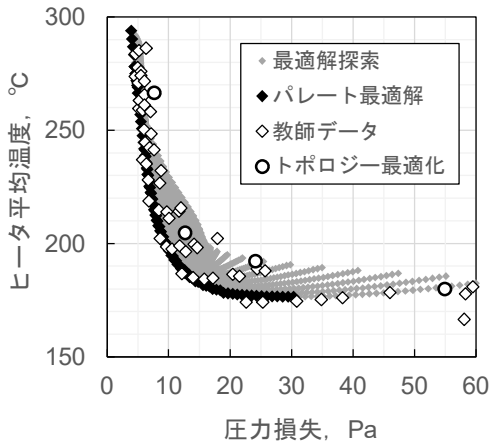


図7 水冷ヒートシンクの最適化結果

応答曲面により得たパレート最適解と，トポロジー最適化による解を比較すると，トポロジー最適化による解はヒータ平均温度の最小化及び圧力損失の最小化の観点では性能が低くなった。トポロジー最適化で得られる解は，一般に大域的最適解ではなく，局所最適解である[4]。今後，トポロジー最適化のパラメータ及び初期条件等の設定内容を追求することにより，更に優れた解が得られると考えているため，これについては今後も検討を継続する。

3-3 空冷ヒートシンクのトポロジー最適化

空冷ヒートシンクのトポロジー最適化について計算過程におけるフィン形状の推移を図8に示す。なお，計算過程の形状は，内部形状を見やすくするために，半分領域のみを表示し，形状表面の色は温度を示している。また，最終ステップの最適化形状を6倍拡大して，材料押出式3Dプリンタ（Bambu Lab製 P1S）により出力したPLA樹脂造形品写真を図8に併せて示す。計算が開始して10ステップ程度で，設計領域側面に沿う壁状の形状が生成された。その後，ヒータ中央部から三次元的に樹枝状の構造体が生成され，計算が進むごとに表面積の拡大とフィン効率の維持を満足する最適解を探索する過程がうかがえた。三次元におけるトポロジー最適化形状に対する性能評価及び寸法最適化については，今後取り組んでいく予定である。

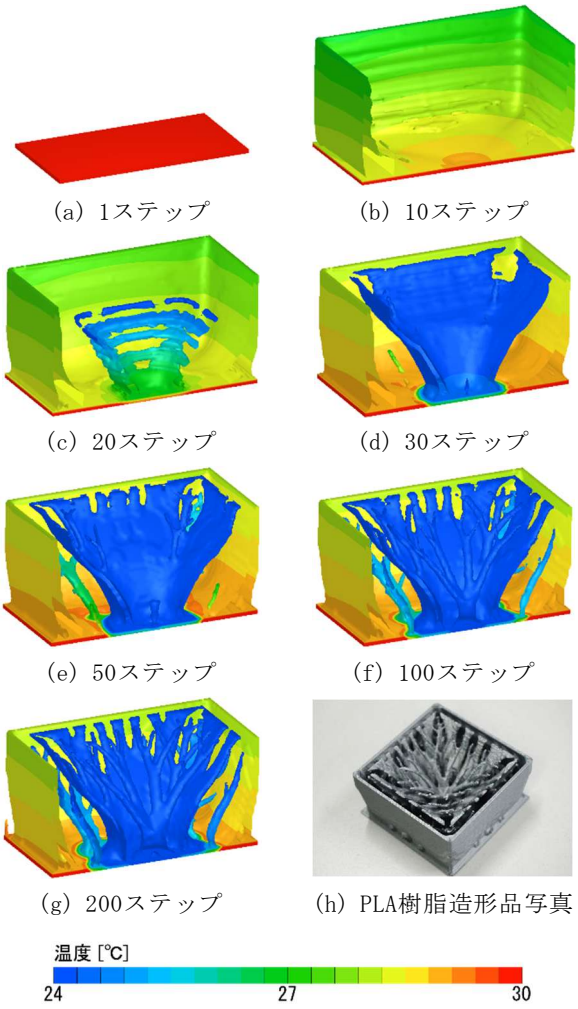


図8 空冷ヒートシンク形状の推移

4 まとめ

本研究では，水冷及び空冷のヒートシンクを対象にしたトポロジー最適化を行い，それぞれの最適化形状を造形試作した。また，水冷ヒートシンクについては，製造の観点から，矩形フィンを等間隔にダイヤ配置したフィンの寸法最適化を行い，本研究で得たトポロジー最適化による形状の性能を上回る最適形状が得られた。今後は，トポロジー最適化形状のパラメータ及び初期条件の設定等による優れた最適解の追求，三次元におけるトポロジー最適化形状に対する性能評価及び寸法最適化に取り組んでいく予定である。

5 参考文献

1) H. K. Versteeg, W. Malalasekera（松下洋介ほか3名共訳）：数値流体力学（第2版），pp. 1-7，森北出版(2011)

2) 近藤 継男ほか2名：トポロジー最適化の基礎，pp. 1-22，コロナ社(2024)

3) 矢地 謙太郎：精密工学会誌，86巻(6号)，pp. 400-404(2020)

4) 矢地 謙太郎ほか3名：日本機械学会第26回設計工学・システム部門講演会，2016.26巻，ID:2310(2016)

電磁力振動と音響信号による強磁性鋼管裏面スケール厚さの非接触測定

東原 純[*1]

Non-contact Measurement of Scale Thickness on the Back Side of Ferromagnetic Steel Pipe Using Electromagnetic Vibration and Acoustic Signals

Makoto Tohara

産業プラントにおける大口径配管では内面にスケールが堆積し，流動効率及び設備全体の性能を低下させることが多い。スケール厚さの評価には一般に放射線透過試験が用いられるが，検査コストが高いため検査頻度が制限される。一方，電磁力に基づく検査手法は低コストな代替手段となり得るが，通常は損傷を受けやすい接触型加速度計に依存している。本研究では，コンデンサマイクを用いた非接触測定手法により強磁性鋼管のスケール厚さを測定する方法を検討し，実験的検証による有効性の確認を行った。その結果，スケール付着に伴いマイクから得られる振動音(出力電圧)が低下し，帯域実効値の変化率を指標とすることでスケール厚さを評価できる可能性が示された。

1 はじめに

冷却水配管や蒸気配管は工業プラントや発電施設において広く使用されている。これらの配管の内部状態の把握は保守管理上重要である。配管内部を流れる流体には，硫黄やカルシウムなどの無機成分が含まれており，時間の経過と共に固化して配管内面に非金属スケールを形成する。スケールの堆積は流路の狭窄や閉塞を引き起こし，設備の運転効率を低下させる要因となる。配管内面に付着したスケール厚さの評価には，従来から配管外側からの放射線透過試験が用いられてきた。しかし，放射線透過試験は安全管理上の制約が大きく，検査時の作業区域設定や設備停止を要する場合がある他，検査コストも高いため，頻繁な実施は困難である。また，超音波探傷試験は比較的容易に適用可能であるものの，非金属スケールが多孔質で不均質な構造を有する場合に超音波の散乱や減衰が顕著となり[1,2]，スケール厚さの定量評価が難しいという課題がある。このような背景から，電磁力加振に基づく検査手法が提案され，比較的低コストに実施できることが報告されている[3]。しかし，これらの手法では接触型加速度計を用いる場合が多く，振動や摩耗によるセンサ損傷の懸念がある。そこで，本研究では，強磁性鋼管に付着した非金属スケールの厚さを測定することを目的として，コンデンサマイクを用いた非接触検査手法に関する基礎的検討を行った。

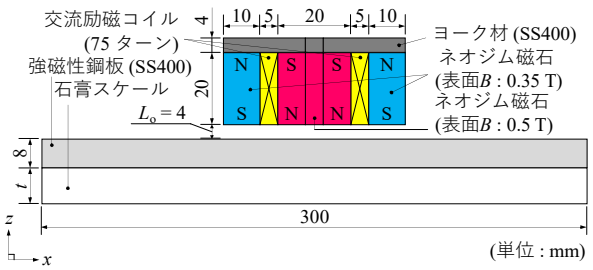
*1 機械電子研究所

2 鋼板での実験

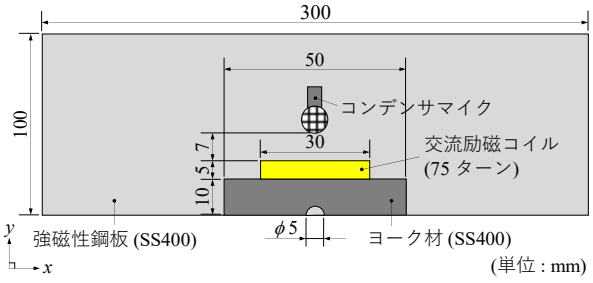
2-1 電磁力加振器

本研究で用いる電磁力加振器は，永久磁石(ネオジム磁石)，交流励磁コイル，およびコンデンサマイクを主な構成要素としている。図1に，鋼管への適用前に基礎的実験として使用した電磁力加振器および強磁性鋼板への1/2領域の設置位置を示す。

交流励磁コイル(75ターン)により強磁性鋼板に交流



(a) xz平面



(b) xy平面

図1 電磁力加振器モデル(1/2領域)

磁界を印加すると，鋼板表面に渦電流が誘起され，その結果ローレンツ力が発生する。永久磁石及びヨーク材は，鋼板内部に発生するローレンツ力を増強する目的で配置している。中央に配置したネオジム磁石の表面磁束密度は0.5 Tであり，両側に配置したネオジム磁石の表面磁束密度はそれぞれ0.35 Tである。

周期的に変化するローレンツ力により鋼板が振動し，これに伴って振動音が発生する。本研究では，この振動音をコンデンサマイクにより取得した。加振器と鋼板表面との距離(リフトオフ：L_o)は4 mmに設定した。

2-2 実験方法

図2に実験機器の構成を示す。実験機器は，加振部及び測定部から構成される。加振部ではファンクションジェネレータにより任意の波形を生成し，アンプ(バイポーラ電源)による電力増幅を行った後，電磁力加振器の励磁コイルに交流電流を印加する。測定部ではコンデンサマイクにより鋼板から発生する振動音を取得し，ロックインアンプを用いて参照周波数成分における出力電圧のピーク値を抽出した。抽出した信号は，データロガーにより逐次記録した。

実験では，電磁力加振器の交流励磁コイルに交流電流を印加し，励磁周波数を所定の周波数範囲で線形スイープした。図1に示すように，測定対象物は強磁性鋼板及び非金属スケールから構成される。強磁性鋼板には，長さ200 mm，幅300 mm，厚さ8 mmのSS400鋼材を用いた。また，非金属スケールとして使用した材料は，スケールの硬くて脆い性質に類似しており，厚さ制御が容易な石膏とした。

産業プラントや発電設備に使用される外径355 mm程度の大口径配管では，20 mmを超える厚さのスケール付着が運用上の問題を引き起こすことがある。この点を考慮し，本実験ではスケール厚さtを10 mm，20 mm，30 mmに設定した。図3に実験時の外観写真を示す。筐体の四隅にはボールローラーを取り付け，測定時の移動調整を容易にしている。また，電磁力振動センサは筐体中央に設けた開口部内に格納した。コンデンサマイクは，筐体の壁を隔てて電磁力振動センサの正面位置に設置している。

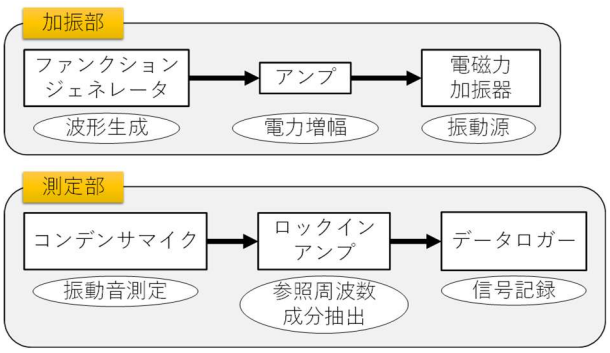


図2　実験機器構成

2-3 実験結果

まず，電磁力振動を利用して鋼板裏面に付着した非金属スケール厚さを測定する際，測定対象物のサイズや形状の影響を極力低減するため，測定に用いる周波数帯域は共振点から十分に離れた範囲に設定する必要がある。図4に，周波数1 kHzから13 kHzの範囲において，200 Hzごとに測定した結果を示す。なお，測定対象はスケールを施していない鋼板を使用し，交流励磁電流は，各周波数において2.3 Aとなるよう調整した。縦軸はコンデンサマイクにより取得した出力電圧の振幅値を示し，横軸は周波数を示す。この結果から，おおよそ2 kHzから8 kHzの範囲に共振点が存在することが確認できる。以上より，本実験では共振点を除く8 kHzから13 kHzの周波数範囲において，スケール厚さ評価の検討を行った。

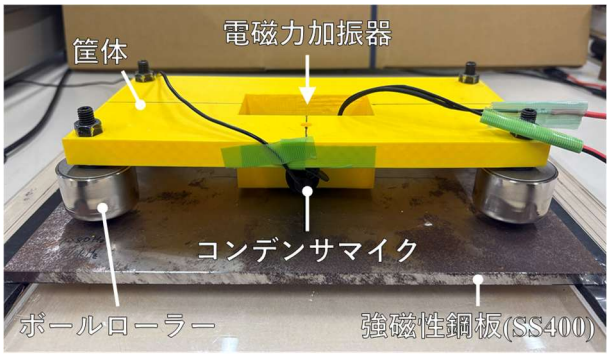


図3　実験時外観

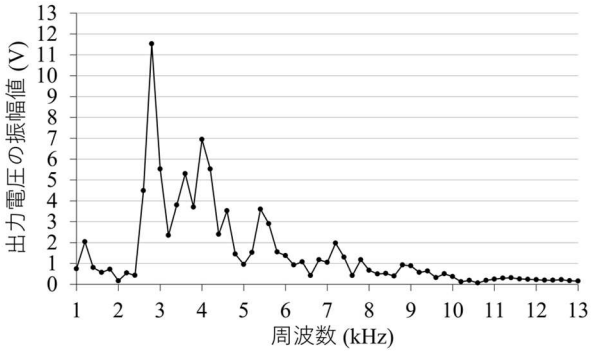


図4　各周波数における出力電圧の振幅値
(スケール厚さ0mm，2.3A固定)

図5に，励磁周波数を8 kHzから13 kHzまで線形スイープした際の，スケール厚さごとの出力電圧波形を示す。なお，交流励磁電流は周波数8 kHzにおいて振幅2.5 Aとなるように印加した。縦軸はコンデンサマイクにより取得した出力電圧，横軸は周波数を示す。この結果より，9 kHz付近において，スケール厚さが増加するにつれて出力電圧が減少する傾向を確認できる。

また，本実験では，標準サイズ鋼板(200 mm×300 mm×8 mm)に加え，300 mm×300 mm×8 mmの大型鋼板についても測定を行った。その結果，9 kHz付近において，大型鋼板と標準サイズ鋼板の出力電圧が概ね一致することが確認された。これにより，9 kHz付近が鋼板のサイズ変化(板厚変化除く)による出力電圧への影響が少ない周波数であることが示された。

本研究では，周波数帯域にわたる電圧応答を実効値として評価する指標として，式(1)，(2)により定義される周波数帯域実効電圧(以下，帯域実効値と称す)$V_{\mathrm{band,rms}}$を用いる。 まず，コンデンサマイクからロックインアンプを通して得られた振幅電圧V_{amp}から，各周波数における時間方向の実効電圧V_{rms}を算出する。次に，このV_{rms}を二乗し，周波数帯域にわたって積分することで，各周波数の電圧応答を加算する。更に，

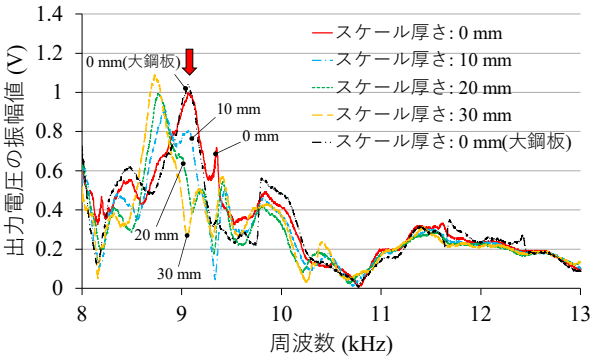


図5　スケール厚さごとの出力電圧波形

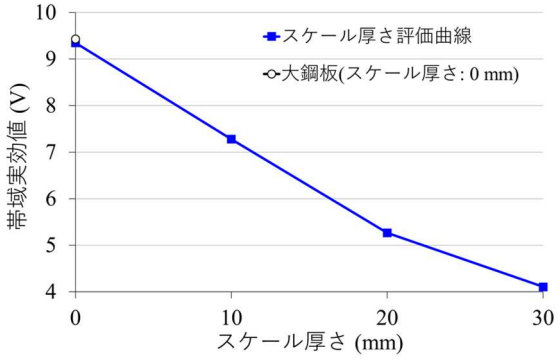


図6　帯域実効値とスケール厚さの関係

帯域幅で除した後に平方根を取ることで，帯域実効値を求めた。

$$V_{\mathrm{rms}} = \frac{V_{\mathrm{amp}}}{\sqrt{2}} \qquad \text{式(1)}$$

$$V_{\mathrm{band,rms}} = \sqrt{\frac{1}{f_2 - f_1}\int_{f_1}^{f_2} V_{\mathrm{rms}}(f)^2 \mathrm{d}f} \qquad \text{式(2)}$$

このように周波数帯域にわたる積分処理を導入した理由は，単一周波数における出力電圧が共振条件や測定条件（筐体の設置状態等）のわずかな違いによりばらつきやすいためである。周波数帯域全体の電圧応答を統合的に評価することで，スケール厚さに対する出力電圧の再現性向上を図った。図6に帯域実効値とスケール厚さの関係を示す。縦軸には，9.0 kHz から9.2 kHz の周波数帯域において算出した帯域実効値を示し，横軸にはスケール厚さを示す。なお，四角印で示した実線は，スケール厚さ0 mm～30 mmの計4種類の測定体の実験結果それぞれから算出した帯域実効値と，スケール厚さの関係を示した評価曲線である。丸印は，スケール厚さ0 mmの大型鋼板における帯域実効値を示す。本結果より，スケール厚さが増加するにつれて帯域実効値は減少することが確認された。また，スケール厚さ0 mmの大型鋼板においても，標準サイズ鋼板と測定値が概ね一致しており，鋼板サイズの違いによる影響が小さいことが示された。

3　鋼管への適用とスケール厚さ推定

図7に実験で用いた鋼管を示す。この鋼管は強磁性鋼製(SGP)であり，外径355.6 mm，肉厚8 mm，長さ360 mmである。内面の周方向に沿って3つの領域を設けており，各領域は周方向の1/3を占め，それぞれスケール厚さを0，10，20 mmとした。スケールの材料には石膏を使用した。電磁力加振器と鋼管外面頂部との距離(リフトオフ：L_o)は4 mmとした。励振周波数は8 kHzから13 kHzまでスイープし，交流励磁電流は周波数8 kHzにおいて振幅2.5 Aとなるよう印加した。

図8にスケール厚さに対する帯域実効値を示す。縦軸には，9.0 kHzから9.2 kHzの周波数帯域において算出した帯域実効値を示し，横軸にはスケール厚さを示す。帯域実効値はスケール厚さの増加に伴い減少し，鋼板の結果(図6)と同様の傾向を示した。しかし，その実効値は鋼板の結果に比較して小さいことが分かる。これは鋼管の曲率に起因するリフトオフの不均一性に

より，頂部から離れるにつれてリフトオフが増加し，測定信号が低下するためであると考えられる。このように，形状の違いによって同一のスケール厚さであっても実効値が変化する場合は，形状ごとに評価曲線を導出する必要があることが実用上の制約である。

そこで，図9にスケール厚さ0 mmを基準とした帯域実効値の変化率を示す。縦軸には変化率を示し，横軸

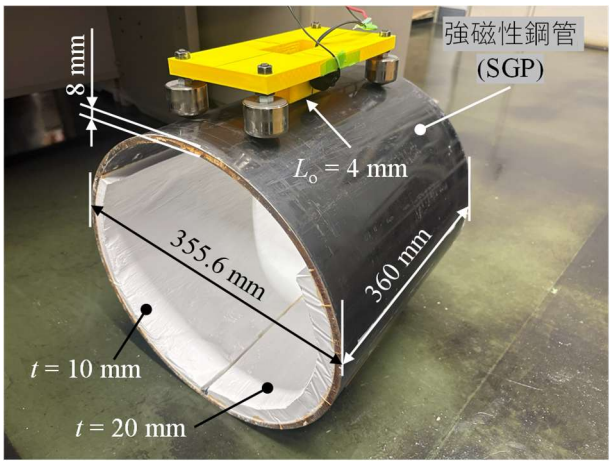


図7　スケールを施した鋼管および実験装置

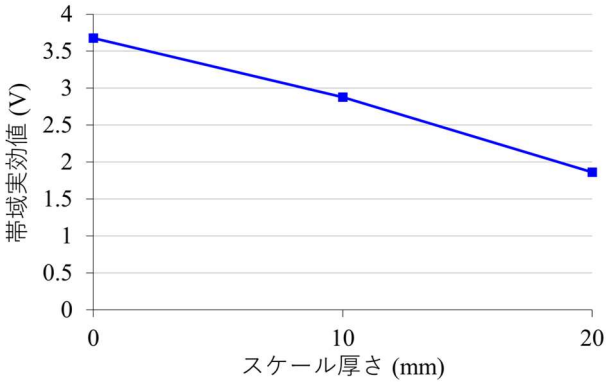


図8　鋼管における帯域実効値とスケール厚さの関係

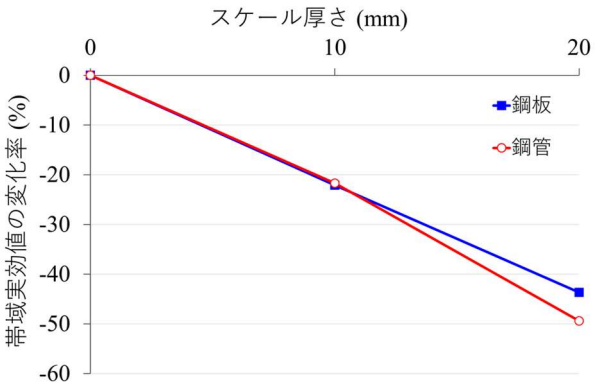


図9　鋼板および鋼管における帯域実効値の変化率とスケール厚さの関係

にスケール厚さを示す。鋼板および鋼管のいずれにおいても，スケール厚さの増加に伴って変化率が減少し，変化率は概ね一致することが確認された。従って，スケールのない状態の基準値が得られれば，その変化率からスケール厚さの推定が可能であると考えられる。

4 まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 強磁性鋼板を用いた実験において，共振から離れた周波数帯(8～13 kHz)では，スケール厚さの増加に伴って出力電圧が減少した。単一周波数における測定は共振や測定条件の変動に敏感であるため，周波数帯域に渡る応答を評価することで，スケール厚さをより安定して評価できた。

(2) 提案手法を外径355.6 mmの鋼管に適用した。鋼管の曲率によりリフトオフが不均一となり帯域実効値は小さくなったが，変化率は鋼板の場合と同程度であり，スケールのない位置における基準値を用いることでスケール厚さを推定できることが示唆された。

提案手法の適用範囲の拡張及び，リフトオフやノイズ，材料特性などの測定条件の影響評価には，今後のさらなる検討が必要である。

5 参考文献

1) R. Takasugi, S. Shiota, H. Ikusada, S. Niwa, Y. Gao and Y. Gotoh, 2024 IEEE 21st Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (2024)

2) A. Hagisaka, S. Niwa, S. Shiota, Y. Gao and Y. Gotoh, International Journal of Applied Electromagnet-ics and Mechanics, Vol. 71, No. S1, pp. S483-S491(2023)

3) S. Niwa, I. Yamada, A. Hagisaka, S. Shiota, Y. Gao and Y Gotoh, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 58, No. 8(2022)

技 術 報 文

嗜好性に優れた冷凍原木シイタケの開発

田﨑 麻理奈[*1]　遠藤 智哉[*1]　片山 秀樹[*1]　上田 京子[*1]　筒井 護[*2]

Development of High-Palatability Frozen Log-Grown Shiitake Mushrooms

Marina Tasaki, Tomoya Endo, Hideki Katayama, Kyoko Ueda and Mamoru Tsutsui

原木シイタケの露地栽培では，発生時期や収穫量が気象条件等に左右されるため制御が難しいことから，集中発生時には生鮮品としての出荷だけでは対応しきれず，余剰が生じやすい課題がある。一方，近年ではライフスタイルの変化に伴い，利便性の高い冷凍野菜の需要が高まっており，冷凍キノコ類も同様の傾向にある。しかし，原木シイタケは菌床栽培品と比較して初発菌数が多いことが予想されるため，冷凍食品規格として流通させるためには微生物制御が不可欠である。そこで本研究では，原木シイタケの余剰品を有効活用するため，原木シイタケの旨味や食感を維持した高品質な冷凍シイタケの開発を試みた。その結果，スチームコンベクションオーブンを用いた加熱殺菌により，保存性と嗜好性保持を両立し得る最適な加工条件を見出すことに成功した。

1 はじめに

中山間地域の原木シイタケの露地栽培は，地域経済や食文化の継承のみならず，森林生態系維持においても重要な役割を担っている。本栽培形態における発生時期は秋から春にわたるが，特に晩秋から初春にかけては，低温により子実体の生育が緩慢となるため肉厚で身の締まった食味に優れたシイタケが生産できる[1)]。

しかし，原木シイタケの露地栽培では気温や降雨などの気象条件に生産量が大きく左右され，発生時期や発生量の制御が困難という課題がある。特に集中発生した際，生鮮品（生シイタケ）としての出荷だけでは対応しきれず，余剰品が発生してしまう場合が多い。そのため，多くの生産者ではこれらを乾シイタケに加工することで保存性を高め，流通させている。しかしながら，乾シイタケは水戻しの手間や用途の固定化（和食のイメージが強い）といった要因から，現代のライフスタイルにおいては敬遠される傾向にあり，国内消費量は年々減少している[2)]。加えて，安価な輸入品の台頭もあり，国産乾シイタケを取り巻く環境は年々厳しさを増している。

一方，近年の共働き世帯や単身・高齢者世帯の増加に伴い，利便性の高い冷凍野菜及びきのこ類の需要が拡大している。冷凍野菜・きのこ類は「長期保存性」「簡便な計量・利用」「調理時間の短縮」「廃棄物の低減」といった利点を有しており，生鮮品の価格高騰時の代替品としても利用されている。したがって，原木シイタケの集中発生時に生じる余剰品を「冷凍原木シイタケ」に加工・製品化することで，長期保存を可能にするだけではなく，現代の市場ニーズに合致した有効な出口戦略となり得る。

しかし，露地栽培の原木シイタケは施設管理された菌床シイタケに比べ，微生物汚染などの衛生リスクが高いことが懸念される。

そこで本研究では「加熱後摂取冷凍食品（凍結直前加熱）」の冷凍食品規格（一般生菌数；10^5 cfu/g以下，大腸菌群；陰性）を満たし，かつ原木シイタケ特有の嗜好性を損なわない最適な殺菌方法を検討し，実用的な「冷凍原木シイタケ」の開発を試みた。

2 研究，実験方法

2-1 試料

原木シイタケはバンブーさわらの郷（同）で栽培された，菌興115号，240号及び301号（2025年12月～2026年3月収穫）を用いた。

殺菌条件検討には当研究所が保有する表皮ブドウ球菌（*Staphylococcus epidermidis* NBRC12993），大腸菌（*Escherichia coli* NBRC3301），芽胞菌（*Bacillus licheniformis* NBRC12200）を用いた。

2-2 殺菌加工条件検討用シイタケ試料の調整

露地栽培の原木シイタケでは，任意に微生物の菌種や菌数を制御することが困難である。そのため本研究では，一定の菌種及び菌数を原木シイタケに予め添加

*1 生物食品研究所
*2 バンブーさわらの郷合同会社

を行い，殺菌条件の検討を行った。使用した菌種は一般生菌の代表としてヒトの手指などの多く存在する表皮ブドウ球菌（*S. epidermidis*），土壌に多く存在する芽胞菌（*B. licheniformis*）及び大腸菌群の代表として大腸菌（*E. coli*）の3種類を使用した。各菌を37 ℃で10^8 cfu/mLに培養調製し，5 mm幅にスライスした原木シイタケ10 gに菌液を100 μL添加し，10^6 cfu/生重量gになるように試料調製を行った。なお，試料は菌種ごとに調製を行った。

2-3 加熱処理

殺菌加工条件の検討には調製した菌添加シイタケ試料はスチームコンベクションオーブン（MIC-6HSC3；ホシザキ（株））を用いて加熱処理を行った。なお，スチームコンベクションオーブンでの加熱ではいずれも付属の芯温センサーを使用し，中心温度の達温を確認しながら加熱処理を行った。

2-4 凍結処理

2-3で加熱処理した試料は速やかにブラストチラー＆ショックフリーザー（HBC-6B3-AW；ホシザキ（株））による急速凍結処理を行った。

2-5 一般生菌数及び大腸菌群

2-3及び2-4で処理した凍結試料全量（10 g）をリン酸緩衝生理食塩水（PBS）で10倍希釈し，1分間ストマッカー（E-Mix primo；アズワン（株））で均質化した。一般生菌数はPBSで希釈した試料1 mLをフィルム培地（Easy Plate AC;キッコーマンバイオケミファ（株））に接種し，35 ℃，48時間培養後，出現コロニー数を計測し試料1 gあたりの一般生菌数を算出した。大腸菌群も同様に，PBSで希釈した試料1 mLをフィルム培地（Easy Plate CC;キッコーマンバイオケミファ（株））に接種し，35 ℃，24時間培養後，出現コロニー数から試料1 gあたりの大腸菌群数を算出した。

2-6 遊離アミノ酸(グルタミン酸)の測定

シイタケ子実体の柄を取り除き，柄の付けを中心に4等分し，各切片を未処理，スチームコンベクション加熱処理，水道水水洗処理及びボイル処理に供した。水道水洗浄処理では10秒間流水で擦り洗いを行い，ボイル加熱処理は中心温度が75 ℃，1分以上同等となるよう沸騰水で約2分間加熱したものを試料とした。各処理後，急速凍結処理を行った試料は凍結乾燥（FDU－1110；東京理化機械（株））を行い，ワーリングブレンダー（7011HS；WARING社）にて粉砕した。粉末0.2 gに対して超純水10 mL，アセトニトリル20 mLを加えた。30分間超音波抽出を行い，遠心分離（15000 rpm，5分）して上清を回収し，0.2 μmフィルターでろ過したものを分析試料とした。遊離アミノ酸は，Nexera 自動プレカラム誘導体化アミノ酸分析システム（(株）島津製作所）を使用して測定し，独立した実験を5回行った。

2-7 統計解析

データは統計ソフト（KyPlot 6.0,（株）カイエンス）を使用して，Tukeyの多重比較検定による有意差検定を行った。

3 結果と考察

3-1 冷凍シイタケ開発を目的とした加熱処理条件の検討

大腸菌などの食中毒菌による被害防止のため，加熱食品においては食品衛生法により中心温度 75 ℃，1分以上と同等の加熱が定められている。そのため，本研究においても中心温度 75 ℃，1 分以上と同等の加熱条件を基準にスチームコンベクションオーブンの条件を設定して検討を行った。結果を表 1 に示す。

表 1 スチームコンベクションオーブンの加熱結果

調製時期	モード	設定温度	殺菌条件	品質評価
2025/11/17	スチーム	68	芯温63℃30分で終了	黒変、肉質柔らかく、ドリップ多い
	スチーム	75	芯温75℃1分で終了	食感良好、ドリップ少ない
	温風	75		乾燥
2025/11/18	スチーム	100	芯温90℃到達で終了	食感良好、ドリップ多い
	スチーム	110		食感良好、ドリップ多い
	スチーム	120		食感良好、ドリップ多い
	スチーム	130		食感良好、ドリップ多い
	スチーム40%	100		乾燥
	スチーム70%	100	芯温90℃到達で終了	食感良好、ドリップ少ない
	スチーム100%	100		ドリップ少ない
2025/11/28	スチーム	75	芯温75℃1分で終了	食感良好、ドリップ多い
	スチーム	90		食感良好、ドリップ多い
	スチーム	100	芯温90℃到達で終了	食感良好、ドリップ多い
	スチーム	130		ドリップやや多い
	スチーム40%	100	芯温70℃5分で終了	食感良好、ドリップ多い
	スチーム70%	100	芯温90℃到達で終了	食感良好、ドリップ多い
	スチーム40%	120		やや乾燥
	スチーム40%	100		食感良好、ドリップ多い
	スチーム20%	150	芯温75℃1分で終了	食感良好、ドリップやや少ない
	スチーム20%	120		やや乾燥
	スチーム20%	180		やや乾燥
2025/12/2	スチーム	100	芯温90℃到達で終了	色味、食感、ドリップなく良好
	スチーム20%	150	芯温75℃1分で終了	乾燥気味

その結果，低温で長時間加熱を行うとシイタケが黒変し，ドリップも多く流出し，食感も柔らかくなっていた（加熱条件；スチームモード，芯温 63 ℃，30 分加熱）。ドリップ流出を抑えるため，スチーム量を 20 %に減少させたところ乾燥気味になった。なお，

11 月 17 日～11 月 28 日調製分は全体的にドリップ流出が多い傾向にあった。この原因としては，収穫直前の降雨や降霜によりシイタケの水分量が増加したことに起因すると考えられた。そのため，再度，品質良好なシイタケを原料として再調製を試みた（12 月 2 日調製）。その結果，ドリップ流出はほとんど見られず，色味や食感も良好であった（加熱条件；スチームモード，芯温 90 ℃達温）。したがって，使用するシイタケの品質は重要であり，晴天時の収穫や雨除けの工夫を行うなどの注意が必要であると言える。次に，当該条件において微生物検査を行った。なお，製品化を見据え，実際の製品形態（冷凍食品）における評価を行った。すなわち，加熱処理後に凍結処理した試料を用いて微生物検査を実施した。その結果，一般生菌数は検出限界以下（＜300 cfu/g），大腸菌群は陰性を示し，加熱後摂取冷凍食品（凍結直前加熱）の冷凍食品規格を満たした。

以上の結果から，スチームコンベクションオーブン（加熱条件；スチームモード，芯温 90 ℃達温）を用いた冷凍シイタケの加熱殺菌条件として決定した。

3-2 加熱殺菌処理によるシイタケ中の旨味成分（グルタミン酸）への影響

決定したスチームコンベクションオーブンの加熱殺菌処理条件においてシイタケに含まれる旨味成分（グルタミン酸）が受ける影響を評価した。自然発生した原木栽培シイタケでは，同じように栽培・収穫されたものであっても個体間で成分含量に大きくばらつくことが知られている[1)]。そこで本研究では，同一個体を 4 等分したシイタケを用いて，未処理（生シイタケ），スチームコンベクションオーブン処理，水道水洗浄処理及びボイル加熱処理の 4 つの処理方法におけるグルタミン酸含量の違いを調べた。結果を図 1 に示す。

スチームコンベクションオーブン処理，未処理及び水道水洗浄処理に有意な差はみられなかった。一方で，ボイル加熱処理したシイタケでは他の 3 つの処理方法と有意な差が認められ，未処理，スチームコンベクション加熱処理及び水道水洗浄処理よりもグルタミン酸含量が低下していた。ボイル加熱処理は市販の冷凍シイタケ商品の主要な殺菌方法として汎用されるが，本研究結果から旨味成分であるグルタミン酸が特に流出しやすい殺菌方法であることが分かった。また，きのこ類は旨味成分の流出や食感不良の懸念があることから，一般的に水洗いが禁忌とされている。洗浄方法の違いによっても影響がある可能性は考えられるが，本研究結果では，水道水洗浄処理と未処理（生シイタケ）に有意な差はみられなかった。

以上の結果から，本研究で決定したスチームコンベクションオーブンによる加熱殺菌条件は，市販の冷凍シイタケで汎用されるボイル殺菌処理よりも，旨味成分であるグルタミン酸を保持できることがわかった。

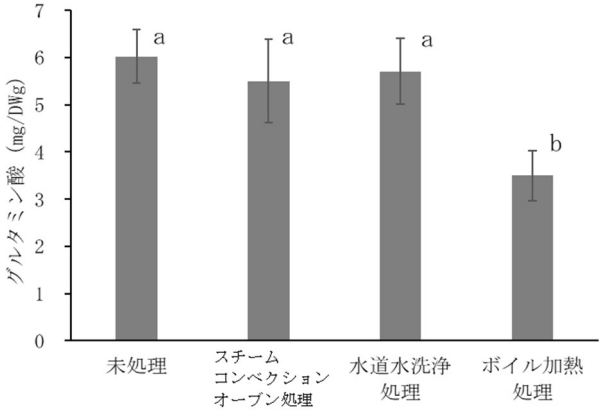


図1　各処理法の違いによる冷凍原木シイタケ中のグルタミン酸含量への影響

※グラフは平均値±標準偏差で表す（n=5）
※異なる文字間は有意差（$p<0.05$）があることを示す

4 まとめ

原木シイタケの集中発生時に生じる余剰品を有効活用するため，「冷凍原木シイタケ」の開発を試みた。その結果，食味や食感に優れ，冷凍食品の規格基準を満たす加工条件を見出すことができた。

5 参考文献

1)作野 えみ，田淵 諒子，寺島 和寿：財団法人日本きのこセンター菌蕈研究所研究報告，49 号，pp. 13-27(2019)

2）福留 奈美，沼田 行雄：日本調理科学会誌，57 巻，1 号，pp. 51-55(2024)

福岡県家具ブランド力向上支援事業
製品企画力高度化支援事業における製品開発事例
－使い続けたくなるデザイン桐箱の開発－

楠本 幸裕[*1]　本 明子[*1]　井上 友子[*2]　藤井 博文[*3]　田村 渉[*3]　鈴木 康洋[*4]

The Project with which it's Supported to Improve the Furniture Branding. The Example Product Development by the Project with which its Supported to Advance the Product Planning Capability

- Development of Paulownia Boxes with Design to Continue User Using -

Yukihiro Kusumoto, Akiko Moto, Tomoko Inoue, Hirofumi Fujii, Wataru Tamura and Yasuhiro Suzuki

株式会社増田桐箱店は 90 年以上続く老舗の桐箱メーカーであり，贈答品などのパッケージ桐箱をメイン商材にオリジナルのプロダクトを手がけている。メイン商材であるパッケージ桐箱は中に入る商品が主役であり，桐箱はすぐに捨てられてしまうことが多く，デザイン性を持たせて永く使い続けてもらえる桐箱を作りたいと考えていた。そこで，「福岡県家具ブランド力向上支援事業 製品企画力高度化支援事業」に参加し，デザイン性の高い製品開発に着手した。その結果，「桐箱になじみのない 20～30 代に向けた，レーザー加工や印刷等で加飾され，これら世代が目を惹くデザインの桐箱 3 サイズ（大・中・小)」というコンセプトを構築し，スーパーユーデザイン株式会社のデザインを基に試作を行い、「DOT BOX」として製品化した。

1 はじめに

本報告は，「福岡県家具ブランド力向上支援事業 製品企画力高度化支援事業」（以下，「本事業」という）における株式会社増田桐箱店（以下，「増田桐箱店」という）の製品開発の取り組みを報告する。本事業の目的や概要については，令和2年度研究報告掲載「福岡県家具ブランド力向上支援事業 製品企画力高度化支援事業における製品開発事例（その1)」[1)] 内の「1 はじめに」と「2 方法」を参照されたい。また，本事業において増田桐箱店の製品開発に関わった製品開発グループ及びデザイン事業者のメンバーを表1に示す。

表1　製品開発グループとデザイン事業者

製品開発グループ	デザイン事業者
・九州産業大学 芸術学部 井上友子教授 ・株式会社増田桐箱店 ・インテリア研究所	・スーパーユーデザイン株式会社

*1 インテリア研究所
*2 九州産業大学
*3 株式会社増田桐箱店
*4 スーパーユーデザイン株式会社

2 事業の取り組み内容

2-1 製品開発の目的

増田桐箱店は，主力として贈答品向け等のパッケージ桐箱を製造する傍ら，各種特殊印刷機（UV，シルク，箔押し等）やレーザー加工機などを導入し，オリジナルや他社とコラボしたプロダクトも手掛けている（図1)。メイン商材であるパッケージ桐箱はあくまで中身が主役であり桐箱は捨てられてしまう。増田桐箱店では，パッケージ桐箱にデザイン性を持たせて，その後も 2 次利用として使い続けてもらえる桐箱を作りたいと考え，本事業により一般消費者向けの「デザイン性の高い桐箱」を開発し，事業後にパッケージ桐箱へ展開することとした。



図 1　増田桐箱店パッケージ桐箱及びプロダクト例

2-2 製品コンセプトの構築とデザイン事業者の選定

製品コンセプトの構築は増田桐箱店が中心となり，製品開発グループが適宜サポートする体制で進められ

た。今回開発する製品の形状はベーシックな桐箱とし，増田桐箱店の独自の加飾技術（レーザー加工，及び UV，シルク，箔押し等の特殊印刷）を活かした，桐箱になじみのない世代へ高い訴求力を発揮するデザインをデザイン事業者に求めることとした。ターゲット層は，「桐箱になじみのない 20～30 代」とし，製品コンセプトは「レーザー加工や印刷等で加飾され，ターゲット層が目を惹くデザインの桐箱 3 サイズ（大・中・小)」とした。

次に，製品開発グループはデザイン仕様書の作成に取り組んだ（図 2)。デザイン仕様書とは，デザイン事業者に委託する製品デザインの内容を詳細に記載するものである。開発グループで議論を重ね，「世界に届け！使い続けたくなるデザイン桐箱」という開発テーマを設定し，これに基づいてデザイン事業者を全国から募集した。

（デザイン仕様書の主な仕様）

基本仕様

・直方体，又は立方体の桐箱

・桐箱の特性を生かした用途と，それに応じた寸法

ターゲット

・インテリアに興味があるが桐箱になじみがない 20～30代

・大切なものを桐箱で良い状態で収納したい

・家庭やオフィスでお洒落にものを収納したい

デザイン

・レーザー加工（カット・彫刻）による加飾

・印刷による加飾も可（シルク，箔押し，多色 UV，焼き印)，組み合わせ自由

バリエーション

・大，中，小 3 パターンのサイズ展開

図 2　増田桐箱店のデザイン仕様書の概要

公募の結果，6 社から 6 件の提案が寄せられ，その中から最もコンセプトに合致し，生産性が高く，長期的な展開を見込める，増田桐箱店のアイコン的商品の可能性を秘めたデザインを提案したスーパーユーデザイン株式会社（東京都）の「DOT BOX」（図 3）が審査会によって選定された。

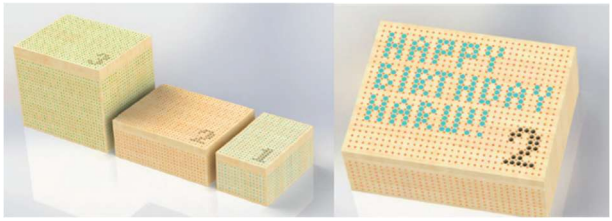


図 3　スーパーユーデザイン(株)が提案した「DOT BOX」

2-3 デザインの具現化(製品の製作)

① ドット模様の詳細仕様

スーパーユーデザイン株式会社が提案した「DOT BOX」は底を除く全面に菱形のドット模様が等間隔に配置されており，これを目安にユーザー側で市販の丸シール等を貼り付けた自由なデコレーションが可能なデザインであった。図 3 の右がその例である。ドットの詳細な仕様は試作と確認を繰り返して決定した。寸法はターゲットである 20～30 代への訴求効果を狙い，ポップな印象を持つ 3 mmとした。色展開も同様にターゲットを意識して暖色・寒色・無彩色の 3 パターンで，桐の木地が鮮やかに見え，かつWEBショップ等画像でも美しく見える組み合わせを決定した(表 2)

表2　決定した「DOT BOX」の色展開

カラー	C M Y K
PANTONE 16-5127 TPG	100% 0% 0% 32%
PANTONE 15-1164 TPG	0% 43% 88% 0%
ホワイト	0% 0% 0% 0%

② 全体の寸法

前述のとおり「DOT BOX」は大・中・小の 3 サイズ展開としている。寸法は，中サイズを「A4 ファイルサイズが楽に入る」かつ「輸送用段ボールへの収まりが良い」という基準で決定し，これを基準に大と小のサイズを決定した。提案時は，各サイズを積み重ねたり並べたりした際に美しくなるよう，一辺の寸法を統一した設計であった。使用上のメリットから，小サイズについては，大，中サイズの中に収納可能な「入れ子」式に修正した。

以上の 2 点の課題解決を経て「DOT BOX」の製品化に至った（図 4)。

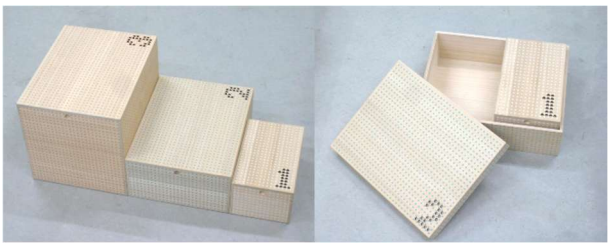


図 4　完成した「DOT BOX」

「DOT BOX」は，意匠権の保護を目的として増田桐箱店と福岡県が共同出願し，ドットの色を指定しない全体意匠として出願・登録された[2)]。

2-4 考察

今回の増田桐箱店の製品開発において他の企業と比較して特徴的であったのは，「桐箱」という形状や素材が厳密に定められた商材が対象であった点である。一般的な桐箱は直方体でデザインの自由度が低い。加えて，市場には安価な競合品が多く，増田桐箱店の製品を選んでもらうためには，単なる箱としての機能を超えた付加価値が不可欠であった。

これらの課題に対し，我々は，箱の形状自体ではなく「表面の装飾」をデザインの中心に据え，提案寸法の根拠や桐箱の特徴（調湿効果・高級感）を活かす収納用途のアイデアの提供をデザイン事業者に求めた。デザイン仕様書はデザイン事業者に全てを委ねる形となったが，敢えて課題を与えることでデザイン事業者の創作意欲を掻き立て，結果的には過去に NIKAWA 事業に参加した経験を持つ優秀なデザイン事業者とのマッチングに成功した。

これらの結果を踏まえ，今後のデザイン仕様書や製品開発では，以下 2 点の工夫が必要であると考える。第一に，今回のように形状や素材に強い制約がある商材の場合，デザイン仕様書に「なぜその寸法なのか」といった具体的な問いかけや，「素材の特性を活かした付加価値の創出」という課題を明確に提示する。これにより優秀なデザイナーとの出会いに繋がる可能性が向上する。第二に敢えて難しい課題を提示する。多少難しい課題であっても能力の高いデザイナーは応募することが明らかになったことから，デザイナーの創造性を刺激し，より革新的なデザインを引き出すことは重要なポイントであると考えられる。

3 まとめ

増田桐箱店は本事業へ参加し，製品開発グループの協力を得て，「桐箱になじみのない20～30代に向けた，レーザー加工や印刷等で加飾され，これら世代が目を惹くデザインの桐箱3サイズ（大・中・小）」という製品コンセプトを構築した。更にそのコンセプトに基づいたデザインをスーパーユーデザイン株式会社が担当して「DOT BOX」を製品化した。

事業終了後，増田桐箱店は，ワークショップイベントを皮切りに「DOT BOX」に対するプロモーション活動を開始しており，今後の販売につなげていく計画である。

4 参考文献

1)石川 弘之，隈本 あゆみ，西村 博之，青木 幹太，酒見 史裕，酒見 典広，田中 敏憲：福岡県工業技術センター研究報告，No30，pp. 21-24(2020)
2)意匠登録第1823586号

福岡県家具ブランド力向上支援事業
製品企画力高度化支援事業における製品開発事例
－現代のモダンなリビング空間にマッチするラタン製品の開発－

隈本 あゆみ[*1]　楠本 幸裕[*1]　本 明子[*1]　井上 友子[*2]　鹿田 和正[*3]　石橋 清志[*4]

The Project with which it's Supported to Improve the Furniture Branding. The Example Product Development by the Project with which its Supported to Advance the Product Planning Capability

- Development of Rattan Products which is Matching at Modern Living Spaces -

Ayumi Kumamoto, Yukihiro Kusumoto, Akiko Moto, Tomoko Inoue, Kazumasa Shikada and Kiyoshi Ishibashi

株式会社鹿田産業は，竹すだれ等のコントラクト製品とラタン家具の企画・販売を主力とする企業である。従来のラタン家具は雑誌通販が主な販売ルートで，薄利多売の販売戦略によってコストを抑えた昔ながらの製品が多く「ラタン＝古臭い」というイメージが定着していた。この状況を打破するため，2023 年に高級ブランド「鹿田室礼」を立ち上げたが，通販商材とのデザインの乖離が課題であった。そこで，「福岡県家具ブランド力向上支援事業 製品企画力高度化支援事業」に参加し，「鹿田室礼」と通販商材とのデザインの乖離を埋める製品開発に着手した。その結果，「シンプルな中に上品さと可愛らしさを感じさせるモダンなデザイン」というコンセプトを構築し，株式会社石橋清志建築設計事務所のデザインを元に試作を行い「tu-tu-mu〈包む〉チェア」として製品化した。

1 はじめに

本報告は，「福岡県家具ブランド力向上支援事業 製品企画力高度化支援事業」（以下，「本事業」という）における株式会社鹿田産業（以下，「鹿田産業」という）の製品開発の取り組みを報告する。本事業の目的や概要については，令和2年度研究報告掲載「福岡県家具ブランド力向上支援事業 製品企画力高度化支援事業における製品開発事例（その1）」[1)] 内の「1 はじめに」と「2 方法」を参照されたい。また，本事業において鹿田産業の製品開発に関わった製品開発グループおよびデザイン事業者のメンバーを表1に示す。

表1　製品開発グループとデザイン事業者

製品開発グループ	デザイン事業者
・九州産業大学 芸術学部 井上友子教授 ・株式会社鹿田産業 ・インテリア研究所	・株式会社石橋清志建築設計事務所

*1 インテリア研究所
*2 九州産業大学
*3 株式会社鹿田産業
*4 株式会社石橋清志建築設計事務所

2 事業の取り組み内容

2-1 製品開発の目的

鹿田産業は，竹すだれ等のコントラクト製品やラタン家具の企画・製造・販売を主力とする従業員 17 名（事業参加当時）の企業である。コントラクト事業を展開する傍ら，通販市場に向けたラタン製品の企画販売も行っている（図 1）。2023 年には，会社全体を挙げたブランド構築の一環として有名デザイナーを起用し，高級ホテルや富裕層をターゲットとした高級ブランド「鹿田室礼（しかだしつらい）」を立ち上げた（図 2）。しかし，従来の低価格でデザイン性の低い通販商品と，ハイブランド「鹿田室礼」との間に顕著なデザイン乖離が生じていた。この乖離を埋めるため，本事業に参加し，低価格帯の通販商品とハイブランド「鹿田室礼」の中間価格帯に位置する製品の開発を行うこととなった（図 3）。



図 1 低価格帯の通販製品



図 2 ハイブランド「鹿田室礼」

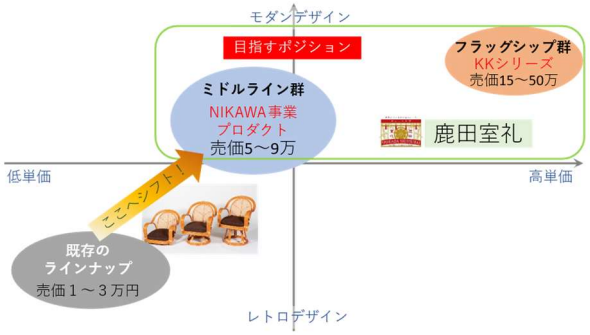


図 3 開発製品のイメージ

2-2 製品コンセプトの構築とデザイン事業者の選定

製品コンセプトの構築は鹿田産業が中心となり，製品開発グループが適宜サポートする体制で進めた。今回開発する製品は，社内では「ミドルライン製品」，販売媒体は「通販雑誌」と位置付けた。そこで，デザイン事業者には，鹿田産業が求めるインテリアイメージを提示し，それに合うアイテムのデザイン提案を求める手法を採用した。鹿田産業のメンバーがインテリアイメージ画像を集め共有する作業を通じて，開発製品のターゲット層を「40～60 代の経済的に余裕のある女性」とし，「ナチュラルモダンなリビング空間に合うラタン製品」というコンセプトが構築された。

次に，製品開発グループはデザイン仕様書の作成に取り組んだ（図 4）。デザイン仕様書とは，デザイン事業者に委託する製品デザインの内容を詳細に記載するものである。開発グループで議論を重ね，「現代のリビング空間に適したラタン素材インテリア製品」という開発テーマを設定し，これに基づいてデザイン事業者を全国から募集した。

公募の結果，5 社から 8 件の提案が寄せられ，その中から最もコンセプトに合致し，ユニークなデザインを提案した株式会社石橋清志建築設計事務所（大阪府）の「tu-tu-mu<包む>シリーズ」（図 5）が審査委員会によって採択された。なお，単年度の開発期間である本事業内で開発対象となったのは，「tu-tu-mu<包む>シリーズ」の中でもチェアとランタン（フロアライト）の 2 製品である。本報告では，特に課題が多かったチェアの開発について詳述する。

（デザイン仕様書の主な仕様）

ターゲット

・40～60代女性，経済的に余裕のある女性

・「家庭画報」や「婦人画報」（質の高い衣食住の通販雑誌）を利用している，愛読している

デザイン

・ナチュラルモダンなリビング空間に合う

・ラタンの曲げ限界を考慮

・3辺合計250 cm 以内（梱包）

バリエーション

・イスの提案はマスト

・他に 3～5 点のアイテム（スツール，テーブル，ランプシェード etc）

図 4　仕様書の概要

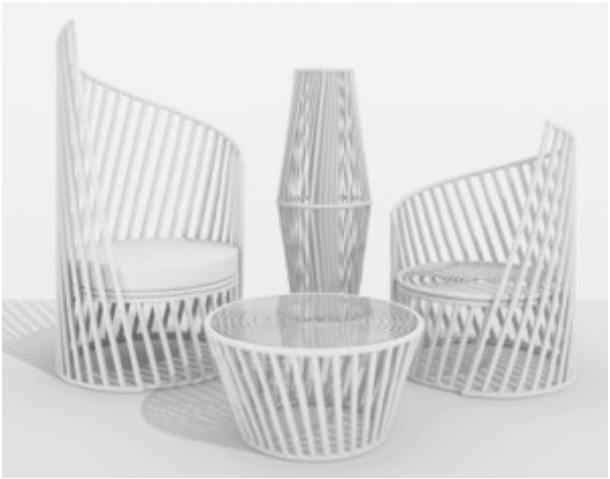


図 5 tu-tu-mu<包む>シリーズ

2-3 デザインの具現化(製品の製作)

① デザイン案の具現化

株式会社石橋清志建築設計事務所が提案した「tu-tu-mu<包む>チェア」は，円柱状の座面部分と，それを包み込む背もたれ部分の 2 つの部材から成るデザインであった。当初，斜めのスポークは座面部分と背もたれ部分ともに同じ方向で構成されていたが，これで

は十分な強度を確保できないと判断し，座面部分のスポークを背もたれ部分と逆方向にする修正を行った。

次に，提案当初のデザインでは，背もたれ部分の最上部に力が加わった際に，ラタン特有の「しなり」が製品の安全性を損なう恐れがあった。この安全性を確保するため，サイズ変更を実施した。

② 使い心地の検討

「tu-tu-mu<包む>チェア」は，座面と背もたれにクッションを取り付けることで，四季を通じて快適に使用できる仕様を目指した。そこで，ラタン製品の製造を行っているインドネシア工場が入手可能なクッション材と生地を選定し，実際に座った際の快適性を考慮した検討を重ねた。

以上の 2 点の課題解決を経て，「tu-tu-mu<包む>チェア」の製品化に至った（図 6)。

「tu-tu-mu<包む>チェア」は，意匠権の保護を目的として，鹿田産業と福岡県の共同出願という形で，特に特徴的な背もたれ部分のみの部分意匠を出願し，登録された[2)]。



図 6　完成した「tu-tu-mu<包む>チェア」

2-4 考察

今回の鹿田産業の製品開発において，本事業の他の支援企業と比較して特徴的であったのは，一般的な木材とは異なる性質を持つ「ラタン」を主要素材とし，かつ「通販雑誌」を主要な販売媒体とする点であった。ラタンはその柔軟性と加工性から独特の曲線美を生み出す一方で，強度設計には専門的な知見が必要となる。また，通販雑誌に掲載されるためには，バイヤーからの厳しい価格評価をクリアする必要があり，デザイン性に加え価格を抑える工夫が求められた。

これらの課題に対し，以下のように対処した。ラタンの特徴を理解するため，鹿田産業のラタン専門知識を持つインドネシア工場の担当者とデザイナーとの間で綿密な打ち合わせを重ねた。これにより，デザイナーの意匠を尊重しつつも，強度を確保した製品設計を実現した。また，価格面については，まずデザイナーが求める品質のプロトタイプを製作し，そのデザインを損なわない範囲で，鹿田産業がバイヤーに響く価格帯までコストを抑え，素材の再選定を行った。このアプローチにより，デザイン性と市場性の両立を図った。

これらの対応を踏まえ，今後の製品開発では，特に以下 2 点の対策を講じる必要があると考えられる。第一に，デザイナーが不慣れな素材を扱う場合は，今回のように素材に精通したメーカー担当者との連携を密にし，初期段階から技術的な実現可能性と制約について詳細な議論を重ねることが不可欠である。第二に，デザインの理想と販売目標価格との間に乖離が生じた場合，単にコストダウンを指示するのではなく，「この理想のデザインを維持しつつ，市場競争力のある価格に抑えるためにはどのような選択肢があるか」という具体的な問いをデザイナーに投げかけ，共に最適な解決策を探求するプロセスを強化するべきである。これにより，より高度なデザイン性と市場性を両立させた製品開発が可能となることを期待できる。

3 まとめ

鹿田産業は本事業へ参加し，製品開発グループの協力を得て，「現代のリビング空間に適したラタン製品」という製品コンセプトを構築した。更にそのコンセプトに基づいたデザインを株式会社石橋清志建築設計事務所が担当することで，「tu-tu-mu<包む>チェア」を製品化した。

事業終了後，鹿田産業は量産に適した価格設定となるように材料の調整を行い，2026年5月を目標に通販雑誌へ売り込みを行う予定である。

4 参考文献

1)石川 弘之，隈本 あゆみ，西村 博之，青木 幹太，酒見 史裕，酒見 典広，田中 敏憲：福岡県工業技術センター研究報告，No30，pp. 21-24(2020)

2)意匠登録 第1819104号

福岡県家具ブランド力向上支援事業
製品企画力高度化支援事業における製品開発事例
―「何に塗る？」漆で仕上げるプロダクト（アイテム・デザイン）の開発―

中嶋 観司[*1]　隈本 あゆみ[*1]　本 明子[*1]　井上 友子[*2]　近松 敏夫[*3]　溝口 瑛[*4]　溝口 京子[*4]

The Project with which it's Supported to Improve the Furniture Branding. The Example Product Development by the Project with which its Supported to Advance the Product Planning Capability

- “Which are your lacquer on” Product Development (Items/Designs) that Finished with Urushi-

Kanshi Nakajima, Ayumi Kumamoto, Akiko Moto,Tomoko Inoue, Toshio Chikamatsu, You Mizoguchi and Kyoko Mizoguchi

漆工房 岩弥は国指定伝統的工芸品「八女福島仏壇」の製造販売を主力とし，文化財や寺院仏閣の修復を行う事業者である。オリジナル製品として，アクセサリーや小型仏壇等の製造販売も行っている。デザインや設計を代表の近松敏夫氏が行っているが，新たなニーズを捉えた新製品の開発が課題となっていた。そこで，「福岡県家具ブランド力向上支援事業 製品企画力高度化支援事業」に参加し，デザイン性の高い製品の開発に着手した。その結果，「漆塗りにこだわり，美しく上質で，質感や手触りの良さを感じられる身近な漆のプロダクトのデザイン」というコンセプトを構築し，スタヂオ・ヨー（溝口 瑛・溝口 京子）のデザインをもとに試作を行い，「ハンギングモビール time」として製品化した。

1 はじめに

本報告は，「福岡県家具ブランド力向上支援事業 製品企画力高度化支援事業」（以下，「本事業」という）における漆工房 岩弥（以下，「岩弥」という）の製品開発の取り組みを報告する。本事業の目的や概要については，令和2年度研究報告掲載「福岡県家具ブランド力向上支援事業 製品企画力高度化支援事業における製品開発事例（その1）」[1)] 内の「1 はじめに」と「2 方法」を参照されたい。また，本事業において岩弥の製品開発に関わった製品開発グループおよびデザイン事業者のメンバーを表1に示す。

表1　製品開発グループとデザイン事業者

製品開発グループ	デザイン事業者
・九州産業大学 芸術学部 井上友子教授 ・漆工房 岩弥 ・インテリア研究所	・スタヂオ・ヨー

*1 インテリア研究所
*2 九州産業大学
*3 漆工房 岩弥
*4 スタヂオ・ヨー

2 事業の取り組み内容

2-1 製品開発の目的

岩弥は国指定伝統的工芸品「八女福島仏壇」の製造販売を主力とし，文化財や寺院仏閣の修復を行う傍ら，オリジナル製品として，アクセサリーや小型仏壇等の製造販売を行っている（図 1）。デザインや設計は，同社代表の近松敏夫が行っており，新たなニーズを捉えた新製品の開発に苦慮していた。岩弥は漆の良さを広め伝統工芸技術を活かした職人の手仕事を次世代に残す目標を持って，本事業への参加により，美しく上質で質感の良さが感じられる身近な漆のプロダクトを新たなオリジナル商品として開発することとなった。



図 1 オリジナル製品

2-2 製品コンセプトの構築とデザイン事業者の選定

製品コンセプトの構築は岩弥が中心となり,製品開発グループが適宜サポートする体制で進められた。今回開発する製品は,伝統工芸技術を活かした職人の手仕事を次世代に残すため,美しく上質で,質感の良さが感じられる身近な漆のプロダクトの提案を求める手法を採用した。岩弥から「どのような商品を作っていきたいか」「仕様書に何を記載するのか」のヒアリングを行った結果,「漆塗りにこだわり,美しく上質で,質感や手触りの良さを感じられる身近な漆のプロダクトのデザイン」というコンセプトが構築された。

コンセプト構築の結果からはモノやターゲットを絞ることができないため,岩弥の仕上げの技法やアイテムのサイズ,形状の制約などを提示し,具体的な製品の限定はせず,デザイナーの意欲を掻き立てるような仕様書を目指した。

次に,製品開発グループはデザイン仕様書の作成に取り組んだ（図 2)。デザイン仕様書とは,デザイン事業者に委託する製品デザインの内容を詳細に記載するものである。開発グループで議論を重ね,「「何に塗る？」漆で仕上げるプロダクト（アイテム・デザイン)」という開発テーマを設定し,これに基づいてデザイン事業者を全国から募集した。

(デザイン仕様書の主な仕様)

ターゲット

・若い世代からシニア世代まで
・良質のものを求める方,工芸好きの方
・プレゼントやお土産,自分のご褒美として

デザイン

・日常生活で使用できるプロダクト
・アクセサリーサイズから両手に納まる（30 cm 角程度）のサイズ感
・アイテムは自由な発想での提案を求める
・「こんなものも漆を使える！」という意外性のある提案
・販路の提案もあるとうれしい

図 2　仕様書の概要

公募の結果,6 社から 6 件の提案が寄せられ,その中から最もコンセプトに合致し,漆塗りのプロセスにアプローチした提案を行ったスタヂオ・ヨー（福岡県）の「ハンギングモビール　time」（図 3）が審査委員会によって採択された。



図 3 ハンギングモビール　time

2-3 デザインの具現化(製品の製作)

① デザイン案の具現化

スタヂオ・ヨーが提案した「ハンギングモビール time」は,漆塗りの工程を表現した螺旋が上から下へと流れるデザインであった。当初,塗りの工程を表す球は 12 個であったが,スタヂオ・ヨーによる模型検証の結果,1 個目の下に 13 個目を連結させ,視覚的なバランスを調整した。

② 球およびリング部分の検討

次に,プロトタイプを製作し,球,リングの大きさを検討した。検証の結果,提案当初の寸法である 30 mm,および塗りの工程がより分かりやすい 40 mmを球の直径の候補とし,最終的には 40 mmだと大きすぎる印象があったことから,家庭での設置を考えた際に収まりがよい直径 30 mmを採用した。

リング部分については,加工は外注とし,塗装を岩弥が行った。ストッパー（留め具）については汎用の工業用部材を転用して,穴あけ,切断の加工は岩弥で行い色付けは外注とした。

以上の 2 点の課題解決を経て,「ハンギングモビール time」の製品化に至った（図 4)。

「ハンギングモビール　time」は,意匠権の保護を目的として,岩弥と福岡県の共同出願という形で,漆塗りの工程が分かる塗り見本の球体が螺旋状に並んだ意匠を出願し,登録された[2)]。



図４　完成した「ハンギングモビール　time」

2-4 考察

今回の岩弥の製品開発において,他の企業と比較して特徴的であったのは,「漆塗り」という伝統技術そのものが商材であるという点である。また,具体的な製品を限定せず,「漆塗り技術を活用した新しいプロダクト」をデザイン公募する,という NIKAWA 事業にとって初の試みであったことも特徴的であった。

これらの課題に対し,我々は,デザイン仕様書に漆塗りの工程や技術的な特徴を丁寧に提示し,デザイナーが漆という素材を深く理解できるよう努めた。その上で,具体的な製品の限定はせず,「大まかなサイズ感」を示し,その制約の中でデザイナーから多様なアイテムを提案してもらう形をとった。その結果,提案内容には幅があったものの,最終的に 6 件の魅力的なデザイン案が集まった。これは,技術先行のアプローチであっても,デザイナーから多様なアイデアを引き出せる可能性を示している。

これらの対応を踏まえ,特定の技術や素材からデザインを公募する形式では,ターゲットユーザーや販売チャネルといったマーケティングに関する具体的な制約をあえて設けないことで,デザイナーが技術の可能性を自由に探求できる余地を与えることが大切であることが分かった。また,この方法を NIKAWA 事業のデザインマッチングにおける新たな可能性として,大いに活用できることが確認できた。

3 まとめ

岩弥は本事業へ参加し,製品開発グループの協力を得て,「漆塗りにこだわり,美しく上質で,質感や手触りの良さを感じられる身近な漆のプロダクトのデザイン」という製品コンセプトを構築した。更にそのコンセプトに基づいたデザインをスタヂオ・ヨーが担当することで,「ハンギングモビール　time」として製品化した。

事業終了後,岩弥はスタヂオ・ヨーと直接契約を結び,パッケージの制作,説明紙制作,販売プロモーション（動画）等に取り組んでいる。

4 参考文献

1)石川　弘之，隈本　あゆみ，西村　博之，青木　幹太，酒見　史裕，酒見　典広，田中　敏憲：福岡県工業技術センター研究報告，No30，pp. 21-24(2020)
2)意匠登録 第1820668号

隔膜電解を用いた老化クロムめっき液からの不純物除去に関する検討

古賀 弘毅[*1]　吉玉 和生[*2]

Study on Impurity Removal from Aged Chromium Plating Solution Using Diaphragm Electrolysis

Hiroki Koga, Kazuo Yoshitama

老化クロムめっき液を工場内リサイクルするための手段として，陽イオン交換膜を使用した隔膜電解法により不純物を除去しクロムめっき廃液を再生する方法を検討した。フロー型の隔膜電解槽を試作し，老化クロムめっき液を陽極室，希硫酸を陰極室に充填して隔膜電解を行ったところ，老化クロムめっき液中の鉄イオンおよびクロム（Ⅲ）イオンを陰極槽側に除去することが可能であった。再生されたクロムめっき液を用いてめっきを行ったところ，めっき被膜中の鉄濃度は大きく低下し光沢度が向上した。また，めっきの際の定電流電解における電圧が，老化めっき液使用時と比べて再生めっき液では大幅に低下した。

1 はじめに

クロムめっきは金型やシャフトへの硬質膜の付与やメタリックな外観を付与する装飾のために行われる。硬さや外観の機能性，量産性，コスト面のバランスに優れており欠くことができない技術である[1)]。クロムめっきでは密着性を高めるために逆電解による素材表面の活性化が行われており，この時，素材成分が溶解して鉄イオン等がめっき液へ混入する。高濃度に鉄イオン等が混入しためっき液は浴電圧の上昇や，ブツや変色等のめっき不良の原因となることから，めっき液の更新が必要となる[2,3)]。めっき液には有害な六価クロムが使用されており，めっき液の更新時など大量にめっき廃液が生じる場合は，その処理を産廃業者へ委託する必要がある。産廃処理費と新規めっき液の建て替えのための材料費が必要となり，クロムめっき浴の更新コストはめっき業者の大きな負担となっている。老化クロムめっき液を工場内でリサイクルすることができれば，めっき事業者の産廃コストだけでなく原料コストをも低減し，ひいては生産コストを改善することが可能となる。

本研究では，老化クロムめっき液の工場内リサイクル方法を開発するため，陽イオン交換膜を使用した隔膜電解によって老化クロムめっき液から不純物を除去し，再びめっき液として再生する方法を検討した。

*1 機械電子研究所
*2 吉玉精鍍(株)

2 実験方法

2-1 逆電解によるクロムめっき液への不純物の混入実験

クロムめっき前の逆電解時に被めっき物である鉄板からめっき液に溶け込む鉄イオンの量を把握するため，鉄陽極を使用した電解試験における通電電気量とめっき液中への鉄イオン溶出量の関係を調査した。使用しためっき液はサージェント浴とした。めっき液組成およびめっき条件を表1に示す。電極には陰極・陽極ともにハルセル試験用鉄板を67 mm×20 mmの大きさに切断し，塩酸浸漬による活性化処理を施して使用した。鉄溶出量は電子天秤（メトラー・トレド製，ME204T）を使用し，試験前後の鉄陽極の重量差から算出した。

表1 鉄陽極の電解溶出試験条件

めっき液組成	CrO_3　200 g･dm^{-3}
	H_2SO_4　2 g･dm^{-3}
浴温	常温(25℃)
陰極･陽極	ハルセル試験鉄板(67 mm×20 mm)
電極面積	50 mm×20 mm(0.1 dm^{-2})
電極間距離	60 mm
電解時間	10 min
陽極電流密度	10, 20, 30, 40 (A･dm^{-2})
(通電電気量)	(600C) (1200C) (1800C) (2400C)

2-2. フロー型隔膜電解槽を用いた電解実験

試作したフロー型隔膜電解槽を使用して，老化クロムめっき液中の不純物除去を試みた。使用したフロー型隔膜電解槽の概略図を図1に示す。容器は透明塩化

ビニール樹脂で作製し，イオン交換膜にはフッ素系高分子電解質膜を使用した。陰極および陽極には安価な不溶性極として鉛板を使用した。装置構成の概略を図2に示す。陽極室電解液には吉玉精鍍（株）から提供された老化クロムめっき液（表2）を使用し，0.5 dm^3をチューブポンプで循環した。陰極室電解液には100 $g \cdot dm^{-3}$硫酸0.5 dm^3をチューブポンプで循環した。電解条件を表3に示す。電流密度を1～20 $A \cdot dm^{-2}$に変化させて，不純物成分の挙動を調査した。不純物除去効果は陰極電解液を分析することで評価した。めっき液中不純物の分析にはICP発光分光分析装置（堀場製作所製，ULTIMA2C型）を使用した。

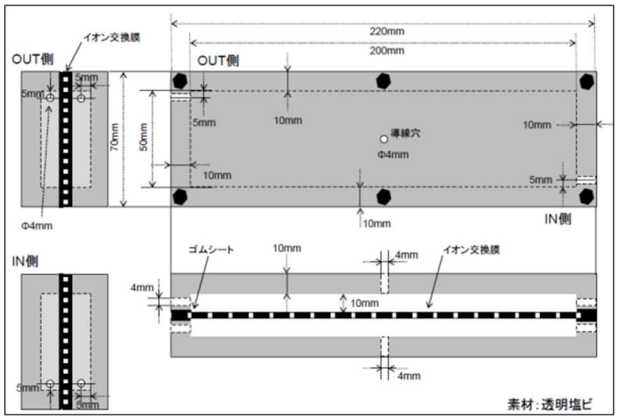


図1 フロー型隔膜電解槽の概略図

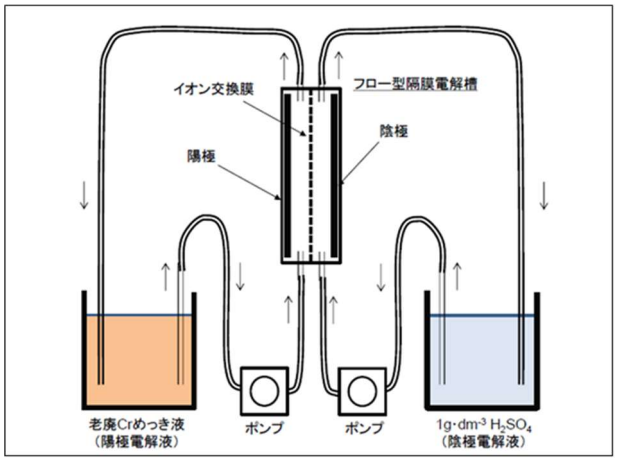


図2　電解実験装置の構成図

表2 使用した老化クロムめっき液の組成分析結果

成分	濃度 / $g \cdot dm^3$
CrO_3	240
Cr^{3+}	66.1
Fe^{3+}	27.3
Cu^{2+}	4.8

表3 フロー型隔膜電解槽を用いた電解実験条件

項目		内容
陽極室	容積	50 cm^3（50mm×200mm×5mm）
	陽極	鉛板（電極面積：50mm×200mm）
	電解液	老化クロムめっき液 （吉玉精鍍サージェント浴）
	送液速度	35 $cm^3 \cdot min^{-1}$
陰極室	容積	50 cm^3（50mm×200mm×5mm）
	陽極	鉛板（電極面積：50mm×200mm）
	電解液	100 $g \cdot dm^{-3}$ H_2SO_4
	送液速度	35 $cm^3 \cdot min^{-1}$
極間距離		10 mm
イオン交換膜		フッ素系高分子電解質膜
電解電流密度		1，5，10，20 （$A \cdot dm^{-2}$）
電解時間		180 min

2-3. 再生浴のハルセル試験

陽イオン交換膜を使用した隔膜電解法によって不純物除去したクロムめっき液（再生浴）の再利用の可能性を評価するためハルセル試験を行い，劣化浴から得られるめっきとの比較を行った。再生浴は劣化浴を隔膜電解装置により陰極電流密度20 $A \cdot dm^{-2}$で3時間処理したものを使用した。試験条件を表4に示す。試験容器には山本鍍金試験器製のハルセル試験器（B-55）を使用した。得られた試験片はめっき外観を比較するとともに，被膜の組成分析も行った。組成分析にはグロー放電発光分析装置（堀場製作所製，JY5000RF型，以下GD-OESと略す。）を使用した。また，定電流電解となる電解時の電圧についても比較した。

表4 ハルセル試験条件

項目	内容
めっき液	老化クロムめっき液 ① 劣化浴（処理なし） ② 再生浴（隔膜電解処理品）
浴温	50 ℃
陰極	ハルセル用黄銅板
陽極	鉛板
全電流	5 A
電解時間	2 min
撹拌	なし

3 結果

3-1 逆電解によるクロムめっき液への不純物の混入結果

鉄陽極を使用した場合のクロムめっき時の鉄溶出量を分析した結果を図3に示す。通電電気量の上昇とともに鉄溶出量は直線的に増加した。通電電気量が2,400 Cの時の鉄溶出量が7.0 mgであった。通電電気量（X）と鉄溶出量（Y）の間には，Y（mg）= 0.003X + 0.15の関係が成立した。陽極反応伴う鉄の溶解量は，全ての電流が鉄の溶解（$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$）に使用されたと仮定した場合，通電電気量1ファラデー（1 F = 96,500 C）当たり0.5 mol（27.9 g）であることから，今回の通電電気量2,400 Cでは計算上698.9 mgとなるはずであるが，実際は7.0 mgであったことからほとんどの電子は酸素発生に使用されたと考えられる。

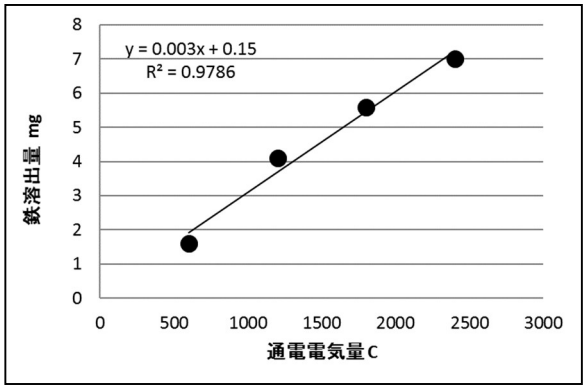


図3 通電電気量と鉄溶出量の関係

3-2 フロー型隔膜電解槽を用いた不純物除去実験結果

フロー型隔膜電解装置を用いて，老化クロムめっき液からの不純物除去試験を行った。隔膜電解によって老化クロムめっき液中の不純物成分のどの程度が陰極室の回収液に移動するかを評価した。不純物として三価クロム，鉄を測定対象とした。180分間電解した時の回収液中の三価クロムの濃度変化を図4，鉄の濃度変化を図5に示す。60分まではどちらも直線的に濃度が増加したが，60分以降は徐々に濃度上昇が緩やかになった。三価クロムと鉄を比較した場合，三価クロムの移動量が多かった。一方，何れの成分も電流密度が高くなると陰極側への移動量が増大するが，三価クロムの移動量は電流密度に比例しなかったが，鉄は電流密度と移動量がほぼ比例していた。これは，陽極反応により三価クロムがクロム酸に酸化されるためと考えられる。直線関係のある60分までの傾きから算出すると，各成分の除去速度は電流密度20 $A \cdot dm^{-2}$の場合，三価クロムが1.7 $g \cdot dm^{-2} \cdot hr^{-1}$，鉄が0.6 $g \cdot dm^{-2} \cdot hr^{-1}$と見積もられた。

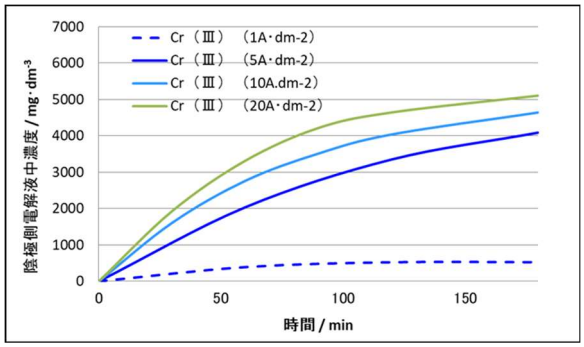


図4 老化クロムめっき液の隔膜電解処理による陰極室回収液中のクロム（Ⅲ）イオンの濃度変化

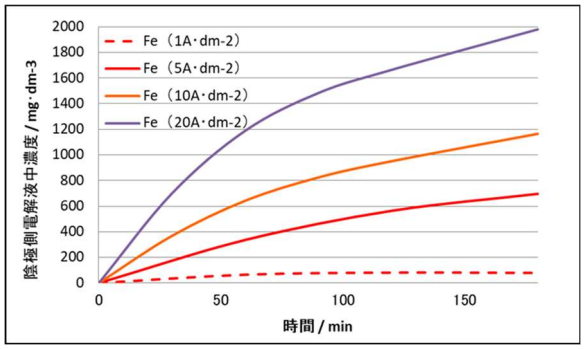


図5 老化クロムめっき液の隔膜電解処理による陰極室回収液中の鉄イオンの濃度変化

3-3 ハルセル試験結果

老化クロムめっき液についてハルセル試験を行い，劣化浴と再生浴から得られためっき被膜を比較した。試験片外観および被膜組成分析の結果を図6，図7に示す。劣化浴から得られためっき被膜は高電流密度側から約13 $A \cdot dm^{-2}$までめっきの電着が確認されたが，めっき部に光沢がなく，未着部分は弱電解による不純物の電着によりやや黒ずんだ色合いとなった。めっき被膜の組成分析結果からめっき厚みは約1 μmであり，皮膜中に約1～2 %の鉄が含まれていた。これはめっき液中の鉄がクロムと共に電着したため考えられる。一方，再生液については光沢のあるめっき被膜の形成が約10 $A \cdot dm^{-2}$まで確認された。めっき被膜の組成分析の結果からめっき厚みは約0.7 μmであり，処理前よりも薄くなった。めっき中に鉄はほとんど検出されず，不純物除去の効果が明瞭に現れた。めっき未着部分についてもきれいな真鍮色を示しており，不純物の

電着が少なかったものと考えられた。処理後のめっき液では付き回りが狭く膜厚が薄くなったのは，再生浴中の三価クロム量が減少したためと考えられた。ハルセル試験中の電圧変化を比較した結果を図8に示す。再生浴では劣化浴と比べて電圧が約50%降下した。

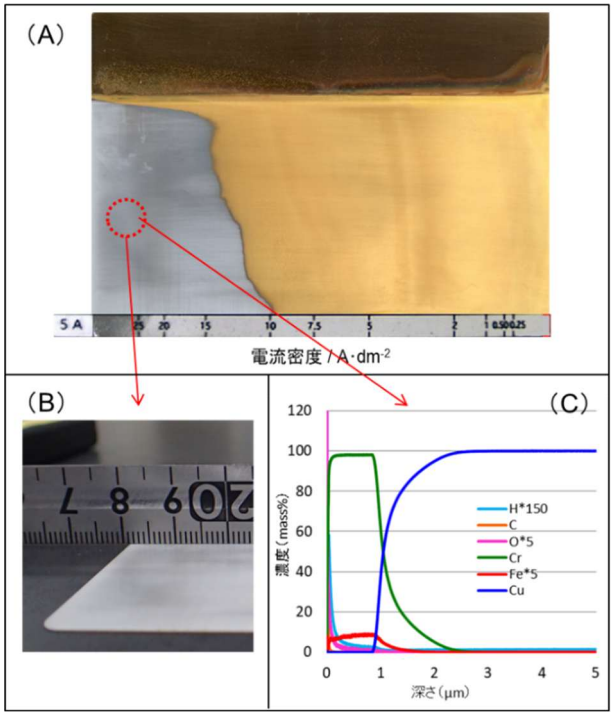


図6 劣化浴のハルセル試験後の試験片外観（A），めっき部拡大（B）およびGD-OES分析結果（C）

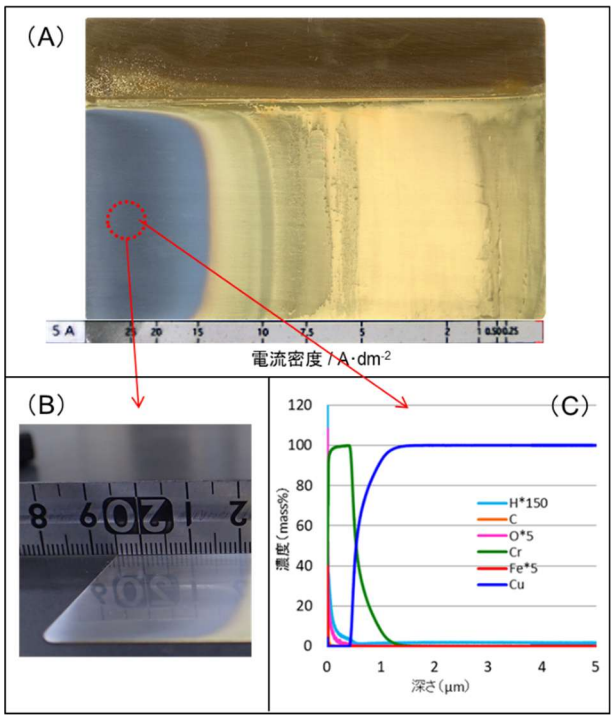


図7 再生浴のハルセル試験後の試験片外観（A），めっき部拡大（B）およびGD-OES分析結果（C）

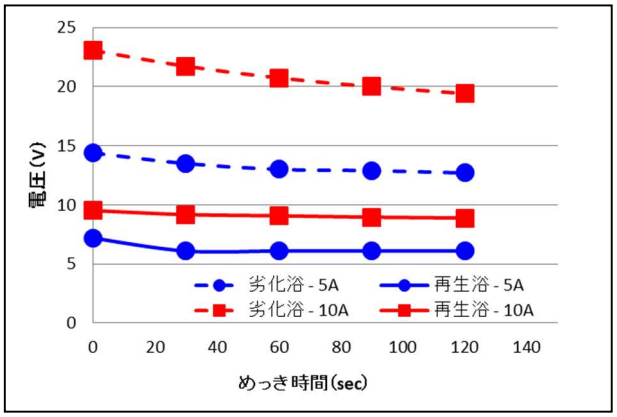


図8 劣化浴及び再生浴のハルセル試験時の電圧変化

4 まとめ

老化クロムめっき液から不純物を除去する方法として，陽イオン交換膜を隔膜に用いたフロー型隔膜電解法を検討し，以下の知見を得た。

・めっき前処理の逆電解処理を模した鉄陽極によりめっき浴への鉄の溶解実験を行った結果，通電電気量と鉄溶出量の間に比例関係が成立し，めっき回数が増えるごとにめっき液の鉄の蓄積量が増大することが示唆された。

・フロー型隔膜電解槽を試作し老化クロムめっき液を電解処理したところ，三価クロム，鉄の除去が可能であり，電流密度20 A·dm^{-2}では，除去速度は三価クロムが1.7 g·dm^{-2}·hr^{-1}，鉄が0.6 g·dm^{-2}·hr^{-1}であった。

・劣化浴，再生浴ついてハルセル試験を行い，得られためっき被膜を観察・分析した。劣化浴では被膜に光沢がなかったが，再生浴では光沢が確認された。GD-OESの結果から，劣化浴ではめっき被膜中の鉄の共存を確認したが，再生浴では鉄が大幅に低下した。

・ハルセル試験時の定電流電解における印加電圧を比較したところ，電流密度10 A·dm^{-2}の場合，劣化浴が20 V程度であったのに対し，再生浴では9 V程度であった。このことから，老化めっき液の処理によってめっき時の消費電力が半減することが明らかとなった。

5 参考文献

1) 森河 務：表面技術，56巻，6号，pp. 308-314 (2005)

2) 渡辺 和夫：表面技術，50巻，2号，pp. 149-154 (1999)

3) 川崎 元雄：実務表面技術，76巻，11号，pp. 554-561 (1976)

レーザ溶接の技術蓄積と最適条件の検討
－レーザによる鉄/アルミニウムの突合せ溶接－

小川　俊文[*1]

Accumulation of LASER Welding Technology and Examination of Optimal Conditions
- LASER Butt Welding with Iron/Aluminum -

Toshifumi Ogawa

構造物の軽量化が進められており多様な異材接合が要求されている。一方，近年は低価格かつ多機能なレーザ溶接機が登場しており，国内のレーザ溶接機普及は更に進むことが予想される。本研究では，ディスクレーザ発振器を用いたレーザ溶接システムにより，板厚1.0 mmの鉄/アルミニウムの突合せ溶接（開先I型，下向き）に関する基礎データ習得を行った。レーザ出力，溶接速度，溶接加工位置，レーザビームのコアとリングのパワー配分比率を最適化することで，角変形が無く，溶接部にボイド欠陥のない溶接ビードを得ることが出来た。

1　はじめに

アーク溶接やティグ溶接は高度な技術が求められ，技術の習得に長い時間を要する。一方，レーザ溶接は，一度溶接条件を確立すれば，誰でも短時間の訓練により技術を習得でき，基準を満足する溶接が可能である。近年，価格が安く機能も充実したレーザ溶接機が登場していることから，今後は国内におけるレーザ溶接機の普及が更に進むものと考えられる。

自動車を始めとする世の中の構造物は軽量化が進められている。金属系構造物の多くに鉄鋼材料とアルミニウム系材料が使用されているため，鉄/アルミニウムの異材接合に関する研究が行われている[1)]。そこで本研究では，レーザによる鉄/アルミニウムの突合せ溶接に関する基礎データ習得を目的とした。

2　実験方法

2-1　供試材料と実験方法

供試材料には，柔らかく，成形性・加工性に優れており，機械，自動車，家電など幅広い分野で使用される冷間圧延工鋼板（SPCC：Steel Plate Cold Commercial）と，加工性，耐食性，溶接性が優れており，日用品や家庭用品，電気器具などに使用される純度99.5 %以上の純アルミニウム板（A1050）を用いた。板厚は1.0 mmとした。

レーザ溶接は，Trumph(株)製 5 kW級ディスクレーザ発振器(TruDisk 5000)，(株)安川電機製 6軸多関節ロボット(MOTOMAN-MC2000 Ⅱ)と2ポジショナー(MOTOPOS-D250B)，Trumph(株)製 加工ヘッド(BEO D-70)で構成されるレーザ加工システムで行った(図1)。レーザ出力は2,000 W，溶接速度100 mm/sに固定し，溶接加工位置とレーザビームのコアとリングのパワー配分比率を変化させて溶接を行った(図2)。サイズ50 mm×100 mmの板材を溶接治具に突合せて固定し，溶接長さ80 mmの突合せ溶接（開先I型，下向き）を行った。溶接雰囲気は，板上面，下面ともアルゴン雰囲気とした。



図1　レーザ加工システム

*1　機械電子研究所

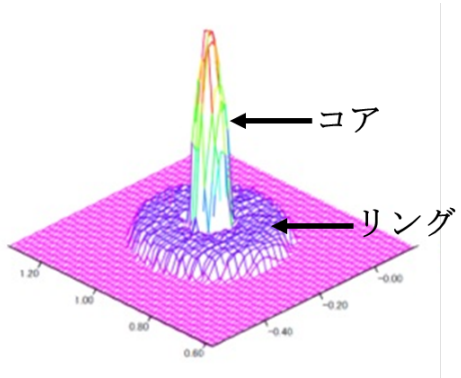


図2　レーザビームのコアとリングの説明

2-2 評価方法

溶接ビードの外観観察は，実体顕微鏡((株)ニコンSMZ745T)で行った。溶接部断面の組織観察は，樹脂埋め鏡面研磨後，実体顕微鏡で行った。溶接部断面における元素マッピング分析は，電子線マイクロアナライザー(日本電子(株) JXA-8200SP)で行った。溶接部断面における硬さ試験は，マイクロビッカース硬さ試験機((株)ミツトヨ HM-100)で行った。

3 結果と考察

3-1 溶接ビード外観

溶接ビードの外観観察は，溶接ビード80 mmの中央部分で行った。観察倍率は10倍とした。溶接加工位置を突合せ面とした場合を図3に示す。パワー配分比コア40 %の場合，表ビード，裏ビード共に良好であった。コア30 %の場合は，溶接ビードが溶接方向に割れていた。コア50 %の場合は，溶接ビードが溶け落ちていた。

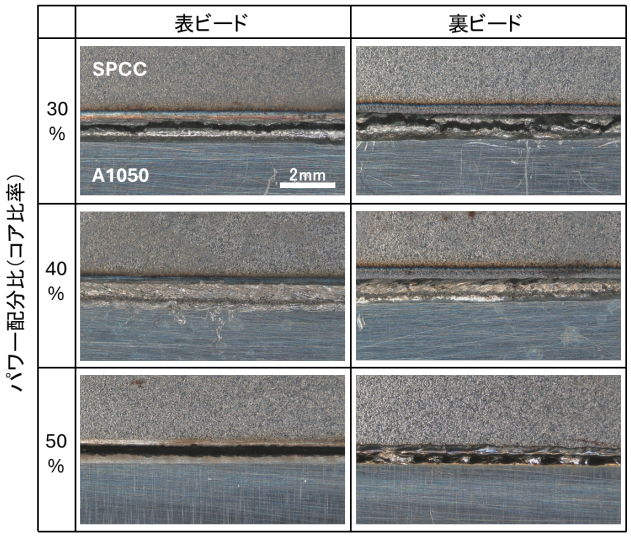


図3　溶接加工位置を突合せ面とした場合の溶接ビード外観の比較

溶接加工位置を突合せ面からA1050側に150 μmシフトさせた場合を図4に示す。パワー配分比が変わっても，図3で観察された溶接方向のビード割れやビード溶け落ちは観察されなかった。しかし，溶接方向に直行する向きにクラックの発生が観察された。

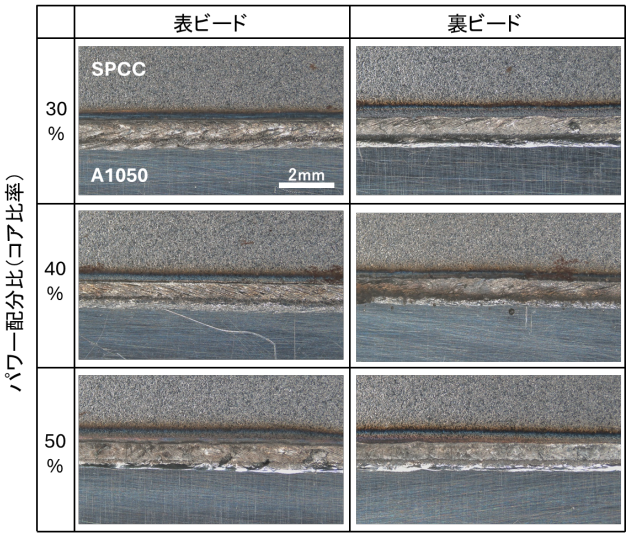


図4　溶接加工位置を突合せ面からA1050側に150 μmシフトさせた場合の溶接ビード外観の比較

3-2 溶接部断面の観察・分析

溶接ビード外観観察結果より，溶接加工位置を突合せ面としパワー配分比コア40 %の場合に，溶接ビード表裏良好で割れや溶け落ちが無かったことから，この試験片について溶接部断面の観察・分析を行った。図5に溶接部断面を実体顕微鏡10倍で観察した結果を示す。断面全体が一直線になっており角変形が無く，溶接部にはボイド欠陥は観察されなかった。

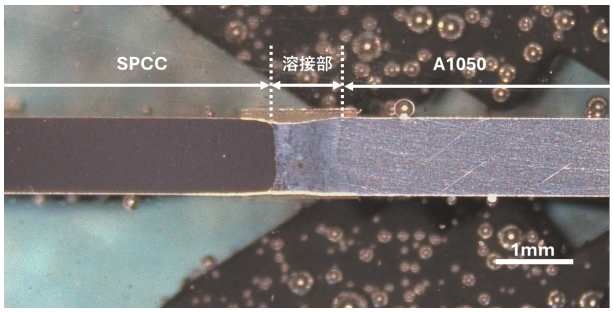


図5　溶接部断面の観察結果

溶接部における鉄(Fe)とアルミニウム(Al)の分布状態を確認するために元素マッピング分析を行った。その結果を図6に示す。Alは，溶接部全域において基材と同程度の強度で分布していたが，Feは，溶接部に部

分的に低い信号強度で分布していた。組成像(COMP)より，溶接部にFeが存在している箇所には，FeとAlの金属間化合物が存在していると考えられる。

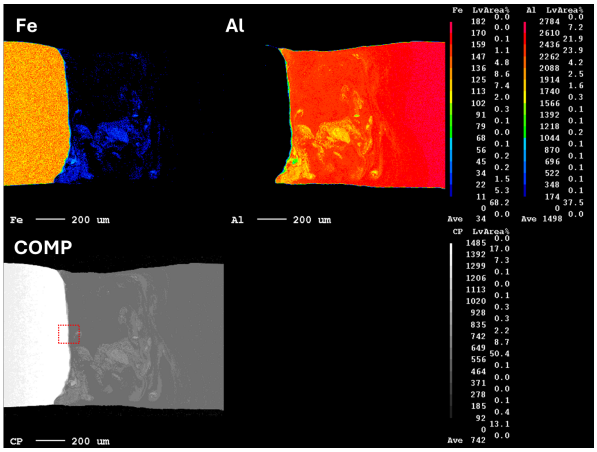


図6　溶接部におけるFeとAlのマッピング分析結果

FeとAlが反応すると金属間化合物を形成することが知られている[2)]。そこで，図6のCOMP像中の破線部において，SPCCと溶接境界近傍でFeとAlのマッピング分析を行った結果を図7に示す。SPCCと溶接部の境界に幅約7 μmの金属間化合物層が形成されていた。また，溶接部にはその金属間化合物層と組成比率が異なる金属間化合物が観察された。FeとAlを高温加熱，加圧環境下で拡散接合するとAl側にAl_3Fe，Fe側にAl_5Fe_2を形成されることが知られている[3)]ことから，SPCCと溶接部の境界に形成された幅約7 μmの金属間化合物層は，Al_5Fe_2と考えられ，溶接部に形成された金属間化合物は，Al_3Feと考えられる。

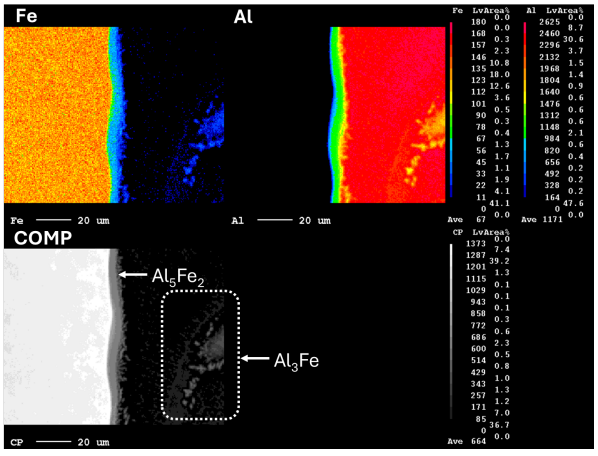


図7　SPCC/溶接部境界近傍でのFeとAlマッピング分析結果

3-3　溶接部断面における硬さ試験

溶接部断面における硬さ試験の結果を図8に示す。試験条件は，試験力1.961 N，保持時間15秒とした。SPCCの硬さ104HV，A1050の硬さ25 HV，溶接部の硬さ74 HVであった。溶接部がA1050よりも硬くなったのは，金属間化合物形成の影響によるものと考えられる。

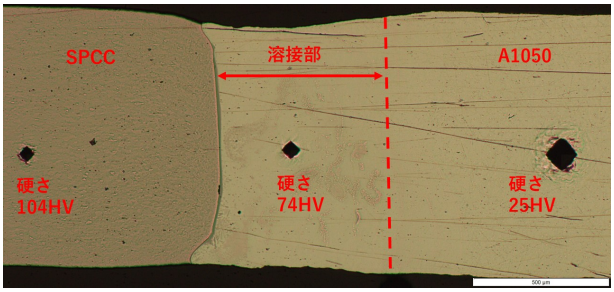


図8　溶接部断面における硬さ試験の結果

4　まとめ

ディスクレーザ発振器を用いたレーザ溶接システムにより，板厚1.0 mmの鉄/アルミニウムの突合せ溶接（開先I型，下向き）に関する基礎データ習得を行い，以下の知見が得られた。

1) レーザ出力2,000 W，溶接速度100 mm/s，溶接加工位置:突合せ面，レーザビームのコアとリングのパワー配分比率40 %の場合に，角変形無し，溶接部にボイド欠陥無し，表ビードと裏ビードの外観良好となった。

2) SPCCと溶接部の境界に幅約7 μmの金属間化合物層が形成され，溶接部にはその金属間化合物層と組成比率が異なる金属間化合物が形成された。

3)溶接部は，金属間化合物形成の影響によってA1050より硬くなった。

5　文献

1)中田　一博：溶接技術，Vol.52(No.10)，pp. 126-130(2004)

2)小椋　智：溶接学会誌，第85巻(第6号)，pp. 37-42(2016)

3)A. Hirose, F. Matsui, H. Imaeda and K. Kobayashi; Materials Science Forum Vols.475-479, pp. 349-352(2005)

イオン交換樹脂を用いた可搬型装置による六価クロムめっき浴の再生

中野 賢三[*1]　古賀 弘毅[*1]　深田 博智[*2]　深田 博志[*2]

Regeneration of Hexavalent Chromium Plating Baths Using a Portable Ion-Exchange System

Kenzo Nakano, Hiroki Koga, Hirotomo Fukada and Hiroshi Fukada

六価クロムめっき浴は，コストや環境保全の観点から長寿命化が求められている。本研究では，劣化した六価クロムめっき浴から不純物を除去して再生する，可搬型クロムめっき浴再生装置の開発を検討した。装置はイオン交換樹脂を用いためっき液精製ユニットとイオン交換樹脂再生ユニットを搭載した。めっき液精製工程では，通液開始30分でFe濃度は大きく減少し，それ以降の減少幅は僅かであった。樹脂再生工程では，酸処理時間の増加に伴い，FeおよびCr(Ⅲ)の溶離量は増加傾向を示し，その増加幅は次第に減少した。実証試験では，容量300 dm^3の劣化クロムめっき浴から，再生処理数2回でFe 623 g，Cr(Ⅲ) 125 gを除去できた。また，ハルセル試験において，再生処理前後のクロムめっき浴に，付きまわり性及びめっき外観の向上，並びに印加電圧の低減効果が認められた。

1 はじめに

クロムめっきは，耐摩耗性を目的とした「硬質クロムめっき」や，耐食性，意匠性付与を目的とした「装飾クロムめっき」として，幅広い用途で利用されている。このうち，特に硬質クロムめっきには六価クロムめっき浴が使用されているが，長期間の運用により被めっき鋼材由来の鉄イオンがめっき浴中に徐々に溶出し，不純物として蓄積する。六価クロムめっき浴中に適量含まれる三価クロムや不純物である鉄イオンの濃度が高くなると，めっき品質低下等の不具合が生じるため，許容濃度を超えない厳格な管理が必要である。三価クロムについては電解条件の適切な制御により濃度調整が可能であるが，鉄イオン濃度が管理値を上回り老化したクロムめっき浴は産廃処理の対象となる。代表的な六価クロムめっき浴であるサージェント浴の場合，原料中にクロム酸を 200 gdm^{-3}（六価クロム換算 104 gdm^{-3}）程度と高濃度含有する。なお，六価クロムは環境省の排水基準で0.2 $mgdm^{-3}$以下と規定される環境負荷物質である。そのため，廃棄処理コストだけでなく，環境保全の観点からも，六価クロムめっき浴の長寿命化が求められていた。

劣化したクロムめっき液から鉄イオン等の不純物を除去する方法としては，隔膜電解やイオン交換法などが挙げられる[1-4]。しかしながら，コスト，効率，運用の利便性などの観点から，中小規模のめっき工場への導入は進んでおらず，その普及は限定的である。本研究では，複数の小型めっき浴槽を備える工場に適応できるように，各浴槽間を移動可能で，イオン交換樹脂により不純物を除去できる，可搬型六価クロムめっき浴再生装置の開発を試みた。使用する陽イオン交換樹脂は，酸処理により吸着した不純物を溶離するため，再生利用が可能である。そこで，装置にめっき液精製ユニットとイオン交換樹脂再生ユニットを搭載し，両工程を連続的に繰り返すことで，安定しためっき浴再生処理を実現する構造とした[5]。ここで，酸処理による樹脂再生が不十分である場合は次回のめっき液精製に支障があるため，十分な再生工程の確立が必要である。また，酸処理や水洗により排出される廃液に六価クロムが含まれることから，その排出量を最小限とし，工場排水への負荷を抑える工夫が求められる。すなわち，本装置には，人力による移動が可能なコンパクト性と高効率な処理プロセスの両立が不可欠であった。これらを踏まえ，装置構造及び処理条件の最適化に向けた検討を行った。本稿では，その結果の一部を報告する。

2 研究，実験方法

図1に，可搬型クロムめっき浴再生装置の概略図を示す。本装置は，陽イオン交換樹脂が充填されたイオ

*1 機械電子研究所
*2 有限会社深田ハードクローム

ン交換樹脂塔，イオン交換樹脂を再生するための酸が収容されたタンク，送液経路および台車等で構成される。これにより，めっき液精製，樹脂塔内のめっき液除去，洗浄，並びに樹脂再生といった処理工程を一括して実施可能である。本試験では，劣化したサージェント浴について，鉄イオンおよび三価クロム（以下，それぞれFe，Cr(Ⅲ)という。）を対象として評価した。

2.1 めっき液精製

Fe濃度7.2 gdm^{-3}およびCr(Ⅲ)濃度1.8 gdm^{-3}の劣化クロムめっき浴300 dm^3について，陽イオン交換樹脂50 dm^3を充填したイオン交換樹脂塔とめっき槽間を送液速度450 dm^3/hで90分間循環させた。通液中に所定時間のめっき液を採取し，ICP発光分析により溶液中のFeおよびCr(Ⅲ)の濃度を求めた。

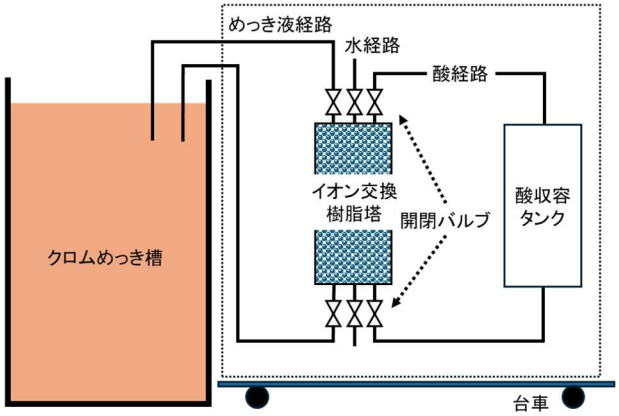


図１　可搬型クロムめっき浴再生装置の概略図

2.2 樹脂再生

めっき液精製処理後，樹脂塔内のめっき液を除去，洗浄した。次に，10 %硫酸 50 dm^3 を供給して所定の時間バブリングする，バッチ式の酸処理を 3 回繰り返し，処理毎に排液を採取して ICP 発光分析を行った。Fe および Cr(Ⅲ)の溶離量は，各回の酸処理における分析結果に基づき算出した溶離量の総和として評価した。

2.3 実証試験

各条件を検討した結果を踏まえ，試作機を用いた劣化クロムめっき浴 300 dm^3 の再生プロセス性能を評価した。めっき液精製工程では，めっき液の樹脂塔内通液時間は 60 分間とし，樹脂再生工程における酸処理は 1 回あたり 15 分間実施した。また，めっき液の精製がめっき品質に及ぼす影響について評価するため，再生前後のクロムめっき浴を用いてハルセル試験を実施した。なお，ハルセル試験は，台形状の小型めっき槽（容量 267 mL）を用いて，陽極に対して陰極を傾斜配置することで陽極との極間距離を変化させ，広範囲の電流密度条件下でめっき膜を作製する方法である[6]。電解後の陰極試験片の表面観察を通じて，めっき膜特性の電流密度依存性及びめっき浴の状態を評価することが可能である。陰極試験片に銅板，陽極に白金板を用いて，浴温 50 ℃，10 A の定電流条件下で 10 分間電解した。評価位置は陰極板下端から高さ 3 cm の位置とした。

3 結果

3.1 めっき液精製

図 2 に，めっき液精製工程における通液時間とめっき浴中の Fe および Cr(Ⅲ)濃度との関係を示す。Fe 濃度は通液開始 30 分後大きく減少し，60 分および 90 分ではその減少幅はわずかであった。より低濃度の Cr(Ⅲ)については，通液 30 分以降ほとんど減少しなかった。なお，溶液濃度に基づく計算から，90 分間の処理でクロムめっき浴から除去された不純物量は，Fe が 370 g，Cr(Ⅲ)が 58 g であった。

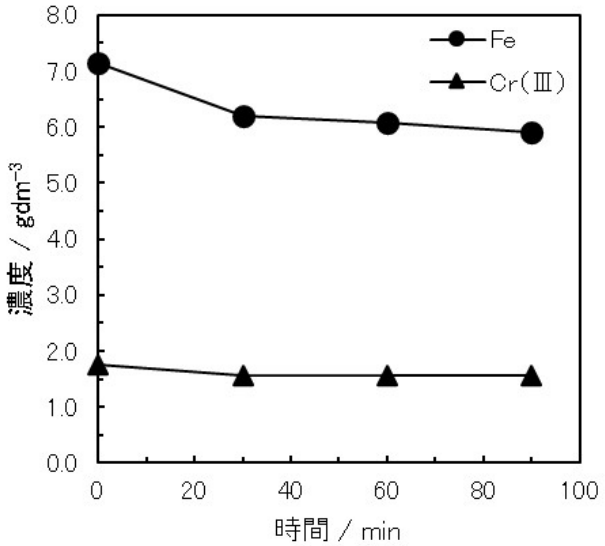


図２　めっき液通液時間と Fe および Cr(Ⅲ)濃度との関係

3.2 樹脂再生

図 3 に，樹脂再生工程における 1 回あたりの酸処理時間と Fe および Cr(Ⅲ)の溶離量との関係を示す。Fe および Cr(Ⅲ)の溶離量は，処理時間の増加に伴い増

加する傾向を示し，その増加幅は次第に減少した。

3.3 実証試験

Fe 濃度 6.3 gdm^{-3} および Cr(Ⅲ)濃度 1.5 gdm^{-3} の劣化クロムめっき浴 300 dm^3 について再生処理を実施した。再生処理 1 回目は Fe321 g，Cr(Ⅲ)72 g を除去した。続く再生処理 2 回目には Fe302 g，Cr(Ⅲ)53 g を除去した結果，合計で Fe623 g，Cr(Ⅲ)125 g の除去を達成した。図 4 に，再生前後のクロムめっき浴を用いたハルセル試験の結果を示す。再生前のめっき浴では，高電流密度側となる左端にヤケが発生した。また，めっき膜の付きまわり性については，低電流密度側の被覆範囲が 11.4 Adm^{-2} に留まり，めっき膜の外観は無光沢であった。一方，再生後のめっき浴では，低電流密度側で 8.4 Adm^{-2} までめっき膜が形成され，付きまわり性の向上が確認された。さらに，電解時の印加電圧は，再生前 14.4 V，再生後 12.2 V となり，めっき液精製による印加電圧の低減が示された。印加電圧の低下（12.2 V/14.4 V=84.7 %）は，消費電力の削減効果（15.3 %）に繋がる。加えて，めっき外観は広い範囲で半光沢となり，良好な仕上がりを示した。

4 まとめ

イオン交換樹脂を用いためっき液精製ユニットとイオン交換樹脂再生ユニットを搭載した可搬型六価クロムめっき浴再生装置の開発について検討を行い，以下の知見を得た。

(1) めっき液精製工程において，Fe濃度は通液30分で大きく減少し，60分および90分における減少幅は小さかった。Cr(Ⅲ)濃度は，通液30分以降はほとんど減少しなかった。

(2) 樹脂再生工程において，酸処理時間増加に伴い，FeおよびCr(Ⅲ)の溶離量は増加する傾向を示し，その増加幅は漸減した。

(3) 実証試験として，容量300 dm^3 の劣化クロムめっき浴の再生処理を実施した。2回の再生処理によりFe623 g，Cr(Ⅲ)125 gの除去を達成した。

(4) 再生前後のクロムめっき浴でハルセル試験を実施した結果，めっき液精製による付きまわり性およびめっき外観の向上，ならびに印加電圧の低減が確認された。

装置は，その後更なる改良を加え，バルブ開閉制御を自動化したことで，操作性と利便性が大幅に向上した。図5に，自動バルブ制御機能を搭載した可搬型クロムめっき浴再生装置の外観を示す。本装置は，現在まで3年以上にわたり継続して運用されているが，運用期間中，イオン交換樹脂の交換は不要であった。適切な樹脂選定，装置構造および処理条件の最適化が，

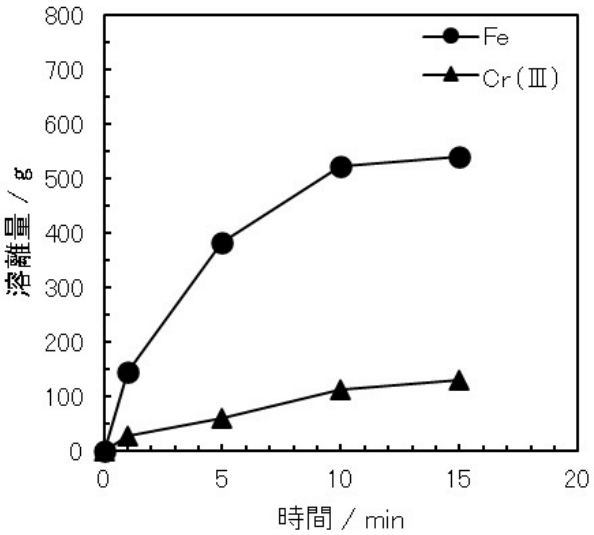


図 3　1 回あたりの酸処理時間と Fe および Cr(Ⅲ)の溶離量との関係

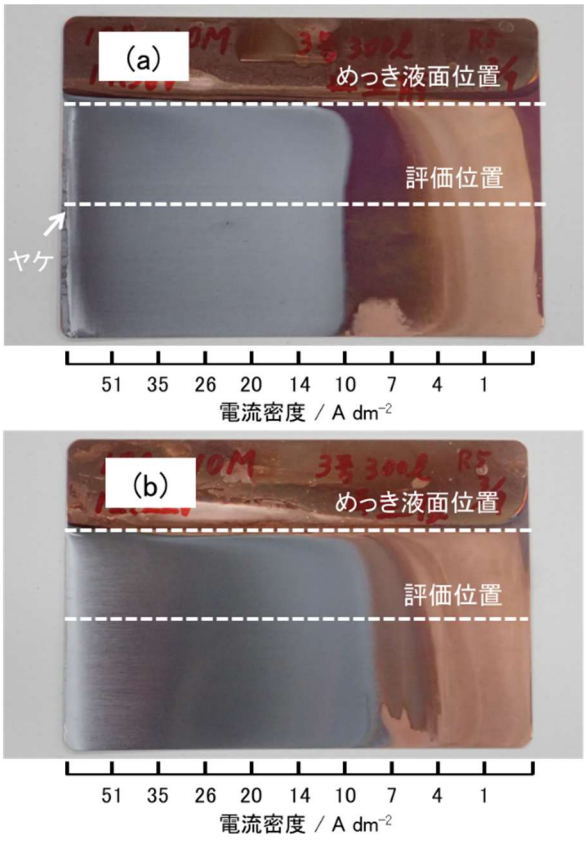


図 4　再生前後のクロムめっき浴を用いたハルセル試験の結果 (a)再生前，(b)再生後

樹脂の劣化抑制に有効であったと考えられる。本技術は，めっき浴の長寿命化による廃棄コスト削減，省エネルギー化，並びに環境保全の推進に有効である。今後の技術普及により，持続可能な社会の実現に資することが期待される。

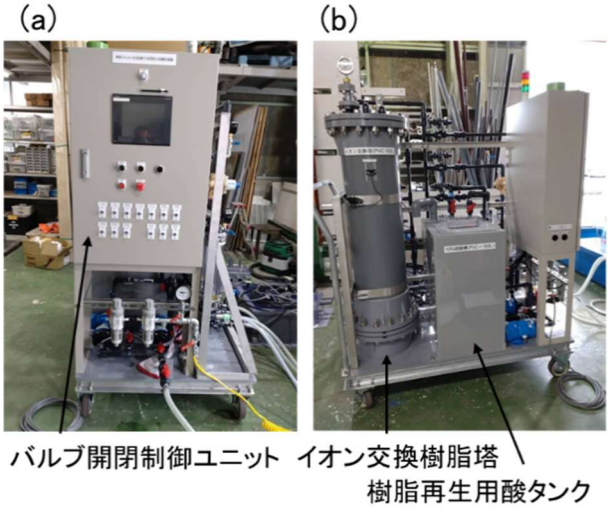


図 5　自動バルブ制御機能を搭載した可搬型クロムめっき浴再生装置の外観　(a)正面，(b)側面

謝辞

本研究は，久留米市ものづくり支援事業　育成支援型（2021年度）および実用化支援型（2022年度）の助成を受けて実施し，株式会社久留米リサーチ・パークおよび九州めっき工業組合環境リサイクル委員会のご協力を賜った。関係者各位に感謝の意を表する。

5 参考文献

1) 森河 務，中出 卓男：表面技術，Vol.68，No.1，pp. 14-20(2017)
2) 酒井 浩史：表面技術，Vol.60，No.5，pp.314-317(2009)
3) 寺田 憲司：表面技術，Vol56，No.6，pp.325-328(2005)
4) 西川 忠弥：表面技術，Vol.40，No.5，pp.653-657(1989)
5) 特許第7340795号広報
6) 小岩 仁子，山本 渡：表面技術，Vol.63，No.8，pp.489-494(2012)

CFRTPシートの成形に関するデータベースの作成

小田　太[*1]

Development of a Database for CFRTP Sheet Forming

Futoshi Oda

航空機分野では CO_2 削減や燃費向上を目的とする部材の軽量化が求められており，炭素繊維強化樹脂（以下，CFRP）の適用拡大が期待されている。本研究では，コストや取扱いの面で利点を有する熱可塑性 CFRP（以下，CFRTP）シートを対象に，プレスによる絞り成形条件を検討した。熱可塑製樹脂として PA6（ポリアミド 6）を母材とした板厚 1.0 mm の平織及び綾織 CFRTP シートに対し，加熱温度，加熱時間及び成形クリアランスを変化させた成形実験を行い，成形可否と外観をデータベースに整理した。その結果，成形クリアランスの影響が大きいこと，同一金型であっても条件調整により平織，綾織とも成形可能であることを確認し，データベースを構築した。

1 はじめに

CFRTPは，炭素繊維と熱可塑性樹脂からなる複合材料であり，高い比強度と軽量性を有するため，輸送機器部材への適用が期待されている。特に航空機分野では，環境保全に対する社会的要請の高まりから，CO_2 削減及び燃費向上に寄与する軽量化材料として注目されている。一方で，CFRTPは材料費が高く，加工コストや成形条件の確立が課題である。量産性の高いプレス加工を適用するためには，材料を適切に加熱し，金型構造や成形クリアランスを含めた条件を把握する必要がある。そこで，本研究ではCFRTPシートの絞り成形を対象に，平織及び綾織CFRTPシートを対象として成形条件を検討し，成形可能条件のデータベース作成を行った。

2 研究，実験方法

本研究で用いた試料を図1に示す。CFRTPシートを連続的に作製する技術を確立[1)]している一村産業（株）製，熱可塑製樹脂PA6，3K（3000本）平織・綾織，炭素繊維含有率53 %，板厚1.0 mmのシートを試料とした。

実験は図2に示すサーボプレス機（CGK（株）製，HMS-1000）と図3に示す抜き金型を用いて20 mm角の材料を作製し，図4に示す小型電気炉（日陶科学（株）製，mini-BS I）を用い，60秒以上の加熱を行った後に，図5に示す絞り金型を用いて径 φ12 mm，絞り深さ 6 mmのプレス絞り成形を行った。成形条件は，加熱温度，加熱時間及び成形クリアランスを主な検討項目とした。加熱温度は280，290，300，310 ℃とし，加熱時間は，各温度における成形可能となるまでの時間を設定した。また，側壁の成形クリアランスは板厚1.0 mmに対して1.0 mm及び1.5 mmとした。

従来の研究[2,3)]においては，シート両面をホットプレートで挟む加熱方法としていたが，材料内部においての加熱が不足して絞り成形が困難であったため，本研究においては小型電気炉による加熱を採用した。

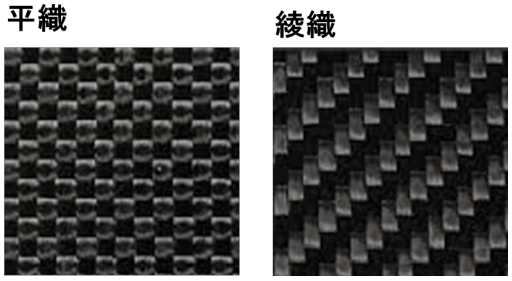


図1　本研究で用いた試料



図2　サーボプレス機

*1 機械電子研究所

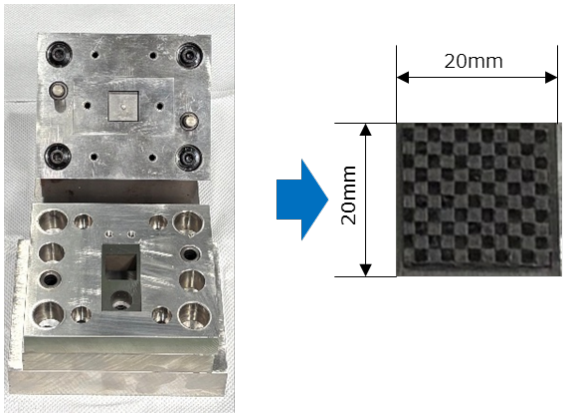


図3　抜き金型と試料

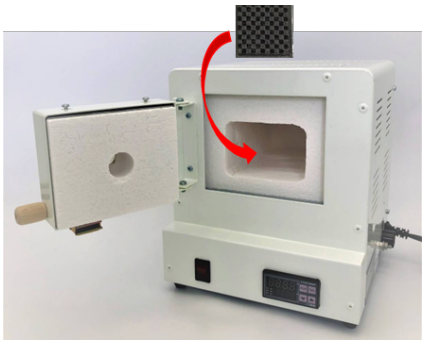


図4　小型電気炉

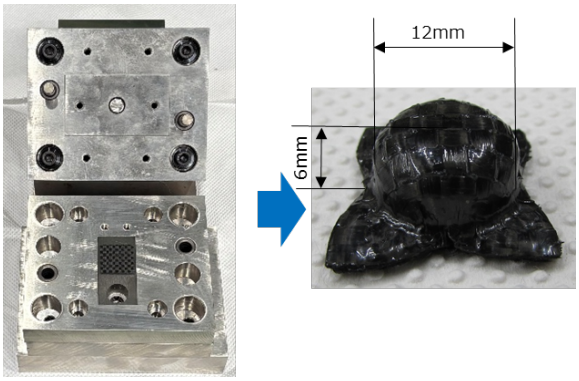


図5　絞り金型と成形品

3 結果と考察

平織，綾織の各材料について，成形クリアランス1.0 mm及び1.5 mmの成形可能条件を整理したものを表1，表2，図6に示す。成形クリアランス1.5 mmでは，平織，綾織ともに加熱温度に対する成形可能になるまでの加熱時間は同じ結果となった。また，金型絞り深さは6 mmで一定とし，成形品の絞り深さを測定した。いずれの条件においても成形品絞り深さは概ね5.82～6.10 mmであり，所定の形状に近い成形品が得られた。

表1　平織CFRTPシートの絞り成形可能条件

No	成形材種 CFRTP(PA6) t1.0mm	加熱温度 (℃)	加熱時間 (S)	クリアランス (mm)	成形品絞り深さ (mm)
1	平織	280	120	1.00	5.99
2	平織	290	120	1.00	5.97
3	平織	300	90	1.00	5.92
4	平織	310	90	1.00	6.00
5	平織	280	90	1.50	5.91
6	平織	290	60	1.50	5.94
7	平織	300	60	1.50	5.95
8	平織	310	60	1.50	5.95

表2　綾織CFRTPシートの絞り成形可能条件

No	成形材種 CFRTP(PA6) t1.0mm	加熱温度 (℃)	加熱時間 (S)	クリアランス (mm)	成形品絞り深さ (mm)
9	綾織	280	300	1.00	6.06
10	綾織	290	180	1.00	5.93
11	綾織	300	120	1.00	5.99
12	綾織	310	90	1.00	6.10
13	綾織	280	90	1.50	5.86
14	綾織	290	60	1.50	5.86
15	綾織	300	60	1.50	5.83
16	綾織	310	60	1.50	5.82

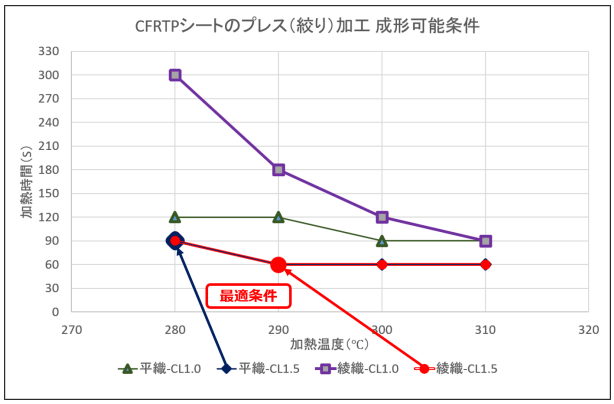


図6　CFRTPシートの絞り成形最適条件

成形可否には成形クリアランスが与える影響が大きく，板厚と同じ1.0 mmよりも1.5 mmの条件において外観が安定する傾向が見られた。外観から，平織においては280 ℃，90 s，クリアランス1.5 mm，綾織においては290 ℃，60 s，クリアランス1.5 mmが最適条件であった。最適条件における成形品を図7に示す。

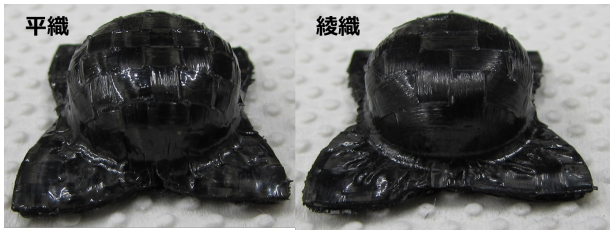


図7　最適条件の成形品外観

一方で，加熱温度が高い場合に織目の空隙からの樹脂漏れが発生した。平織，綾織ともに310 ℃，60 s加熱した際の成形品の外観を図8に示す。平織の方が樹脂漏れの量が多いことから，平織と綾織では織目の空隙が異なり，平織の方が織目の空隙が比較的大きいことがわかる。これは，平織と綾織では織り方の違いから，成形時の繊維の動きに図9に示すような違いがあるため，漏れ出し方に差が出たと考えられる。

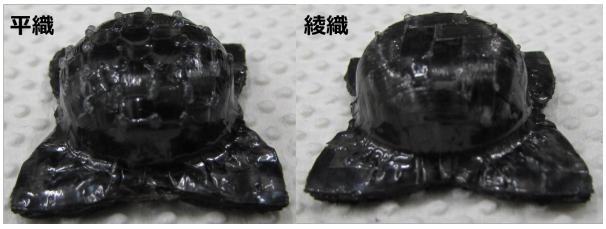


図8　加熱温度が高い条件の成形品外観

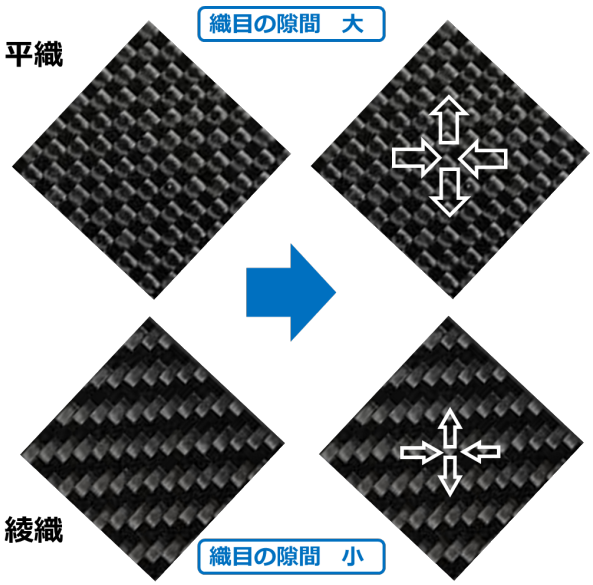


図9　平織，綾織の繊維の動き

平織は伸び特性に優れ，側壁への流入性が劣ることからしわが発生しにくい。一方で，綾織は平織に比べ伸び特性に劣るが，側壁への流入性に優れる。しかし，そのためにしわが発生しやすい。このことが，加熱温度290 ℃，クリアランス1.0 mmの時に，平織と綾織の成形可能条件に大きな違いが認められた要因であると考えられる。綾織は平織に比べ加熱時間が大幅に長く，材料が十分に軟化しないと成形困難であったのは，伸びにくく側壁への流入性に優れるがゆえに，板厚と同じクリアランス1.0 mmでは成形途中に金型の隙間以上の材料が流入し，側壁への流入が閉塞した状態で，絞りパンチに引っ張られることでシートに割れが発生したと考えられる。

4 まとめ

CFRTPシートPA6，板厚1.0 mmの絞り加工に対して，以下の結果が得られた。

(1) 加熱炉を使用した材料内部までの加熱が成形に必要であった

(2) 成形可否に成形クリアランスが与える影響が大きく，クリアランス1.5 mmの条件において成形が安定した

(3) 平織，綾織で材料の流動性に差があるが，成形クリアランスの調整によって，同様の金型で成形可能であった

(4) 平織，綾織に対して，成形可能な16条件をデータベース化した

5 参考文献

1) 戦略的基盤技術高化支援事業「車両用部材の多品種中小ロット生産に対応した連続炭素繊維強化熱可塑性樹脂シートの開発」報告書（2013）

2) 公益財団法人 天田財団 塑性加工 平成28年度一般研究開発助成「CFRTPシートの順送プレス加工技術の開発」報告書（2019）

3) 公益財団法人 金型技術振興財団 研究開発助成「連続CFRTPシートの順送プレス金型の開発」報告書（2020）

金属粉末射出成形における樹脂型の適用

田尻 智基[*1]　西澤 崇[*1]

Application of Resin Molds in Metal Powder Injection Molding

Tomoki Tajiri and Takashi Nishizawa

金属粉末射出成形（MIM）では金型作製に多大な費用と時間が必要である。そこで,試作コストの低減を目的に,光造形3Dプリンター製樹脂型の適用について検証した。成形試験の結果,保圧時の応力集中により中心部分から亀裂が生じ,30ショット以降の精度が低下したものの,20ショット程度までは実用的な転写精度を維持した。本手法は,安価かつ迅速な試作手法として,形状確認の用途において有効であると考えられる。

1 はじめに

福岡県工業技術センターでは,令和4年度に「金属粉末造形技術研究会」を発足した。本研究会は,金属粉末射出成形（以下,MIM）及びアディティブ・マニュファクチャリングの普及を目的とし,研究活動や意見交換会を継続的に実施している。

研究会の運営過程において,MIMはAM（Additive Manufacturing）と比較して試作の実施にコストがかかるという課題が顕在化した。これは,MIMでは,金型作製に多大な費用と期間を要することが原因であり,企業の迅速なアイディア検証を阻害する要因になっていた。そこで,樹脂3Dプリンターを用いて型を作製することで,試作におけるコストの低減を試みた。

一般に,樹脂型は金型と比較して耐熱性や機械的強度が著しく劣ることが知られている。本報告では,MIM工程における樹脂型の適用可能性及び有効性を検証した結果を述べる。

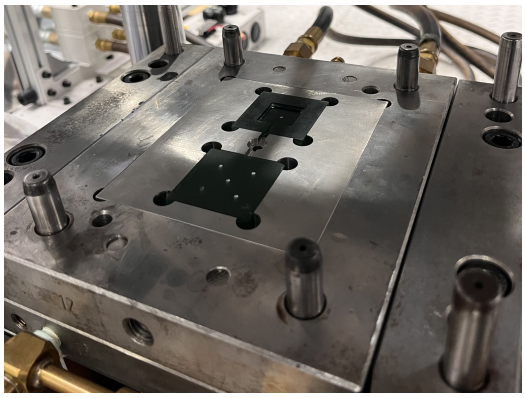


図1　成形時の金型の様子

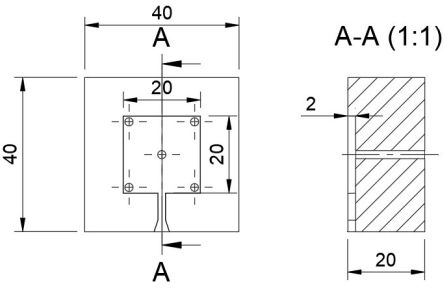


図2　樹脂型の形状及び寸法

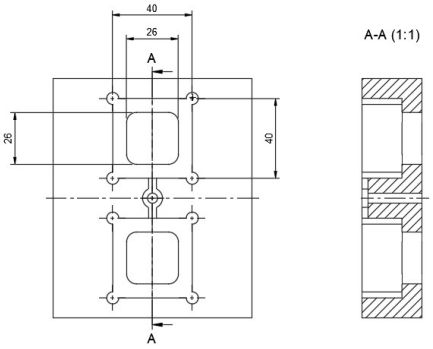


図3　入れ子ブロック形状及び寸法

2 実験方法

2-1 金型作製

2-1-1 金型の構成

金型には,当センターで既に使用されているカセット金型を採用し,そのキャビティ部を樹脂型に置換する構成とした（図1）。樹脂型の外形寸法は,幅40 mm × 奥行き40 mm × 厚さ30 mmとし（図2）,この樹脂型を保持するための入れ子ブロックを作製した（図3）。また,成形品の離型プロセスを考慮して,入れ子ブロックにはエジェクターピン用の貫通穴を配置した。

*1 機械電子研究所

2-1-2 樹脂型の造形

樹脂型の造形には,高い寸法精度を確保するため,光造形方式3Dプリンター（ELEGOO社製：MARS）及び耐熱性光硬化レジン（OYOWOOA社製：耐熱温度280 ℃）を用いた。

光造形において,造形姿勢は造形品質を左右する重要な因子である。当初は造形失敗（脱落や歪み）を回避する目的で,造形プラットフォームに対してキャビティ面を傾斜させた姿勢で造形を行った。しかし,この樹脂型を用いた射出成形を試みたところ,成形体（グリーン体）の一部が型表面に残留する離型不良が発生した。この課題を解決するため,キャビティ形状面が造形方向に対して「接線方向」または「法線方向」（以下,正方向）となるよう配置姿勢を変更し,比較検証を行った。その結果,正方向の姿勢で造形した樹脂型において,フィードストックの付着が抑制された。両者の表面性状を確認したところ,後者では前者に比して表面の凹凸が小さく抑えられていた（図4,5)。

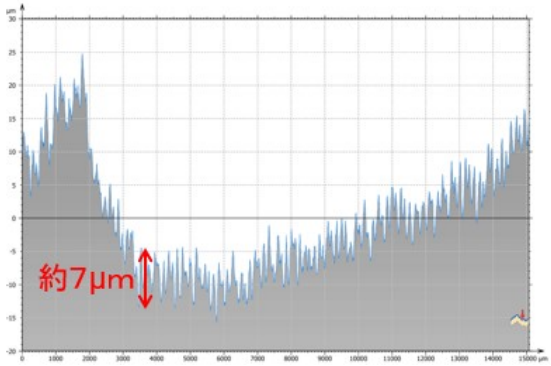


図4　傾斜させて造形した樹脂型の表面形状

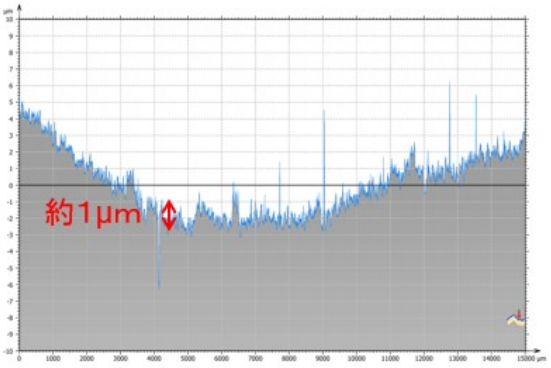


図5　正方向の姿勢で造形した樹脂型の表面形状

これは,3Dプリンター特有の積層痕の影響と考えられる。すなわち,造形精度や成功率の観点からは適切とされる傾斜姿勢が,射出成形においては積層痕によるアンダーカット（引っ掛かり）を生じさせ,離型性を阻害する要因となったと考えられる(図6)。以上の検討結果に基づき,以降の成形実験では,離型性に優れた正方向の姿勢で造形した樹脂型を使用することとした。

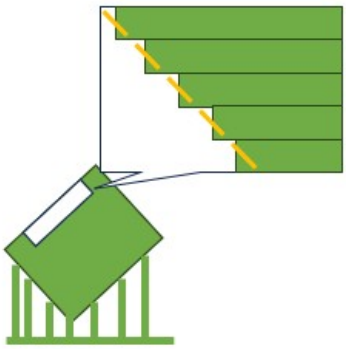


図6　傾斜させて造形した際の表面の簡略図

2-2 成形実験

金型の組み付け後,保圧10 MPaの条件下でショートショット試験を行って,充填挙動を確認し,最適成形条件を決定した。本実験で設定した成形条件の詳細を表1に示す。条件設定後,樹脂型が破損または劣化により成形不能に至るまで連続成形を実施した。これにより,樹脂型の転写精度及び耐久性の検証を行った。成形体の品質評価には,非接触三次元形状測定機（ZEISS社製：ATOS 5）を用い,樹脂型の初期形状（設計値）と得られたグリーン体の形状比較及び寸法差の計測を実施した。

表1　成形条件

項目	
射出温度	185℃
射出速度	30mm/s
金型温度	30℃
保圧	30MPa

3 結果と考察

3-1 形状精度の経時変化

成形前の樹脂型キャビティ形状に対する,各ショット回数（1,10,20,30,40,50ショット）におけるグリーン体の形状比較結果を図7,8,9,10,11,12に示す。

成形回数の増加に伴い,成形体寸法が初期の型形状を超過する傾向が確認された。また,樹脂型表面に発

生した亀裂がグリーン体表面に転写される現象が散見された。特に30ショット以降，これらの傾向が顕著となっていることから，この段階で大規模な亀裂が進展し，保圧工程における型の開き（変形）が生じたものと推察される。

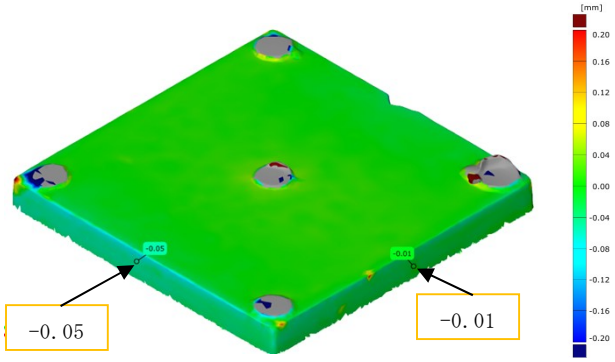


図7　1ショット時の成形体のキャビティとの寸法差

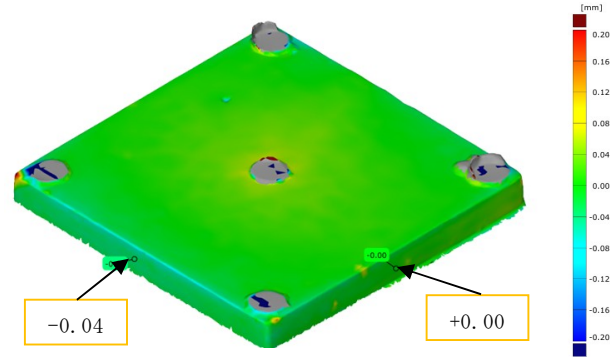


図8　10ショット時の成形体のキャビティとの寸法差

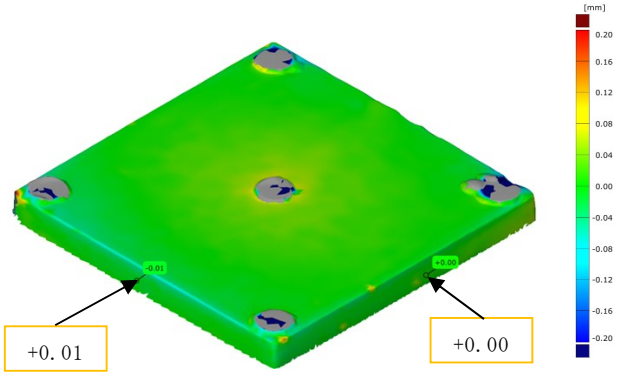


図9　20ショット時の成形体のキャビティとの寸法差

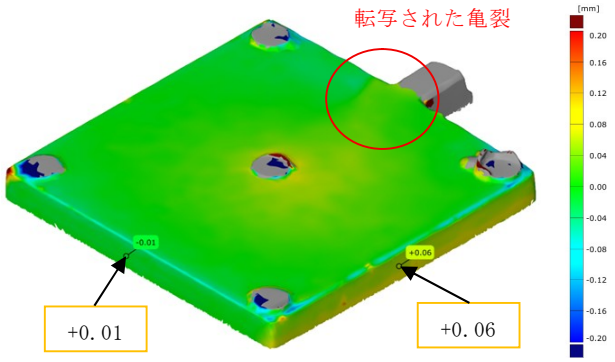


図10　30ショット時の成形体のキャビティとの寸法差

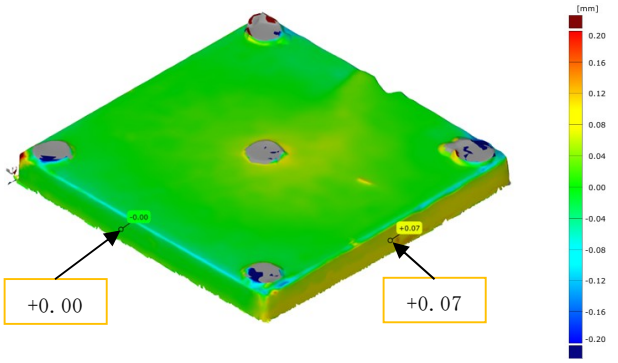


図11　40ショット時の成形体のキャビティとの寸法差

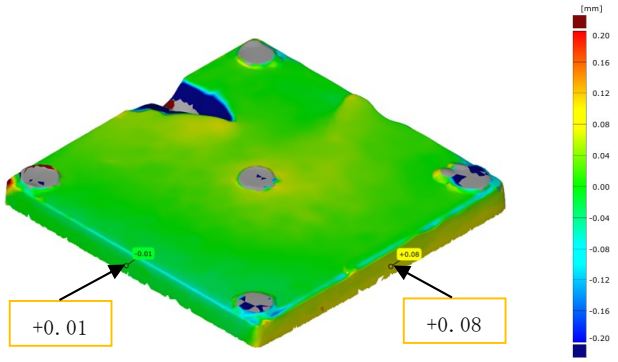


図12　50ショット時の成形体のキャビティとの寸法差

3-2　樹脂型の損傷要因解析

実験終了後，樹脂型を分解して観察したところ，中心部から放射状に広がる亀裂が確認された（図13）。

本実験に用いた入れ子ブロックの構造上，エジェクターピン用の貫通部周辺には樹脂型を裏面から支持する構造を欠いている。そのため，高圧の保圧工程において，当該部位に向けて樹脂材料が局所的にたわむような変形が生じ，応力集中による亀裂が発生，進展したものと考えられる。

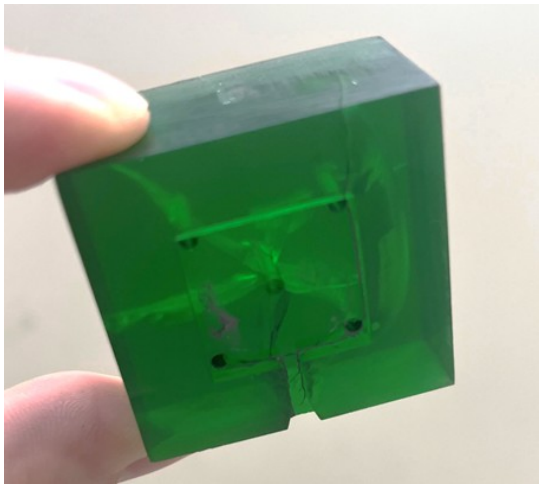


図13　樹脂型に発生した亀裂の様子

4 まとめ

本研究では,MIMにおける試作コストの低減を目的とし,光造形3Dプリンターを用いて作製した樹脂型の適用可能性を検証した。得られた知見を以下に記す。

(1)実験の結果,本実験の構成において十分な成形精度を維持し得る限界は20ショット程度であると判断される。しかし,樹脂型は低コストかつ数時間という短時間で作製が可能であるという点から,許容できる範囲であり,製品開発の初期段階における形状確認や試作手法に有効であると考えられる。

(2)樹脂型の損耗を抑制し,ショット数を延伸させるためには,材料及び構造の両面からのアプローチが不可欠である。具体的には,より機械的強度の高い他社製レジンの選定や,エジェクターピン用の貫通穴面積の最小化などの設計変更,さらには入れ子ブロックによる補強構造の最適化などにより,耐久性の向上の可能性があると考えられる。

今後はこれらの改良を加え,試作を実施していく予定である。当所では,MIM関連機器（成形機及び真空脱脂焼結炉）の研修を受け入れており,試作したい形状の部品があれば,是非,ご気軽に問い合わせていただきたい。

5 参考文献

1） 重光和夫：大分県産業科学技術センター研究報告書,（2025）

インコネルの金属粉末射出成形における焼結条件と機械的性質に関する研究

田尻 智基[*1]　西澤 崇[*1]　中村 憲和[*1]

Study on Sintering Conditions and Mechanical Properties of Inconel Alloys in Metal Powder Injection Molding

Tomoki Tajiri, Takashi Nishizawa and Norikazu Nakamura

航空機エンジン部品等に用いられるインコネル718は難削性材料であり,金属粉末射出成形（MIM）による効率的な製造が期待されている。しかし,JIS規格にインコネルの機械的性質の記載はなく,企業のMIMによる製品製造を支援するために,基礎データの取得が急務である。本研究では,焼結雰囲気にアルゴンを採用し,各種酸素除去手法の導入により高密度な焼結体の作製を試みた。実験の結果,相対密度95 %以上を達成し,溶製材に近い硬さ及び引張強さを得ることができた。また,インコネル625では酸素除去により引張強さが向上する傾向を確認した。また,これらの評価結果をデータベースとしてまとめ,MIMによる製造プロセスの有効な指針を提示した。

1 はじめに

福岡県には自動車,半導体などで技術力を磨き,航空機産業への参入の可能性を秘めた中小企業が幅広い分野において潜在的に存在している。当所では,世界的な成長分野の一つである航空機産業へのそれら企業の参入を技術的な面から支援すべく,航空機ならではの特殊材料に対する加工や評価等のデータベースの構築を実施している。

耐熱合金インコネル718はエンジン部品に用いられているが,難削材であるため,機械加工以外の製造方法が求められている。解決方法の一つに,金属粉末射出成形（以下,MIM）があるが,インコネル718については「金属粉末射出成形材料－仕様[1)]（JIS Z 2551)」には機械的性質の記載がなく,企業が製品の材料に選定する上で基準がない状態であったため,機械的性質の評価を実施した。

本研究の目的は,MIMにより製造されたインコネル718及びインコネル625焼結体の密度,硬さ,引張強さ,表面組織を網羅するデータベースを作成し,企業の社会実装を支援することである。焼結雰囲気はアルゴン雰囲気とし,さらに酸素除去手法（ゲッター材,精製器,高純度ガス）を導入することで,その効果を検証するとともに,高密度な焼結体を得ることを目指した。

2 実験方法

2-1 材料

フィードストックは,ガウス（株）製の加熱脱脂用フィードストックを用いた。金属粉末は,ガスアトマイズ粉であり,粒径は20 μmアンダーである。それぞれの化学組成を表1,2に示す。

表1　インコネル 718　化学組成

[mass%]

成分	C	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	Fe	O
分析値	0.047	52.31	19.05	3.02	0.61	0.94	5.06	Bal.	0.043

表2　インコネル 625　化学組成

[mass%]

成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe
分析値	0.008	0.36	0.4	0.003	0.002	62.82	22.53	9.48	3.93	0.08

2-2 成形

射出温度175 ℃,金型温度60 ℃の条件下で,手動射出成形機を用いて成形を実施した。金型キャビティには,後述する真空脱脂焼結炉において複数本を同時焼結ができる試験片形状を採用した（図1)。

*1 機械電子研究所

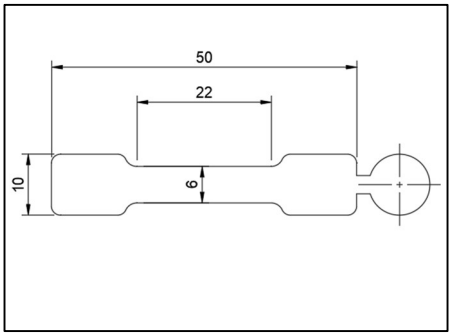


図1　金型キャビティ形状の寸法

2-3 脱脂･焼結･熱処理

脱脂及び焼結は真空脱脂焼結炉（島津産機システムズ製：VESTA）を用いて実施した。

2-3-1 脱脂

脱脂工程における温度パターンを図2に示す。脱脂は窒素雰囲気下で実施した。インコネル718及びインコネル625のフィードストックは共通のバインダー組成を有するため,両試料に対して同一の温度パターンを適用した。

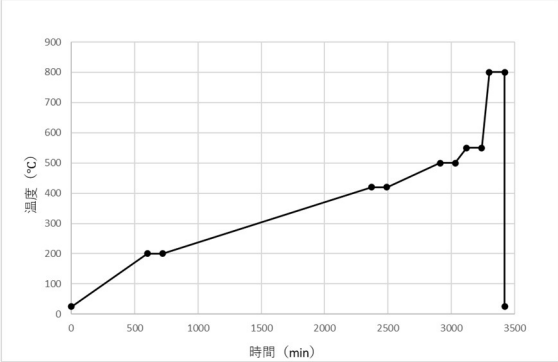


図2　脱脂温度パターン

2-3-2 焼結

インコネル718及びインコネル625の焼結プログラムを図3,4に示す。焼結条件の検討において,相対密度95 %以上を達成し,かつ外観上に溶けが認められない最適温度を導出した。その結果,焼結温度をインコネル718では1300 ℃,インコネル625では1285℃ に決定した。

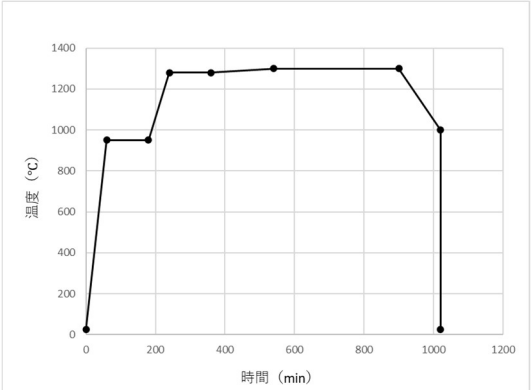


図3　インコネル718の焼結温度パターン

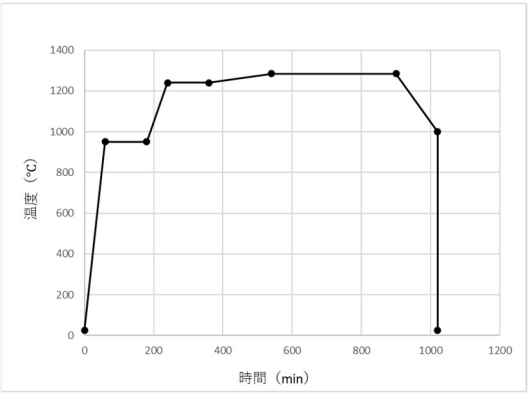


図4　インコネル625の焼結温度パターン

表3に4通りの焼結条件を示す。標準的な雰囲気ガスには一般工業用ガス純度（99.99 %以上）のアルゴンガスを用いた（条件①）。また,一般工業用ガスにガス精製器（大阪ガスリキッド（株）製,FPCC-X）を介することでガス中の水分及び酸素を除去した（条件②）。次に,酸素ゲッター材としてスポンジチタン（東邦チタニウム（株）製）を使用し,図5に示す容器の溝部に充填した。これを蓋で被覆する構造とすることで,ゲッター材により脱酸素化された雰囲気のみがブラウン体（脱脂体）に接触する環境を構築した（条件③）。なお,高純度ガス条件においては,純度99.999 %以上のアルゴンガスを直接使用した（条件④）。

表3　焼結方法

	雰囲気ガス	酸素除去方法
①	一般工業用アルゴンガス	なし
②	一般工業用アルゴンガス	ゲッター材
③	一般工業用アルゴンガス	精製器
④	高純度ガス	なし



図5　ゲッター材使用容器

2-3-3　熱処理

インコネル718に対しては，1000℃で2時間の加熱後に油冷を施す固溶化熱処理を行った。次いで時効処理として，720℃で8時間保持した後，620℃まで炉冷し，同温度でさらに8時間保持した後に空冷した。一方，インコネル625については，1100℃で2時間の加熱後に油冷を行い，固溶化熱処理を行った。

2-4　評価

焼結状態の確認を目的として，光学顕微鏡による組織観察を実施した。次いで，アルキメデス法を用いて密度測定を行い，相対密度が95%に達していることを確認した。機械的特性の評価として，硬さ測定にはロックウェル硬さ試験機（(株) 松沢精機製，MRK-SA）を，引張試験には万能試験機（(株) 島津製作所製，オートグラフ AG-100kNX）をそれぞれ用いた。

3　結果と考察

3-1　組織観察

焼結条件による顕著な差は見られなかったため，一般工業用アルゴン雰囲気における組織写真のみを図6，7に示す。インコネル718，625共に粒界の析出物を確認できた。また，インコネル718と比較して，インコネル625の空孔は丸みを帯びており，部分的な溶融もしくはガスが発生していることが考えられる。

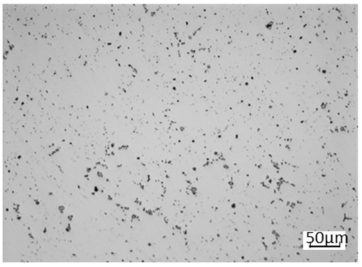


図6　インコネル718組織写真（一般アルゴン雰囲気）

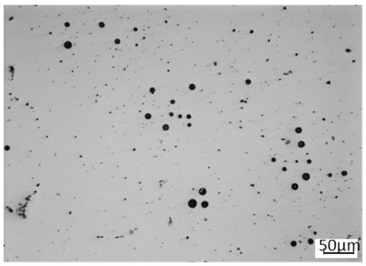


図7　インコネル625組織写真（一般アルゴン雰囲気）

3-2　密度

インコネル718及びインコネル625の各焼結条件における密度測定結果を図8，9にそれぞれ示す。

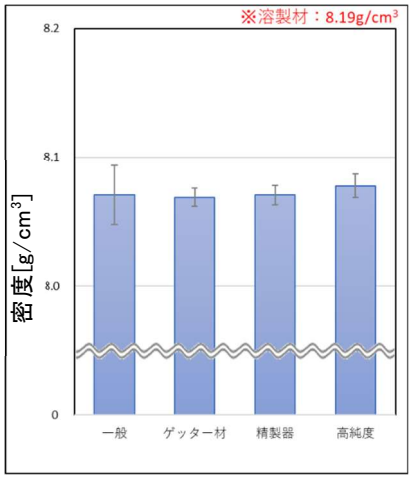


図8　各条件におけるインコネル718の密度

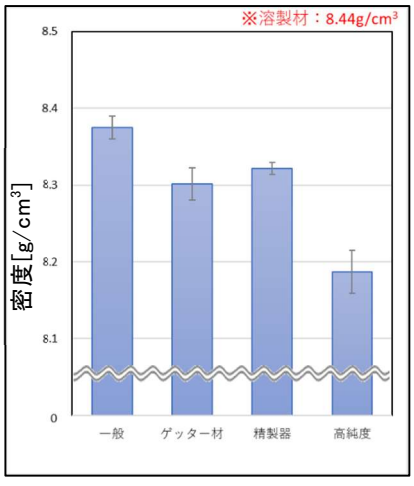


図9　各条件におけるインコネル625の密度

インコネル718については，条件毎の差が小さく，相対密度が98 %以上と十分な密度が得られた。インコネル625については，高純度アルゴンガスにおいて，特に低い密度となった。

3-3 硬さ

インコネル718及びインコネル625の各焼結条件におけるロックウェル硬さの測定結果を図10, 11にそれぞれ示す。インコネル718については, 一般工業用アルゴンガス及びガス精製器において, 硬さが高い傾向が見られた。また, 全ての条件において, 溶製材と同等の数値が得られた。インコネル625については, ゲッター材のみが硬さが相対的に低くなる傾向が見られた。

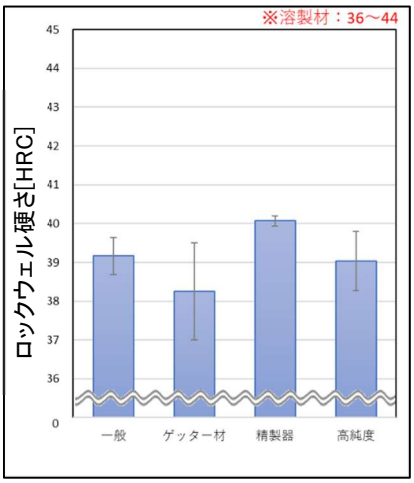


図10　各条件におけるインコネル718の硬さ

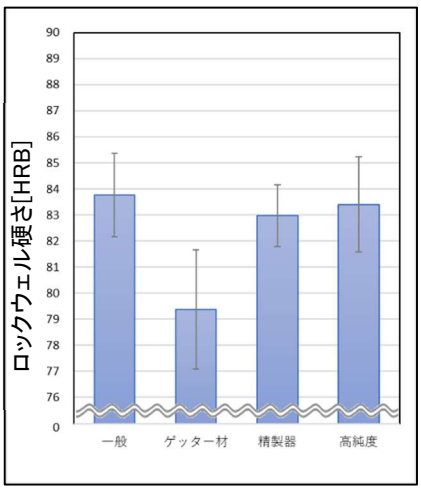


図11　各条件におけるインコネル625の硬さ

3-4 引張強さ

各焼結条件におけるインコネル718及びインコネル625の引張試験結果を図12, 13にそれぞれ示す。インコネル718については, 硬さ試験の結果と同様, 一般工業アルゴンガス及びガス精製器を用いる条件下で引張強さが向上する傾向が見られた。一方, インコネル625では, 密度測定の結果に反し, ゲッター材の使用及び高純度アルゴンガス雰囲気において溶製材に匹敵する高い強度が得られた。

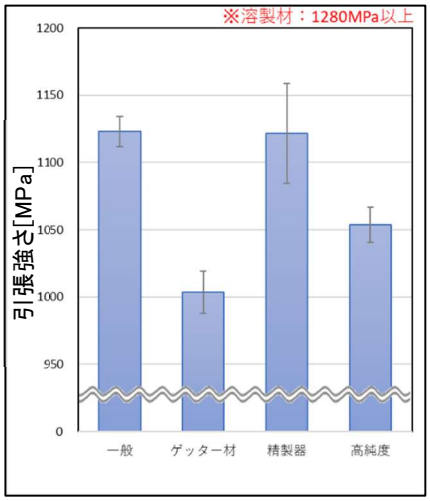


図12　各条件におけるインコネル718の引張強さ

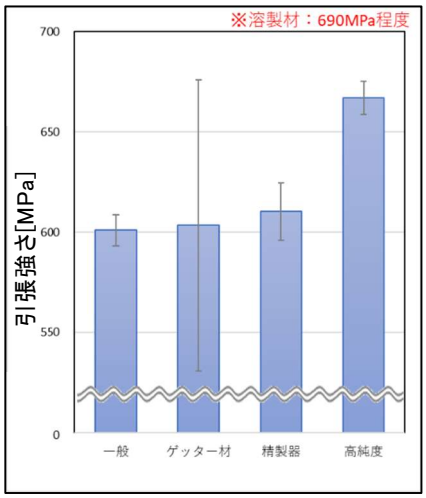


図13　各条件におけるインコネル625の引張強さ

本実験は全条件において同一の焼結温度を採用したが, インコネル625については, 雰囲気条件ごとに焼結温度を最適化することで, さらなる高密度化及び機械的性質の向上が可能であると考えられる。

4 まとめ

製品化を目的としたインコネルの機械的性質に関する基礎研究を行った。本研究によって雰囲気のわずかな差が焼結体の状態に影響を与えることが分かった。特にインコネル625は雰囲気中の酸素を取り除く効果が顕著に見られた。

5 参考文献

1) 日本規格協会：金属粉末射出成形材料－仕様（JIS Z 2551), (2021)

材料押出(MEX)方式による純銅積層造形部品の焼結変形抑制と材料特性に関する研究

山田 泰希[*1]　佐藤 惇[*1]　竹下 朋春[*1]

Study on Sintering Deformation Control and Material Properties of Pure Copper Parts Fabricated by Material Extrusion (MEX) Method

Taiki Yamada, Atsushi Sato and Tomoharu Takeshita

材料押出法（MEX）は純銅積層造形（AM）の低コストかつ安全な手法として期待されているが，焼結時の大きな体積収縮に伴う変形が寸法精度上の課題となっている。本研究では，高周波焼入れコイル等の部分形状を模擬した「C字型試験片」に着目し，特有の開口変形に対するサポート構造の抑制効果を検証した。結果として，開口部に1 mm角の微小サポートを付与することで，自然な体積収縮を阻害せずに変形を抑制できることが判明した。更に，相対密度92.8 %，電気伝導率96.3 %IACSという高い材料特性を確認し，高精度・高機能な純銅部品造形に向けた実践的な設計指針を構築できた。

1 はじめに

近年，AI技術の発展や半導体需要の拡大に伴い，熱マネジメント部品として高い熱伝導性と電気伝導性を有する「純銅」の複雑形状部品（データセンタ用コールドプレートやヒートシンク等）に対するニーズが高まっている[1)]。金属積層造形（AM）技術のうち，粉末床溶融結合法（PBF）や指向性エネルギー堆積法（DED）等のレーザ方式においては，純銅の光反射率の高さが課題であり[2)]，ブルーレーザや電子ビーム等の高額な専用装置が必要となる。これに対し，材料押出法（MEX）は，導入コストが安価かつ材料のハンドリングが容易であり，金属粉末の飛散による粉塵爆発や人体ばく露のリスクがなく，一般的な環境下で安全に造形できることから，純銅の新たな造形プロセスとして大きな注目を集めている。

MEX方式は，金属粉末を流動性物質(バインダー)と混練後，射出成形・脱脂焼結によって高精度複雑形状の三次元製品を製造する，金属粉末射出成形(MIM)の技術が応用される。図1に示す通り，造形後に脱脂・焼結工程が必須であり，焼結工程において寸法収縮が発生することが固有の制約となっている。

特に，本手法を用いて純銅製の高周波焼入れ用コイル等を造形する場合は，三次元的な内部冷却水路の一体形成や，ろう付けの工程の削減というメリットを享受できる。一方で，造形検証を進める中で，1ターンコイルを模擬したC字型形状を焼結する際に特有の現象として「スリット開口部が外側に大きく広がる変形」が生じることが明らかとなった(図2)。この開口変形は，実用部品に求められる寸法精度を達成する上で解決すべき重大な課題である。本研究では，このC字型スリット部の変形に対し，最適なサポート構造の付与による抑制効果を検証するとともに，焼結体の密度や電気伝導率をはじめとする材料特性を総合的に評価し，実用化に向けた知見を得ることを目的とする。

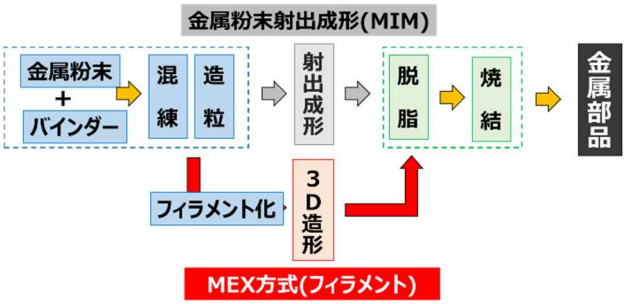


図1　MIMとMEXの工程

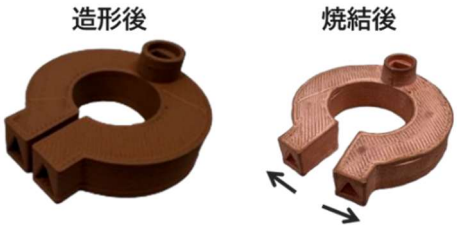


図2　焼結時の変形例

2 研究，実験方法

*1 機械電子研究所

本実験では，純銅MEX造形時の開口変形対策として，図3に示す通り，スリット開口部を連結するサポート構造の寸法を変化させた3パターンのC字型試験片（外径40 mm，内径30 mm）を設計した。サポートの設計寸法は以下の通りである。

(a)C字型①（拘束なし）： 開口部のサポート構造無し

(b)C字型②（面方向の拘束）： 開口部に幅5 mm，厚み0.5 mmの薄板状サポートを付与

(c)C字型③（点の拘束）： 開口部に幅1 mm，厚み1 mmの細線状サポートを付与

これらの試験片を純銅フィラメントを用いて造形し，窒素雰囲気下における加熱脱脂，および真空下における高温焼結処理を，規定の温度プロファイルに従って行った。焼結完了後の試験片は，3Dデジタイザを用いてスリットの開口幅，および内径の寸法を測定した。

また，電気特性等の材料物性を評価するため，アルキメデス法を用いた密度測定を実施した。更に，焼結後のC字型試験片に対して全面研磨を施し，表面の凹凸や酸化膜を除去した上で，抵抗値測定を実施した。得られた寸法データと抵抗値から電気伝導率（%IACS）を算出し，理論値および先行研究のデータと比較検討した。

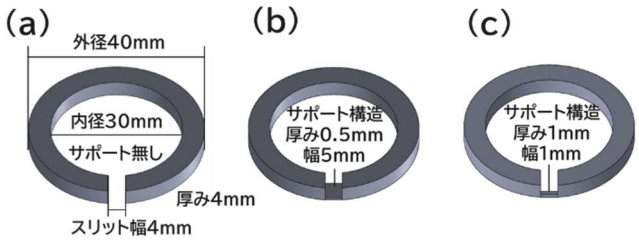


図3　設計したC字型試験片

(a)C字型①　(b)C字型②　(c)C字型③

3 結果と考察

3-1 サポート構造によるC字型試験片の変形抑制効果

各パターンのC字型純銅試験片における脱脂・焼結後の写真を図4，寸法測定結果を表1に示す。なお，表中の狙いの寸法は，等方的な収縮率から算出したものである。

実験の結果，開口部に対する拘束の有無によって変形の挙動が大きく変化することが確認された。サポートを一切付与しない比較基準の「C字型①」では，内径および開口幅が狙いの寸法から大きくずれ，変形が生じる結果となった。これは，焼結過程においてC字形状特有の収縮応力が開口部を外側へ押し広げるように働いたためと考えられる。

一方で，開口部を繋ぐ形で幅5 mm・厚み0.5 mmの「C字型②」を付与すると，開口幅の差分が狙いの寸法に対して-0.17へと改善を見せた。更に，拘束面積を落とした幅1 mm・厚み1 mmの「C字型③」においては，内径差分-0.20 mm，開口幅差分-0.15 mmとなり，全ての測定項目が最も設計値に近い良好な結果を示した。これらの結果により，C字型特有の開口部が広がる変形を防ぐためには，部品全体の自然な体積収縮を阻害せず，かつ開口部の広がりのみを物理的に繋ぎ止めるサポート構造を採用することの有効性が確認された。

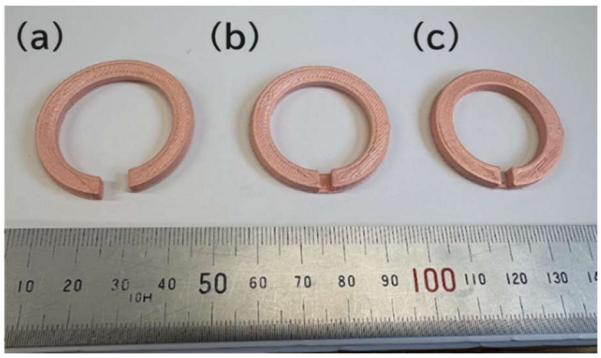


図4　脱脂焼結後の写真

(a)C字型①　(b)C字型②　(c)C字型③

表1 脱脂・焼結後の寸法測定結果

試験片条件	サポート寸法	内径 実測値（差分） ※狙い24.6	開口幅 実測値（差分） ※狙い3.28
C字型①	サポート無し	27.84 mm (+3.24)	6.76 mm (+3.48)
C字型②	幅5.0/ 厚み0.5 mm	25.66 mm (+1.06)	3.11 mm (-0.17)
C字型③	幅1.0/ 厚み1.0 mm	24.40 mm (-0.20)	3.13 mm (-0.15)

3-2 密度および電気伝導率の評価

実用的な熱マネジメント部品や電磁気部品としての性能を担保するため，アルキメデス法による密度測定および，全面研磨を施したC字型試験片を用いた電気特性の評価を行った。

本研究では，焼結体の相対密度の算出にあたり，無酸素銅（JIS C1020）の理論密度である 8.94 g/cm³ を基準値（100%）として用いた[3)]。アルキメデス法によって測定した結果，焼結体の相対密度は 0.928

（92.8 %）であった。更に，研磨後の試験片の寸法（厚さ2.7 mm，断面積 12.259 mm²，有効端子間距離 87.84 mm）と，測定された抵抗値 R = 0.1283 mΩ から体積抵抗率 ρ を算出した。その結果，体積抵抗率は 1.791 $\mu\Omega\cdot$cm となり，これを基に算出した電気伝導率は96.3 %IACSという良好な値を記録した。

一般に，多孔質体の電気伝導率は内部の空隙の影響を強く受け，相対密度に依存して低下する。本研究における相対密度0.928という数値は，バルク材と比較すると更なる高密度化の余地を残している。この密度に対して96.3 %IACSという高い導電率が算出された点については，測定に用いたC字形状特有の要因を考慮する必要がある。本試験片における測定では電流が最短経路となる内径側を優先的に流れる「偏流」が生じやすく，平均直径から算出した端子間距離よりも実効的な電流経路が短くなる。そのため，得られた数値は形状依存の「見かけの電気伝導率」として高めに算出されている可能性が考えられる。

しかし，その形状要因を考慮しても本プロセスの焼結体は良好な導電性を示しており，今後のプロセス最適化によりポロシティの低減が進めば，電気伝導率及び熱伝導率のさらなる特性向上が見込まれる。これは，先行研究[4]における標準的なMEX造形品のデータ（表2）と比較しても良好な数値であり，高周波コイル等のプロトタイプ製作に向けた適用可能性が示されたと言える。

表2 MEX造形品と相対密度と電気伝導率

造形手法･材料	相対密度［%］	電気伝導率［%IACS］
MEX(本研究)	92.8	96.3
MEX(先行研究[4])	95.3 ± 0.5	82 ± 1
バルク材	100	100

4 まとめ

本研究では，PBF（粉末床溶融結合法）やDED（指向性エネルギー堆積法）等のレーザ方式において課題とされる光反射率の問題や，微細粉末の飛散に伴う粉塵爆発・人体ばく露のリスクという安全上の課題を低減し，純銅部品を安価かつ安全に製造できるMEX方式に着目した。

MEX方式による高品質な造形を実現するため，脱脂・焼結プロセスにおける寸法収縮の挙動と効果的な変形抑制手法を検証した。

その結果，C字型スリット部の開口変形に対しては，開口部に1 mm角の微小なサポート構造を付与することで，全体の収縮を阻害せずに寸法精度を向上できるという実用的設計指針を得た。

また，造形物の材料特性評価において，0.928の相対密度と，MEX方式による純銅造形物としては高い96.3 %IACSの電気伝導率を確認した。これらの結果は，環境負荷や作業安全性の面でも優れる本手法が，実用的な電磁気・熱管理部品の製造プロセスに適用可能であることを示した。

5 参考文献

1) Tran, T. Q., et al. : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , Vol. 122 , pp. 285-306 (2022)

2) E. Hosseini, V. A. Popovich : Additive Manufacturing , Vol. 29 , 100784 (2019)

3) 日本産業標準調査会 : JIS H 3100 銅及び銅合金の板及び条 , 日本規格協会 (2018)

4) Antonio Cañadilla : Materials , Vol. 15 , p. 4644 (2022)

V字型形状の雨どいにおける排水時の砂の流動解析

山本 圭一朗[*1]　大内 崇史[*1]　松橋 洋子[*2]

Analysis about Sand-Water Flow in V-shaped Eaves Gutter Drainage

Keiichiro Yamamoto, Takafumi Ouchi and Yoko Matsuhashi

エスビー工業（株）は断面がV字型の形状を有する住宅用雨どいを製品化している。雨どいの詰まりの要因に落ち葉，土砂やゴミなどの堆積があり，雨どいの断面形状によって排水時の流動も異なることが予想された。そこで本研究では，砂を対象とした雨どい排水時の挙動を数値解析するとともに，実験によって流動状況を撮影した。断面がV字型と市販角型雨どいの流量5 L/minにおける解析結果から，V字型雨どいは角型雨どいよりも雨どいを流れる水の流速が大きく，砂を模擬した粒子の全てが雨どいから排出された。また，砂の流動状況を撮影した実験においても，V字型雨どいの方が角型雨どいよりも砂が排出されやすかった。

1 はじめに

住宅用雨どいの断面は，半円型や角型形状が一般的であるが，エスビー工業（株）では石灰石を主原料とするLIMEX（ライメックス）[1)]を使用するV字型形状の雨どい（図1）を製品化している。



図1　エスビー工業（株）の雨どい

雨どいの詰まりの要因に，落ち葉，土砂やゴミなどの堆積があり，雨どいの断面形状によって排水時の流動が異なることも予想される。そこで，本研究では砂を対象とし，雨どいの排水時における流動について数値解析と実験による流動状況を調べた結果について報告する。

2 研究，実験方法

2-1 解析方法

解析対象はV字型と市販の底面80 mmの角型雨どいとし，排水時の砂の挙動を模擬した解析を行った。図2に示すように，長さ1,500 mmの雨どいの入口に長さ100 mmの流入流路を設けて入口から水を5 L/min流し，水の挙動を界面捕獲法（Volume of Fluid法）による非定常自由表面流れ解析により予測した。雨どいに勾配は設けず，解析領域内の初期状態は空気のみとした。砂は離散要素法（Discrete Element Method）を用いた解析を行うこととし，形状を球，密度を2,000 kg/m^3，粒径を細砂と中砂の粒径区分である0.25 mm[2)]とした。粒子の生成位置は雨どい出口より上流995 mmから1,005 mmの区間とし，図3に示す破線の領域内にV字型雨どいでは2,530個，角型雨どいでは2,496個の粒子をランダムな配置で計算開始時に生成させた。時間刻みは0.01秒一定とし，計算は流入開始より60秒までとした。

解析ソフトウェアにはscFLOW V2024.2（ソフトウエアクレイドル社）を使用し，解析領域はポリヘドラル要素により分割した。メッシュサイズは雨どい底面より1/3の領域を3 mm，それ以外の領域を6 mmとし，境界層は厚みの変化率1.1の8層とした。

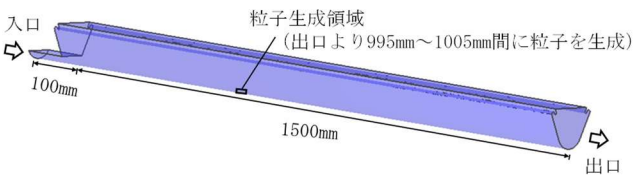
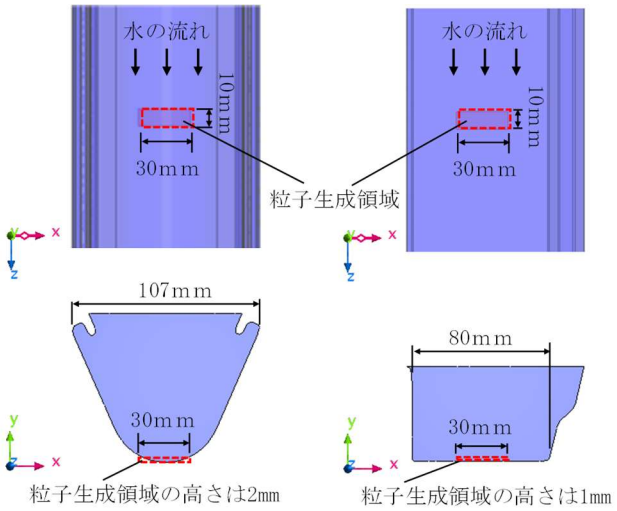


図2　雨どいの解析形状

*1 機械電子研究所
*2 エスビー工業(株)



V字型　　角型

図3　粒子生成領域

2-2 実験方法

雨どいの排水時における砂の挙動を観察するために，図4に示す実験を行った。長さ3 mのV字型と角型の雨どいを流れ方向に1° の下り勾配を付けて設置し，砂5 gを雨どいの出口側より1 m上流の中央部に置き，水5 L/minを流した時の砂の挙動をカメラで撮影した。砂は機械電子研究所内の敷地より採取し，目開き2 mmのふるいを通過したものを用いた。

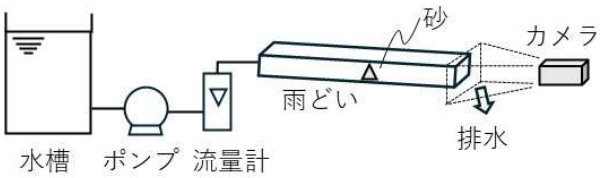


図4　排水時の砂の挙動の観察実験

3 結果

3-1 解析結果

V字型と角型雨どいの流入開始時と60秒後における粒子の排出状況を図5，図6に示す。粒子の位置を確認しやすくするため，粒径は50倍拡大して描画している。V字型雨どいでは，60秒後には全ての粒子が雨どいより排出されたのに対し，角型雨どいでは，404個の粒子が雨どいに残存する結果となった。

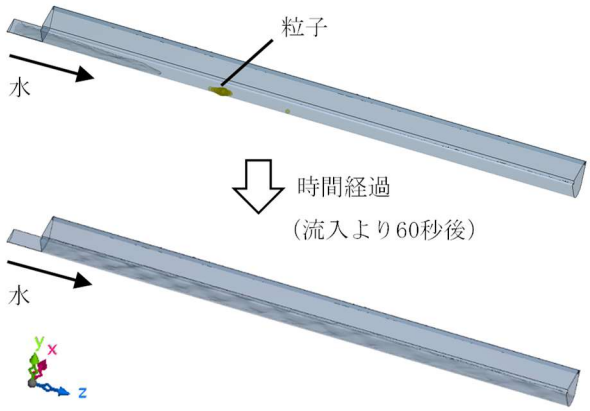


図5　V字型の雨どいの粒子排出状況の解析結果

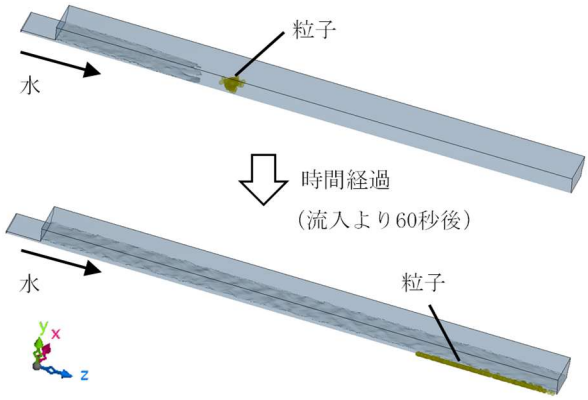
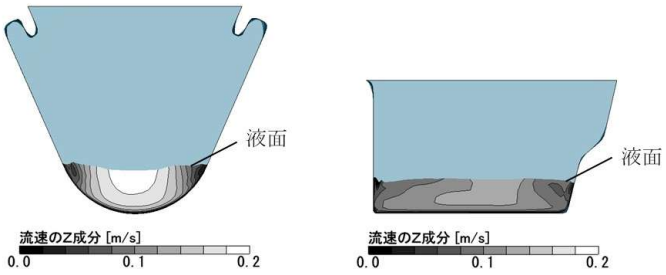


図6　角型の雨どいの粒子排出状況の解析結果

図7に，粒子生成領域の断面における水の出口方向の流速分布を示す。V字型雨どいは，中央部がくぼんだ形状であることから，角型雨どいより水の流速が大きく，流速の影響により全ての粒子が雨どいより排出されたものと考えられる。



V字型　　角型

図7　雨どいにおける水の流速分布

3-2 実験結果

V字型と角型の雨どいにおける実験開始前の砂の状況を図8に，実験開始より60秒後の砂の状況を図9に示す。角型雨どいでは砂が雨どいに残っているが，V字型雨どいでは目視による雨どいへの砂の残存を確認できなかったことから，解析と同様にV字型雨どいの方が砂が排出されやすいという結果となった。

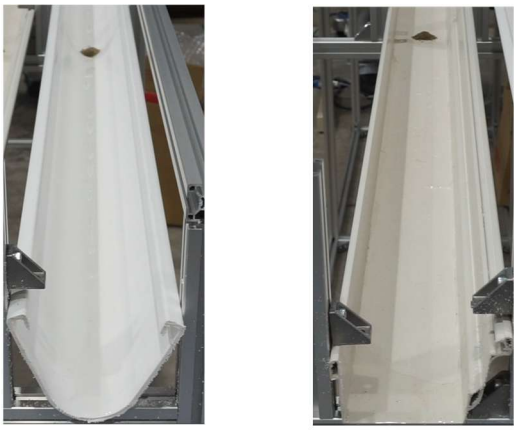


図8　実験開始前の砂の状況

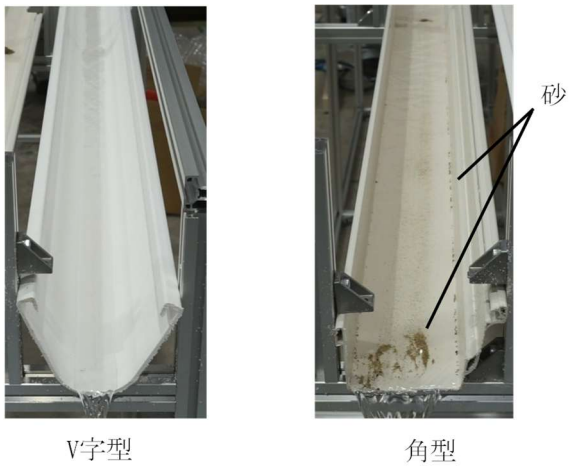


図9　実験開始60秒後の砂の状況

4 まとめ

雨どいの排水時における砂の挙動を数値解析するとともに，実験による流動状況の撮影を行った。V字型と角型の雨どいにおける流量5 L/minにおける解析結果から，V字型雨どいは角型雨どいよりも雨どいを流れる水の流速が大きいために，砂を模擬した粒子が排出されやすいと考えられた。また，流動状況を撮影した実験においても，V字型雨どいの方が，角型雨どいと比較して砂が排出されやすいという結果となった。

5 参考文献

1) （株）TBM ： LIMEX とは？ https://tb-m.com/study/limex/ （参照2026-04-28）

2) JGS 0051「地盤材料の工学的分類方法」

IoT導入支援キットと連携可能な画像認識AIツールの試作

前田 洋征[*1]

Development of a Prototype Image Recognition AI Tool Compatible with the IoT Starter Kit

Hiroyuki Maeda

モノづくり中小企業では，AI・IoT等のデジタル技術を活用した変革が求められているが，専門知識や人材不足等の理由から導入は十分に進んでいない。弊所では，IoT導入支援キット等を用いた生産現場の見える化による県内中小企業のデジタル化支援を進めてきた[1)]。しかしながら，多くの企業を支援する中でIoT技術だけでは解決困難な課題も存在しており，新たな企業ニーズに対応できる支援ツールが必要であった。そこで本研究では，専門知識がなくても生産現場で活用でき，安価で手軽に試用できる画像認識AIツールを開発した。本ツールは，クラウド不要で1台のデバイスのみで画像データの収集から学習と推論が可能なエッジ完結型AIツールであり，IoT導入支援キットとの連携も可能としている。

1 はじめに

モノづくり中小企業は人手不足や製造コスト増大などの課題を抱えており，デジタル技術を活用した生産性向上が求められている。このような背景から弊所では，IoT導入支援キット等の開発を行い，IoTを活用した生産現場の見える化支援を進めている。しかしながら，さまざまな企業を支援する中で，IoTの導入だけでは解決できない現場課題も存在している。

こうした中，近年ではAI技術が急速に進化しており，特に生成AIは一般にも広く認知され活用が広がっている。生成AIは高度な情報検索や文章・画像・コードなどの生成が可能であり，多様な用途に利用されている。一方で，生成AIは一般的な情報を中心に学習されているため，生産現場固有の課題解決に直接活用することは難しい。特に，生産現場は業務内容や現場環境が企業ごとに大きく異なっており，多様な課題が存在している。そのため，各現場に対するAI導入の個別対応が必要となることがAI導入の障壁となっている。

そこで本研究では，専門知識がなくても多様な生産現場で活用でき，手軽に導入・活用できるよう，安価なデバイスを用いた画像認識AIツールを試作する。弊所はこれまで，IoT導入支援キットや生産進捗管理システムYokaKit等のツールを開発し，これらを活用することで幅広い企業を支援してきた。AI導入支援においても，AI技術を手軽に試用できるツールを開発し，活用してもらうことで幅広い県内中小企業へのAI導入促進を目指す。

*1 機械電子研究所

2 画像認識AIツールの構成

本研究では，生産現場で利用できるようにエッジ上で動作する画像認識AIツールの開発を行った。市販されているエッジAI製品には，追加学習が可能な製品も存在するが，基本的には認識可能な対象が限定されている場合が多い。そのため，現場ごとの多様なニーズに柔軟に対応することが難しい。一方，任意の画像認識を実現する方法としては，AI開発向けエッジデバイスを使用する手段がある。しかし，これらはAIモデルの推論実行に特化したものが多く，学習にはパソコンやクラウドサービスを利用する必要がある。例としては，Google ColabやRoboflowなどのクラウドサービスを用いてAIモデルを学習し，生成したモデルをエッジデバイスに書き込んで使用する方法がある。これらのクラウドサービスはオンライン上でGPUを利用できるため，高速なAI学習ができることが利点である。しかし，継続利用に伴う課金制への懸念やクラウド上にデータをアップロードする必要があり，顧客製品などの機密情報を扱う可能性がある生産現場では，導入の障壁になる場合がある。そのため，開発するAIツールはクラウドを使用しない構成が良いと考えた。

そこで本研究では，クラウドを利用しないオンプレミス型で，1台のデバイスのみで画像データの収集，学習と推論まで実行可能なエッジ完結型の画像認識AI

ツールを開発した。開発したエッジAIツールのコンセプトを図1に示す。

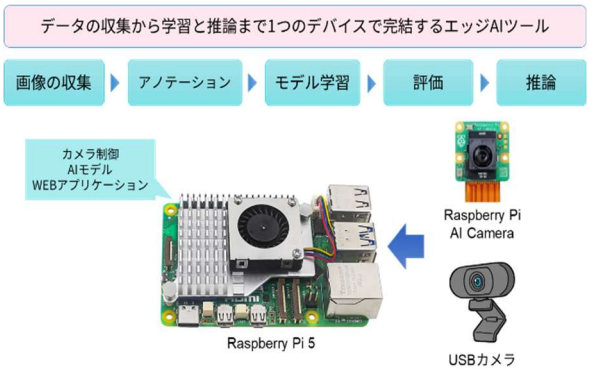


図1 エッジAIツールのコンセプト

エッジデバイスには，Raspberry Pi 5を採用した。AI学習で一般的に使用される汎用GPU計算を実行できないが，比較的安価であり導入しやすい特徴がある。なお，Raspberry Pi 5では，AIモデルの学習中や推論時にはCPUが高温になるため，冷却用アクティブクーラーを装着する。カメラには，Raspberry Pi AI Cameraまたは一般的なUSBカメラを使用できるようにした。Raspberry Pi AI Cameraは，Sony製のインテリジェントビジョンセンサーIMX500を内蔵するRaspberry Pi公式のAIカメラである。IMX500は，カメラに加えて推論アクセラレータを内蔵しているため，Raspberry Pi側ではなくカメラ側で推論を実行できる。一方，推論性能は低下するが，汎用性を考慮した一般的なUSBカメラも使用可能とした。

2-1 YOLO

AIモデルには，リアルタイム物体検出アルゴリズムであるYOLOを採用した。YOLOは，高速かつ高精度に物体検出が可能なオープンソースソフトウェアである。YOLOには，複数のバージョンやモデルサイズが存在するが，本研究ではRaspberry Pi 5で動作可能な小規模モデルを採用した。本ツールには，YOLOによるAIモデルの学習・生成やリアルタイム推論機能を実装した。

2-2 Label Studio

画像認識におけるAI学習では，画像内の認識対象に対するラベル付けと画像内の位置を示すバウンディングボックスを付与するアノテーション作業が必要になる。本研究では，アノテーションツールとしてLabel Studioを採用した。Label Studioは，画像，テキストなど，多様なデータ形式に対応したオープンソースのアノテーションツールであり，Webブラウザから操作可能である。本ツールでは，収集した画像データをLabel Studioに取り込み，アノテーション作業後には学習用データセットを作成できる構成とした。

3 Webアプリケーションの構成

本ツールのソフトウェアはWebアプリケーションとして開発を行った。開発言語にはPythonを採用し，WebフレームワークにはFastAPIを使用した。FastAPIは，高速な処理性能を持つPython向けWebフレームワークであり，REST APIを容易に構築できる特徴がある。さらに，Webブラウザから操作可能にすることで，同一ネットワーク内のパソコンやタブレットなどから利用可能な構成とした。本Webアプリケーションには，学習データの収集機能，Label Studioを用いたアノテーション機能，YOLOによるモデル学習機能，リアルタイム推論機能を実装した。また，IoT導入支援キットと連携ができる構成とした。

3-1 Webアプリケーションの画面構成

本Webアプリケーションは，サイドメニューから任意のメニューを選択して使用する構成とした。サイドメニューは「プロジェクト」，「データセット」，「撮影」，「アノテーション」，「学習」，「推論」，「連携」，「設定」，「電源」から構成される。

「プロジェクト」画面では，画像認識の名称や学習データ，モデル設定を含むプロジェクトの新規作成や管理を行う。「データセット」画面では，画像および動画の管理を行う。本ツールにより撮影した画像や動画は，このデータセット画面から閲覧できる。「アノテーション」画面では，Label Studioの起動やLabel Studioへの画像データのインポートを可能としている。本アプリケーションからLabel Studioを起動・利用できるようにすることで，専門知識を持たない利用者がアノテーション作業を容易に実施できる構成とした。「設定」画面では，接続されているカメラの一覧表示，Raspberry Pi 5のストレージ使用容量やCPU温度の確認が可能である。「電源」画面では，Raspberry PiとLabel Studioの再起動及びシャットダウンを実行できる。その他の主要機能は次節に示す。

3-1-1 撮影機能

本ツールにおける「撮影」画面を図2に示す。

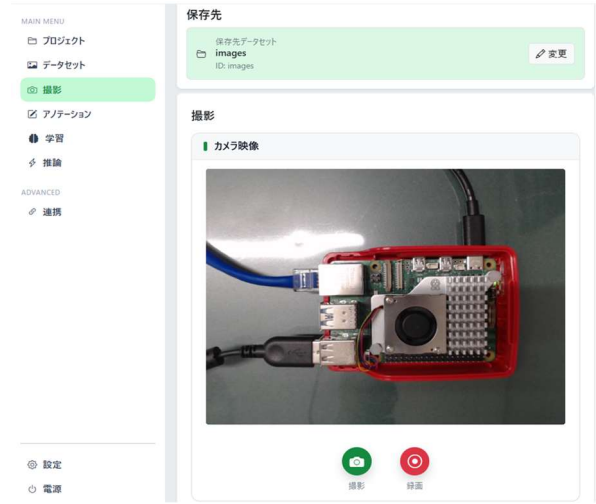


図2 撮影画面

「撮影」画面では，Raspberry Pi AI CameraまたはUSBカメラを使用した画像および動画の撮影を可能としている。撮影時は，保存先となるデータセットを選択する必要がある。また，撮影した動画を学習用データとして利用できるように画像として出力できる。

3-1-2 学習機能

「学習」画面を図3に示す。学習画面では，YOLOを用いたAIモデル学習の設定を行い，学習によってモデルを生成できる。ユーザーは学習に使用するデータセットを選択し，ラベル（クラス）の設定，エポック数，入力画像サイズやバッチサイズなどの学習用のパラメータを設定できる。また，学習済みモデルを選択して追加学習を行うことも可能としており，既存モデルを活用した学習にも対応している。



図3 学習画面

3-1-3 推論機能

「推論」画面を図4に示す。この画面では学習済みモデルを選択し，リアルタイム推論を実行できる。推論用カメラにRaspberry Pi AI Cameraを使用する場合は，作成したモデルをIMX500用に変換する必要がある。しかし，この変換作業はRaspberry Piで実行するには処理負荷が大きい。そのため，本ツールではWindowsパソコンで変換作業を行い，変換後に生成されたIMX500用ファイルを用いて推論を実行する構成とした。

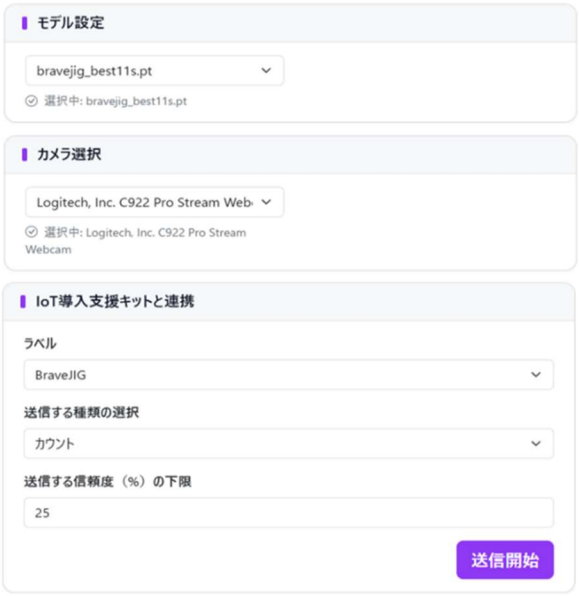


図4 推論設定画面

図5に，Braveridge製のIoTデバイスBraveJIGルーターを認識対象としたリアルタイム推論の実行例を示す。



図5 リアルタイム推論画面

リアルタイム推論では，認識対象をバウンディング

ボックスで表示し，認識結果のラベル名と信頼度を表示する。また，リアルタイム推論時には，連携画面で設定したIoT導入支援キットに対して，認識した物体名とカウント数を送信することが可能である。

3-1-4 連携機能

「連携」画面ではIoT導入支援キットとの連携設定が可能になっている。連携画面を図6に示す。



図6 連携画面

IoT導入支援キットにはWeb API機能を用いて外部システムと連携する機能が備わっており，デバイスおよびセンサ種別を登録することで，外部システムも標準センサと同様に扱うことができる。本ツールではこのWeb APIを使用して連携を実現した。連携画面では，IoT導入支援キットのIPアドレスを設定でき，本ツールをセンサデバイスとして登録することで，画像認識結果を外部センサ情報として送信する構成とした。また，IoT導入支援キットでは接点出力デバイスを用いた外部機器の駆動が可能になっている。そのため，本ツールがIoT導入支援キットと連携することで，特定の物体を認識した時や設定したカウント数以上の物体を認識した時に，警告灯の点灯や装置の駆動が実行可能になっている。

4 結果と考察

本研究では，Raspberry Pi 5を用いたオンプレミス型のエッジ完結型画像認識AIツールを試作した。本ツールでは，1台のデバイスのみで学習データの収集，アノテーション，YOLOによるAIモデル学習およびリアルタイム推論が可能になっている。さらに，IoT導入支援キットとの連携により，物体認識だけでなく，認識結果に基づいて外部機器の駆動まで可能としている。

本ツールでは低コストを重視しているため，GPUを搭載した環境と比較すると，学習に多くの時間を要する。また小規模モデルを使用しているため，精度面に制約がある。しかし，中小企業における画像認識AIの初期導入支援用途としては，十分活用できると考えている。なお，ライセンス面については，YOLOのライセンス条件を考慮し，県内企業の現場で利用する場合は，利用者へのソースコード公開を前提とする運用方法を検討する必要がある。

5 まとめ

本研究では，県内中小企業におけるAI導入支援を目的として，低コストで導入可能なオンプレミス型の画像認識AIツールを開発した。今後は，操作性向上のためのUI改良に加え，画像分類機能，異常検知機能，OCR機能などの実装を進める予定である。また，汎用GPU計算が可能なNVIDIA製のJetsonシリーズに対応させた高性能版の開発も進めることで，用途に応じた選択肢拡充および適用範囲の拡大を目指す。さらに，本ツールを活用した県内企業へのAI導入支援を進め，生産現場におけるAI普及に取り組む予定である。

6 参考文献

1） 前田 洋征，田口 智之，奥村 克博，西村 圭一，小橋 泰成：福岡県工業技術センター研究報告，No.35(2025)，pp.66-69

IoT導入支援キットを用いた簡易電力測定手法の開発

前田 洋征[*1]　古賀 文隆[*1]

Development of a Simplified Power Measurement Method Using IoT Starter Kit

Hiroyuki Maeda, Fumitaka Koga

製造業において電力使用状況を把握することは，エネルギー効率の改善やコスト削減に有効である。さらに，サプライチェーン全体におけるCO_2排出量の開示義務化（Scope 3）が段階的に進められていることから，製造業における電力使用状況把握の必要性が高まっている。しかしながら，工場の生産設備それぞれの消費電力を把握することは容易ではない。そこで，本研究では，弊所が開発しホームページで無償公開しているIoT導入支援キットを用いた簡易的な電力測定手法の開発を行った。IoT導入支援キットを用いて測定した電力値と市販の簡易電力ロガーの測定値を比較した結果，同等の電力測定が可能であることを確認できた。

1 はじめに

近年，燃料価格の上昇を背景に電気料金が高騰しており，製造業にとって電力コストの増加が大きな負担となっている。また，日本政府はカーボンニュートラルの実現に向けた取り組みを推進しており，自社の事業活動に伴う温室効果ガス排出量だけでなくサプライチェーン全体で排出される温室効果ガスについても把握・削減の対象としている。このため，中小企業においても，温室効果ガスの排出要因である電力使用量を把握し，消費電力削減に向けた取り組みが不可欠であり，加工機の消費電力量計測の事例が報告されている[1)]。しかし，工場に設置された各装置の消費電力を個別に把握することは容易ではない。消費電力を把握する方法として，市販の簡易電力ロガーを使用する方法があるが，電力計測に関する専門知識が必要になる。他に，高精度な電力計測機器を導入する方法もあるが，設備導入に高額なコストがかかることから，中小企業における電力使用量の把握は十分に進んでいない。

このような背景から，低コストかつ容易な電力測定手法が求められているのに対して，弊所が開発したIoT導入支援キットは，電力測定には対応できていなかった。そこで，本研究では，IoT導入支援キットを用いた簡易的な電力測定手法を開発し，市販の簡易電力ロガーと比較することで測定精度の評価を行った。

2 IoT導入支援キット

弊所は県内中小企業の生産性向上を支援するために，低コストかつ簡単にIoT導入できるツールとしてIoT導入支援キットを開発し，弊所ホームページに無償公開している[2)]。IoT導入支援キットの構成を図1に示す。



図 1 IoT 導入支援キット

IoT導入支援キットとは，プログラミング不要で簡単にIoTを始められるソフトウェアとなっており，株式会社Braveridgeと共同開発したIoTデバイスであるBravePI（ブレイブパイ）とBraveJIG（ブレイブジグ）に対応している。BravePIは，比較的安価に無線センサ化可能なIoT導入支援 組立てモジュールである。BraveJIGは，センサの無線ネットワーク化が可能で，高い設置性と防水・防塵仕様を備えたIoT/DX汎用モジュラーデバイスである。2026年5月時点では，照度，温湿度，熱電対，気圧，測距，加速度，ADC及び差圧が市販されているが，直接電力の測定はできない。

3 電力測定手法の方針および電流センサの選定

本研究では単相交流回路を対象として，IoT導入支援キットを用いた電力測定手法を開発した。交流回路における電力は電圧と電流の位相差を考慮する必要が

*1 機械電子研究所

あり，電力Pは，次式により算出される。

$$P = |E|\,|I|\,cos\theta \qquad (1)$$

式(1)においてEは電圧，Iは電流，cos θ は力率を示す。電流および力率は，負荷状況に応じて変動するため，これらを正確に測定するには電圧波形と電流波形を測定して力率を求める必要がある。しかし，この手法では高価な計測機器が必要になるうえ，測定作業も複雑になる。そこで，本研究では簡易的な電力把握を目的として，安全性および利便性も考慮し，電圧と力率を一定とみなしクランプ式電流センサを用いて測定した電流値のみから電力を推定する。クランプ式電流センサは，瞬時値型と実効値型に大別され，実効値型はさらに平均値整流型と真の実効値型に分類される。それぞれの特徴は次の通りである。

(1) 瞬時値型

電流の時間変化（波形）そのものを測定する方式であり，電流の瞬時値を測定できる。実効値の算出には測定した波形に対する演算が必要になる。

(2) 平均値整流型

交流電流を整流（絶対値化）した後の平均値を測定し，電流を正弦波と仮定して実効値を算出する方式である。電源不要で使用できる。

(3) 真の実効値型

真の実効値の測定が可能な方式である。動作には外部電源が必要となり，回路構成が複雑であるため，平均値整流型よりも高価である。

これらの3種類の電流センサから使用するセンサを選定するために，直流安定化電源の交流電源入力部の電流を測定した。また，基準値としてパワーメータとオムロン社製の簡易電力ロガーZN-CTX21による測定も行い，精度を比較した。直流安定化電源の交流電源入力部の印加電圧と電流波形の一例を図2に示す。また，各方式の電流センサで電流を測定した際のセンサ出力値を図3に示す。直流安定化電源の交流電源入力部の電流は，直流安定化電源に接続した電子負荷装置の負荷を変えることで調整した。図2では，電圧は正弦波であるのに対し，電流は電圧のピーク付近でのみ大きな値を持つ歪んだ波形になっている。

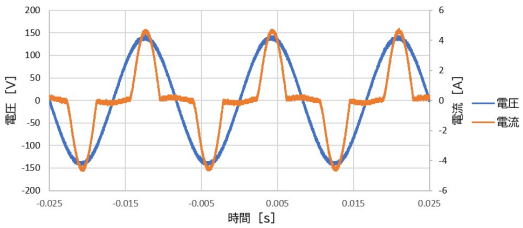


図2　直流安定化電源の交流電源入力部の印加電圧と電流波形の一例

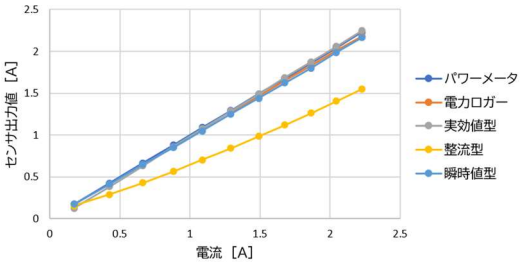


図3　直流安定化電源の交流電源入力部の電流に対するセンサ出力値

電流測定値を比較した図3に示すとおり，実効値型および瞬時値型は基準値と同等の測定ができている。一方，平均値整流型では電流波形を正弦波と仮定して実効値を算出するため，歪みのある波形では精度が低下すると一般に言われるとおり，本実験においても大きな誤差が生じている。以上の実験結果から，本研究では歪みのある波形に対しても測定可能で，別途実効値演算が不要となる真の実効値型電流センサを採用することにした。

4 電力測定手法

4-1 電流センサのハードウェア構成と電流の算出

電流センサのハードウェア構成の構成を図4に示す。

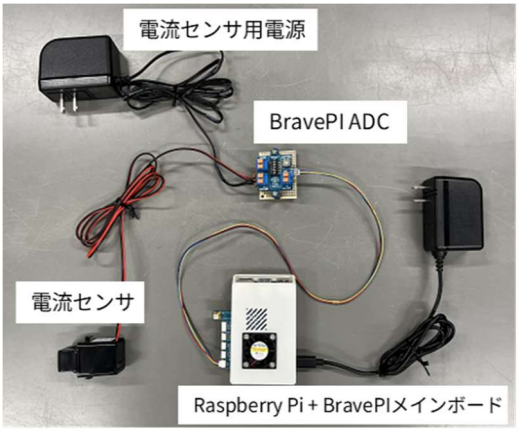


図 4 電流センサのハードウェア構成

IoT導入支援キットのハードウェアは，Raspberry PiとBravePIメインボードから構成される。電流センサおよびAC電源はBravePI ADCセンサーボードに接続され，BravePI ADCセンサーボードはBravePIメインボードのI2Cポートに接続されている。なお，ADCセンサーボードには2チャンネルの入力が存在するが，内部抵抗を設定できるのは，チャンネル1のみであるため，チャンネル1を使用した。また，内部抵抗は100 Ωに設定した。電流センサには，ユー・アール・ディー社製のCTT-CLS-RMSシリーズを使用した。CTT-CLS-RMSシリーズは，型式によって5～500 Aの定格電流に対応しており，測定結果を4-20 mAのアナログ信号として出力する。ADCセンサーボードは，4-20 mAのアナログ信号を内部抵抗にかかる電圧値として取得するため，取得した電圧値を測定電流値へ変換する必要がある。ADCで取得した電圧値Vから測定電流Iを算出する式を式(2)に示す。

$$I = aV - b \tag{2}$$

式(2)において，aは電流センサの換算係数，bはオフセット係数である。換算係数aは，電圧と電流の関係を一次関数の傾きで表し，使用するCTT-CLS-RMSの型式に応じて式(3)により求められる。また，オフセット係数bは式(4)により求められる。

$$a = \frac{I_{max} - I_{min}}{V_{max} - V_{min}} \tag{3}$$

$$b = aV_{min} \tag{4}$$

式(3)において，I_{max}はCTT-CLS-RMSシリーズの定格電流であり，I_{min}は0である。V_{max}およびV_{min}はそれぞれアナログ信号が4 mAおよび20 mAのときに内部抵抗100 Ωにかかる電圧であり，V_{max}=2 V，V_{min}=0.4 Vである。例として，「CTT-16-CLS-RMS10」は定格電流が10 Aであるため，換算係数aは，

$$a = \frac{10 - 0\,[A]}{2.0 - 0.4\,[V]} = 6.25$$

と求められる。また，オフセット係数bは，0.4 Vを入力した時に測定電流が0 Aになるよう補正する係数であり，式(4)よりCTT-16-CLS-RMS10のオフセット係数bは，2.5となる。算出した測定電流とあらかじめ設定した電圧，力率を式(1)に代入することで，対象機器の消費電力を簡易的に算出できる。

4-2 電力測定に対応したIoT導入支援キット

電力測定に対応するように改良したIoT導入支援キットを図5に示す。



図5 電力測定に対応したIoT導入支援キット

図5に示すとおり，電力測定版IoT導入支援キットでは，電圧，力率，電流センサの換算係数およびオフセット係数を設定でき，これらをもとに算出した測定電流と電力の結果が表示される。

5 電力測定の評価

分電盤および3Dプリンタを対象として，開発した電力測定版IoT導入支援キットと比較対象としてオムロン製簡易電力ロガーも用いた電力測定を行った。分電盤の測定結果と一部区間を拡大した結果を図6に示す。

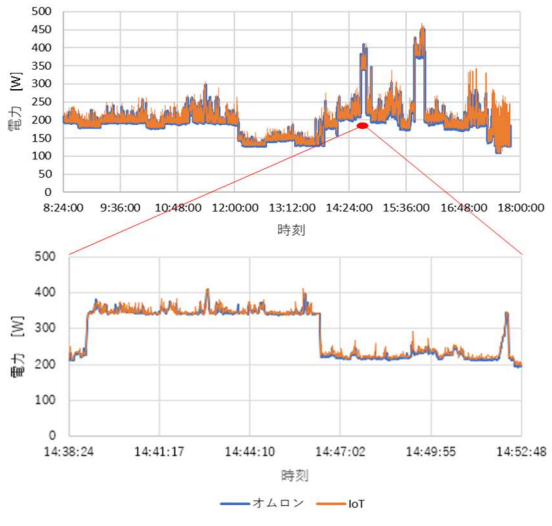


図6 分電盤の電力測定の比較

分電盤測定では，電圧100 V，力率0.7に設定した。図6より，市販の簡易電力ロガーと同等の測定結果が得られた。一部区間を拡大した結果からも，微小に変動している値も同様に測定できていることを確認できた。次に，積算電力量の比較結果を図7に示す。

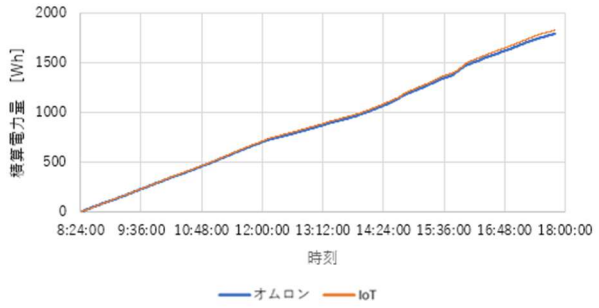


図7 分電盤の積算電力量の比較

積算電力量では，IoT導入支援キットによる結果がわずかに大きな値を示したが，測定終了時の測定誤差は1.9 %であった。

次に，3Dプリンタを対象にした電力測定の比較を図8，積算電力量の比較を図9に示す。3Dプリンタの測定では，電圧100 V，力率1に設定した。

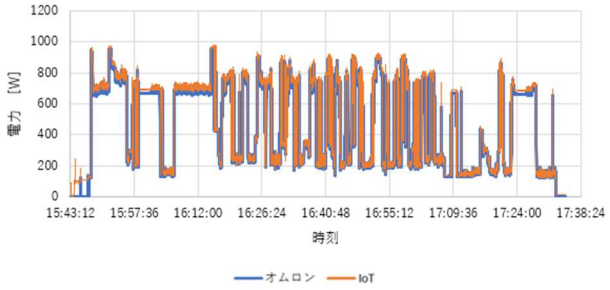


図 8 3D プリンタの電力測定の比較

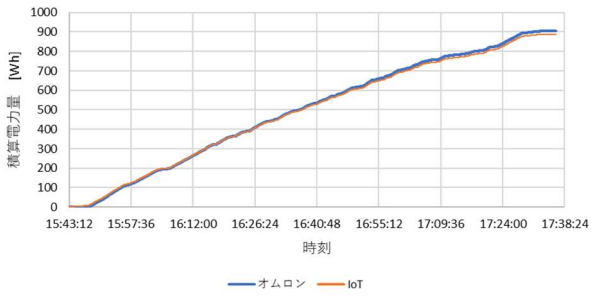


図9 3Dプリンタの積算電力量の比較

図8および図9より，3Dプリンタに対しても，市販の簡易電力ロガーと概ね一致する測定結果が得られた。また，測定終了時の積算電力量の測定誤差は1.7 %であった。以上により，本研究で開発したIoT導入支援キットを用いた電力測定手法は，市販の簡易電力ロガーと同等の測定が可能であることを確認できた。

6 結果と考察

IoT導入支援キットを用いて市販の簡易電力ロガーと同等の電力測定を実現した。市販製品と導入コストを比較した場合，電力測定版IoT導入支援キットを新たに用意するには，Raspberry Pi一式，BravePIメインボード，BravePI ADCセンサーボードおよび電流センサが必要であり，約6万円の費用が掛かる(2026年5月時点)。このうち，ADCセンサと電流センサを合わせた費用は約2万円である。また，1台あたり約1万円のBluetoothトランスミッターを使用することで，最大16台まで無線センサ化でき，2台目以降を拡張する場合は，合わせて約3万円で電力測定を追加できる。市販の簡易電力ロガーは，1台5万円前後であるため，複数個所を同時に測定する場合や既にIoT導入支援キットを用いて別のセンサを活用している場合は，既存製品より低コストに電力測定できるのが利点である。

7 まとめ

本研究では，単相交流回路を対象としてIoT導入支援キットを用いた簡易的な電力測定手法の開発を行った。電流センサに真の実効値型を採用し，BravePI ADCセンサーボードを用いて測定電流から簡易的に電力を算出する手法を開発した。また，分電盤および3Dプリンタを対象として市販の簡易電力ロガーとの比較測定を行った結果，市販の簡易電力ロガーと同等の電力測定が可能であることを示した。

今後の課題としては，さらに三相交流回路を対象としたIoT導入支援キットによる簡易電力測定手法を開発する。また，実際に県内中小企業への電力測定の導入支援で活用し，有効性を検証する予定である。

8 参考文献

1) 平井 克尚，板倉 亮馬，川島崇宏：島根県産業技術センター研究報告，第61号(2025)，pp.17-20
2) 前田 洋征，田口 智之，奥村 克博，西村 圭一，小橋 泰成：福岡県工業技術センター研究報告，No.35(2025)，pp.66-69

学協会誌
掲載論文の概要

分裂酵母におけるプロテインジスルフィドイソメラーゼPdi1pを用いた異種タンパク質分泌生産系の構築

富永 陽大[*1]　小谷 哲也[*2]　渡邊 真宏[*3]　竹川 薫[*4]

Construction of a Heterologous Protein Secretion System Using the Protein Disulfide Isomerase Pdi1p in *Schizosaccharomyces pombe*

Akihiro Tominaga, Tetsuya Kotani, Masahiro Watanabe and Kaoru Takegawa

分裂酵母*Schizosaccharomyces pombe*は有用タンパク質の生産宿主として広く利用されており，精製の容易さや機能維持の観点から有用タンパク質を細胞外へ分泌させる手法が求められている。本研究では，過剰発現によって細胞外へ分泌するPdi1p（プロテインジスルフィドイソメラーゼ）を利用した高分泌系による有用タンパク質生産法の構築に取り組んだ。モデルタンパク質である緑色蛍光タンパク質EGFPをPdi1pと結合させた融合タンパク質を過剰発現させたところ，細胞外への分泌が確認された。さらに，Pdi1pのドメイン構造を部分的に欠損させると融合タンパク質の分泌量が向上した。詳細な解析の結果，この分泌促進にはPdi1pのxドメインが重要であることが示唆された。

1 はじめに

分裂酵母*Schizosaccharomyces pombe*（以下，*S. pombe*という）は，分子遺伝学・細胞生物学の分野で詳細に研究されている，真核生物におけるモデル生物のひとつである。*S. pombe*は高等動物と多くの遺伝学・生物学上の共通点を有するため，高等動物の高発現プロモーターを利用した効率的な有用タンパク質生産が可能である。また，バイオ医薬品や機能性食品の原料となる複雑な構造のタンパク質であっても，機能を維持したまま生産できる利点がある。微生物によるタンパク質生産法には，細胞内に蓄積させた後に破砕・抽出を行う「細胞内生産法」と細胞外に分泌させる「細胞外分泌法」がある。細胞外分泌法は細胞内生産法よりも精製が容易であり，かつタンパク質の立体構造や機能を維持しやすいため，産業的に有用な手法とされている。

これまでの研究において，我々は分裂酵母のPdi1タンパク質（以下，Pdi1pという）を過剰発現するとPdi1p自体が細胞外へと分泌されることを見出している。そこで，本研究においては，Pdi1pと有用タンパク質を連結させ，Pdi1pを細胞外への分泌キャリアーとして利用する，効率的な有用タンパク質分泌生産系の構築を試みた。さらに，Pdi1pを構成している6つのドメイン（a,b,b',x,a',c）（図1）のドメイン構造を段階的に削除して，キャリアー部分を低分子化することによって分泌量がさらに向上すると考え，分泌に最適なドメイン構造の探索を行った。

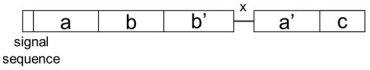


図1　*S. pombe* Pdi1pのドメイン構造

2 実験方法

2-1 菌株及び培地

宿主菌株は，細胞内外の8種のプロテアーゼ遺伝子を欠損させた*S. pombe* A8株を用いた。培地には，YPD培地（1 %酵母エキス，2 %ペプトン，2 %グルコース）を使用し，培養を行った。

2-2 ベクター

プロモーターに哺乳動物由来の高発現プロモーター（hCMV-p）を用いて，Pdi1p及びドメイン欠損型Pdi1pのC末端にモデルタンパク質として緑色蛍光タンパク質EGFP（Enhanced Green Fluorescence Protein）を連結し，融合タンパク質として発現するベクターを構築した。

2-3 トリクロロ酢酸添加によるサンプル調製

1/10量のトリクロロ酢酸を試料に添加し，氷上で15分間静置後，遠心分離（10,000×g，15分）を行った。沈殿物を冷エタノールで2回洗浄して脱塩・乾燥させ，

*1 生物食品研究所　*2 AGC株式会社
*3 産業技術総合研究所　*4 九州大学

SDS-PAGE用バッファーに溶解した。5分間の熱変性後，SDS-PAGEに供した。

2-4 ウエスタンブロット解析

試料20 μLをSDS-PAGEゲル（5-20 %グラジエント）に供し，PVDF膜に転写した。その後，Anti-GFP pAb-HRP-DirecT（1：2,000）による免疫検出を行い，シグナルを増強化学発光法により検出した。

2-5 タンパク質の立体構造解析

Pdi1pの立体構造解析はColabFoldを用いて行い，図はPyMol 2.4 softwareを用いて作成した。

3 結果と考察

3-1 Pdi1p全長及びドメイン欠損型Pdi1pを用いた融合タンパク質の細胞外分泌

Pdi1p全長及びドメイン欠損型Pdi1p-EGFP融合タンパク質発現ベクターを*S. pombe* A8株に導入した。形質転換体を48時間振とう培養し，培養上清のウエスタンブロット解析を行った結果，Pdi1p-EGFPが検出されたことから，Pdi1pが細胞外分泌を促進するキャリアーとして機能することが確認された（図2A）。また，a'ドメイン及びcドメインの削除によるキャリアーの低分子化は融合タンパク質の分泌量増加に寄与した一方で（図2A），さらにxドメインを削除すると分泌量が減少した（図2B）。以上の結果から，xドメインはPdi1pの分泌キャリアーとしての機能に重要であることが示唆された。

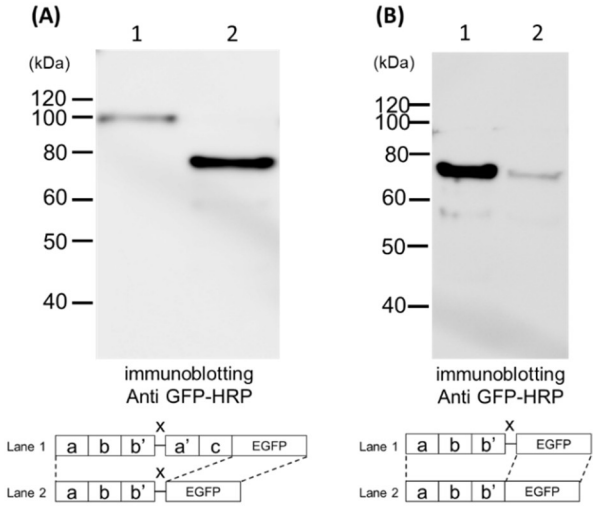


図2 Pdi1p全長及びドメイン欠損型Pdi1pとEGFPを連結させた融合タンパク質のウエスタンブロット解析
（A）1：Pdi1p全長-EGFP 2：Pdi1pΔa'c-EGFP
（B）1：Pdi1pΔa'c-EGFP 2：Pdi1pΔxa'c-EGFP

3-2 Pdi1p及び融合タンパク質の立体構造解析

15アミノ酸から構成されるxドメインは，ドメイン間の“ヒンジ”として機能し，細胞外分泌に適した立体構造の維持に寄与しているものと推測した。そこで，Pdi1p単体，Pdi1p全長-EGFP，Pdi1pΔa'c-EGFP及びPdi1pΔxa'c-EGFPについて立体構造解析を行った（図3）。Pdi1p全長-EGFPとPdi1pΔa'c-EGFPを比較すると，xループの存在によって構造的自由度が高まっていることが示唆された。対照的に，xループが存在しないPdi1pΔxa'c-EGFPではb'ドメインが分子間相互作用を通じてEGFPを固定化している様子が確認された。以上の結果から，xドメインによる分泌促進メカニズムの詳細には依然として不明な点はあるが，xループの存在とそれに伴う構造的自由度が細胞外分泌の向上に重要な影響を及ぼしていることが示唆された。

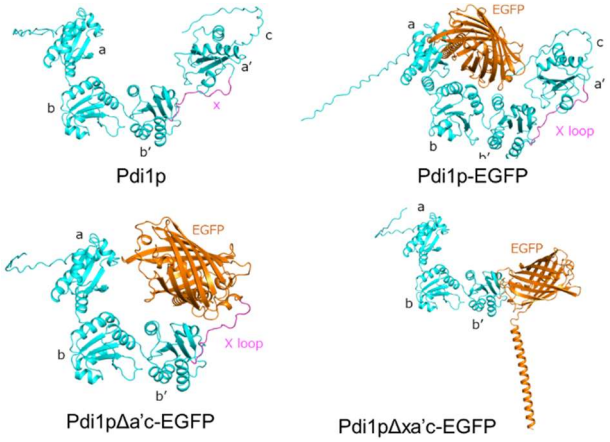


図3 Pdi1p及び融合タンパク質の立体構造モデル

4 まとめ

本研究により，分裂酵母Pdi1pを分泌キャリアーとして利用した有用タンパク質分泌生産系について，ドメイン欠損型Pdi1pの解析を通じてキャリアーの低分子化が分泌量向上に有効であることが明らかになった。さらに，xドメインが細胞外分泌に重要な役割を果たしていることが示唆された。将来的に，本研究で得られた知見と分泌メカニズムの更なる解析を組み合わせることで，高機能タンパク質分泌生産システムの産業化に貢献したいと考えている。

5 掲載論文

Journal of Bioscience and Bioengineering, Vol. 140 (4), pp. 237-243 (2025)

連絡先

研究報告の内容の他、技術的な課題は各研究所【技術総合支援室】までお問い合わせください

福 岡 県 工 業 技 術 セ ン タ ー	
企画管理部 （情報交流課）	〒818-8540　筑紫野市上古賀 3-2-1 代表 TEL:092-925-7721【問合せ TEL:092-925-5977】　FAX:092-925-7724
化学繊維研究所 （技術総合支援室）	〒818-8540　筑紫野市上古賀 3-2-1 代表 TEL:092-925-7721【問合せ TEL:092-925-7402】　FAX:092-925-7724
生物食品研究所 （技術総合支援室）	〒839-0861　久留米市合川町 1465-5 代表 TEL:0942-30-6644【問合せ TEL:0942-30-6213】　FAX:0942-30-7244
インテリア研究所 （技術総合支援室）	〒831-0031　大川市上巻 405-3 代表 TEL:0944-86-3259【問合せ TEL:0944-86-3259】　FAX:0944-86-4744
機械電子研究所 （技術総合支援室）	〒807-0831　北九州市八幡西区則松 3-6-1 代表 TEL:093-691-0260【問合せ TEL:093-691-0231】　FAX:093-691-0252

https://www.fitc.pref.fukuoka.jp/

ISSN　0916-8230

福岡県工業技術センター研究報告

No.36 （2026）

令和８年１０月発行

発　行：福岡県工業技術センター
〒818-8540　福岡県筑紫野市上古賀 3-2-1
TEL 092-925-5977　　FAX 092-925-7724

印　刷：株式会社ビー・ピー・シー

無断複写・転載を禁じます。