

ISSN 2435-7766 (Print)
ISSN 2435-7774 (Online)

令和7年度
岐阜県産業技術総合センター研究報告
第7号

Report of Gifu Prefectural Industrial Technology Center
No.7 2026

岐阜県産業技術総合センター
Gifu Prefectural Industrial Technology Center

目 次

○機械

金属積層造形材の被削性評価（第2報）	1
切削工具の工具寿命に関する研究（第2報）	4
ロボットを活用した刃付け作業の自動化に関する研究（第1報）	8

○金属

鑄造シミュレーションを用いた革新的な生産効率の向上に関する研究（第2報）	
ー鑄造シミュレーションを用いた鑄造不良の低減ー	11
高湿度環境における金属腐食の防止に関する研究（第2報）	
ーコンテナ輸送環境の温湿度変動を考慮した腐食試験条件の検討ー	13
レーザー加飾技術の高度化に関する研究（第3報）	17
低融点金属による水栓製品欠陥補修技術の開発（第2報）	21
炭素系硬質膜の密着性改善に関する研究（第1報）	23

○化学

現場生産性向上を図る高機能プラスチック製品の開発（第17報）	
ー帯電防止プラスチックの開発（5）ー	27
現場生産性向上を図る高機能プラスチック製品の開発（第18報）	
ー難燃性プラスチック複合材料の開発（5）ー	31
現場生産性向上を図る高機能プラスチック製品の開発（第19報）	
ー軽量化・複合化によるマルチマテリアル製品の開発（5）ー	34
現場生産性向上を図る高機能プラスチック製品の開発（第20報）	
ーリサイクルプラスチックの物性向上技術の開発（5）ー	38
樹脂材料への無機コーティングに関する研究（第1報）	
ー高放熱性樹脂材料の開発（1）ー	42
表面処理による無機フィラーの高機能化に関する研究（第1報）	45

○繊維・紙

繊維端材のリサイクルによる資源循環型部材開発に関する研究（第3報）	
ー端材を原料とした吸音材の開発(2)ー	49
繊維端材のリサイクルによる資源循環型部材開発に関する研究（第4報）	
ー異種ポリマーブレンド物の溶融紡糸技術の開発(2)ー	53

繊維製品の快適性に関する研究（第1報）	55
重量物用パルプモールドの軽量化技術の開発（第1報）	57
廃棄繊維を活用した抄紙技術の開発（第1報）	61

○複合材料

カーボンニュートラルな材料を用いた脱炭素社会実現のための機能性材料の開発（第2報）	
－PP/セルロース複合材料の耐衝撃性向上のための配合要素の検討－	63
DXを活用した繊維配向樹脂の成形技術に関する研究（第1報）	69
二液型接着剤の接着工程効率を改善するデバイスの開発（第1報）	72

○情報

AIを用いたカメラ映像解析による作業支援技術に関する研究（第2報）	
－ロウ付け作業におけるスキル評価指標の検討－	75
構造最適化を活用した創造的設計技術に関する研究（第2報）	80
精密深絞りプレス加工の省エネルギー生産技術開発（第1報）	
－断熱層を有する金型設計に向けたプレス加工による発熱率と熱伝達率の評価－	84
生産管理業務のデジタル化に関する研究開発（第1報）	
－主軸モータの回転パターンを利用した工具番号の特定－	87
冷間鍛造機の初期不良品削減に用いる監視システムの開発（第1報）	90
協働ロボットを活用したデータ駆動型生産システムに関する研究開発（第1報）	93
製造ラインを最適化するフレキシブル生産システムに関する研究開発（第1報）	
－生産システム研究会の設立とデジタル化に向けた共通基盤の構築－	98
デジタルツインを活用した危機予測AIに関する研究（第2報）	102
ものづくり現場におけるAI技術の活用に関する研究開発（第2報）	
－協働ロボットとAIを活用した画像検査システムの開発－	105
生産リードタイムの短縮を目的とした適正在庫情報の可視化と管理技術に関する研究（第2報）	108
筋変位センサを用いた動作解析と可視化に関する研究（第1報）	112
切花フランネルフラワーの開花・出荷予測システムの開発（第1報）	116
AIを用いたメタルアーチファクト低減技術の開発	120

機

械

機械

金属積層造形材の被削性評価（第2報）

丹羽孝晴*、加賀忠士**

Machinability evaluation of metal additive manufactured materials（Ⅱ）

NIWA Takaharu*, KAGA Tadashi**

金属積層造形は、従来の製造工程とは異なる製法であるため、圧延材料とは異なる機械的特性を有することが知られている。機械的特性は切削条件に影響を与えるため、昨年度は圧延材料と金属積層造形で作製された材料の機械的特性の違いを把握することを目的として、実験で使用する金属積層造形装置により作製された SUS316L 材について、硬さおよび引張強度を調査し、JIS 規格で規定されている値と比較した¹⁾。今年度は、圧延材料および金属積層造形で作製された材料に対してドリル加工を実施した。その結果、20 回までのドリル加工における工具摩耗は、両者ともに同程度であり、顕著な摩耗進展は確認されなかった。一方、加工時の切りくず形状については、金属積層造形材の方がより細かいことが確認できた。

1 はじめに

金属積層造形とは、製品の CAD データに基づき、電子ビームやファイバーレーザーなどの高エネルギー熱源を用いて金属粉末を溶融・凝固させ、層状に積み重ねることで三次元造形物を作製する技術である。この技術を用いた装置は、一般に金属 3D プリンタと呼ばれている。

金属積層造形は、自由度の高い形状の製品を作製できることや、設計から試作品製作までのリードタイム短縮を可能とするなどの利点を有している。そのため、すでにジェットエンジン用部品、産業用ガスタービンの燃焼器、自動車部品の一部などに実用化されている。これに伴い、製品仕様に適合した硬さや引張強度などの機械的特性を有する材料の開発を目的とした金属混合粉末の研究や、トポロジー最適化を活用した新たな設計手法に関する研究が進められている²⁾。

岐阜県の地場産業の一つであるプラスチック産業における製品製造では、成形加工のために金型が不可欠である。近年では、金型製造分野においても金属積層造形の需要が高まりつつある。金属積層造形を導入することで、従来の切削加工のみでは実現困難であった形状の金型製作や、自由度の高い冷却経路の設計が可能となる。その結果、複雑形状製品への対応や、最適な冷却機構による成形サイクルの短縮が期待され、品質向上およびコスト低減につながると考えられている。

一方で、金属積層造形装置は導入コストが高額であり、自社製品への適用可能性を事前に十分評価できないことや既存設備の減価償却が完了していないといった要因から、導入が進んでいない企業も多いのが現状である。

また、金属積層造形は設計モデルに基づいて製品形状

を作製できるものの、造形物表面の粗さや寸法精度などの観点から、最終製品とするためには仕上げ加工が不可欠である。金属積層造形材は、圧延材料と同一の化学成分を有していても、造形プロセスの影響により機械的特性が異なることが報告されている³⁾。このような特性差は、仕上げ加工の一つである切削加工において、工具摩耗挙動や切削特性に影響を及ぼす可能性がある。

そこで本研究では、金属積層造形材料における最適な切削条件の把握を最終的な目的とし、その基礎的検討として、今年度は金属積層造形により作製された試料および圧延材料に対してドリル加工を実施し、工具摩耗の変化と切りくず形状の違いを調査した。

2 試験

2.1 試料

本研究では、寸法が 100mm×60mm×3mm の板状試料を用いた。試料は、パウダーベッド方式の金属積層造形装置（HBD 社製 HBD-150）を用いて作製した SUS316L 金属積層造形材と、比較のための SUS316L 圧延材である。金属積層造形材は、図 1 に示すように、造形高さ 60mm となる方向に積層して製作した。

2.2 切削加工実験

金属積層造形材および圧延材の各試験片に対して、ド

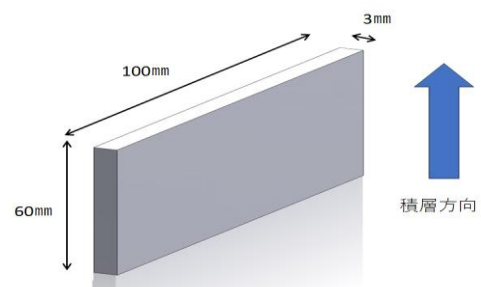


図 1 試料の形状

* 技術支援部

** 機械部

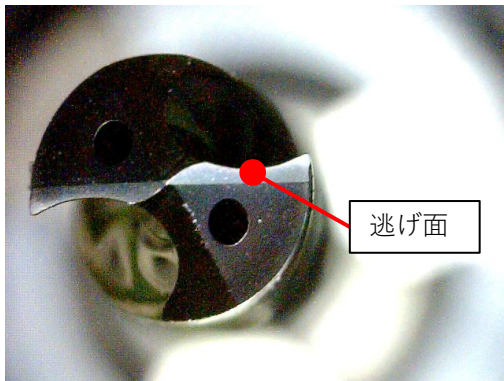


図2 ドリル先端



図3 加工の様子



図4 ドリル加工回数と逃げ面摩耗幅の関係



図5 金属積層造形材切りくず

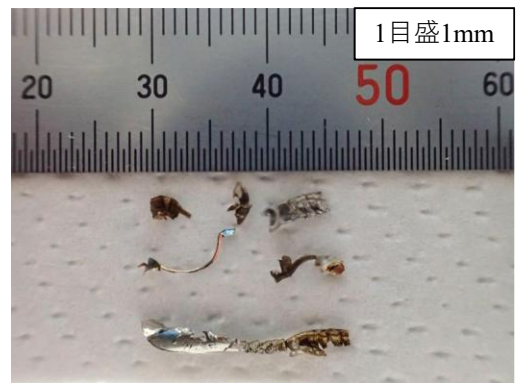


図6 圧延材切りくず

リルによる貫通穴あけ加工を行い、図2に示すドリル工具逃げ面の摩耗について評価した。加工には、立形マシニングセンター（ブラザー工業(株)製 S300X2）で、使用したドリル径は直径φ5mm、刃数2のステンレス鋼加工用超硬ドリルである。切削条件は、水溶性切削油剤を被削材上面に塗布し、切削速度 10m/min、送り速度 0.12mm/rev とした。図3に加工の様子を示す。

3 切削加工実験の結果及び考察

ドリル加工回数と逃げ面摩耗幅の関係を図4に示す。金属積層造形材および圧延材のいずれにおいても、工具摩耗量は同様の傾向を示した。また、20回までの加工回数においては、明確な摩耗の増加は確認されておらず、加工回数が不足していることを認識した。

次に、金属積層造形材の切りくず形状を図5に、圧延材の切りくず形状を図6に示す。両者を比較すると、金属積層造形材において生成された切りくずは、圧延材に比べて細かい形状となることが確認された。この原因は次年度以降検討していく。

4 まとめと今後の展望

金属積層造形材および圧延材に対してドリル加工を行い、使用した工具の摩耗量の変化を調査した結果、20回までの加工回数においては、両者の間に有意な差は認められなかった。一方で、切りくず形状には材料間で違いが確認され、金属積層造形材の方が圧延材と比較して細かい切りくずが生成される傾向を示した。今後は、さらなる加工回数での加工実験を継続し、工具摩耗量の変化について引き続き調査する予定である。

【謝 辞】

本研究の一部は、一般財団法人越山科学技術振興財団と公益財団法人遠藤斉治朗記念科学技術振興財団の助成金を受けて実施しました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 丹羽ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6,
pp11-12, 2025
- 2) 宮内創,香川県産業技術センター No.25,p1-p4,2024
- 3) 豊川良平ら,長野県工技センター研報 No.17,M42-
M45,2022

切削工具の工具寿命に関する研究（第2報）

加賀忠士*、横山哲也*

Study on tool life of cutting tool (II)

KAGA Tadashi* and YOKOYAMA Tetsuya*

航空機産業で利用されるチタン合金は切削加工で工具が激しく摩耗する難削材である。そのため、生産現場でチタン合金の高能率切削加工の最適条件を求める方法が望まれている。本研究では、チタン合金の切削加工における切削油剤が工具摩耗に及ぼす影響を調査する。本年度は、ドライと2種類の切削油剤（エマルジョン形、ソリューション形）の切削環境における工具摩耗実験により、工具摩耗、切削可能距離及び切削抵抗を評価した。その結果、切削速度が減少すると、切削可能距離が増加する。切削可能距離はドライに比べ切削油剤の方が長くなる。切削距離が増加（工具摩耗が進行）すると切削抵抗が増加し、その後、切削可能距離を越えた辺りから切削抵抗が急激に増加する。工具摩耗と切削可能距離の評価において、切削油剤のエマルジョン形とソリューション形で明らかな差異はないが、ドライと2種類の切削油剤では明確に異なる。なお、切削抵抗の評価において、ドライと2種類の切削油剤で明確な差異を確認できなかった。

1 はじめに

航空機産業では炭素繊維強化プラスチックの利用拡大と共にチタン合金の利用が拡大している。チタン合金の切削加工では刃先が高温になるため、工具摩耗が加速する等の課題がある。現状、チタン合金の切削加工では、低速加工を採用せざるを得ず、加工能率を上げるためには、送り量を増加して高トルクで削る方法が経験的に行われている。しかし、生産現場では、さらなる加工能率の向上が求められ、高能率切削加工の最適条件を求める方法が望まれている。

当センターは、令和3～5年度（3年間）においてチタン合金の切削加工の研究に取組み、切削速度、送り量及び径方向切込み量から工具摩耗の進行を予測する予測式を導き出した。これにより、加工能率を最大限に高める切削条件の提案が可能となった^{1)～3)}。

令和6年度からは次のステップとして、切削条件の1つである切削油剤に着目し、それをを用いることで、工具摩耗が低減し、工具寿命が延長する効果を確認している。切削油剤には、潤滑作用を主目的として原液で使用する「不水溶性切削油剤」と、冷却作用を主目的として水に希釈して使用する「水溶性切削油剤」の2つに大別できる。近年、環境や省資源の観点より「不水溶性切削油剤」から「水溶性切削油剤」への切り替えが進んでいる⁴⁾。令和6年度は基礎実験として、「水溶性切削油剤」の種類（エマルジョン形、ソリューション形）、切削速度変化、送り量変化、及び径方向切込み量変化による切削抵抗ならびに工具刃先温度の関係を把握した⁵⁾。そこで、本年度は、引続き「水溶性切削油剤」に着目し、切削油剤が工具摩耗に及ぼす影響を調査するため、切削環

境を切削油剤の塗布なし（以下、ドライと表記）と2種類の切削油剤（エマルジョン形、ソリューション形）のそれぞれの塗布における工具摩耗実験を行ったので、その結果を報告する。

2 実験

図1に切削実験の概要、表1に実験条件を示す。被削

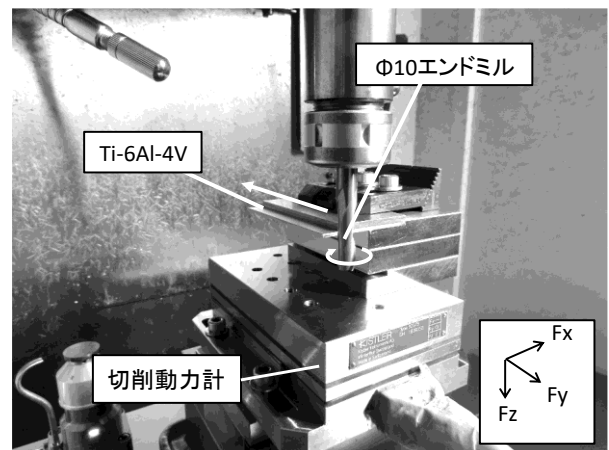


図1 切削実験の概要

表1 実験条件

切削速度 m/min	45.2, 60.0, 90.1
1刃あたりの送り量 mm/tooth	0.2
径方向切込み量 mm	2
軸方向切込み量 mm	2
工具送り方向	ダウンカット
切削環境	ドライ, エマルジョン形, ソリューション形

* 機械部

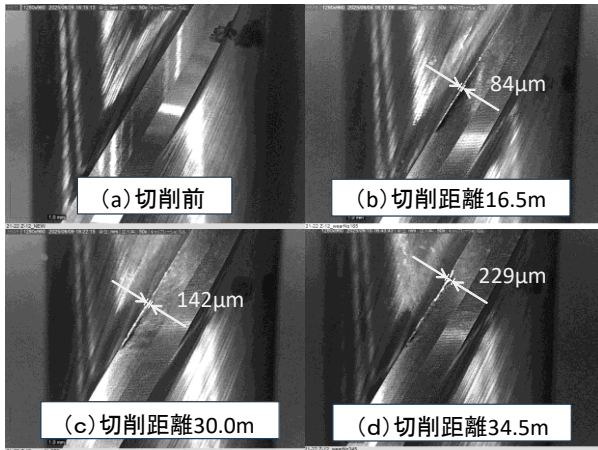


図2 工具逃げ面の摩耗の様子
(ソリューション形、切削速度 60.0m/min)

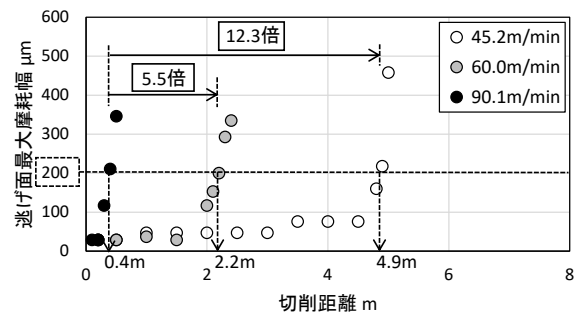
材はチタン合金 Ti-6Al-4V(W60×L100×t2 mm)、実験装置は3軸マシニングセンター(ブラザー工業(株) S300X2)、切削工具は超硬 K40UF のコーティング無しでφ10mmの1枚刃エンドミルを使用した。実験は、加工機のテーブル上に配置した切削動力計(Kistler 9257B)の上に治具を介して被削材を固定し、被削材長さ L100 mm の方向を直線に走らす加工を1パスとし、切削油剤の10倍希釈をそれぞれ被削材に塗布することで行った。

評価は、工具摩耗、切削可能距離及び切削抵抗とした。一例として、図2にソリューション形、切削速度 60.0m/min の工具摩耗実験におけるエンドミル外周刃側面から見た逃げ面の摩耗の様子を示す。逃げ面の中で最大の摩耗幅を摩耗測定値とする。一般に工具寿命は逃げ面の摩耗幅が 200μm から 300μm の範囲で設定されることが多い。本研究では、切削距離に対する最大摩耗幅の関係をグラフ化し、最大摩耗幅が 200μm に達する前後の測定結果を直線補間することで最大摩耗幅が 200μm に達する切削距離を算出し、切削可能距離とした。また、切削抵抗については切削時に切削動力計から得られる F_x 、 F_y 、 F_z の値を合力に変換し、この合力を1パス(100 mm)で平均して評価した。

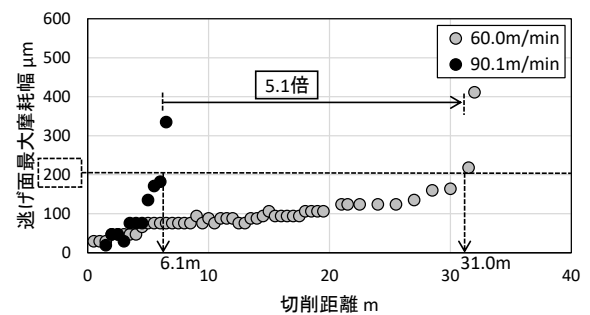
3 結果及び考察

3.1 工具摩耗測定結果及び切削可能距離評価

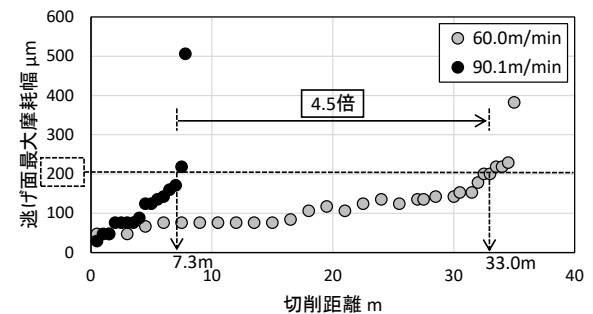
図3にそれぞれの切削環境における各切削速度の切削距離と逃げ面最大摩耗幅の関係を示す。切削速度が減少すると、切削可能距離が増加しており、その比率は切削速度 90.1m/min を基準(ドライ:切削可能距離 0.4m、エマルジョン形:切削可能距離 6.1m、ソリューション形:切削可能距離 7.3m)として比較すると、ドライの切削速度 60.0m/min での切削可能距離は 2.2m で 5.5 倍、切削速度 45.2m/min での切削可能距離は 4.9m で 12.3 倍、エマルジョン形の切削速度 60.0m/min での切削可能距離



(a) ドライ



(b) エマルジョン形

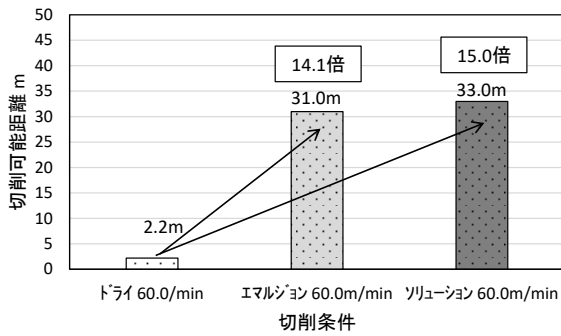


(c) ソリューション形

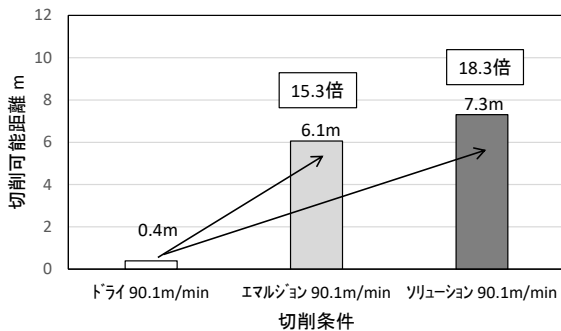
図3 切削距離と逃げ面最大摩耗幅との関係

は 31.0m で 5.1 倍、ソリューション形の切削速度 60.0m/min での切削可能距離は 33.0m で 4.5 倍に増加している。

次に、図4に各切削速度におけるそれぞれの切削環境の切削可能距離の関係を示す。ドライを基準(切削速度 60.0m/min:切削可能距離 2.2m、切削速度 90.1m/min:切削可能距離 0.4m)として比較すると、切削速度 60.0m/min においてはエマルジョン形での切削可能距離は 31.0m で 14.1 倍、ソリューション形での切削可能距離は 33.0m で 15.0 倍、切削速度 90.1m/min においてはエマルジョン形での切削可能距離は 6.1m で 15.3 倍、ソリューション形での切削可能距離は 7.3m で 18.3 倍に増加している。



(a) 切削速度 60.0m/min



(b) 切削速度 90.1m/min

図4 各切削環境における切削可能距離

以上から、工具摩耗と切削可能距離について、エマルジョン形とソリューション形との明らかな差異はないことと、ドライと2種類の切削油剤（エマルジョン形・ソリューション形）では明らかに異なることが分かった。

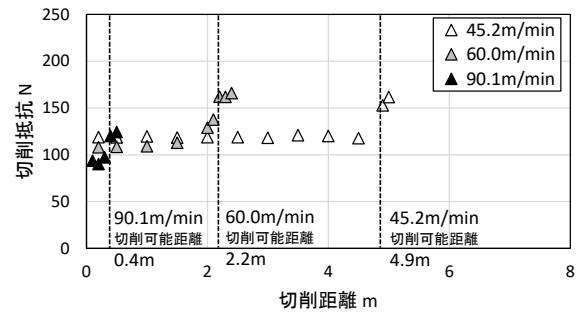
3.2 切削抵抗測定結果

図5にそれぞれの切削環境における各切削速度の切削距離と切削抵抗の関係を示す。切削距離が増加する（工具摩耗が進行する）と切削抵抗が増加している。そして、切削可能距離を越えたあたりからは切削抵抗が急激に増加している。なお、切削環境がドライと2種類の切削油剤（エマルジョン形、ソリューション形）で明確な差異を確認できなかった。

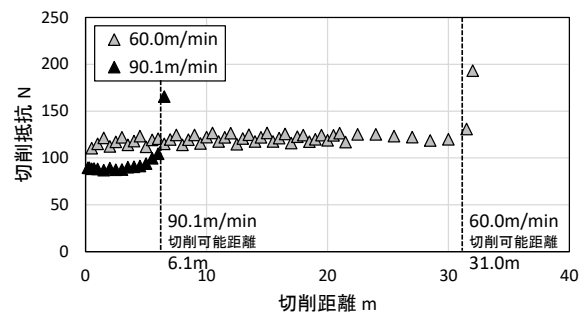
4 まとめ

本研究では、チタン合金の切削加工における切削油剤が工具摩耗に及ぼす影響を調査する。本年度は「水溶性切削油剤」に着目し、切削環境をドライと2種類の切削油剤（エマルジョン形、ソリューション形）における工具摩耗実験を行い、工具摩耗、切削可能距離及び切削抵抗を評価し、以下の結果を得た。

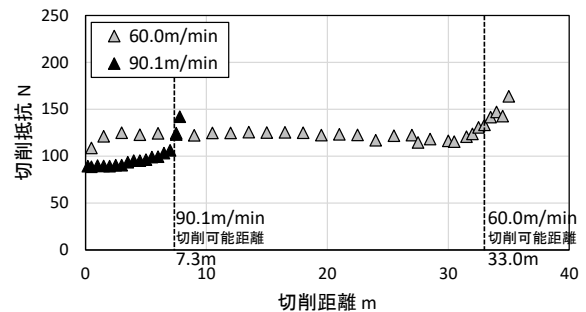
- 1) 切削速度が減少すると、切削可能距離が増加し、その比率は切削速度 90.1m/min を基準として比較すると、ドライでは切削速度 60.0m/min で 5.5 倍、切削速度 45.2m/min で 12.3 倍、エマルジョン形では



(a) ドライ



(b) エマルジョン形



(c) ソリューション形

図5 切削距離と切削抵抗との関係

切削速度 60.0m/min で 5.1 倍、ソリューション形では切削速度 60.0m/min で 4.5 倍に増加する。

- 2) 各切削速度におけるそれぞれの切削環境の切削可能距離において、ドライを基準として比較すると、切削速度 60.0m/min においてはエマルジョン形で 14.1 倍、ソリューション形で 15.0 倍、切削速度 90.1m/min においてはエマルジョン形で 15.3 倍、ソリューション形で 18.3 倍に増加する。
- 3) それぞれの切削環境における各切削速度の切削距離と切削抵抗の関係について、切削距離が増加する（工具摩耗が進行する）と切削抵抗が増加する。そして、切削可能距離を越えたあたりからは切削抵

抗が急激に増加する。

- 4) 工具摩耗と切削可能距離の評価において、切削油剤のエマルジョン形とソリューション形の明らかな差異はない。一方、ドライと2種類の切削油剤（エマルジョン形、ソリューション形）では明確に異なる。なお、切削抵抗の評価において、ドライと2種類の切削油剤（エマルジョン形、ソリューション形）で明確な差異を確認できなかった。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学大学院工学研究科 社本英二教授に、ご助言をいただきました。深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 加賀ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.3, pp5-6,2022
- 2) 加賀ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp3-4,2023
- 3) 加賀ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp4-6,2024
- 4) 協同油脂株式会社加工油技術部,やさしい切削油剤の話,株式会社潤滑通信社, pp14-15,2011
- 5) 加賀ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp7-10,2025

ロボットを活用した刃付け作業の自動化に関する研究（第1報）

小寺将也*、横山貴広*

Study on automating blade sharpening using robots (I)

KODERA Masaya* and YOKOYAMA Takahiro*

刃物の刃付け工程は手作業が多く、熟練技能者の高齢化や若手の人手不足等の課題もあり、品質管理や生産性向上への対応が急務である。当センターでは、これまでに包丁の「粗刃付けロボットシステム」を構築し、包丁を片面粗研磨するプログラム作成・動作確認をした。本研究は、現場の工程を考慮し実用化するため、本システムの改良と加工精度向上を目指す。本年度は、両面粗研磨できる包丁把持ツールを製作し、プログラム作成・動作確認及び本システムによる実加工を実施した。その結果、本システムによる包丁の両面粗研磨工程の課題を把握すると共に、研磨角度の設定値に対して誤差が最大 -1.9° であることを確認した。

1 はじめに

刃物の刃付け工程は熟練技術者の手作業が多く、製品の品質を左右する最も重要な工程である。近年、熟練技能者の高齢化や若手の人手不足等により、技能継承や従来からの手作業による生産体制を維持することが困難となっている。また、包丁は様々な形状¹⁾があり、生産性向上のために刃付け工程を自動化するには研磨用砥石の摩耗による位置制御や品質管理が重要な課題となる。

本研究は、令和4～6年度に実施した研究²⁾⁴⁾で構築した「粗刃付けロボットシステム」を用い、現場の工程を考慮しつつ実用化するため、本システムの改良と加工精度向上を目的とする。本年度は、包丁の片面粗研磨から両面粗研磨する包丁把持ツールを製作し、プログラムの作成・動作確認及び実加工を実施した結果を報告する。

2 粗刃付けロボットシステムの構成

「粗刃付けロボットシステム」は、ロボット本体がファナック製 LRmate200iD/14L、研磨装置が TORMEK 製 T-8、研磨砥石が TORMEK 製 SG-250（サイズ： $\Phi 250\text{mm} \times 50\text{mm}$ ）で構成され、ロボット動作経路を作成するためのプログラミングソフトは RoboDK 社製 RoboDK を使用した³⁾。

図1に両面粗研磨する包丁把持ツールの全体の形状（側面図）と外観及び動作時の様子を示す。本ツールの図面は SolidWorks で設計し、アルミ合金（A2017）製とした。

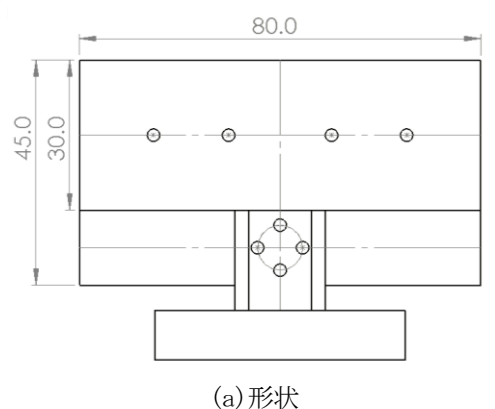
3 実験

両面粗研磨実験には、粗刃付け前の三徳包丁を用いた。まず、包丁のアゴ部と包丁把持ツールの側面を合わせ

ロボットアームに取り付ける。次に、包丁の片面を回転研磨砥石で包丁のアゴから切っ先までを粗研磨した後、ロボットアームの先端の軸を 180° 回転させ、反対側を同様に粗研磨するプログラムを作成する。その後、本システムによる動作確認と乾式による粗研磨を以下の研磨角度で実施した。

図2に包丁の研磨角度と刃先幅を示す。包丁の右側面・左側面とは、包丁の柄を手で握り上から見て右側・左側とする。研磨角度を①左側面 10° 、②左側面 20° 、③右側面 10° 、④右側面 20° とし、その順にロボットの粗研磨を設定する。また、粗研磨前の刃先幅を d_1 、研磨角度 10° と 20° の粗研磨面の境界点間の距離を粗研磨後の刃先幅 d_2 とし、粗研磨による刃付け状況を定量的に評価する。なお、現場での手作業による粗研磨した刃先幅は 0.2mm 程度であり、本システムによる粗研磨後の刃先幅の目標値 d_m とする。

図3に粗研磨後の包丁の評価測定位置を示す。包丁のアゴ部から 50mm 、 100mm 、 150mm の3ヵ所の刃先角度、刃先幅、断面形状を表面粗さ測定機（Taylor Hobson 製フォームタリサーフ®PGI Novus）にて評価測定した。



(a) 形状

図1 包丁把持ツール（側面図）

* 機械部



(b) 外 観



(c) 動作時

図1 包丁把持ツール (写真)

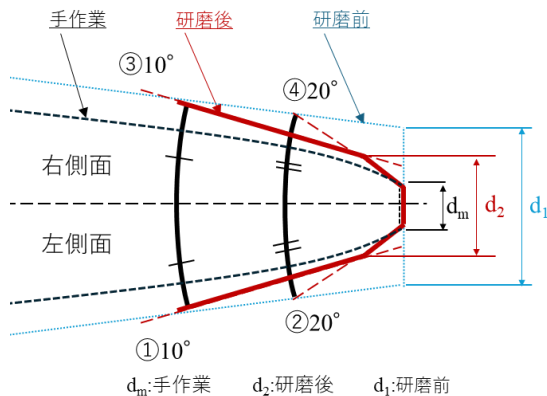


図2 包丁の研磨角度と刃先幅

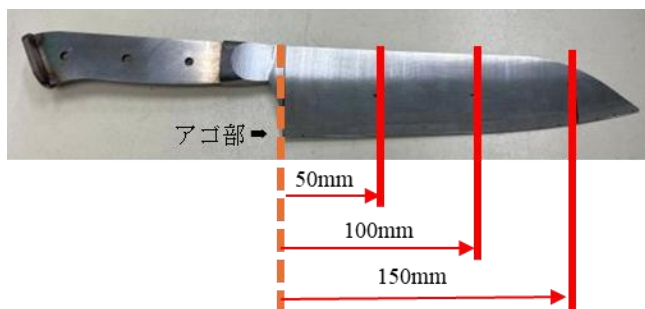


図3 包丁の評価測定位置

表1 刃先角度

測定箇所 [mm]	研磨角度 設定値[°]	計測値[°] (右側面)	計測値[°] (左側面)
50	10	9.5	9.2
	20	20.5	19.9
100	10	8.1	9.1
	20	19.2	20.2
150	10	8.4	9.4
	20	19.8	21.5

4 結果及び考察

4.1 刃先角度

表1に刃先角度の測定結果を示す。研磨角度の設定値に対して誤差の最大値は、測定箇所が100mm部の研磨角度の設定値が10°に対し測定値8.1°(誤差:-1.9°)であった。測定範囲内では、研磨角度の設定値に対して $\pm 2^\circ$ 未満の誤差で粗研磨されていた。

4.2 断面形状

図4に包丁のアゴ部から(1)50mm、(2)100mm、(3)150mmの刃先の断面形状を示す。なお、研磨前の形状を点線、研磨後の形状を実線で示している。(1)50mmの刃先は両面粗研磨されており、刃先にバリを確認した。(2)100mmの刃先も両面粗研磨されているが、(1)50mmのようなバリは確認できなかった。(3)150mmの刃先も両面粗研磨されているが、右側面と左側面で断面形状が異なった。

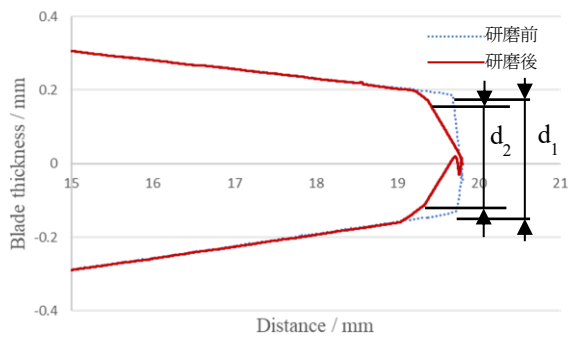
これらの結果から、包丁のアゴ部から離れるほど均等に研磨できていない。原因として、包丁の取付けがシミュレーションと比較して誤差があり、包丁のアゴ部から切っ先に向けて移動するに従い、包丁が回転研磨砥石から離れていった可能性が考えられる。また、包丁の把持ツールの形状により刃先が固定されておらず、研磨時に十分な荷重がかからなかった可能性や、研磨砥石が摩耗するため、研磨基準面の調整をする必要があることなどが考えられる。

4.3 刃先幅

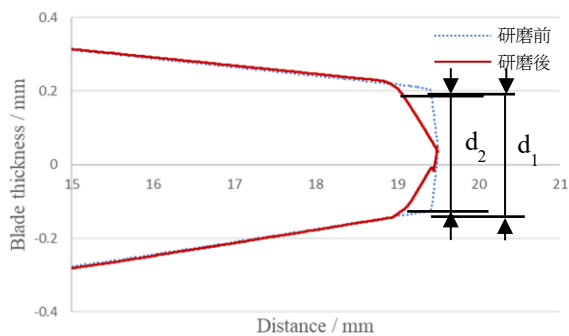
表2に粗研磨による刃先幅の変化を示す。研磨前の刃先幅 d_1 を測定したところ0.3mm程度であった。実験後、刃先幅 d_2 を計測したところ、研磨前後の刃先幅に変化は見られなかったため、研磨荷重や研磨時間等について検討する必要があると考えられる。

表2 刃先幅

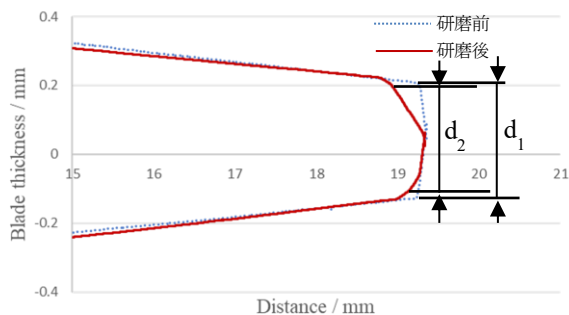
測定箇所[mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]
50	0.318	0.285
100	0.300	0.291
150	0.321	0.307



(1) 50mm 部

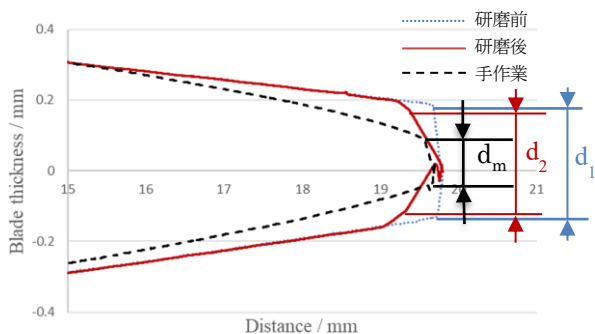


(2) 100mm 部



(3) 150mm 部

図4 ロボット研磨による断面形状

図5 手作業による粗刃付け断面形状
(50mm 部)

4.4 手作業による粗刃付けとの比較

図5に、図4(1)に手作業による粗刃付けをした包丁の断面形状(破線)を追記したものを示す。測定箇所は本システムによる研磨と同様に、包丁のアゴ部から50mm部である。この箇所における刃先幅 d_m は0.116mmであった。手作業による粗刃付けでは、包丁の角度を手で変化させながら両側面を研磨するのに対して、本研究の方法では、回転砥石に対して、包丁の角度を2段階にそれぞれ固定し、刃に沿って研磨するようにロボットを動作させた。そのため、本研究の方法と手作業による粗刃付けでは断面形状に差がみられた。

なお、今後、現場の工程を考慮し実用化に向け、包丁の両側面を広く研磨することが必要である。そのため、加工動作の変更、湿式による研磨、力覚センサによる加工負荷の計測等を実施し、加工精度向上を目指す。

5 まとめ

「粗刃付けロボットシステム」において、両面粗研磨できる包丁把持ツールを製作し、プログラム作成・動作確認及び本システムによる実加工を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 研磨角度の設定値に対して誤差が最大 -1.9° であることを確認した。
- (2) 包丁の刃先の断面形状測定により、両面粗研磨を確認できたが、研磨前後で刃先幅に大きな変化はなかった。
手作業による粗刃付けと同等の刃先にするためには、加工動作の変更を検討する必要がある。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、ご協力いただきました丸章工業株式会社様に感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 加藤ら,刃物あれこれ-金属学からみた切れ味の秘密-,アグネ技術センター,2013
- 2) 塚原ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp1-2,2023
- 3) 塚原ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp1-3,2024
- 4) 塚原ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp1-3,2025

金属

－ 鋳造シミュレーションを用いた鋳造不良の低減－
三原利之*

Study on innovative improvement of production efficiency using casting simulation (II)
- Reduction of casting defects using casting simulation -
MIHARA Toshiyuki*

青銅鋳物の水栓部品について、鋳造条件を改良した鋳造シミュレーションを行ったところ、鋳造温度を通常より高く設定した場合には、鋳型内の溶けた銅合金（溶湯）の流れ（湯流れ）が改良されることが分かった。実際の鋳造現場にて、通常より高い鋳造温度で鋳造を行ったところ、水栓部品の鋳造不良が大幅に低減した。これは、鋳造温度を高くすることで、鋳型内を流れる際に高い温度を保持した溶湯が、鋳型の末端にある水栓部品部により早く高い温度を保ったまま供給され、そのため、凝固に由来する鋳造欠陥が低減したと考えられる。このことから、鋳造シミュレーションでの湯流れの解析は鋳造不良の低減に有用であり、今後、実際の鋳造現場で活用することで生産性を改善する可能性があると考えられる。

1 はじめに

鋳物に求められる品質や精度が日々高まっている中、鋳物産業が抱える重要な課題の一つに、鋳造欠陥の高い発生率がある。生産現場では鋳物欠陥対策に膨大な時間と労力が費やされており、鋳物の高品質化・品質管理・生産性向上に関して、極めて重要な課題となっている。そのため、具体的な不良率の低減対策として、鋳造方案の改良や鋳造条件の最適化が検討されている。しかし、これらの対策は、生産現場の経験的な方法に頼るところが多く、鋳造不良の発生要因を十分に把握できていないのが現状である。さらに、同一の鋳造条件であっても、鋳造品の部位によって実際の凝固状態が異なっているため¹⁾、鋳造不良の主な原因である鋳造欠陥が局所的に発生することも考えられる²⁾。そのため、鋳造欠陥の発生要因を明らかにすることは非常に困難である。

本研究では、青銅鋳物の水栓部品の製品欠陥を低減するため、青銅鋳物の水栓部品について注湯温度を変えて鋳造シミュレーションを行い、鋳型内の溶けた金属の流れ（湯流れ）について検討した。

2 実験

2.1 供試材

本研究に用いた青銅鋳物 CAC406 製の水栓部品は、一般家庭等で使用されるものであるが、研究協力企業で鋳造され、その後の研磨工程で鋳物内部にあった鋳造欠陥が発見されたものの提供を受けた。

図1に本研究に用いた青銅鋳物 CAC406 製の水栓部品（左）と水栓部品の表面に発生した鋳造欠陥部の電子顕微鏡の SEM 像の例を示す（右）。電子顕微鏡の SEM 像は高分解能走査電子顕微鏡複合装置（日本電子（株）製 JIB-4600F）を用いて測定した。この鋳造欠陥の内部

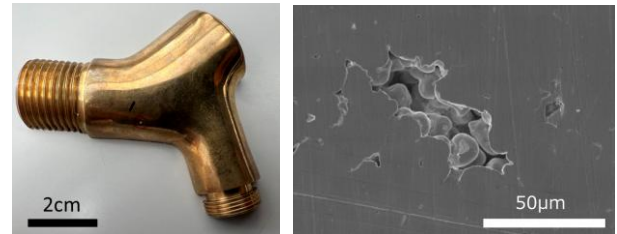


図1 青銅鋳物の水栓部品（左）と鋳造欠陥部の電子顕微鏡の SEM 像の例（右）

にはデンドライト（欠陥内部発生する樹状の結晶構造）が生成しているため、この鋳造欠陥は溶融した銅合金（溶湯）が凝固し収縮する際に、周辺から溶湯が十分に供給されなかったために発生した欠陥と考えられる。通常、こうした鋳造欠陥は、水栓部品部に溶湯が流れ込む入り口付近などの溶湯の最終凝固部で発生する。

2.2 鋳造シミュレーション

鋳造シミュレーションは、鋳造シミュレーションソフト（クオリカ（株）製 JSCAST）を用いて、1 mm 格子の解像度で鋳造方案について行い湯流れを予測した。注湯時の溶湯の温度は、鋳造現場で通常行われている 1,175℃と、それよりも高い 1,200℃で鋳造シミュレーションを行い、そのほかの鋳造条件は実際の鋳造時に近い条件に設定した。鋳型内の湯流れの状態は、溶湯の鋳造方案全体の充填率が 40% の時点で比較した。これは注湯開始より 1.7 秒後の溶湯が、鋳造方案の末端にある水栓部品部に到達した直後の充填率であり、水栓部品部における溶湯の充填状態が比較できる。鋳造方案は研究協力企業から提供を受けたものを用いた（図2）。

3 結果及び考察

鋳造欠陥による製品不良が発生した鋳造方案について、通常の注湯温度（1,175℃）で鋳造シミュレーションを

* 技術支援部

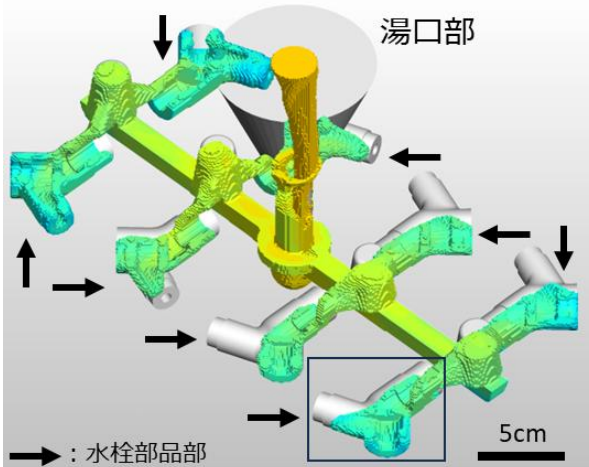


図2 鋳造シミュレーションによる湯流れ予測（通常
注湯温度 1,175℃、充填率 40%）

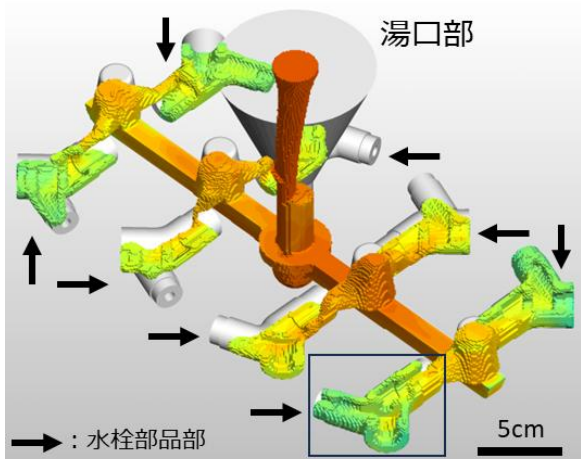


図3 鋳造シミュレーションによる湯流れ予測（通常
より高い注湯温度 1,200℃、充填率 40%）

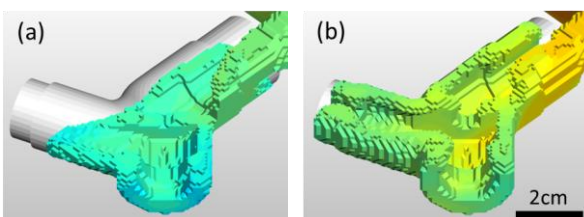


図4 鋳造シミュレーションによる湯流れ予測の拡大図（(a) 注湯温度 1,175℃（図2の口部）、
（b）注湯温度 1,200℃（図3の口部））

行った結果を図2に示す。また、水栓部品部の拡大図を図4(a)に示す。通常より高い注湯温度（1,200℃）で鋳造シミュレーションを行った結果と水栓部品部の拡大図を、図3と図4(b)に示す。

通常の注湯温度である 1,175℃の場合、溶湯の鋳造方案全体の充填率が40%の時点では、水栓部品部に溶湯が十分に供給されていない様子が予測された。その一方で、

通常より高い注湯温度（1,200℃）の場合では、通常の注湯温度の場合と比較して、より多くの溶湯が水栓部品部に充填されている様子が予測された。また、この時の水栓部品部における流入部の溶湯温度は、通常の注湯温度の場合では 1,124℃だったのに対し、通常より高い注湯温度の場合では 1,155℃であり、およそ 30℃程度高かった。今回、通常より高い注湯温度では、水栓部品部により高い温度で溶湯が供給され、溶湯がより高い流動性を保持したまま凝固が進むことで、最終凝固部における凝固に由来する鋳造欠陥が低減できたと考えられる。実際の鋳造現場にて、通常より高い注湯温度（1,200℃）で鋳造を行ったところ、鋳造欠陥が主要要因である水栓部品部の不良率は、通常の注湯温度で22%であったのに対し、通常より高い注湯温度での鋳造不良率は 12%と大幅に低下した（43%減）。

このことから、鋳造シミュレーションによる鋳造条件の検討は、水栓部品部の鋳造不良の低減に有用であり、今後、実際の鋳造現場で活用することで生産性を改善する可能性があると考えられる。

4 まとめ

青銅鋳物の水栓部品に発生した鋳造欠陥に由来する製品不良を低減するため、鋳造シミュレーションを用いて湯流れを予測したところ、通常より高い注湯温度では、水栓部品部により早く、高い温度で溶湯が充填されることが分かった。実際の鋳造現場にて、通常より高い注湯温度で水栓部品部の鋳造を行ったところ、水栓部品部の不良率は大幅に低下しており、これは鋳造時に溶湯が水栓部品部に、より早く高い温度を保ったまま供給されたことで、凝固に由来する鋳造欠陥が低減したためと考えられる。鋳造欠陥の要因には溶湯の流動状態のほかにも多様な要因が複雑に影響しており、水栓部品ごとに最適な鋳造温度を設定する必要があると考えられる。今後、さらに鋳造欠陥が発生する要因について検討を進め、生産現場において鋳造シミュレーション技術を活かしたより実用性の高い不良低減対策を提言していく。

【謝 辞】

本研究にご協力いただいた株式会社水生活製作所様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 岡根利光, 鋳造工学 Vol.85, 9, pp605-612, 2013
- 2) 三原ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp17-18, 2025

高湿度環境における金属腐食の防止に関する研究（第2報）

－コンテナ輸送環境の温湿度変動を考慮した腐食試験条件の検討－

山口貴嗣*

Study on prevention of metal corrosion in high humidity environments (II)

- Corrosion test conditions considering temperature and humidity fluctuations in container transport environments -
YAMAGUCHI Takashi*

高湿度環境下における金属腐食の再現促進試験条件の確立を目的として、海上輸送用コンテナ内環境を模擬した温湿度測定および複合サイクル試験を実施した。密閉容器内での実測の結果、昼夜温度変動に伴う上下方向の水蒸気移動が生じ、夜間において上部が高湿度となる特異的挙動が確認された。得られた実測データを基に試験条件を設計し、SPCC 製試験片を用いた腐食促進試験を実施したところ、コンテナ上部条件では顕著な腐食促進が認められ、下部条件においても軽微な腐食が確認された。本研究で設定した複合サイクル試験は、海上輸送環境を一定程度再現可能であることが示された。

1 はじめに

近年、県内企業においても海外生産および国際物流の拡大が進んでおり、海上輸送中における製品・部品の腐食が品質およびコストに与える影響が顕在化している。特に、密閉性の高い海上輸送用コンテナ内部では、昼夜の温度変動に伴う湿度変化や結露の発生が起りやすく、これらが腐食促進因子として作用する可能性が指摘されている¹⁾。そのため、輸送環境に起因する腐食現象の把握および対策技術の確立は、県内企業製品・部品の品質安定化による競争力維持の観点から重要な課題となっている。

当研究所に寄せられる技術相談においても、保管時や輸送時の高湿度環境下で発生する腐食不良に関する事例が継続的に報告されている²⁾。しかしながら、実際のコンテナ内部における温湿度挙動を実測し、その挙動に基づいて腐食促進試験条件を体系的に構築した検討例は多くない。また、段ボール等の梱包材が有する吸放湿特性や揮発成分がコンテナ内部環境に及ぼす影響についても、定量的な検証例は限られている³⁾。

そこで本研究では、海上輸送用コンテナ環境を模擬した密閉系において温湿度挙動を実測し、その結果を基に複合サイクル腐食試験条件を設計・構築することを目的とした。さらに、再現試験の結果との比較を通じて試験条件の妥当性を検証し、県内企業における輸送起因腐食の評価および防食対策検討に資する基礎データを提供することを目指した。

2 コンテナによる海上輸送を模した腐食試験

県内企業では、海外工場で生産された製品や部品を輸入し、国内で組立・販売を行う業種が少なくない。これらの輸送の多くは海上コンテナ輸送に依存している。海上輸送ではコンテナが外気環境に曝されるため、昼夜の

温度変動や外気湿度の影響を受けやすく、内部環境の変動が輸送品の腐食発生要因となる可能性がある。

このため、コンテナ内部の温湿度挙動を把握し、その挙動を再現した腐食試験条件を構築することは、輸送起因腐食の評価において重要である。

2.1 温湿度データの収集

実環境におけるコンテナ内部の温湿度挙動を把握するため、プレハブ構造のガレージ内に実験装置を設置した。装置は、外部との水分交換を抑制する目的で密閉したプラスチックケースを縦方向に積層した構造とし、コンテナ内部の上下位置差を模擬した。

温湿度の測定には、チトセ工業株式会社製のデータロガーLogbeeを用いた。測定位置は、ケース最上部（コンテナ天井付近相当）および床上部約1m（コンテナ下部相当）の2点とし、5分間隔で温度および相対湿度を連続記録した（図1）。これにより、位置による温湿度変動特性の差異を時系列データとして取得した。

2.2 コンテナ内の環境を再現した腐食試験

2.1で取得した上部および下部の温湿度データを基に、時間変化を反映した温湿度サイクルプログラムを作成した。作成したプログラムを用い、QFOG社製CRH600複合サイクル試験機により、コンテナによる海上輸送環境を模擬した試験を実施した。

本試験では、実測データに基づく温湿度変動を一定期間に短縮再現することで、実環境に近似した腐食挙動の

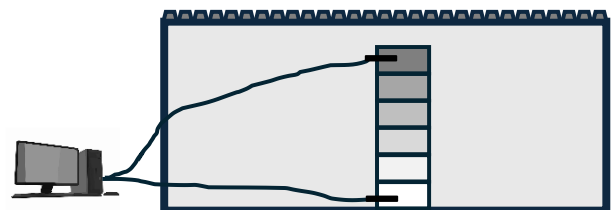


図1 温湿度データの収集のイメージ

*技術支援部

評価を試みた。

3 結果及び考察

3.1 密閉コンテナを模した環境での結果

コンテナを模擬した密閉型実験装置において、夏季条件下での温湿度変化を測定した結果を図2に示す。

本装置は温度 23℃、湿度 50%RH の条件で密閉した状態から測定を開始した。

測定の結果、昼間には装置上部の温度が上昇し、最大で約 50℃近くまで達することが確認された。一方、下部の温度上昇は比較的緩やかであり、装置内には明確な温度勾配が形成されていた。この温度上昇に伴い、昼間には上部の相対湿度が大きく低下する傾向が観測された（図2 下部破線楕円部分）。

これは、温度上昇により飽和水蒸気量が増加することで、同一水蒸気量条件下では相対湿度が低下するためであると考えられる。

一方、夜間には外部環境の温度低下に伴い装置内の温度差が縮小し、上部および下部の温度はほぼ同一となった。しかしながら、この温度均一化後においても、上部で相対湿度が高くなる傾向が確認された（図2 上部破線楕円部分）。

本実験装置はコンテナボックスを上下に連結したセグメント構造であり、各ボックスの上下には小さな通気口が設けられている。この構造により、完全な密閉状態ではなく、温度差に起因する微弱な自然対流および水蒸気拡散が装置内で生じていた可能性がある。その結果、昼間の温度上昇時に発生した水蒸気が装置上部に移動し、夜間の温度均一化後においても上部で相対湿度が高い状態が維持されたものと推察される。

さらに、水蒸気は空気の主成分である窒素および酸素（分子量約 28～32）に比べて分子量が小さい（約 18）ため、湿潤空気は乾燥空気より密度がわずかに小さい。このため、水蒸気を多く含む空気が上方に移動しやすい性質も、上部高湿度傾向を助長した要因の一つであると考えられる。

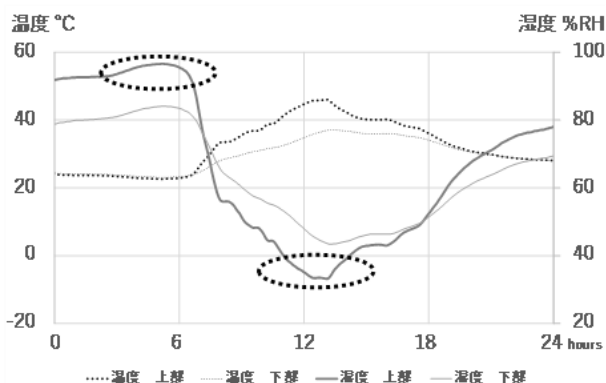


図2 模擬コンテナ試験装置における上部および下部の温湿度変化（24時間）

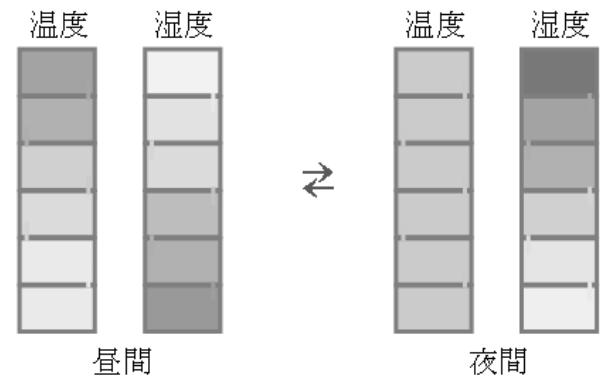


図3 模擬コンテナ試験装置の概念図
（※温湿度が高いほど、濃色で表示）

以上の結果より、模擬コンテナ内部では昼夜の温度変動に伴い顕著な温湿度変化が生じるとともに、装置内の位置によって湿度分布に差が生じることが確認された。特に夜間には温度が同一になっているにもかかわらず上部で高湿度となる特徴的な挙動が観測され、これは温度勾配による水蒸気移動、装置構造による微弱な対流、および水蒸気密度差の影響が複合的に作用した結果であると考えられる（図3）。

3.2 密閉コンテナ内の段ボール箱内を模した環境での結果

次に、試験装置内部の連続的に接続している、それぞれの試験室内に図4のような段ボール箱を設置し、その内部環境を測定した結果を図5に示す。段ボール箱内部では、装置内部の空間と比較して湿度変動が緩和される傾向が確認された。

段ボールはセルロース繊維を主体とする多孔質材料であり、水分を吸着および放出する吸放湿特性を有している。このため、周囲環境の湿度が上昇した場合には水分を吸収し、湿度が低下した場合には水分を放出することで、内部の湿度変動を緩衝する作用が生じると考えられる。

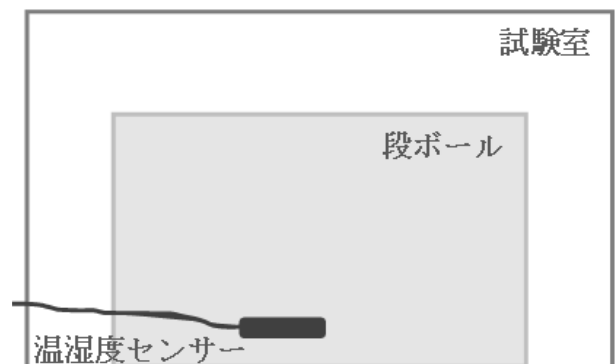


図4 段ボール箱を内包した、模擬密閉コンテナ試験装置の模式図

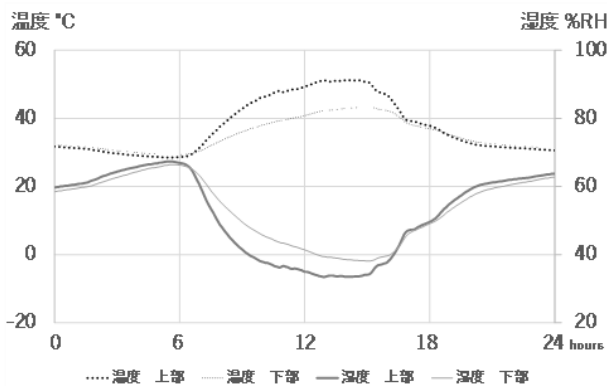


図5 段ボール箱を内包した、模擬密閉コンテナ内の温湿度変化

その結果、段ボール箱内部では急激な湿度変化が抑制され、外部空間に比べて比較的安定した温湿度環境が形成されたものと推察される。

このことは、輸送時における梱包材が単なる機械的保護材として機能するだけでなく、コンテナ内部に形成される微小環境の温湿度変動を調整する要因としても作用する可能性を示唆している。

3.3 複合サイクル試験の実施結果

前節までに得られた温湿度測定結果に基づき、コンテナ内部環境を模擬するための複合サイクル試験条件を設定した。本試験条件は、実測された温湿度変動の振幅および周期性を基に、乾湿繰り返し環境を短縮して再現することを目的として設計した。測定結果から、模擬密閉コンテナ内では上部および下部で温湿度変動の挙動が異なることが確認されたため、それぞれの環境特性を反映した試験条件とした。

コンテナ上部のサイクル試験条件として、 $25^{\circ}\text{C} \cdot 90\% \text{RH}$ および $45^{\circ}\text{C} \cdot 20\% \text{RH}$ の温湿度条件を繰り返すサイクルを設定した。試験は3.5時間で6サイクル実施し、さらに1サイクルのみ3.25時間とすることで、合計24時間で7サイクルを1セットとして実施するプログラム

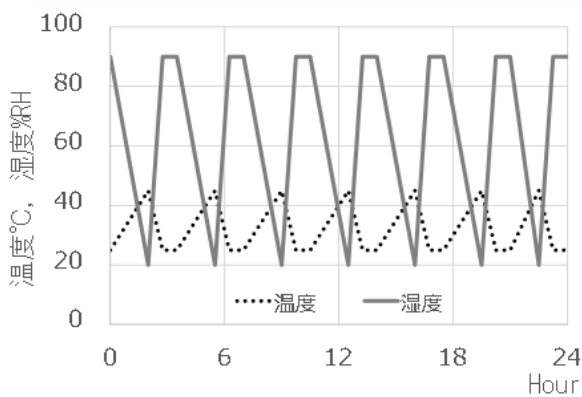


図6 密閉コンテナ内上部の試験プログラム

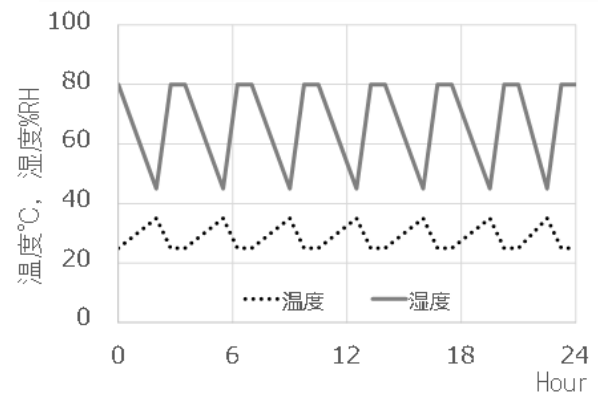


図7 密閉コンテナ内下部の試験プログラム

とした。これにより、実環境における1週間相当の温湿度変動を再現する条件とした(図6)。この条件は、高湿度状態と高温低湿度状態が交互に現れる乾湿繰り返し環境を再現するものであり、鋼材表面における水膜形成と乾燥を周期的に生じさせる環境条件である。

一方、コンテナ下部のサイクル試験条件として、 $25^{\circ}\text{C} \cdot 80\% \text{RH}$ および $35^{\circ}\text{C} \cdot 45\% \text{RH}$ の温湿度条件を繰り返すサイクルを設定した。本条件についても同様の時間構成とし、合計24時間で実環境の1週間相当の温湿度変動を再現する試験条件とした(図7)。この条件は、上部環境と比較して温湿度変動が緩やかな環境を模擬したものである。

試験片には、実製品を想定した SPCC 製ワッシャー (JIS G 3141⁴⁾) を用いた。当該ワッシャーにはクロメート処理が施されていたため、基材の腐食挙動を評価する目的で処理層を除去し、研磨面を試験面として使用した。研磨には SiC 耐水研磨紙 (#120) を用い、腐食生成物の発生状況が明瞭に観察できる表面状態に調整した。

複合サイクル試験の結果を図8に示す。コンテナ上部の試験条件では、乾湿繰り返し環境下において試験片表面に腐食生成物の形成が確認され、腐食の進行が認められた。この結果は、高湿度工程において形成された水膜により腐食反応が進行し、その後の乾燥工程において腐食生成物の濃縮および酸素供給が促進されることで、次の湿潤工程における腐食反応が加速されるという乾湿サイクル特有の腐食促進機構によるものと考えられる。

一方、コンテナ下部の試験条件においては、上部条件ほど顕著ではないものの、試験片表面に軽微な腐食の発生が確認された。本条件では $35^{\circ}\text{C} \cdot 45\% \text{RH}$ の工程が炭素鋼の臨界湿度域⁵⁾を下回るものの、 $25^{\circ}\text{C} \cdot 80\% \text{RH}$ の工程では腐食進行が可能な湿度域に達している。また、温湿度変動に伴う表面水分の形成および乾燥が繰り返されることにより、限定的ながら腐食反応が進行したものと考えられる。

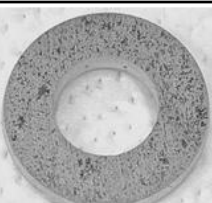
	コンテナ上部	コンテナ下部
試験前		
1 WEEK		
2 WEEK		
3 WEEK		
4 WEEK		

図8 複合サイクル試験の結果

以上の結果より、本研究で設定した複合サイクル試験条件は、コンテナ輸送環境における温湿度変動の特徴を一定程度反映しており、輸送過程における腐食発生挙動を評価するための基礎的な試験条件として有効である可能性が示唆された。また、本試験条件は、輸送起因腐食に関する技術相談に対する評価指標として活用できる基礎データとなることが期待される。

4 まとめ

本研究では、コンテナによる海上輸送環境を模擬した密閉系において温湿度挙動を測定し、その実測データに基づいて複合サイクル腐食試験条件を構築し、以下のようない知見が得られた。

①コンテナ内部を模擬した装置において、上部と下部で

異なる温湿度変動特性が確認された。特に上部では、高湿度と乾燥を繰り返す乾湿サイクル型の環境が形成される可能性が示唆された。

②実測データに基づき設定した複合サイクル試験の結果、上部模擬条件（25℃・90%RH ⇄ 45℃・20%RH）では腐食が顕著に進行した。一方、下部模擬条件（25℃・80%RH ⇄ 35℃・45%RH）においても軽微な腐食が確認され、腐食発生には平均湿度のみならず温湿度変動が重要であることが示された。

③コンテナ内部に段ボールを設置することで、その内部の温湿度変化が緩和される傾向が認められ、梱包材の吸放湿特性が腐食リスク低減に寄与する可能性が示唆された。

以上より、本研究で構築した複合サイクル試験プログラムは、コンテナによる海上輸送環境の特徴を一定程度再現できる評価手法であると考えられる。本手法は、県内企業から寄せられる輸送起因腐食に関する技術相談への対応や、適切な防食対策検討のための基礎資料として活用可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 株式会社 MTI「Monohakobi Techno Forum 2011：講演-4「海上コンテナ内温度と簡易防熱の検討 ～フィールド試験に基づく簡易施工法の開発～」，https://www.monohakobi.com/ja/wp-content/uploads/2015/06/20111214_MTF4_kondo2.pdf (参照 2026/2/27)
- 2) 山口,岐阜県産業技術総合センター研究報告第6号, pp1-4,1999
- 3) 猪木ら,ESPEC 技術情報, pp19-21,2025
- 4) 日本規格協会, JIS G 3141「冷間圧延鋼板及び鋼帯」, p2, 2021
- 5) 腐食防食協会,「金属の腐食・防食 Q&A」, 丸善, p.16, 1988

レーザー加飾技術の高度化に関する研究（第3報）

田中 等幸*、大津 崇*

Research on advanced color laser marking (Ⅲ)

TANAKA Tomoyuki* and OTSU Takashi*

ステンレス鋼へのレーザー加飾は、表面に形成される酸化被膜の光干渉を利用した発色技術であり、金属製品の意匠性向上への応用が期待されている。しかし、所望の金属表面色をレーザー加飾するためには、大量の実験から加飾条件を特定する必要がある。本研究では、ニューラルネットワークによってレーザー加飾の表面色を予測するモデルを構築し、加飾条件設定に係る開発コストの低減を目的とする。構築した3入力3出力の予測モデルを未知の加飾条件に適用した結果、その色差は18.5となり一定の有効性を確認した。また、予測モデルの逆解析によって探索した加飾条件でレーザー加飾を行った結果、32件中11件において表面色の再現に成功した。

1 はじめに

ステンレス鋼やチタン合金等の金属表面に適切なレーザーエネルギーを照射すると、表面に酸化被膜が形成され、その膜厚に応じた光干渉により多様な発色が生じる。この現象を利用したレーザー加飾技術は、金属製品に対する意匠性付与技術として注目されており、刃物や装飾部材などへの応用が期待されている。

レーザー加飾技術により所望の発色を得るためには、レーザー出力、走査速度、繰り返し周波数等の制御パラメータと、材質固有の発色との関係を事前に把握しておく必要がある。製造現場においては、実験計画法等を活用し、作業者の経験や知識に基づく試行錯誤によって加飾条件設定が行われているが、この方法では大量の実験を必要とするため、開発期間の短期化や開発コストの削減が課題となっている。また、作業者に依存した方法は、技術伝承の観点からも課題があり、レーザー加飾技術の普及拡大を阻害する要因の一つとなっている。

我々はこれらの課題に対し、レーザー加飾表面色に影響を及ぼす3因子の制御パラメータを特定し、表面色の予測モデル構築手法について検討してきた。第1報¹⁾では、応答曲面法を用いたモデル構築法、第2報²⁾では、サポートベクター回帰を用いたモデル構築法を提案した。これらの研究により、ステンレス鋼の表面色と制御パラメータとの間に非線形性の存在が明らかとなったが、いずれの手法においても目標とする十分な予測精度は得られていない。

本報では、非線形問題に対して高い表現能力を有するニューラルネットワーク（以下、NN）を用いて、制御パラメータからレーザー加飾表面色を予測するモデルの構築法について報告する。また、構築した予測モデルを逆解析することによって、所望のレーザー加飾表面色を再現する制御パラメータ探索手法について検討した。

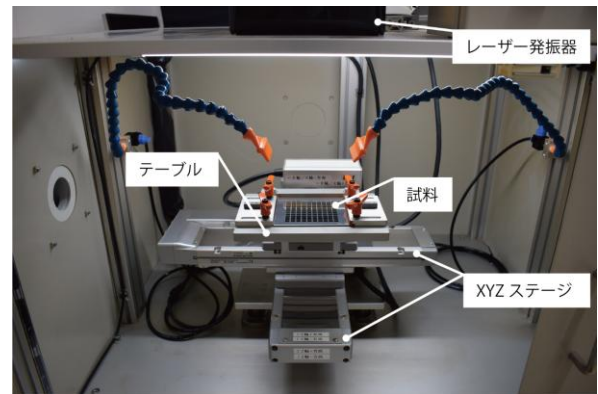


図1 実験環境

2 実験方法

2.1 レーザー加飾サンプルの作成

レーザー加飾サンプルの作成には、ステンレス鋼 SUS304 材（100 mm × 100 mm × 1 mm）を用いた。試料表面を#400 耐水研磨紙で研磨後、エタノールで洗浄し、常温で乾燥させたものを実験試料とした。

汎用 XYZ ステージとレーザー発振器（株式会社 Keyence 製 MD-X2500、レーザー波長 1064 nm）で構成されるロボットシステムに SUS304 材を固定し、大気環境下でレーザーを照射した（図1）。図2に制御パラメータの概要図を示す。図2(a)はレーザー出力と時間の関係を表し、図2(b)はパルスレーザーを走査した際のマルチパスを示している。レーザー照射によって SUS304 材を高温酸化させた時の表面色は、レーザー出力、走査速度、繰り返し周波数、パルス幅、走査間隔、焦点距離、走査回数等、様々な制御パラメータの影響を受けることを確認している³⁾。

本研究では、ステンレス鋼表面色への影響が大きいレーザー出力（10-20 W、2 W 刻み）、走査速度（50-300 mm/s、50 mm/s 刻み）、繰り返し周波数（5-30 kHz、5

* 金属部

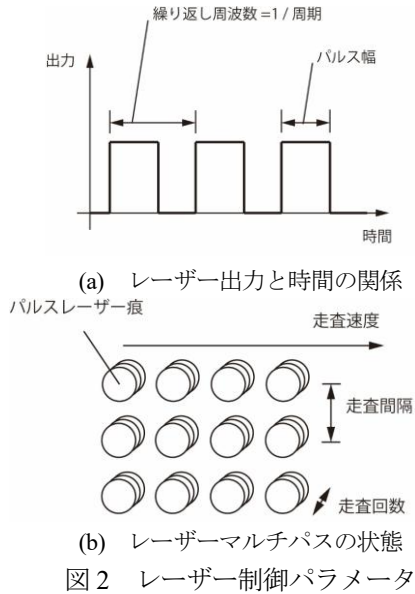


図2 レーザー制御パラメータ

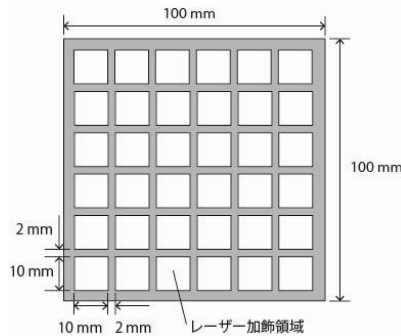


図3 レーザー加飾サンプルの作成

kHz 刻み) の3 因子の制御パラメータを変化させ、その他の制御パラメータは、走査間隔 40 μm 、焦点距離 0 mm (ジャストフォーカス)、走査回数 1 回に固定した。図3 に示す 6 行 6 列から成る矩形領域 (10 mm $\times$ 10 mm) に対して、それぞれの加飾条件でレーザーを走査させ、加飾サンプルを作成した。また、照射順序による熱影響の偏りを低減するため、照射順序は無作為に設定した。

2.2 レーザー加飾表面領域の測色

レーザー加飾した表面領域の測色には、分光測色計 (Konica Minolta 株式会社製 CM-M6) を使用した。この分光測色計は、材料表面に対し 45° 方向から D65 光源を照射し、その拡散反射光の角度検出が可能である。本研究では、人間の視認性に近い鏡面反射軸から 15°

離れた方向の拡散反射光を測色し、CIE Lab 表色系 (L^* (明度)、 a^* (赤-緑軸) および、 b^* (黄-青軸)) を用いて色値を算出した。

2.3 予測モデルの作成

本研究では、予めカーネルを設計することなく、複雑な関数を自動的に学習できる NN を用いて予測モデルの構築を試みた。モデル構築には、216 件の学習データを用いた。なお学習データは、制御パラメータを同じ基準で扱えるようにするため、正規化したものを使用した。

図4 に予測モデルのアーキテクチャを示す。同図は、レーザー制御パラメータを入力とする入力層、入力を受け取り内部で計算処理を行う隠れ層、計算結果から色値を出力する出力層で構成される 3 入力 3 出力の多層パーセプトロンを表している。隠れ層におけるハイパーパラメータは、層数を 1~3 層、各層のニューロン数を 10~100 の範囲、活性化関数を ReLU または Tanh、学習率を 0.0001~0.01 の範囲、エポック数 2000、バッチサイズ 200、最適化アルゴリズム Adam とした。ハイパーパラメータの最適化は、式(1)に示す予測モデルの精度評価指標を用いて探索した。具体的には、ハイパーパラメータ最適化ライブラリ Optuna⁴⁾を用いて、 $L^*a^*b^*$ の各出力成分 m の実測値と予測値の二乗誤差 RMSE を算出し、それらの平均値が最小となるハイパーパラメータの組み合わせを最適な予測モデルとした。

$$\overline{\text{RMSE}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{n,m} - y'_{n,m})^2} \quad (1)$$

ここで、 N は学習データ数、 M は出力次元数 (本研究では $M=3$)、 $y_{n,m}$ は実測値、 $y'_{n,m}$ は予測値である。

2.4 予測モデルの評価

構築した予測モデルの汎化性能を評価するため、中心複合計画⁵⁾によって決定した 32 件のレーザー加飾条件を予測モデル評価用の検証データに使用した。検証データを構築した予測モデルに当てはめ、モデルの汎化性能を評価した。

構築した予測モデルの評価指標には、検証データの決定係数 R^2 (式(2)) と平方根平均二乗誤差 RMSE (式(3)) を用いた。

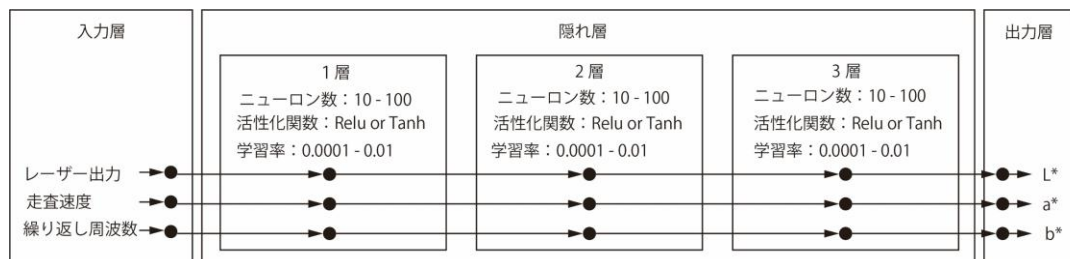


図4 予測モデルのアーキテクチャ

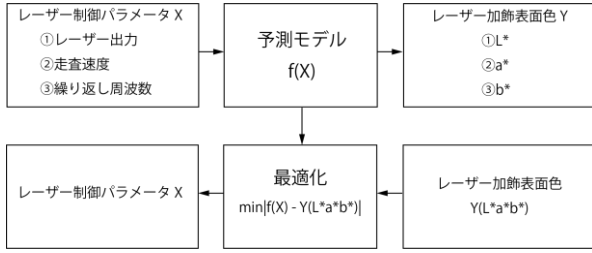


図5 制御パラメータ探索のプロセス図

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (3)$$

ここで、 y_i は実測値、 y'_i は予測値、 $\bar{y}$ は実験値の平均、 n はデータ数（本研究では $n=32$ ）を表している。

2.5 制御パラメータ探索

特定の色を発色させるレーザー加飾条件は必ずしも発色と一対とはならず複数存在する。このため、レーザー加飾表面色からレーザー制御パラメータを予測するモデルを構築することは困難である。そこで、本研究ではレーザー制御パラメータからレーザー加飾表面色を学習することで予測モデル $f(X)$ を求め、つぎにレーザー加飾表面色に対する最適化問題として予測モデルの逆解析を行った。構築した予測モデルが高精度であれば、レーザー加飾による金属表面色を再現可能な制御パラメータが探索できると予想される。図5に予測モデルを基にレーザー制御パラメータを探索するプロセスを示す。同図の探索プロセスは、レーザー加飾表面色 $Y(L^*a^*b^*)$ と予測モデル $f(X)$ の差を計算し、複数の解の中から最適な制御パラメータ X を求めることを表している。

制御パラメータの探索には、既知の学習データを利用し、少ない試行回数で最適値を求める方法として知られているTPE（Tree-structured Parzen Estimator）を用いた⁶⁾。具体的には、予測モデルから出力されるレーザー加飾表面色の予測値と実際に測色した実測値の二乗誤差の合計Loss（式(4)）が最も小さくなる制御パラメータを探索した。探索空間は学習データにおける各制御パラメータの最小値から最大値までの連続一様分布とした。

$$Loss = (L_{pred}^* - L_{real}^*)^2 + (a_{pred}^* - a_{real}^*)^2 + (b_{pred}^* - b_{real}^*)^2 \quad (4)$$

ここで、 L_{pred}^* 、 a_{pred}^* 、 b_{pred}^* はそれぞれ、 L^* 、 a^* 、 b^* の各予測モデルから出力される色値、 L_{real}^* 、 a_{real}^* 、 b_{real}^* はそれぞれ、実測したときの色値である。

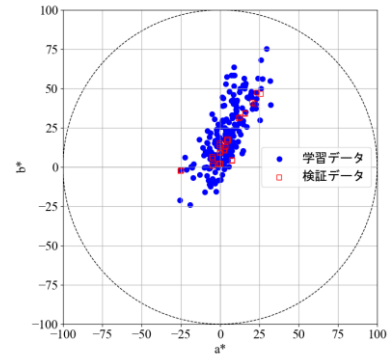


図6 実験データの色度分布

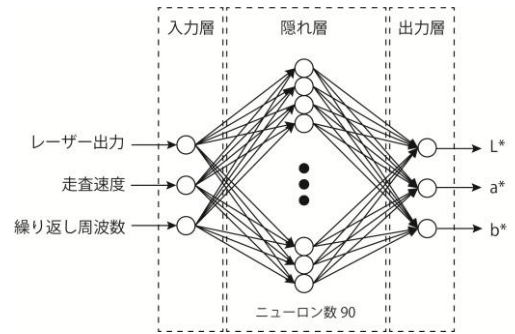


図7 予測モデルの構造

既知の制御パラメータでレーザー加飾した色値と探索した制御パラメータでレーザー加飾した色値との色差は式(5)によって求める。この値が12以下（目標色差）であれば、探索した制御パラメータを用いて所望の色が再現されたと判断することとした。

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (5)$$

ここで、 ΔL^* は実測値と予測値の明度差、 Δa^* は実測値と予測値の赤-緑の色度差、 Δb^* は実測値と予測値の黄-青の色度差を表している。

3 結果と考察

3.1 NN 予測モデルの性能評価

図6に学習データおよび検証データの a^*b^* 色空間の色度分布を示す。学習データは暖色系に多く分布している一方、検証データは、学習データの分布範囲内に収まっており、本研究で構築した予測モデルの汎化性能を評価するうえで妥当な条件であることを確認した。

図7に最適化後の予測モデルのアーキテクチャを示す。Optunaにより構築されたモデルは、隠れ層1層、ニューロン数90から構成されるパーセプトロン構造であり、学習率0.00564、活性化関数Tanhが最適なハイパーパラメータとして選択された。

式(5)より算出した色差 ΔE^* は18.5であり、目標色差を

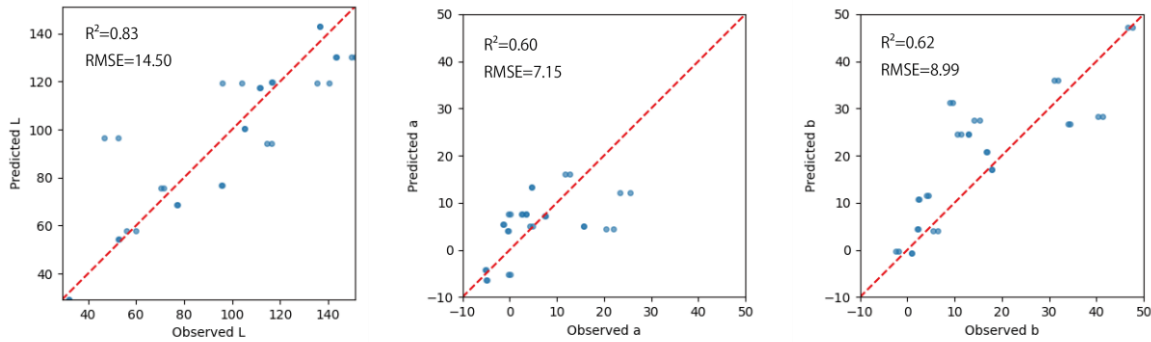


図8 実測値と予測値の散布図

満たすことができなかった。学習データの増加に伴い色差が徐々に小さくなることを確認したが、216件の学習データ量は、全データの0.3%相当にすぎず、制御パラメータと表面色との関係を表現するためには不足していると考えられる。図8に、 L^* 、 a^* 、 b^* 各成分における実測値とモデル予測値の比較結果を示す。 L^* 成分では決定係数 $R^2 = 0.83$ となり、比較的高い予測精度が得られた。一方、 a^* および b^* 成分では、それぞれ $R^2 = 0.60$ 、 $R^2 = 0.62$ となり、 L^* と比較して相関の低下が認められた。また、 a^* および b^* の散布図では、予測値のばらつきが大きく、色度成分の再現性が輝度成分よりも低いことが確認できる。

以上より、予測モデルの精度向上には、学習データを増加することに加え、色度成分の再現性を改善する必要がある。今後、データ量と精度の関係を調査するとともに、表面色に影響を及ぼす制御パラメータを入力特徴量として追加することを検討する。

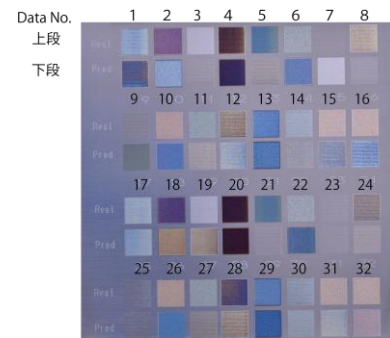
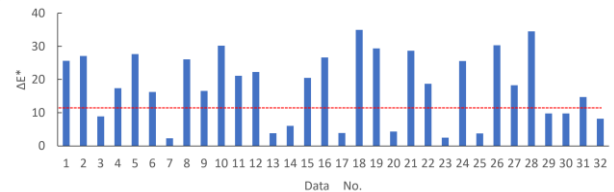
3.2 制御パラメータ探索評価

構築した予測モデルを逆解析することにより、所望のレーザー加飾表面色を再現する制御パラメータ探索を行った。発色が既知の制御パラメータによる加飾結果と、同じ発色を入力として探索により得られた制御パラメータを用いた加飾結果を図9(a)に示す。上段は既知条件を用いたレーザー加飾表面色、下段は探索条件を用いたレーザー加飾表面色である。また、図9(a)に対応する各データの色差 ΔE^* を図9(b)に示す。図中の点線は目標色差を表している。図9(b)より目標色差を満足したのは、32件中11件であり、完全な色再現には至らなかった。

以上より、本手法は未知のレーザー加飾表面色に対して一定の有効性が示されたが、高精度に色再現を実現するためには、予測モデルの精度向上を図る必要がある。

4 まとめ

本研究では、NNを用いてレーザー加飾条件からステンレス鋼表面色を予測するモデルを構築し、モデルの逆解析による制御パラメータ探索手法を提案した。構築した予測モデルは、色差18.5の精度で予測可能であることを確認した。また、予測モデルの逆解析による制御パ

(a) レーザー加飾表面色の比較
(上段：既知、下段：予測)

(b) 色度差分布

図9 レーザー制御パラメータ探索結果

ラメータ探索を行った結果、32件中11件がレーザー加飾表面色の再現に成功した。

今後、学習データ数の拡充および、予測モデルのアーキテクチャの改善等を図り、予測モデルの精度向上を検討する必要がある。

【参考文献】

- 1) 田中ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp30-33, 2024
- 2) 田中ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp22-25, 2025
- 3) 田中ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.1, pp25-26, 2019
- 4) 柳瀬, Optuna で始めるハイパーパラメータ最適化, Vol.104, No.7, 2021
- 5) 山田ら, パラメータ設計・応答曲面法・ロバスト最適化入門, pp97-117, 2022
- 6) Cheng-Fang Su ら, Procedia CIRP 137, pp40-45, 2025

低融点金属による水栓製品欠陥補修技術の開発（第2報）

細野幸太*、林哲郎*、大津崇*

Development of the defect repair technology about the faucet product with the low melting metal (II)

HOSONO Kota*, HAYASHI Tetsuro* and OTSU Takashi*

砂型 casting で作製する青銅製水栓製品において、メッキ処理前の研磨工程で発見される微小な casting 欠陥は、メッキ表面の美観に影響を及ぼすため補修が必要となる。この補修方法として、筆者らは低融点金属である亜鉛等を補修材に用い、小型電気炉で加熱することで、曲面部分でもボイドなどの欠陥が極めて少ない、約 155 μ m 厚の銅-亜鉛化合物層を形成できることを見出している。この補修方法を実用的なものとするため、深さのある欠陥を補修する手法を検討し、欠陥部に銅薄板を設置した後に亜鉛および錫を配置し加熱することにより深さ 0.6mm 程度の欠陥を補修できることを確認した。

1 はじめに

これまでに筆者らは、深さ約 0.25mm の穴加工を施した曲面を有する青銅 (CAC406) 製水栓製品に対し、亜鉛 (Zn) 薄板および錫 (Sn) 箔を設置し、混合ガスを流した小型電気炉中で加熱 (495 $^{\circ}$ C) する補修法を試み、CAC406 曲面部と Zn は密着し、約 155 μ m 厚のほぼ欠陥のない銅 (Cu) -Zn 化合物層を形成できることを見出している¹⁾。しかし、深さが 155 μ m を超える欠陥や、図 1 のように穴加工した欠陥部のさらに奥部に欠陥が存在する場合もあり、深い欠陥を補修する手法を開発する必要がある。

そこで本報では、新たに Zn、Sn に加えて Cu 薄板を補修材として用いることにより、深い欠陥部 (約 0.6mm) の補修を試みたので報告する。

2 実験

2.1 試験片

試験片には砂型 casting で製造した曲面を有する CAC406 製水栓製品を使用した。この試験片には、メッキ処理前の研磨が施されている。試験片をエタノールで 5 分間超音波洗浄した後、铸造欠陥の補修箇所を模擬した ϕ 3、深さ約 0.6 mm の穴を切削加工により形成した。補修材には、株式会社ニラコ製の Cu 薄板 (厚さ 0.4 mm、純度 99.96%) および Zn 薄板 (厚さ 0.2 mm、純度 99.2%) を用いた。これらの薄板を穴形状に合わせて ϕ 3 程度に加工し、底部に Cu 薄板を、その上部に Zn 薄板 2 枚を順に重ねて設置した。また、酸化によって Zn 薄板の表面が黒く変色することを抑制するため、 ϕ 3 程度の厚み 0.1 mm の Sn 箔 (株式会社ニラコ製、純度 99.9%) 及び厚み 0.1 mm の Zn 箔 (株式会社ニラコ製、純度 99.2%) を 0.2 mm 厚の Zn 薄板上に設置し、加熱処理前の試験片とした。



図 1 深い欠陥を有する CAC406 製水栓製品

2.2 加熱装置と加熱条件

加熱には、酸化防止のため混合ガス (窒素-3%水素) を一定量流せるように改良した小型電気炉 (ヤマト科学株式会社製、FP303) を用いた。加熱保持温度は Zn の融点 (419 $^{\circ}$ C) を超える 495 $^{\circ}$ C とし、1 時間保持した後、150 $^{\circ}$ C まで炉冷した試験片を各種測定に供した。

2.3 断面観察、元素分析及び硬さ測定

加熱処理後の試験片を切断、樹脂埋め、鏡面研磨し断面観察試料とした。断面観察試料を金属顕微鏡 (株式会社ニコン製エクリプス LV100) にて観察し、CAC406 曲面と Zn 及び Cu の密着状態ならびに補修部分における欠陥等の有無を確認した。また、断面観察試料を走査型電子顕微鏡 (SEM、日本電子株式会社製 JXA-8530F) にて観察するとともに、内蔵のエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) を用いて Cu、Zn、Pb 及び Sn の分布状態を確認した。さらに、切断面の硬さをマイクロビッカース硬さ試験機 (株式会社フューチャアテック製 FM-810) にて測定した。なお、測定点数は各層 5 点とした。

3 結果及び考察

図 2 に加熱処理後の試験片 (a) と同図点線部で切断したマクロ断面像 (b) を示す。図 2 (b) より Zn と CAC406 ならびに Zn 下部と Cu 表面は接合していることが分かる。Cu 下部と CAC406 表面部の一部に空隙が確認できるが、

* 金属部

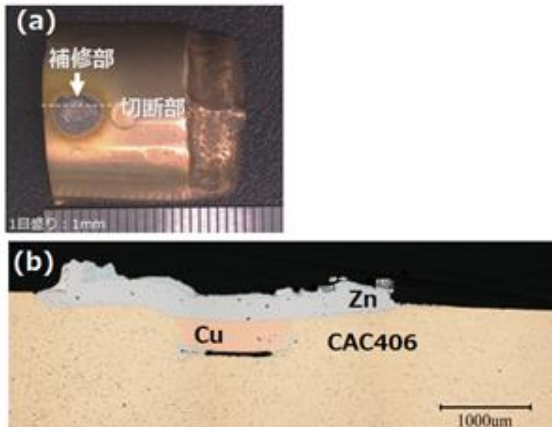


図2 (a)加熱処理後試験片および(b)マクロ断面

Cu 両端部と CAC406 は接合しており空隙を塞いでいることが分かる。これらの結果から、小さな鑄造欠陥部を切削加工し、加工部に Cu、Zn 及び Sn 薄板を設置、混合ガス中で加熱することで曲面を有する深い欠陥部を補修できることが示唆された。

図3に加熱処理後の SEM 断面像(a)及び元素分析結果 (b)Cu、(c)Zn、(d)Pb 及び(e)Sn の分布状態を示す。同図より、Zn 薄板に CAC406 の成分である Cu、Pb 及び Sn が拡散し、カーケンダルボイド等の欠陥がほぼない約 165μm 厚の Cu-Zn 化合物層が形成されていることが分かる。また、Cu 両端部においては Zn が検出されており、Zn が Cu に拡散し、接合していると考えられる。なお、EDX による簡易定量分析から Cu-Zn 化合物層中の Cu は 35.3at%、Zn は 64.5at%、Pb は 0.13at%、Sn は 0.07at%であり、Cu₅Zn₈を形成していると考えられたり。化合物層の硬さは、HV411 であり、素材である CAC406 の HV85 より、硬いことが分かった。

図4(a)は、3mm未満の鑄造欠陥を有した製造現場で不良と見なされる CAC406 製水栓製品である。この部品の欠陥部分にφ3、深さ約 0.5mm の穴を切削加工し、実験用試験片と同様の補修処理を施したうえで、バフ研磨した例を図4(b)に示す。同図から補修材で充填された滑らかな曲面が得られており、実際の水栓製品においても小型電気炉による補修が可能であると考えられる。

4 まとめ

曲面形状を持つ CAC406 製水栓製品の深い欠陥を補修する手法を試みた。欠陥を模した深さ約 0.6mm の穴を有す CAC406 製水栓製品に Cu、Zn 薄板および Sn、Zn 箔を設置した試験片を準備し、混合ガスを流した小型電気炉中で加熱する手法を試み、次の知見を得た。

- CAC406 と Zn 及び Cu は密着し、空隙をふさぐことで深い穴部を補修できることが分かった。
- 補修部の表面には約 165μm 厚のほぼ欠陥のない Cu-Zn 化合物層が形成された。
- 形成された Cu-Zn 化合物層のビッカース硬さは

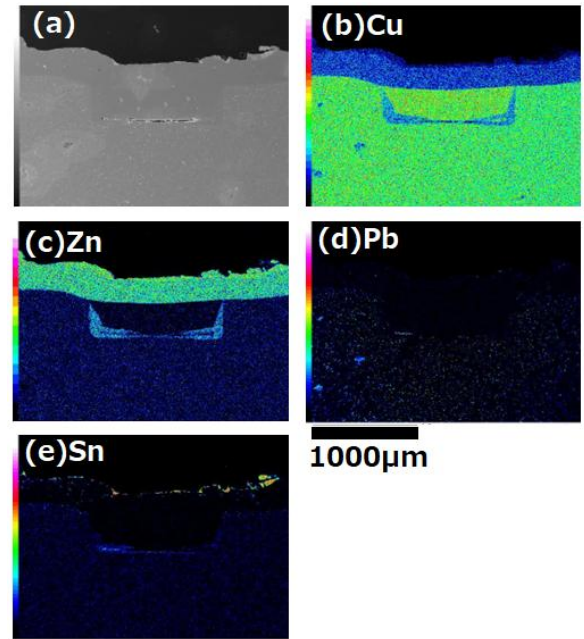


図3 Zn 箔/Sn 箔/ Zn 薄板/CAC406 試験片加熱処理後の(a)SEM 断面像及び各元素分布像 (b)Cu、(c)Zn、(d)Pb 及び(e)Sn



図4 (a)鑄造欠陥を有する水栓製品、(b)バフ研磨後の補修水栓製品

HV411 となり、素材の 4.8 倍であった。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、実験試料をご提供いただいた株式会社水生活製作所様に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 細野ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp26-27,2025

炭素系硬質膜の密着性改善に関する研究（第1報）

小川大介*、田中等幸*

Study on improvement of adhesion of carbon-based hard coatings (I)

OGAWA Daisuke* and TANAKA Tomoyuki*

炭素系硬質膜（Diamond-Like Carbon：DLC）は高硬度・耐摩耗性・低摩擦特性などをもつ優れた表面被膜である。一方で、DLC と基材との残留応力の違いや基材の表面状態、界面ミスマッチから密着性の確保が実用上の課題となっている。本年度は3種のDLC膜の特性を評価し、膜種別などの違いによる膜の硬度や摩耗特性の基礎データを蓄積した。そのうえで、スクラッチおよび微小押し込み試験による密着性評価法を比較した結果、臨界荷重に一定の相関が認められるとともに、表面・断面観察からは、き裂形態に特徴的な差異が現れることを確認できた。このことからDLC膜の密着性解析にあたっては、表面や断面の観察に加え、摺動や局所応力の双方から評価を行うことが有効である。

1 はじめに

近年、環境問題や省エネルギーの観点から、各種機械部品には摩擦損失の低減や長寿命化といった機能が求められている。平滑性および化学的安定性に加え、低摩擦・耐摩耗性に優れたDLC膜は、電気・電子機器、自動車部品などの摺動部の表面被膜としての利用が期待されている¹⁾。ISO 20523:2017において、DLC膜は構造や水素含有量、添加元素の有無により7つに分類されており、用途に合ったDLC膜を選択することが重要である。また、高負荷荷重で長期間摩擦が発生する部品への適用においては、成膜する基材（金属やセラミックス）との密着性や高い剥離強度が求められる²⁾。

本研究では各種製品にDLC膜を適用するうえで必要な評価技術の蓄積を目的としている。本年度は成膜条件の異なるDLC膜を用いて、密着性評価法としてスクラッチ試験および微小押し込み試験を検討した。

2 実験

2.1 試料

実験にはφ22.5 mm×14 mmの高炭素クロム軸受鋼（SUJ2）を基材とした3種類のDLC膜（サンプルA～C）を用いた（表1）。なお、サンプルBとサンプルCは、DLC種別および成膜方法は同じであるが、中間膜の有無が異なっている。

2.2 微小押し込み硬さ試験

DLC膜の硬さ評価には微小押し込み硬さ試験機（株

エリオニクス、ENT-NEXUS）を用いた。圧子には、ダイヤモンド圧子（バーコビッチ）を用い、除荷負荷試験にて押し込み荷重5 mN、荷重保持時間5秒で試験を行った。測定は各試料8箇所で行い、平均値を硬さの代表値とした。

2.3 摩擦摩耗試験

DLC膜の耐摩耗性及び耐久性の評価には高温摩擦摩耗試験機（ブルカージャパン(株)、UMT-TriboLab）を用いた。評価は、ボールオンディスク試験法により行い、ボールサンプルにはSUJ2製転がり軸受用鋼球（直径3/8 inch）を用いた。試験条件は、相対すべり速度0.03 m/s、垂直荷重0.1 N、1 N、5 N、9 N、常温大気中とした。また、摩耗状態を共焦点顕微鏡（レーザーテック(株)、OPTICS HYBRID L3）により観察した。

2.4 密着性試験

DLC膜の密着性はスクラッチ試験と押し込み試験により評価した。

スクラッチ試験にはスクラッチ試験機（(株)レスカ、CSR1000）を使用した。ダイヤモンド圧子（先端曲率半径：200 μm）を用い、速度10 μm/s、垂直荷重を10 N/mmで増加させ試験を行った。なお、膜の剥離荷重は、AEセンサーの波形が最初に検出されたところとし、その箇所の表面状態を共焦点顕微鏡により観察した。

押し込み試験には微小押し込み硬さ試験機を使用した。ダイヤモンド圧子（バーコビッチ）を用い、除荷負荷試験にて押し込み荷重300 mN、荷重保持時間5秒で試験を行った。なお、剥離（クラック発生）荷重解析には偏微分マルテンス硬さ（HM_{diff}）-荷重曲線を用い、試験後の試料の表面状態を電子顕微鏡（日本電子(株)、JIB-4600F）により観察した。

3 結果及び考察

3.1 微小押し込み硬さ試験

表1 DLC膜サンプル

試験片	DLC 種別	中間膜
A	ta-C	無
B	a-C:H	有
C	a-C:H	無

* 金属部

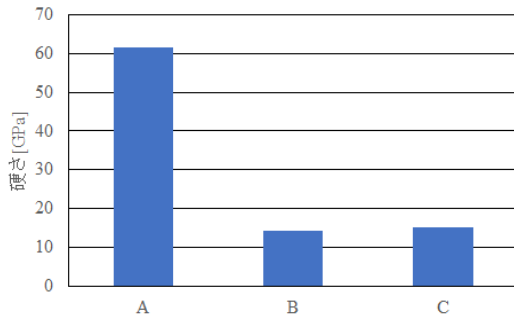


図1 DLC膜の微小硬さ

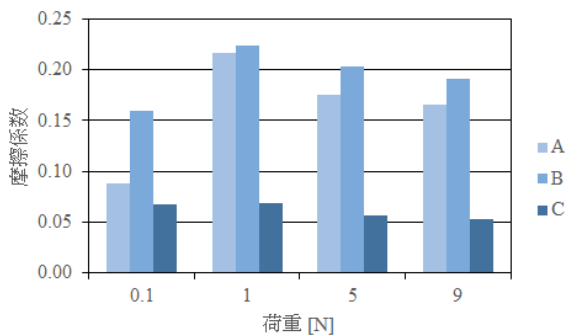


図2 DLC膜の摩擦係数

表2 比摩耗量 ($\times 10^{-7} \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$)

試験片	DLC	ボール
A	1.2	2.0
B	1.3	0.4
C	1.6	0.2

図1に微小押し込み硬さ試験機で測定した各種 DLC 膜の硬さを示す。サンプル A は 60 GPa を超える硬さであり、サンプル B およびサンプル C は、約 15 GPa の硬さであった。一般的に ta-C 膜はダイヤモンド骨格構造 (sp^3 結合) の比率が高く、水素を含まないため高硬度となり、a-C:H 膜についてはグラファイト骨格構造 (sp^2 結合) が多く、水素含有しているため低硬度となる³⁾と言われており、本研究においても一般的な膜硬さと同じ結果となった。

3.2 摩擦摩耗試験

ボールオンディスク試験による平均摩擦係数の結果を図2に示す。摩擦係数は、サンプル C が最も低く、おおよそ 0.05 となり、サンプル A および B では 0.2 弱となった。同じ DLC 種別であるサンプル B とサンプル C で摩擦係数に 2 倍以上の差が生じているが、この理由は膜組成の違いが影響したものと考えられる。次に、共焦点顕微鏡を使用して試験後の DLC 膜およびボールの摩耗痕寸法から体積を算出し、比摩耗量を導出した結果を表2に示す。DLC 膜の比摩耗量についてはサンプル A

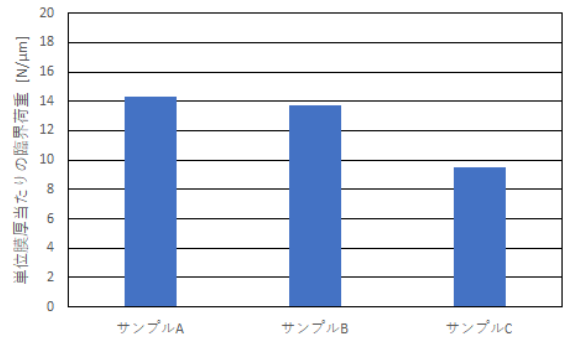


図3 スクラッチ試験による臨界荷重

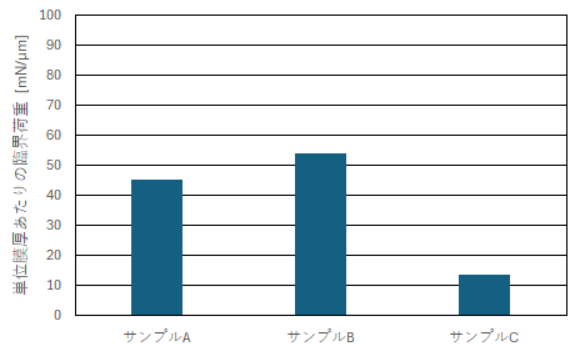


図4 微小押し込み試験による臨界荷重

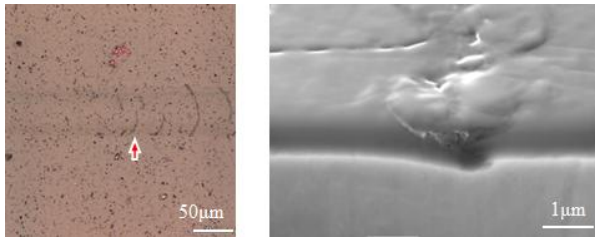
およびサンプル B の耐摩耗性が高いことが分かる。一方、ボールの比摩耗量から相手攻撃性が低い DLC 膜はサンプル B およびサンプル C であった。以上から耐摩耗性および相手攻撃性の両方が低い DLC 膜はサンプル B であることが示唆された。

3.3 密着性試験

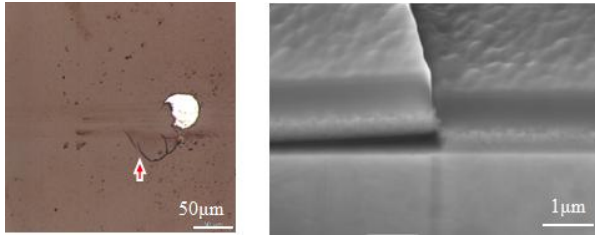
スクラッチ試験および押し込み試験による単位膜厚あたりの臨界荷重を評価した結果を図3、4に示す。サンプル A および B は臨界荷重が高い傾向を示すことから一定の相関を示した。

スクラッチ試験後の表面および断面観察結果を図5に示す。測定箇所は、AE センサーで最初に波形の変化が検出された箇所を共焦点顕微鏡および電子顕微鏡にて観察したものであり、き裂箇所を矢印で示している。スクラッチ痕⁴⁾はサンプル A がヘルツクラック（半円状のクラック）、サンプル B がラテラルクラック（層状のき裂、剥離）、サンプル C がラジアルクラック（45 度方向に発生するき裂）であり、3 種の DLC 膜でクラック形態に明確な違いがあることが確認できた。ヘルツクラックやラテラルクラックは圧子接触面の後ろに形成されるものであり、一般に引張応力により発生する。特に、ラテラルクラックは剥離を伴うため、密着性に起因する。一方、ラジアルクラックはスクラッチの進行方向に対して 45 度方向に発生するき裂であり、圧縮応力に加えてせん断応力が重畳され、一般に引張応力集中が局所的に増

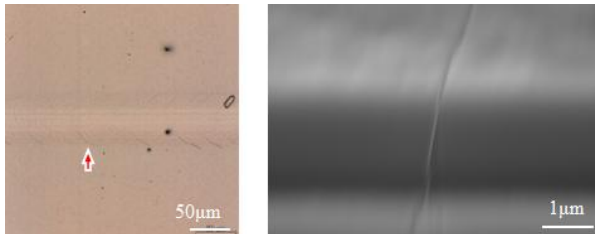
→ スクラッチ方向



(a) サンプル A



(b) サンプル B



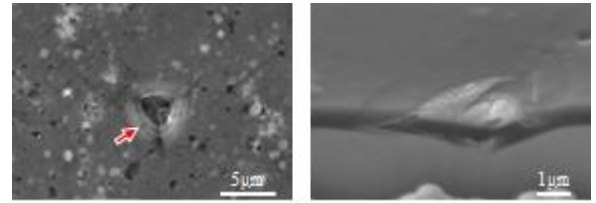
(c) サンプル C

図5 スクラッチ試験後の状態
(左：表面、右：断面)

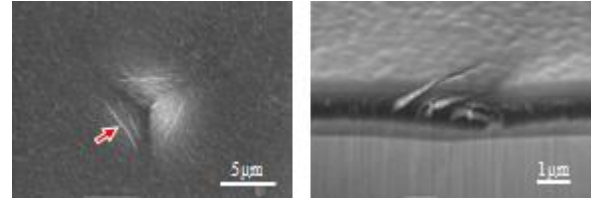
大することが原因とされている。よって、サンプル A、C は DLC 膜内のき裂であるのに対し、サンプル B は基材界面からの剥離に伴うき裂であり、基材と中間膜との密着性が低いと示唆された。

押し込み試験後の表面および断面の電子顕微鏡観察結果を図6に示す。サンプル A および B では圧痕の周りに微細なき裂が認められ、断面にも複数のき裂が確認できる。これらのき裂は、圧子を押し込んだ際に生じる圧痕周辺の引張応力の作用により発生したものと考えられる。サンプル C については表面に圧子形状の圧痕が認められるもののクラックは確認できない。一方、断面には基材との界面近傍にき裂が発生しており、ラテラルクラック様相を示している。よって、サンプル A、B は DLC 膜内のき裂であるのに対し、サンプル C は界面き裂（剥離）であると考えられ、密着性が低いことが示唆された。

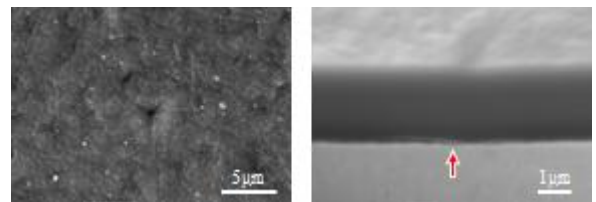
以上から、スクラッチ試験による摺動と微小押し込み試験による局所応力との双方から密着性評価を行うことで、DLC 膜の特性および中間膜との密着性に起因するき裂の差異が把握でき、DLC 膜の評価に有用であると考えられる。



(a) サンプル A



(b) サンプル B



(c) サンプル C

図6 微小押し込み硬さ試験後の状態
(左：表面、右：断面)

4 まとめ

各種炭素系硬質膜（DLC）の膜特性と密着性について体系的に評価した。その結果、膜種別によって、膜硬度や摩耗特性に顕著な差が生じることを確認した。さらに、密着性評価として2種類の手法を比較検討したところ、得られた臨界荷重には一定の相関が認められた。一方で、観察されるクラック形状には特徴的な差異が生じることが確認でき、DLC 膜の密着性の解析にあたっては、表面や断面の観察に加え、摺動や局所応力の双方から評価を行うことが有効であると考えられる。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学大学院工学研究科 野老山貴行准教授に、ご助言頂きましたことを深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 大竹尚登, DLC の基礎と応用展開(普及版), シーエムシー出版, 2023
- 2) 斎藤秀俊, DLC 膜ハンドブック, エヌ・ティー・エス, 2006
- 3) 三宅浩二, 日本真空学会, 第 60 巻, 第 11 号, pp428-436, 2017
- 4) 榎本祐嗣ら, 薄膜トライボロジー, 東京大学出版会, pp7, 1994

化学

現場生産性向上を図る高機能プラスチック製品の開発（第17報）

ー 帯電防止プラスチックの開発（5）ー

今泉茂巳*、林浩司*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (XVII)

- Development of antistatic plastics (V) -

IMAIZUMI Shigemi* and HAYASHI Koji*

永久帯電防止剤 PAA-1 を 20 wt% 添加したブロー成形グレードのポリエチレン平板と PAA-3 を 30 wt% 添加した同平板について、帯電防止効果の湿度依存性を検討した。その結果、湿度が低くなるにつれて表面抵抗率が大きくなる傾向が見られた。PAA-1 添加平板の方がその傾向は大きかったが、湿度 20%RH でも $10^{11} \Omega/\text{sq.}$ の表面抵抗率で「帯電するがすぐ減衰する」程度の帯電防止性は有していた。これらの平板を 30 回繰り返し水洗した時の帯電防止効果の持続性について調べた結果、PAA-1 添加平板では、水洗前 $10^9 \Omega/\text{sq.}$ であった表面抵抗率が 10 回水洗までに $10^{12} \Omega/\text{sq.}$ に上昇し、それ以降はあまり変化しなかった。一方、PAA-3 添加平板では水洗による表面抵抗率の変化は見られなかった。多層ブロー成形に向けた予備検討として、板厚を 2 mm から 0.3 mm まで薄くした時の表面抵抗率の変化を調べたところ、いずれの平板についても板厚を薄くしても表面抵抗率は大きく変化せず、多層ブロー成形により表層のみ帯電防止剤添加プラスチックになっても問題がないことが示唆された。

県内企業により、2 種類の永久帯電防止剤を使用して 5L 扁平缶の試作を行った。表面抵抗率は $10^8 \sim 10^9 \Omega/\text{sq.}$ で十分な耐電防止性を有していた。色は若干黄色を呈したが、色を付ければ問題ない程度であった。しかし、現状では、ピンチオフ部の強度が低い場合やピンチオフ部が完全に融着せずに一部割れるといった問題があり、成形条件のさらなる検討が必要であると考えられる。

1 はじめに

化学工場等で使用される試薬容器には金属製やガラス製のものが多いが、これらの容器は重く、ガラス容器においてはぶつけて割れる危険性もあり、扱いにくい。そのため、軽くて割れないプラスチック製容器が求められている。しかしながら、プラスチックは静電気を蓄積しやすいため、プラスチック製試薬容器には、ほこり等異物の混入や静電気火災を防ぐために帯電防止性を付与する必要がある。これまでプラスチックへの帯電防止性付与は基本的に射出成形品について行われているが、容器のようなブロー成形品への帯電防止性付与については見がない。

プラスチックへの帯電防止性付与にはカーボンブラックや界面活性剤系帯電防止剤（低分子型帯電防止剤）が広く使用されている。しかしながら、カーボンブラックを添加したプラスチックは黒色であり、着色が不可能なため用途が限られる¹⁾。また、界面活性剤系帯電防止剤を添加したプラスチックは帯電防止効果に湿度依存性があり、乾燥した環境では十分な効果が現れない¹⁾。さらに、帯電防止剤が表面にブリードアウトし、布拭きや水洗いにより失われてしまうため、効果が長続きしない¹⁾。

そこで本研究では、蓄電防止レベルの帯電防止性（目標：表面抵抗率 $10^9 \Omega/\text{sq.}$ 以下）を持つとともに、それが湿度に依存せず長期間維持され、かつ、着色可能なブロー成形用帯電防止プラスチックの開発を行ってきた。

ブロー成形グレードの高密度ポリエチレン（以下、PE 樹脂とする）に永久帯電防止剤（高分子型帯電防止剤）を添加して混練した後、熱プレスして作製した平板の帯電防止効果を評価したところ、永久帯電防止剤を 20～30 wt% 添加することにより表面抵抗率が $10^9 \Omega/\text{sq.}$ まで低下することが明らかになった²³⁾。しかしながら、20～30 wt% の帯電防止剤の添加は、製造コストが大幅に増加し商品化が難しいため、多層ブロー成形により表層のみ帯電防止剤添加プラスチックにする等の工夫が必要であると考えられた。

本年度は、平板の帯電防止効果の湿度依存性および繰り返し水洗に対する帯電防止効果の持続性について明らかにするとともに、多層ブロー成形に向けた予備検討として、板厚を薄くしていった時の表面抵抗率の変化について調べた。また、県内企業により 5L 扁平缶の試作を行った。これらについて報告する。

2 実験

2.1 材料

これまで、3 種類の永久帯電防止剤（PAA-1、PAA-2、PAA-3 とする）と、PE 樹脂としてノバテック HD HB216R（日本ポリエチレン(株)）を使用して検討を行ってきた²³⁾。そのうち、帯電防止効果が大きかった PAA-1 と PAA-3 を添加した平板（100 mm×100 mm）について、効果の湿度依存性、水洗に対する持続性、および、板厚との関係を検討した。

5L 扁平缶の試作では、永久帯電防止剤として PAA-1

* 化学部

と同じメーカーの製品（PAA-4 とする）と PAA-3 と同じメーカーの製品（PAA-5 とする）、PE 樹脂としてノバテック HD HB233R（日本ポリエチレン(株)）を使用した。

2.2 湿度依存性試験

以前の実験で $10^9 \Omega/\text{sq.}$ の表面抵抗率が得られた PAA-1 を 20 wt% 添加した平板²⁾（以下、PAA-1-20 とする）と PAA-3 を 30 wt% 添加した平板³⁾（以下、PAA-3-30 とする）について、いずれも 2 枚使用して試験を行った。

環境試験室（エスベック(株) TBR-4EAOPT）内で試験を行った。温度は 20°C（一定）で、湿度を 20、40、65、80%RH に設定した。試験片を各湿度で 24 時間静置した後、両面の表面抵抗率を測定し、平均値をとった。

2.3 水洗に対する帯電防止効果の持続性評価

2.2 で使用した PAA-1-20 と PAA-3-30 について、いずれも 2 枚使用して試験を行った。

水を張ったバット中に試験片を入れ、水道水を流しながら不織布ワイパー（日本製紙クレシア(株) テクノパワークロスレイ）で表・裏面について全面を 3 回に分けて一方向に軽く拭いた。試験片を流水で洗い、蒸留水中に浸漬後、新しい不織布ワイパーで水分を吸い取り、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $65 \pm 4\%\text{RH}$ 環境下に 7 時間以上静置した。この作業を 30 回繰り返した。

水洗前と水洗 10 回後、20 回後、30 回後に、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $65 \pm 4\%\text{RH}$ で約 60 時間試験片を状態調節した後、両面の表面抵抗率を測定し、平均値をとった。

2.4 板厚による表面抵抗率の変化

PAA-1-20 と PAA-3-30 について、以前に作製した混練物を使用して、熱プレスにより厚さ 0.3mm、0.5 mm、1 mm、2 mm の平板を各 3 枚ずつ作製した。小型熱プレス機（アズワン(株) AH-2003C）を使用し、PAA-1-20 は 150°C で、PAA-3-30 は 140°C で、10 分間プレスした。JIS K 6911 に従い $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $65 \pm 4\%\text{RH}$ で 90 時間状態調節を行った後、表面抵抗率を測定し平均値をとった。

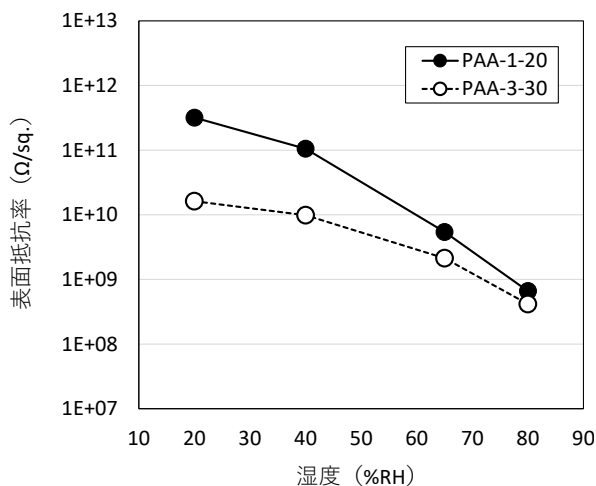


図1 表面抵抗率の湿度依存性 (n = 4)

2.5 容器の試作

県内企業の協力により、PE 樹脂に永久帯電防止剤 PAA-4 と PAA-5 を 20% 添加して 5L 扁平缶を試作した。成形温度は 180°C で、単層ブローで行った。試作容器について、表面抵抗率測定と引張試験を行った。

2.6 表面抵抗率の測定

高抵抗率計（日東精工アナリテック(株) ハイレスタ-UX MCP-HT800）により測定した。

平板については UR-100 プローブを使用し、ガード電極としてレジテーパー UFL を使用した。なお、レジテーパーについては基本的に金属面を使用した。板厚が薄い場合に金属面を使用すると測定の精度が悪くなる可能性があるため、2.4 の試験のみテフロン面を使用した。

試作容器については、容器側面に URS プロローブを押し当てて測定した。1 つの容器について位置を変えて 3 ヶ所測定し、平均値をとった。

いずれの測定でも印加電圧は 500 V を基本とし、測定可能な範囲を外れた場合のみ 250 V で測定した。測定値は短時間で安定したため、測定開始後 1 分後の数値を表面抵抗率とした。

2.7 試作容器の引張試験

容器側面とピンチオフ部について、約 10 mm 幅の短冊状試験片を切り出し、 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $50 \pm 5\%\text{RH}$ で 48 時間状態調節を行った。その後、万能試験機（Instron Corporation 5985 型）を使用し、容器側面はチャック間距離 50 mm、引張速度 100 mm/min で、ピンチオフ部はチャック間距離 25 mm、引張速度 10 mm/min で試験を行った。

3 結果および考察

3.1 帯電防止性の湿度依存性

PAA-1-20 と PAA-3-30 の温度 20°C 、湿度 20～80%RH での表面抵抗率測定結果を図 1 に示す。いずれも湿度が低くなると表面抵抗率が増加する傾向が見られ、その傾

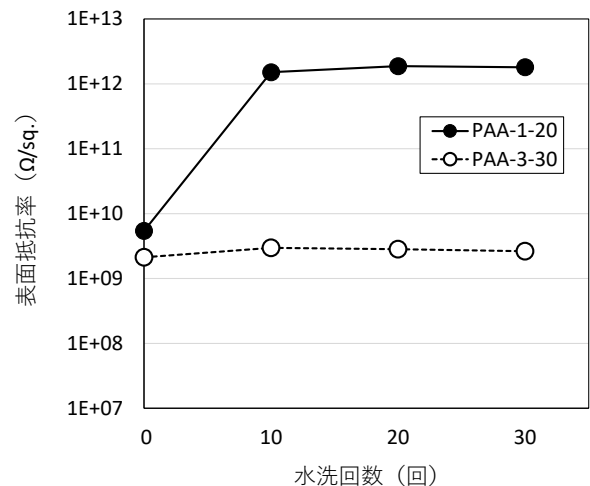


図2 水洗に対する帯電防止効果の持続性 (n = 4)

向はPAA-1-20の方が大きかった。PAA-3-30の表面抵抗率は、湿度80%RHでは $4.2 \times 10^8 \Omega/\text{sq.}$ であったが、湿度20%RHでは $1.6 \times 10^{10} \Omega/\text{sq.}$ まで増加した。一方、PAA-1-20の表面抵抗率は、湿度80%RHでは $6.6 \times 10^8 \Omega/\text{sq.}$ であったが、湿度20%RHでは $3.2 \times 10^{11} \Omega/\text{sq.}$ まで増加した。 $10^{11} \Omega/\text{sq.}$ の表面抵抗率は「帯電するがすぐ減衰する」程度の帯電防止性があることを示す値であり、それほど問題はないと考えられる。

3.2 水洗に対する帯電防止効果の持続性

PAA-1-20とPAA-3-30について30回まで水洗を行った際の表面抵抗率の変化を図2に示す。水洗前の表面抵抗率はPAA-1-20が $5.4 \times 10^9 \Omega/\text{sq.}$ 、PAA-3-30が $2.1 \times 10^9 \Omega/\text{sq.}$ で、ともに $10^9 \Omega/\text{sq.}$ 台であった。しかしながら、PAA-1-20は水洗10回までに表面抵抗率が $1.5 \times 10^{12} \Omega/\text{sq.}$ まで上昇した。それ以降はほとんど変化せず、水洗30回後の表面抵抗率は $1.8 \times 10^{12} \Omega/\text{sq.}$ であった。一方、PAA-3-30は水洗30回まで表面抵抗率がほとんど変化せず、水洗30回後の表面抵抗率は $2.6 \times 10^9 \Omega/\text{sq.}$ であった。PAA-1-20はPAA-3-30と比べて熱プレス時の帯電防止剤のブリードアウトが激しかった²⁾ため、拭き取り時に表面の帯電防止剤が脱落した結果、表面抵抗率が上昇した可能性がある。

3.3 板厚による表面抵抗率の変化

板厚を変えた時の表面抵抗率を図3に示す。PAA-1-20の表面抵抗率は板厚2mmの時に $2.6 \times 10^9 \Omega/\text{sq.}$ で、0.3mmまで薄くしても $3.8 \times 10^9 \Omega/\text{sq.}$ であった。PAA-3-30の表面抵抗率は板厚2mmの時に $2.1 \times 10^9 \Omega/\text{sq.}$ で、0.3mmまで薄くすると $5.0 \times 10^8 \Omega/\text{sq.}$ と幾分小さな値を示した。表面抵抗率の測定精度から考えると共に板厚の影響はないと考えられる。この結果より、多層ブロー成形により表層のみ帯電防止剤添加プラスチックになっても問題がないことが示唆された。

3.4 試作容器とその性能

試作した容器を図4に示す。PAA-4添加品、PAA-5添

加品ともにブランク品（帯電防止剤無添加品）と比べると若干黄色を呈したが、容器に色を付ければ問題ない程度であった。なお、PAA-5添加品については、底面のピンチオフ部が完全に融着しておらず一部割れている状態であった。

表面抵抗率については、PAA-4添加品が $3.5 \times 10^9 \Omega/\text{sq.}$ 、PAA-5添加品が $5.4 \times 10^8 \Omega/\text{sq.}$ で、目標である $10^9 \Omega/\text{sq.}$ 以下に達していた。

引張試験の結果を図5に示す。容器側面については、帯電防止剤の添加により最大荷重が低下し、最大荷重時の伸びが増加する傾向が見られたが、測定誤差を考えるとそれほど大きな差ではなかった。一方、ピンチオフ部についてはPAA-4の添加により最大荷重、最大荷重時の伸びともに著しく減少した。試験の際、ブランク品はピンチオフ部は変化がなくその上部または下部が伸びたのに対し、PAA-4添加品はピンチオフ部で割れており、圧着性が不十分となった。しかし、この問題やPAA-5添加品のピンチオフ部の割れについては、成形条件をさらに検討することにより解決する可能性があると考えられる。

4 まとめ

ブロー成形グレードの高密度ポリエチレンに永久帯電防止剤PAA-1 20 wt% およびPAA-3 30 wt% を添加した平板において、帯電防止効果の湿度依存性、繰り返しの水洗に対する効果持続性、板厚の影響についての試験を行った。耐電防止効果の湿度依存性については、湿度が低下するにつれて効果が低下したが、それほど問題がない程度であった。繰り返しの水洗に対する効果持続性については帯電防止剤によって結果が異なり、PAA-3を使用したものについては十分な効果持続性を有した。また、板厚を薄くしても帯電防止効果は低下せず、多層ブロー成形による製造コストの上昇を抑えた加工が可能であることが示唆された。

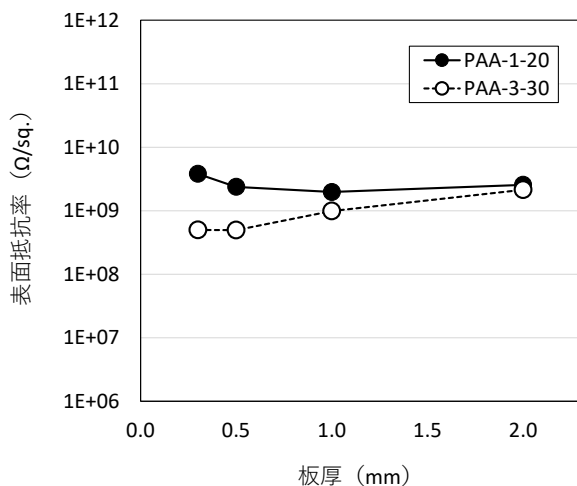


図3 板厚と表面抵抗率の関係 (n=3)



図4 試作した5L扁平缶

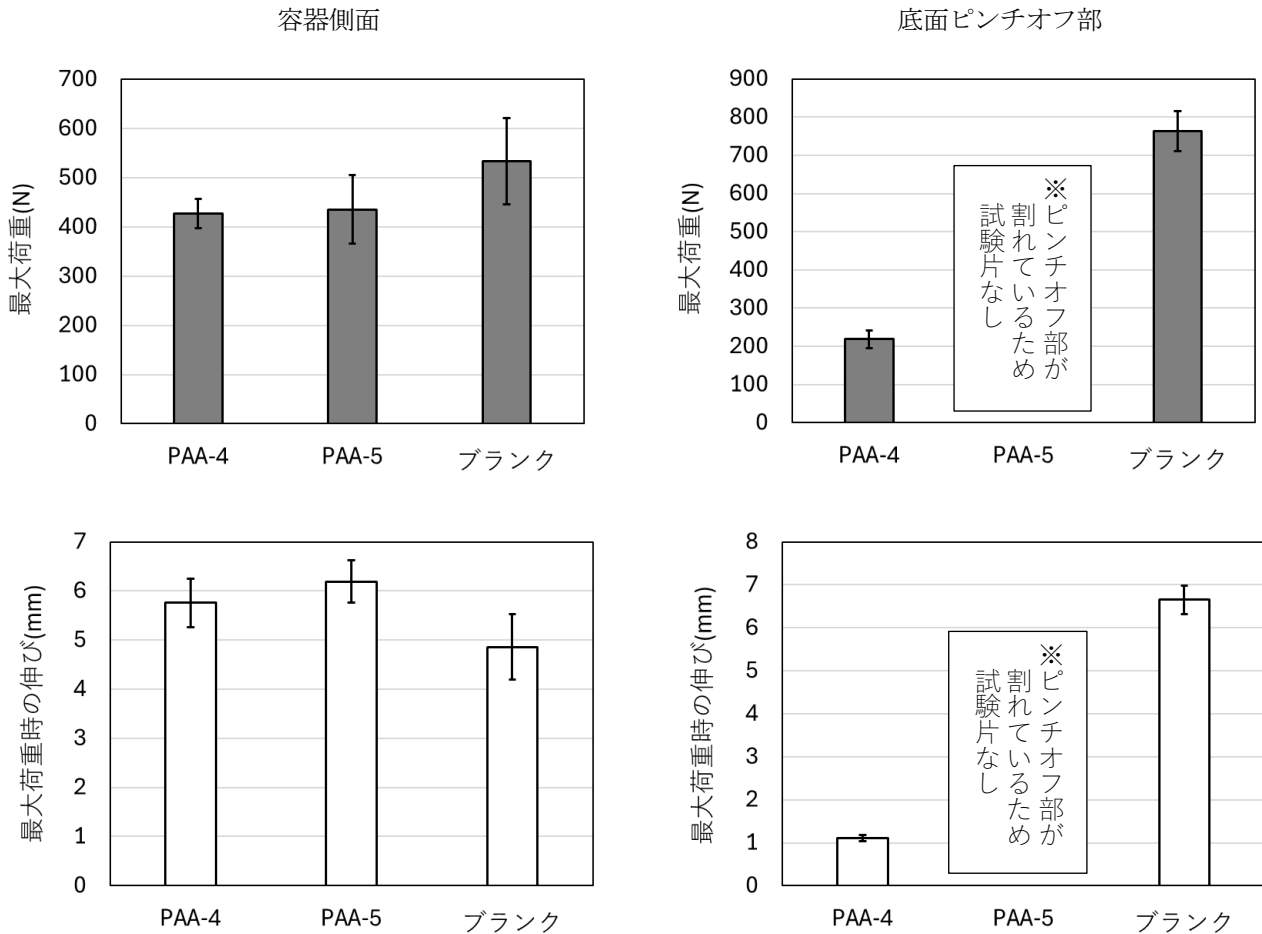


図5 試作容器の引張試験結果 (n=5)

試作した5L扁平缶は $10^8 \sim 10^9 \Omega/\text{sq.}$ の表面抵抗率を示し、十分な帯電防止性を有していた。色は若干黄色を呈したが、着色すれば問題ない程度であった。しかしながら、現状では底面ピンチオフ部の強度が弱かったり、完全に融着せずに一部割れた状態になってしまったりする問題がある。今後、成形条件の検討等によりこれらの問題を解決するとともに、多層ブロー成形による低コスト化を検討していく予定である。

【謝 辞】

コダマ樹脂工業株式会社様に5L扁平缶を試作していただきました。心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 赤松, CMC テクニカルライブラリー116「帯電防止材料の技術と応用」, シーエムシー出版, 372pp., 2002
- 2) 今泉, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 5, pp37-40, 2024
- 3) 今泉, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 6, pp29-32, 2024

現場生産性向上を図る高機能プラスチック製品の開発（第18報）

—難燃性プラスチック複合材料の開発（5）—

丹羽 厚至*、廣瀬 威仁*

Development of the advanced feature plastics improve to productivity（XVIII）

—Development of the fire-retardant plastic composites（V）—

NIWA Atsunori* and HIROSE Takehito*

本研究では、ベーマイトを使用した難燃 PP の開発を行った。まず、難燃 PP（試作）の混練ロット毎の燃焼性のバラツキを評価するため、混練毎の LOI 評価を行ったところ、概ね同程度を示した。次に、これまでの知見をもとに配合を行い、ペレタイズから物性等評価まで行ったところ、LOI は 26.8 であり、自己消火性程度の難燃性を示した。物性は、硬く脆い性質がある一方で高い弾性率、耐熱性を示したことから、適切な使用用途を選べば使用可能であると考ええる。

1 はじめに

近年、電子機器や建築材料、自動車部品などの高性能化に伴い、プラスチック材料の使用量は増加の一途をたどっている。一方で、プラスチックは一般に可燃性であり、火災時には燃焼拡大や有毒ガスの発生を引き起こす可能性があるため、安全性向上の観点から難燃化が重要な課題となっている。従来はハロゲン系難燃剤が広く用いられてきたが、燃焼時に発生する有害物質による人体への影響や、ハロゲン系難燃剤使用に係る環境規制の強化により、非ハロゲン系難燃材料の開発が求められている。中でも、無機系フィラーを用いた難燃化技術は、環境負荷低減の観点から注目されている。

これまでの研究¹²⁾では、ベーマイトを難燃剤として使用したときの効果を確認した。その結果、ベーマイトを 50wt% 添加することで限界酸素指数（以下、「LOI」と略す）が 23.9 となった。また、ベーマイトのシランカップリング処理の有無と LOI の関係性を評価したところ、シランカップリング処理により 60wt% まで LOI が向上することがわかった。次に、ベーマイトの各種形状と難燃性及び、難燃剤併用時の難燃性を評価した。形状に関しては、針状ベーマイトは立方体状ベーマイトよりやや高い難燃性を示した。また、難燃剤としてフッ素樹脂を用いたところ、LOI が最大で 25 まで増加した。一方で、ホウ酸亜鉛を難燃剤として用いたときは、LOI の顕著な増加はみられなかった。

そこで本研究では、PP+ベーマイト+難燃剤（以下、「難燃 PP」と略す）の量産に係る難燃性と物性評価を行った。

2 実験

2.1 材料

PP はノバテック PP（日本ポリプロ（株）製、MA3）を用いた。難燃剤は、立方体状ベーマイト（以下、

「cBoe」と略す）を用いた。また、難燃剤は、PTFE 系加工助剤のメタブレン（以下、「フッ素樹脂」と略す）（三菱ケミカル（株）製、A-3800）を用いた。

2.2 試料作製

【ラボ試作】

難燃 PP（試作）の複合化には、バッチ式の混練機であるラボブラストミル（（株）東洋精機製作所製、4C150・R100H）を使用した。PP、cBoe 及び難燃剤を所定の割合で準備し、200℃、10 rpm、9 分 30 秒間で全試料を混練機に投入した後、30 秒間かけて 10 rpm から 20 rpm に増速し、200℃、20 rpm で 10 分間混練した。混練後試料を取り出し、小型熱プレス機（（株）アズワン製、AH-2003C）を使用し 170℃で平板に成形した。

【実機試作】

難燃 PP（量産）複合化ペレットの作製（以下、「ペレット」と略す）には、二軸押出機（（株）日本製鋼所製、TEX44C）を使用した。PP、cBoe 及び難燃剤を所定の割合で準備し、195℃でペレタイズした。小型熱プレス機を使用し、このペレットを 170℃で平板に成形した。

ダンベル型試験片（JIS K 7161-2 1A 型）は、射出成形機（芝浦機械（株）製 EC75SXIII-2A）を使用し、上記にて作製したペレットから成形した。成形条件は、シリンダ温度 195℃、射出圧力 60 MPa、金型温度 40℃とした。

2.3 各種測定

LOI 測定は燃焼性試験器（スガ試験機（株）製、ON-1）を使用した。測定は JIS K 6269 を準用し、室温で行った。2.2 の平板（厚さ 3 mm）から LOI 測定用の試験片を切り出し、切断面をカンナでトリミングした。試験片をデシケーターで静置後、LOI 試験に供した。

引張試験は万能材料試験機（インストロン社製、5985 型）を使用した。測定は JIS K 7161-1 を準用し、試験速度 50 mm/min、つかみ具間距離 115 mm で測定した。伸

* 化学部

びは、クロスヘッドの移動距離から算出した。

三点曲げ試験も万能材料試験機を使用した。測定は JIS K 7171 を準用し、試験速度 10 mm/min、支点間距離 64 mm で測定した。試験片は、ダンベル型試験片の平行部分から切り出した。

荷重たわみ温度測定は HDT 試験装置（（株）東洋精機製作所製、3M-2）を使用した。測定は JIS K 7191-1 及び JIS K 7191-2 を準用し、曲げ応力 0.45 MPa で測定した。試験片は、ダンベル型試験片の平行部分から切り出した。

ロックウェル硬さ測定は硬度計（アカシ（株）製 ARK-F1000 型）を使用した。測定は JIS K 7202-2 を準用し、R スケール（1/2”、60 kgf）にて測定した。試験片は、ダンベル型試験片のつかみ部（厚さ 4 mm）で測定した。

熱重量測定は示差熱/熱重量同時測定装置（TA Instrument 社製、Q600 型）を使用し、昇温速度 10 °C/min、室温から 800 °C、窒素雰囲気、白金パンで測定した。試料はペレットを使用した。

メルトフローレイト（以下、「MFR」と略す）はメルトフローインデックスステスター（（株）安田精機製作所製、120-FWP-W）を使用した。測定は JIS K 7210-1 を準用し、230 °C、2.16 kg で測定した。試料はペレットを使用した。

シャルピー衝撃強さは衝撃試験機（Zwick 社製）を使用した。測定は JIS K 7111-1 を準用し、支点間距離 62 mm、ノッチ無しで測定した。試験片は、ダンベル型試験片の平行部分から切り出した。

密度は乾式密度計（マイクロメリテックス社製、アキュピック II）を使用した。測定は JIS R 1620 を準用し、23 °C で測定した。試料はペレットを使用した。

3 結果及び考察

3.1 難燃 PP（試作）の LOI 再現性

混練による試作において、LOI のバラツキがどの程度あるか確認するため、混練 3 回分の LOI 測定を行った。その結果、25.0、24.1、24.1 となり、平均 24.4、標準偏差 0.52 であった。LOI 測定は概ね 0.4 刻みで測定を行うため、3 回の差は大きくないと考える。

3.2 難燃 PP（量産）の物性評価

これまでの研究で難燃性の高い配合が見いだせたことから、ラボレベルのバッチ式から、実機レベルの連続式へのスケールアップを行った。作製したペレット及びペレットから成形した試験片を使用し、各種物性等測定を行った。表に、難燃 PP 及び PP の各種特性を評価した結果を示す。

まず、試作したペレットの熱重量測定を行い、ベーマイトの添加量が約 59wt% であることがわかった。過去の研究¹⁾からベーマイト添加量は 50wt% 以上であると難燃効果が見込めることがわかっており、本研究の試作では、

難燃性を発揮できる十分な量が添加できたと考える。

LOI 測定の結果では、難燃 PP は 26.8 を示し、PP と比べて 48% 上昇した。一般的に LOI26 以上で自己消火性があるといわれており³⁾、その程度まで難燃性が付与できたと考える。

密度測定の結果では、難燃 PP は 1.51 g/cm³ であり、PP と比べて 67% 大きくなった。ただし、PP の密度 0.905 g/cm³ 及び、ベーマイトの密度 3.07 g/cm³ 並びに、ベーマイト含有量 59wt% という条件を元に密度を計算すると 2.18 g/cm³ となることから、測定したペレットに気泡が内包されていると考える。

MFR 測定結果では、難燃 PP は 11.6 であり、PP の 12.5 と比べて大きな差は見られなかった。よって、ベーマイト含有量が高いものの、射出成形により成形することが可能な流動性を有していると考ええる。

引張強さの結果では、難燃 PP は 23.5 MPa であり、PP と比べて 27% 低下した。引張伸び測定の結果では、難燃 PP は 0.8% であり、PP と比べて 90% 低下した。引張弾性率測定の結果では、難燃 PP は 4.71 GPa であり、PP と比べて 177% 増加した。曲げ強さ測定の結果では、難燃 PP は 41.9 であり、PP と比べて 10% 低下した。曲げたわみ測定の結果では、難燃 PP は 2.9% と、PP と比べて 59% 低下した。シャルピー衝撃強さ測定の結果では、難燃 PP は 17.4 MPa であり、PP と比べて 81% 低下した。ロックウェル硬さ測定結果では、難燃 PP は 89.4 であり、PP と比べて若干硬さが低下した。荷重たわみ温度測定の結果では、難燃 PP は 116.2°C であり、PP と比べて 38% 上昇した。

以上の結果より、試作した難燃 PP は LOI を大きく上昇することができたが、硬く脆い傾向が強くなったと考える。一方で、弾性率が上昇したことからたわみにくくなり、また耐熱性も向上していることから、この特徴を活かした場面で活用可能であると考ええる。

4 まとめ

ベーマイトを使用した難燃 PP の開発を行った。まず、ラボ試作における混練ロット毎の燃焼性のバラツキを評価するため、混練 3 回分の LOI 評価を行ったところ、概ね同程度を示した。

次に、これまでの知見をもとに配合を行い、ペレタイズから物性等評価まで行ったところ、LOI は 26.8 であり、自己消火性程度の難燃性を示した。物性は、硬く脆い性質がある一方で高い弾性率、耐熱性を示したことから、適切な使用用途を選べば使用可能であると考ええる。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、試料を提供いただきました三菱ケミカル株式会社に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 丹羽, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5,
pp41-44, 2024
- 2) 丹羽, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6,
pp33-36, 2025
- 3) 増子, 繊維消誌, Vol.45, pp474-478, 2004

表 難燃PP と PP の各種特性評価結果一覧

	難燃PP	PP
LOI	26.8	18.1
無機含有量 (%)	59	—
MFR (g/10min@230°C)	11.6	12.5
密度 (g/cm ³)	1.51	0.905
引張	最大引張強さ (MPa)	23.5
	最大引張伸び (%)	0.826
	引張弾性率 (GPa)	4.71
曲げ強さ (MPa)	41.9	46.7
シャルピー衝撃強さ (kJ/m ²)	17.4	94.4
荷重たわみ温度 (°C@0.45 MPa)	116.2	84.1
ロックウェル硬さ (Rスケール)	89.4	95.9

現場生産性向上を図る高機能プラスチック製品の開発（第19報）

－軽量化・複合化によるマルチマテリアル製品の開発（5）－

岩田 泰我*、西垣 康広*、栗田 貴明*、山田 孝弘*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (XIX)

- Development of multi-material products by weight reduction and combination (V) -

IWATA Taiga*, NISHIGAKI Yasuhiro*, KURITA Takaaki* and YAMADA Takahiro*

近年、自動車・航空機産業やスポーツ用品等の幅広い分野で製品の軽量化が求められている。このため、部品の一部を比強度、比剛性に優れた炭素繊維強化複合材料（以下、CFRP）へ置き換え、異種材と接合して使用するマルチマテリアル製品の開発が盛んに行われている。マルチマテリアル製品の成形法であるインサート成形は短時間で一体成形が可能であり、低コスト化が期待できる。一方で、立体形状を成形する場合、「そり」や「ひけ」等の変形が発生するため、金型構造や成形条件を検討し、所望の形状を得る必要がある。本研究ではCFRTP-S45C 立体インサート成形品の寸法精度向上を目的とし、凹形状立体インサート成形品の金型設計と成形条件、冷却方法の検討を行った。冷却方法としてアルミ型を用いた徐冷方法を考案し、そりによる変形を抑制して寸法精度を向上する手法について知見を得た。

1 はじめに

近年、自動車・航空機産業やスポーツ用品等の幅広い分野で製品の軽量化が求められており、金属等の重量部材の一部をCFRPに置き換えて異種材と接合したマルチマテリアル製品の開発が盛んに行われている^{1)~4)}。また、サーキュラーエコノミーの観点から、リサイクル性や二次加工性を有する熱可塑性樹脂を母材に用いたCFRTP（Carbon Fiber Reinforced ThermoPlastics）の利用が期待されている。CFRP マルチマテリアル製品の接合工程では主に接着剤やリベットを用いた間接接合が採用されているが、消耗品のコストや作業者の安全性に課題があるため、消耗品が不要でコスト軽減が期待できる直接接合が注目されている。

当センターではCFRTPのマルチマテリアル化に向け、CFRTPのプレス成形や射出成形技術に関する知見を蓄積し、CFRTPと異種材料の超音波接合による直接接合技術を確立してきた^{5)~14)}。また、強化繊維が短炭素繊維、母材がナイロン6（PA6）のCFRTP（以降、CF/PA6）と炭素鋼（S45C）のインサート成形を行い、成形条件と接合強度の関係を明らかにした。

ここで、自動車・航空機部品のような立体形状のマルチマテリアル製品をインサート成形する場合、図1に示すような「そり」や「ひけ」等の成形不良が発生するため、金型構造や成形条件を検討し、所望の形状を得る必要がある。

そこで本研究ではCFRTP-S45C 立体インサート成形品の寸法精度の向上を目的とし、金型設計と成形条件、冷却方法の検討を行った。

2 金型設計

本研究で作製する立体インサート成形品（以降、A-モデル）を図2に示す。A-モデルはCFRTPと平板インサート材から成る凹形状構造体とした。成形品サイズは高さ20mm、幅40mm、長さ110mm、側壁厚み2mm、底面厚み6mmである。また、インサート材は14mm×100mm、厚み2mmの平板とした。A-モデル成形用金型を作製するため、インサート材固定機構の検討と流動解析によるゲート位置の検討を行った。

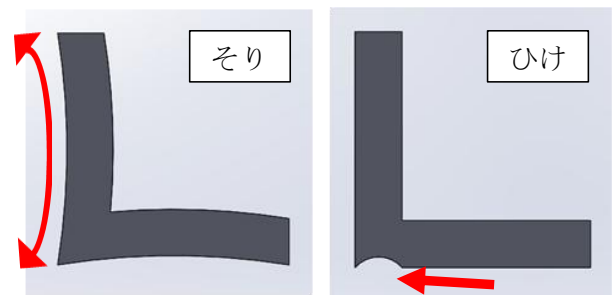


図1 プラスチック射出成形品の成形不良

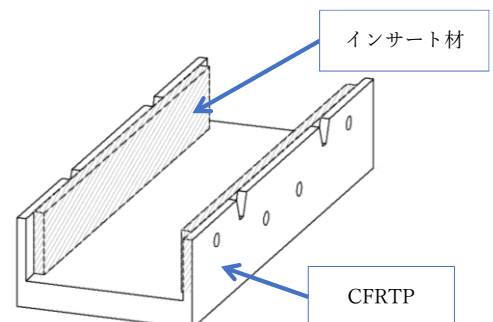


図2 A-モデル形状

* 次世代技術部

2.1 インサート材固定機構

立体形状のインサート成形品を作製する場合、インサート材の設置位置によってはインサート材の脱落防止のための専用機構を考案する必要がある。さらに A-モデルにおいては左右のインサート材が成形時に転倒した場合、樹脂がコア側に流入し成形不良となるため、インサート材をコア側に固定する必要がある。以上の検討を踏まえて考案したインサート材固定機構を図3に示す。成形前にインサート材を金型コア側底面にある2か所の突起で支持し、その後、金型閉過程でスライドコアにより側面4箇所をφ3mmの突き出しピンで固定する機構とした。

2.2 流動解析

A-モデル成形用金型における最適なゲート位置を検討するため、(a)ダイレクトゲート、(b)サイドゲートの2条件について流動解析を行った。それぞれの成形モデルを図4に示す。図中、濃灰色の領域がランナー・ゲート部であり、淡灰色の領域が成形品である。解析項目は変形量と繊維配向とした。

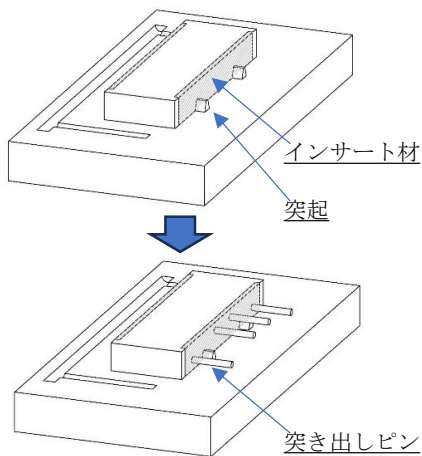


図3 インサート材固定機構

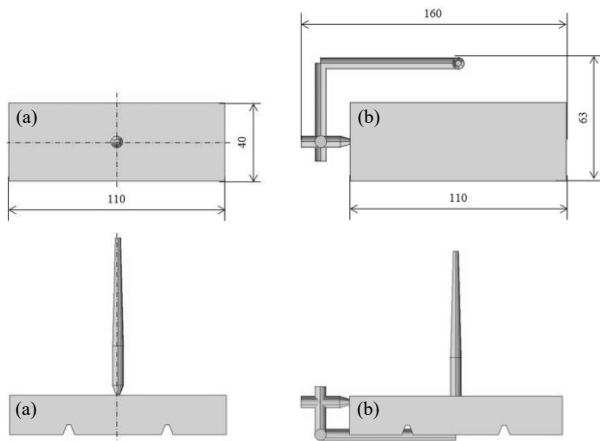


図4 A-モデルゲート位置概略図
((a)ダイレクトゲート、(b)サイドゲート)

ゲート位置(a)、(b)の変形量解析結果を図5(a)、(b)に示す。図5(a)の場合、そりによって壁面が内側に傾くと共に底面も長手方向に湾曲し、図中に丸で示した成形品両端開口部で最大の変位量が予測された。図5(b)の場合、壁面の傾きは発生するが底面の湾曲は抑制され、成形品開口部における変位量は(a)と比較して小さくなることが予測された。

ゲート位置(a)、(b)の繊維配向の解析結果を図6、図7に示す。成形品表面の線の方法が繊維配向を表し、線の明暗が配向率を表す。ここで配向率とはある領域に

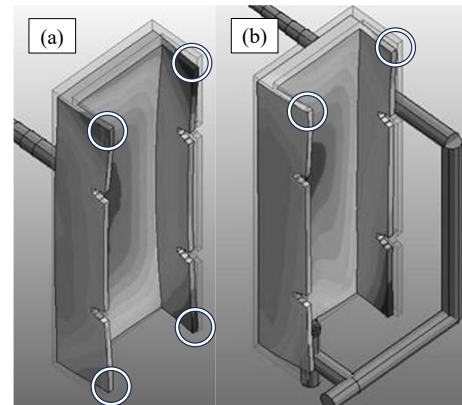


図5 変形量解析結果
((a)ダイレクトゲート、(b)サイドゲート)

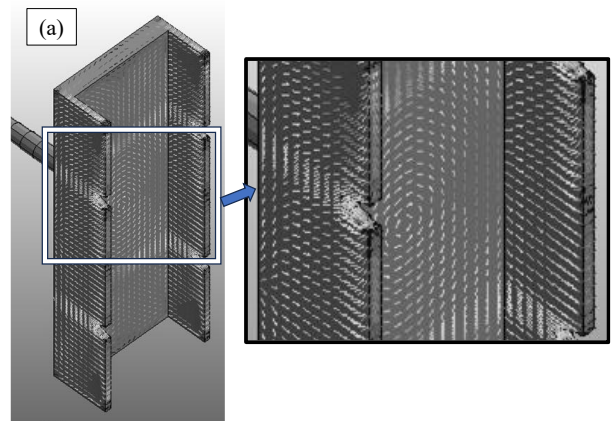


図6 (a)ダイレクトゲートの繊維配向解析結果

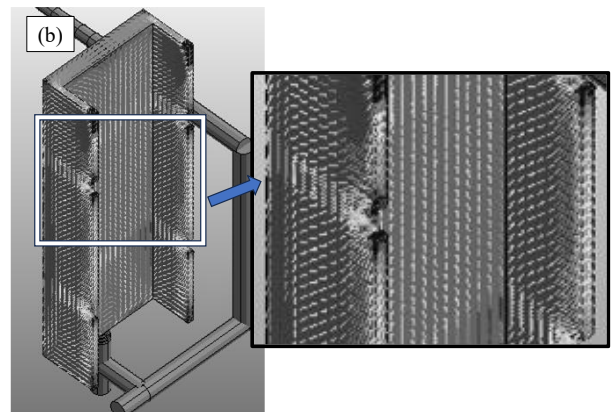


図7 (b)サイドゲートの繊維配向解析結果

いて繊維が一定の方向に配向する割合であり、線の色が濃いほど繊維が線の方向に引き揃う状態を表す。図6の場合、成形品中央部において繊維が放射状に配向し、配向率が低くなることが予測された。また、中央部側面の繊維が長手方向と直交する方向に配向するため長手方向の物性低下が予測され、成形後に変形しやすいと考えられる。図7の場合、ゲート側から繊維が長手方向に配向し、配向率が高くなることが予測された。そのため、長手方向の物性が(a)と比較して高く、変形を抑制できると考えられる。変形量と繊維配向の解析結果より、変形の抑制が可能な(b)サイドゲートを採用した。

また、2.1節で示したインサート材固定機構(突き出しピン)の箇所では樹脂の流動が阻害され、ウェルドラインが発生する可能性がある。ウェルドラインとは、樹脂の流路が合流することで形成される線状の融着不良部であり、当該箇所は破壊の起点になりやすい。このため、突き出しピンの位置に穴をあけたモデルについて流動解析を行い、ウェルドラインの形成に寄与するウェルド会合角を解析により確認した。解析結果から突き出しピンが流路上にある場合、ピン近傍の開口部側にウェルド会合角の発生が予測された。しかし、発生するウェルドラインが微小であるため、成形品の物性には影響がないと考えられる。

3 A-モデルの寸法精度向上に向けた検討

3.1 成形

2章の検討をもとに作製した金型を縦型射出成形機(株)ソディック製 TR75VRE)に設置し、CF/PA6ペレット(LANXESS製 Durethan TP737-201)を用いてA-モデルをインサート成形した。CF/PA6の繊維体積含有率は25%、融点は220℃である。また、インサート材としてレーザーカットしたS45Cを用いた。S45Cの接合面は接合強度向上のためサンドブラスト処理した。

成形条件は先行研究¹⁴⁾より金型温度100℃、インサート材温度100℃、成形温度280℃とした。また、良好な外観の成形品を得るため、充填速度0.5秒、保圧80MPa、保圧時間20s、冷却時間20s、充填量等を調整した。

3.2 成形品の形状測定および成形条件の検討

上記条件で成形したA-モデルの写真を図8に示す。

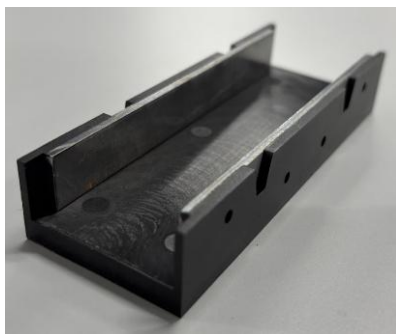


図8 A-モデル成形品

成形品の外観にひけやウェルドラインは確認されなかった。一方、そりによって壁面が内側に傾く変形が確認された。この変形量を測定するためゲート側開口部を光学顕微鏡により画像測定した。成形品開口部の画像測定結果を図9に示す。設計上、開口部内側の間隔は32mmであるが、画像測定の結果は29.7mmであり、両側壁面が内側に向かって片側1mm以上傾いていることが確認された。

そりは樹脂充填後の冷却過程において成形品表面と内部に温度差が生じ、樹脂が固化する際の収縮量に差が生じることで発生するため、冷却条件を工夫し、成形品表面と内部の温度差を小さくすることでそりを抑制できると考えた。そこでA-モデル壁面のそりを片側1mm以下に抑制することを目指し、冷却方法について検討した。

3.3 冷却方法の検討

成形品表面と内部の温度差を小さくし、そりを抑制するため、冷却条件を検討した。3.1節の条件でA-モデルを成形した場合、脱型時に表面が空気に触れて温度が下がる一方で、成形品内部は高温であるため、そりが発生すると考えられる。そのため成形品内部と表面の温度差が小さくなるまで、金型内で冷却した。金型内で冷却する時間を20sから60sに延長することで、開口部の間隔は29.8mmとなり、そりによる変形が抑制される傾向が見られた。

この結果から、冷却時間をさらに延長し、成形を行った。上記の冷却条件においては金型内で成形品を冷却したが、金型内に成形品を保持する時間が長い場合、成形時間が長くなることで生産性が低下し、脱型不良が発生する可能性も考えられた。そこで、図10に示す金型コア部と同形状のアルミ型を作製し、金型内冷却5s後に脱型した成形品を、200℃に加熱したアルミ型に設置し、恒温槽内で200℃から20℃まで6℃/minで冷却した。

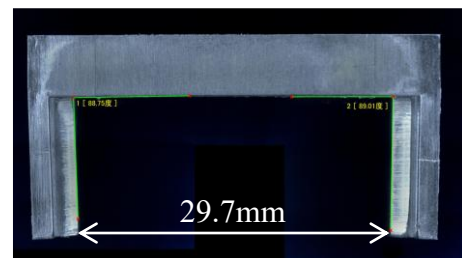


図9 A-モデル開口部画像測定結果
(金型内冷却20s)

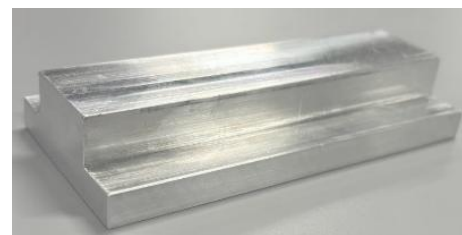


図10 アルミ型外観

アルミ型を使用して冷却した成形品開口部の画像測定結果を図 11 に示す。画像測定の結果から、開口部間隔は 30.6mm となり、変形量は片側 0.7mm まで低減した。この結果より、立体インサート成形における寸法精度の向上に対して、徐冷によるその抑制が有効であることが明らかになった。

4 まとめ

本研究ではCFRTP-S45C 立体インサート成形品の寸法精度向上を目的とし、A-モデル成形用金型の設計と成形条件、冷却方法について検討を行った。その結果、以下の成果を得た。

- (1) インサート材固定機構の設計とサイドゲートの採用により、変形抑制に有利な金型設計を確立した。
- (2) アルミ型を用いた徐冷により、開口部変形量を片側 0.7mm まで低減でき、徐冷が寸法精度の向上に有効であることが明らかになった。

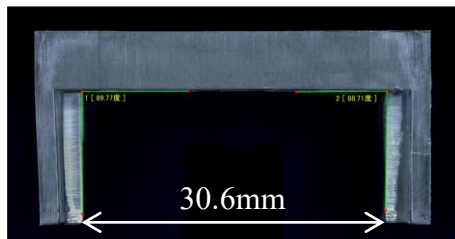


図 11 A-モデル開口部画像測定結果
(アルミ型冷却)

【謝 辞】

本研究の遂行にあたりご指導・ご助言をいただきました共同研究先の国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学工学部の仲井朝美教授に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 三瓶ら, レーザー加工学会誌, Vol.22, No.3, 2015
- 2) 永塚ら, 溶接学会全国大会講演概要集, No.95, pp54-55, 2014
- 3) 原賀・佐藤, 自動車軽量化のための接着接合入門, 日刊工業新聞社, 2015
- 4) 中田, 異種材料接合, pp95-120, 日経 BP 社, 2014
- 5) 道家ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4, pp45-48, 2016
- 6) 道家ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.5, pp44-47, 2017
- 7) 西垣ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp45-48, 2018
- 8) 西垣ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp43-46, 2019
- 9) 西垣ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.1, pp65-68, 2020
- 10) 西垣ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.2, pp71-74, 2021
- 11) 西垣ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.3, pp45-48, 2022
- 12) 西垣ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp35-38, 2023
- 13) 岩田ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp35-38, 2024
- 14) 岩田ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp37-40, 2025

現場生産性向上を図る高機能プラスチック製品の開発（第20報）

ーリサイクルプラスチックの物性向上技術の開発（5）ー

廣瀬威仁*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (XX)

ーDevelopment of technology for improving properties of recycled plastics (V)ー

HIROSE Takehito*

一般家庭から回収された容器包装リサイクルプラスチックは、複数の高分子成分が含まれるため、物性向上には含有材料の把握が重要となる。まず、含有される高分子材料を調べたところ、ポリプロピレン、ポリエチレン、ポリスチレンが主に含まれていることがわかった。次に、ゴム成分や相容化剤を添加したところ、引張応力は少し低下したが、破壊ひずみは未添加系に比べて約2倍となった。また、流動性が未添加に比べて40%近く減少することを明らかにした。

1 はじめに

近年、多くの分野でリサイクルが進められている。プラスチック分野におけるリサイクル手法は、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクルが挙げられる。それぞれ、廃プラスチックを成形材料として新しいプラスチック製品にする方法、化学的に分解してモノマーに戻す方法、熱エネルギーとして利用する方法である。

一般家庭から排出されるプラスチックとして、飲料用ボトル、容器包装材（食品の容器や容器が入っていた外装を指す）、ゴミ袋等が挙げられる。飲料用ボトルに使用されるポリエチレンテレフタレート（PET）は、各自治体で適切に回収され、ボトルや服などにリサイクルされている。一方で、容器包装材やゴミ袋は飲料用ボトルのように単一の材料ではなく、複数の高分子材料から構成されており、容器包装材はポリプロピレン（PP）、ポリスチレン（PS）、PET等、ゴミ袋はポリエチレン（PE）等が使用されている。これらは、回収、選別、粉碎、洗浄、金属類除去、熔融押出のプロセスを経る。また、洗浄工程では水を利用することにより、さらに選別を行い、水に浮くPP、PE、発泡PSが混在したペレットとなる。

このため、得たペレットには、複数の高分子が存在し、お互いに混ざらず（非相溶）、材料物性は単一材料に比べて非常に低い。非相溶系の高分子材料における物性向上技術として、分散粒子径（小さいほど、相容性が高い）の大小から相容性を経験式として明らかにしたWuの経験式が参考になる。Wuによれば、①粘度比、②せん断速度、③界面張力が分散相の粒子径を支配すると報告している¹⁾。今回のような複数成分が存在した高分子材料への適用を考えた場合、同一材料でも分子量や材料グレードが異なるため（つまり、高粘度から低粘度まで様

々）、界面張力を下げる手法が容器包装プラスチックにおいて物性向上を期待できる手法といえる。ここで、異種高分子（AとB）の界面張力を下げる手法として、AとBの両者に近い構造を持つ適切な材料（相容化剤）の選択と添加（配合）が重要となる。

既報²⁾では、力学物性の向上として一般容器包装リサイクルプラスチック（RP）の熱挙動と含有フィラーのEDX分析、RPの主な構成材料からモデル配合系を作製し、ゴム（軟質材料）の添加による力学物性向上の有効性を示した。

本研究では、既報において不明確だったRPの組成を特定、PP/PEモデル系においてはゴム添加の効果、RPにおいてはゴムおよび相容化剤配合の効果を明らかにする配合検討を行った。二軸混練機の高せん断力を利用したブレンド物の作製および評価を実施した。

2 実験

2.1 材料

RPには市場回収品の容器包装材から熔融混練を利用して製造された3種のペレットを使用した。その3種は①手選別にて製造されたペレット、②光学機器を用いて選別し製造されたペレット、③②の後、熔融混練下でフィルターメッシュを通して、異物を除去したペレットを用いた。PPは日本ポリプロ（株）製MA3、PEは日本ポリエチレン（株）製HJ360を使用した。エチレンープロピレンージエン共重合体（EPDM）はENEOSマテリアル（株）製EP57Cを使用した。各系における組成比は、バッチプロセスでは、樹脂／ゴム＝80vol％／20vol％にて固定し、連続プロセスでは樹脂／ゴム＝99vol％／1vol％、97vol％／3vol％、95vol％／5vol％の3条件とした。また、PP/PEモデル系では樹脂に占めるPPとPEがそれぞれ等しい体積比になるように調整した。炭酸カルシウムは、白石工業（株）製Brilliant-1500と白艶華CC-Rを使用し、配合量は、全体に対して20、40、60phrとした。RP系の相容化剤は、旭化成（株）製水添スチレン

* 化学部

系熱可塑性エラストマー（SEBS）タフテック H1041 を使用し、全体に対して、1phr 添加した。

2.2 試料の作製

2.2.1 バッチプロセス（密閉式混練機）

（株）東洋精機製作所製ラボプラストミル（4C150、ミキサータイプ R100H）を使用して作製した。始めに 200℃、10rpm に制御された混練機内にドライブレンドした所定量の樹脂を投入し、トルクが安定した後にゴムを投入し回転数を 100rpm に変更した。その後、炭酸カルシウムを添加し、十分にトルクが安定した後、試料を取り出した。

2.2.2 連続プロセス（二軸混練押出機）

（株）テクノベル製二軸混練押出機（ZRO15TW-GFI-LPT（同方向回転方式））を使用して作製した。所定の材料を事前にドライブレンドし、200℃、200rpm の条件で熔融混練を行った。その後、得られたペレットは、50℃、6 時間乾燥した。

2.2.3 物性評価シートの作製

バッチ式および連続式で得られたブレンド物は、アズワン（株）製熱盤プレス機（AH-2003C）を用いて加圧なし、200℃、1 分間の条件で軟化させ、続いて 10MPa、200℃、3 分間の条件で加圧成形をした後、樹脂を結晶化させるために水冷にて 200℃から 40℃まで降温し、シート状成形体（厚さ約 0.3mm）を得た。

2.3 評価

NMR 測定は日本電子（株）製高分解溶液核磁気共鳴装置（JNM-ECA600）を使用して、¹H-NMR 測定を行った。溶媒は、1,1,2,2-テトラクロロエタン-d₂ を使用し、測定温度は 130℃とした。

SEM 観察は日本電子（株）製集束イオンビーム走査型電子顕微鏡（FIB-SEM、JIB-4600F）を使用した。試料調製後、白金蒸着を行い、加速電圧は 5kV で観察した。

引張試験はインストロン社製万能材料試験機（5985 型）を使用した。試験片は、シート状成形体から JIS K 6251 の規定の 3 号ダンベル状試験片を打抜き作製した。試験条件は、23℃、引張速度 100mm/min、初期チャック間 60mm とし、試験片が破壊するまで試験を行った。得られた荷重-変位データより、引張応力（荷重/初期断面積）とひずみ（（クロスヘッド移動距離/初期チャック間）×100）を算出した。

メルトマスフローレート（MFR）の測定は（株）安田精機製作所製 120-FWP-W を使用した。試験温度は 230℃、予熱時間 300 秒、n=3 とした。なお、PE の測定温度は、190℃（JIS K 6922-1）であるが、全試験条件を揃えるために PE、PP、RP は 230℃にて測定を実施した。

熔融粘度の測定は、（株）東洋精機製作所製キャピラリーレオメーター PMD-C を使用した。測定温度は 200℃、ダイ長さ 10mm、ダイ径 1mm（L/D=10）、押出速度は 1,2,5,10,20,50,100,200,500（各 mm/min）とした。

表 1 ¹H NMR による RP の成分量

	PP (%)	PE (%)	PS (%)	PET (%)
手選別	49	40	11	—
機械選別	46	50	3	1

3 結果および考察

3.1 溶液 NMR による RP の組成分析

表 1 に NMR スペクトルの積分比から、それぞれのポリマーの成分比を算出した結果を示す。PS の成分比が手選別と機械選別では大きな差があり、機械選別のみ PET が存在した。機械選別では、手選別に比べて PS 量が少なくなっている。このデータを基に、RP の物性向上に有効な配合設計指針を検討し、PP と PE を占める割合が多い、機械選別の RP を今後の試験に使用することとした。

3.2 樹脂材料の力学特性と MFR

図 1 に各樹脂（PP、PE、RP（手選別、機械選別、機械選別（メッシュあり））の 5 種）の引張試験の結果を示す。RP と比較して、PP は高い引張応力、低破壊ひずみを示し、PE は低い引張応力、高破壊ひずみを示した。次に RP 間の比較では、引張応力に大きな変化はなかったが、破壊ひずみに差があった。図 2 に MFR 測定の結果を示す。RP（機械選別）は PP の約半分の値となった。これらは、高分子/高分子の相容性が低いこと、製品に適した材料設計のため多くの添加剤（無機フィラー、劣化防止剤等）が配合されていることが原因として推察される。

3.3 PP/PE/EPDM モデル系の炭酸カルシウム配合による力学物性

図 3 に使用した 2 種類の炭酸カルシウムの SEM 像を示す。CC-R および Brilliant-1500 とともに、数 10nm から 100nm の粒子を確認した。CC-R には、表面に脂肪酸が

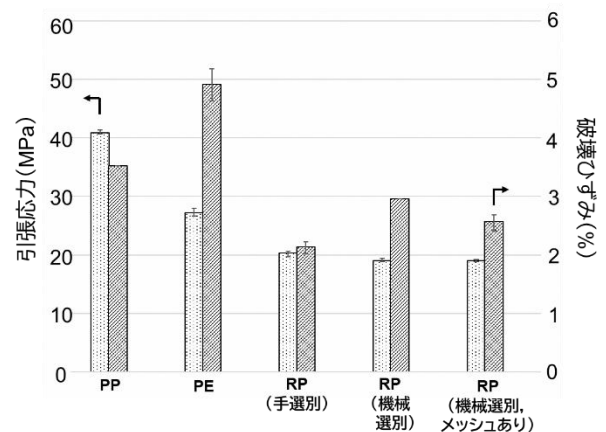


図 1 各種樹脂の引張試験結果

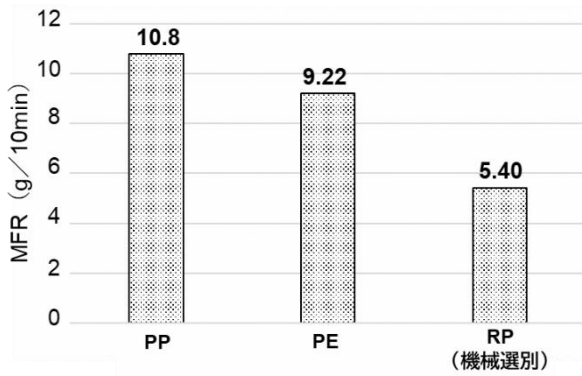


図2 各種樹脂のMFR値

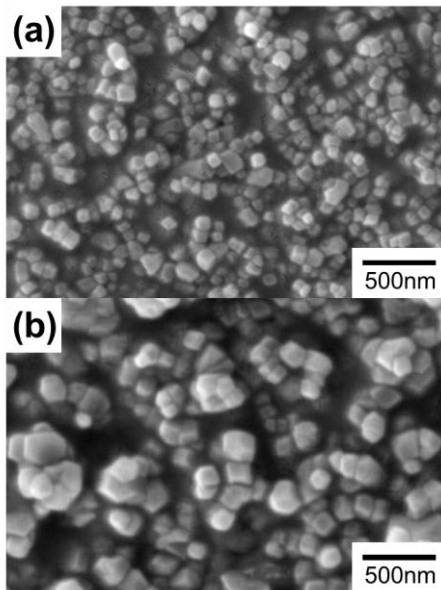
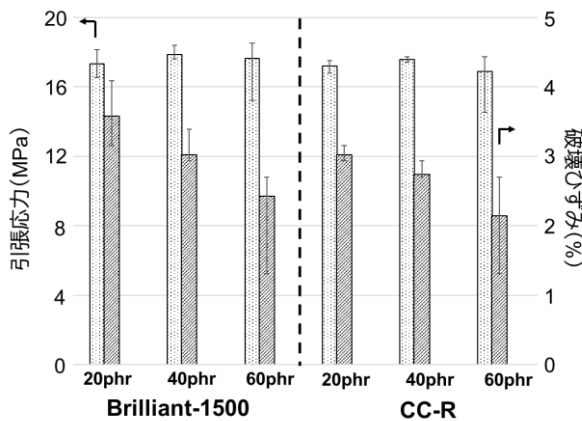
図3 炭酸カルシウムのSEM像
(a: CC-R、b: Brilliant-1500)

図4 炭酸カルシウム配合系の引張試験結果

処理されているが、SEM像からは脂肪酸の有無は確認出来なかった。既報²⁾のモデル配合系を使用し、炭酸カルシウム配合による物性値の変化を評価した。図4にPP/PE/EPDM=40vol%/40vol%/20vol%のモデル系に炭酸カルシウムを配合した系の引張試験の結果を示す。混練はバッチプロセスで行い、全ての配合系において、破壊引張応力は大きくは変わらなかったが、添加量が増え

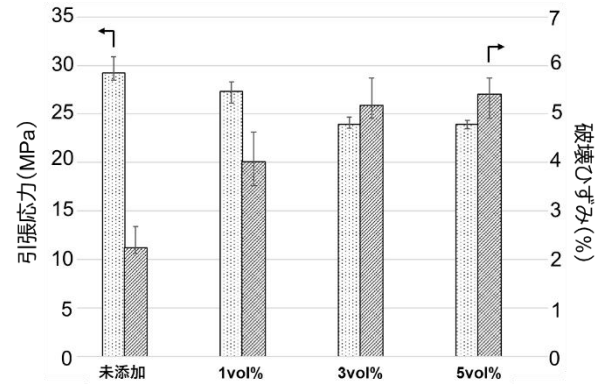


図5 PP/PE ブレンド配系の引張試験結果

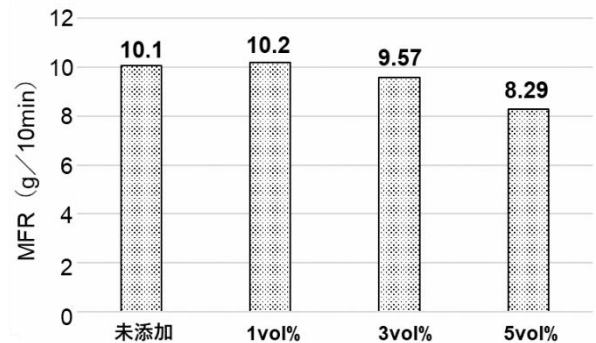


図6 PP/PE ブレンド系のMFR値

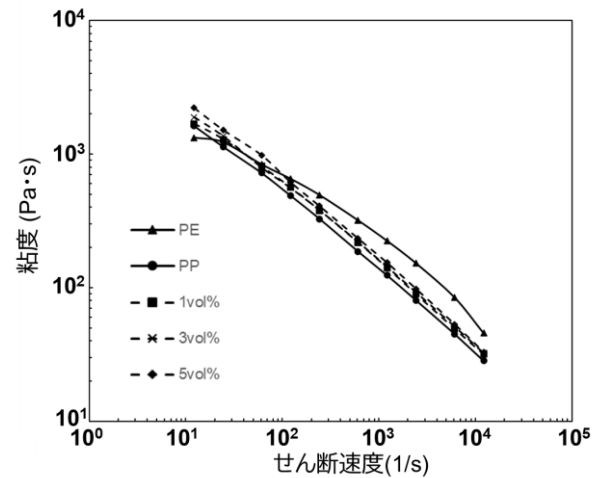


図7 PP/PE モデル系のせん断速度依存性

ることにより、破壊ひずみが大きく下がり、硬く脆くなることがわかった。

3.4 PP/PE モデル配合系の EPDM 添加による力学物性と流動性

図5に二軸混練機によって作製した試料の引張試験の結果を示す(図中の vol% は EPDM 添加量)。ゴムの少量添加 (1,3,5vol%) により、3.2 で報告した樹脂単独に比べて、PP 単独以上の破壊ひずみとなり、ゴム添加量の増加に伴い、破壊ひずみが増加する結果となった。図6にMFR測定による結果を示す。EPDM 未添加は、PP/PE のブレンド物のみを示す。ゴム添加により、MFR値が低くなる傾向となった。図7に射出成形を想定した

200℃での溶融粘度の結果を示す。MFR 値は、ゴム添加により低粘度を示したが、キャピラリーレオメーターによる射出成形のせん断速度領域では、新材 2 種 (PP、PE) の範囲内を示した。

3.5 RP におけるゴム、相容化剤配合による力学物性と流動性

図 8 に二軸混練機を用いて作製した RP/ゴムブレンド系の引張試験の結果を示す。3.1 の報告により、RP (機械選別) 中には PS が含まれていることから、SEBS はスチレン/オレフィン (PP、PE) の界面相容性向上、

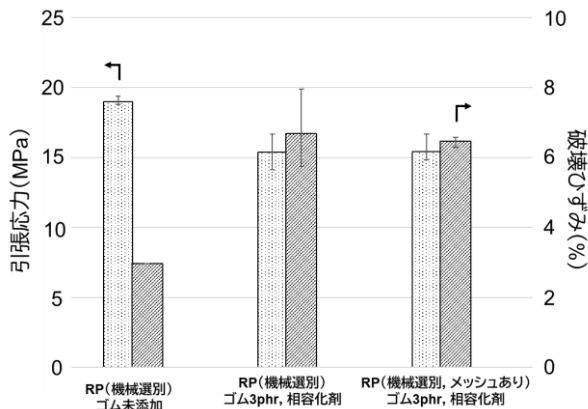


図 8 RP/ゴムブレンド系の引張試験結果

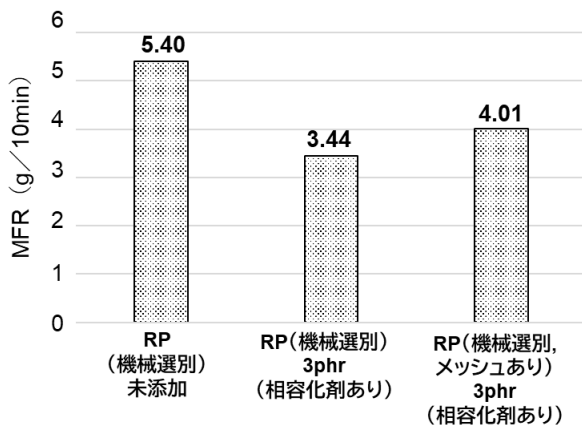


図 9 RP/ゴムブレンド系の MFR 値

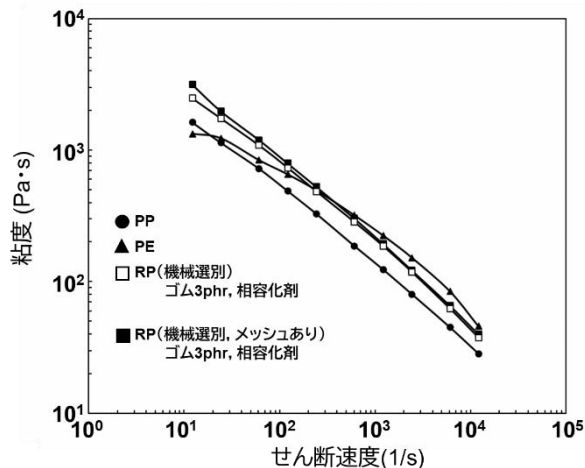


図 10 RP/ゴムブレンド系のせん断速度依存性

ゴム (EPDM) は RP 中の PP/PE の界面相容性向上を期待した。また、ゴム添加量は少量で物性向上が期待できることから、RP 全体に対して 3phr とした。その結果、RP と各種ゴム添加系を比較すると、ゴム添加によって、引張応力は低下したが、破壊ひずみは約 2 倍となった。メッシュの有無においては、破壊引張応力と破壊ひずみ共に大きな違いは無かった。図 9 に MFR 測定の結果を示す。RP/ゴムブレンド系は、MFR 値は低く、ゴム、相容化剤配合により流れにくい材料となった。図 10 に 200℃でのキャピラリーレオメーターの結果を示す。3.4 と同様に低せん断領域では高粘度であるが、高せん断領域では新材 2 種 (PP、PE) の範囲内となった。

4 まとめ

本研究では、力学物性と流動性に着目した。PP/PE のモデル配合系、RP/ゴムブレンド系について、以下の知見を得た。

- 1) RP の成分と組成比は選別法によって異なり、手選別では分別されなかった PS も機械選別を行うことにより選別されることがわかった。
- 2) RP の引張応力、破壊ひずみは、PP、PE 単独より低い。RP (機械選別) は、RP (手選別) に比べて破壊ひずみが大きい、引張応力に大きな差はない。
- 3) PP/PE ブレンド系では、少量 (1 から 3vol%) のゴム添加で破壊ひずみが向上し、少量のゴム添加が系の力学物性向上に有効であることを明らかにした。
- 4) RP/ゴムブレンド系では、少量のゴム添加によって破壊ひずみが向上した。しかし、低 MFR となるが、射出成形領域では、粘度は新材 2 種 (PP、PE) の間となった。

【謝 辞】

材料を提供していただきました (株) タイボー様、白石工業 (株) 様に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) S. Wu, Polymer Engineering and Science 27, pp335-343, 1987
- 2) 廣瀬, 岐阜県産業技術総合センター研究報告書 No.6, pp41-44, 2025

樹脂材料への無機コーティングに関する研究（第1報）

－高放熱性樹脂材料の開発（1）－

篠田安弘*

Study of inorganic material coating on resin materials (I)

- Development of high thermal conductivity resin materials (I) -

SHINODA Yasuhiro*

エポキシ樹脂と高熱伝導ベーマイトを複合化させた材料を開発することを目的に、二つの手法を検討した。一つ目のベーマイトを加圧成形後に樹脂を含浸させる手法では、形状を保持できる強度になるまで圧縮すると表面に隙間が少なくなり樹脂の含浸が困難であることが分かった。樹脂にベーマイトを練りこんで硬化させる二つ目の手法では、ベーマイトの割合が 75wt%の試料で熱伝導率が 1.33 W/(m・K)まで向上できたが、混練した時点で固くなってしまったため、今後はベーマイトの割合を減らしながら同程度の熱伝導率を目指す。

1 はじめに

一般的に、樹脂材料は安価、軽量で、加工しやすく、絶縁性であるため、様々な場所で使用されているが、パワーエレクトロニクス材料として使用するには熱伝導率が低く、高熱伝導性の無機フィラーの添加が有効と考えられ、多くの研究が行われている¹⁾²⁾。

このような中、アルミナ並みの熱伝導率を持つ高熱伝導ベーマイトは、六方晶窒化ホウ素(h-BN)より安価でアルミナより加工性が高いため、注目されている。

本研究では、高放熱性樹脂材料の開発を目的とし、二つの手法によりエポキシ樹脂と高熱伝導ベーマイトの複合化を試みた。一つ目の手法は、高熱伝導ベーマイトを加圧成形することでベーマイト粒子同士の接触機会を増やし強固な熱伝導パスを形成した後に、ベーマイトの隙間にエポキシ樹脂を含浸させる方法であり、本年度は樹脂を含浸させる前の加圧成形体の作製について報告する。二つ目の手法は、エポキシ樹脂に高熱伝導ベーマイトを混練してから硬化させる方法であり、本年度は高熱伝導ベーマイトと二液硬化型エポキシ樹脂の複合化を試みた。

2 実験

2.1 高熱伝導ベーマイトの加圧成形体の作製

高熱伝導ベーマイト（立方体形状、平均粒径 3 μm）約 0.3 g を内径 10 mm の金属筒に入れ、錠剤成型圧縮機（前川試験機製作所製「BRE-33」）を用いて円盤状の加圧成形体（成形圧力：3、4、5、8、10 MPa）を作製した。

2.2 樹脂と高熱伝導ベーマイトの複合体の作製

二液硬化型エポキシ樹脂（ストルアス社製 EpoFix）の主剤と硬化剤を自転公転ミキサー（シンキー社製あわとり練太郎「ARE-500」）で混練（回転速度 1000 rpm）し、硬化する前に高熱伝導ベーマイトを重量比が 25wt%、50wt%、75wt%となるよう加えた後、再度ミキサーで混

練した。樹脂のみのものと再混練したものを2時間ほど減圧環境下に置くことで脱泡を促し、その後室温・常圧で一晩硬化させた。（ベーマイトの重量比を用いて減圧脱泡 0A、25A、50A、75A とする）

また、ベーマイトと樹脂を混練する際、自転公転ミキサーで回転速度 2000 rpm の脱泡処理を追加で行い、室温常圧下で硬化させた試料を別に作製した。（常圧回転脱泡 25B、50B、75B とする）

2.3 評価

高熱伝導ベーマイトの加圧成形体について、レーザーフラッシュ法で熱伝導率を測定（NETZSCH 社製熱伝導率測定装置「LFA447 NanoFlash」）した。また、表面の電子顕微鏡観察（エリオニクス社製三次元粗さ解析電子顕微鏡「ERA-600G」）を行った。

樹脂と高熱伝導ベーマイトの複合体について、X 線 CT スキャン（東芝 IT コントロールシステム社製マイクロ X 線 CT「TOSCANER-32300μFD」）、乾式密度測定（マイクロメリティックス社製乾式密度計「アキュピク II 1340」）、及び熱伝導率測定を行った。熱伝導率の測定では、なるべく気泡が少ない部分を厚み 1.5 mm 程度に削り出したものを使用した。

3 結果及び考察

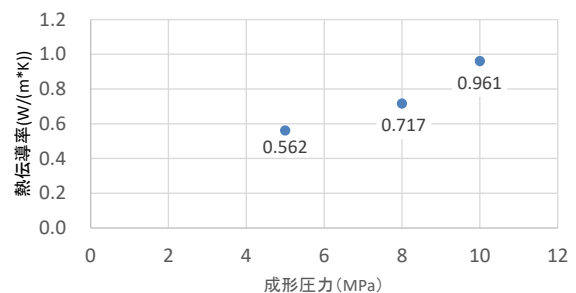


図1 加圧成形体の熱伝導率

* 化学部

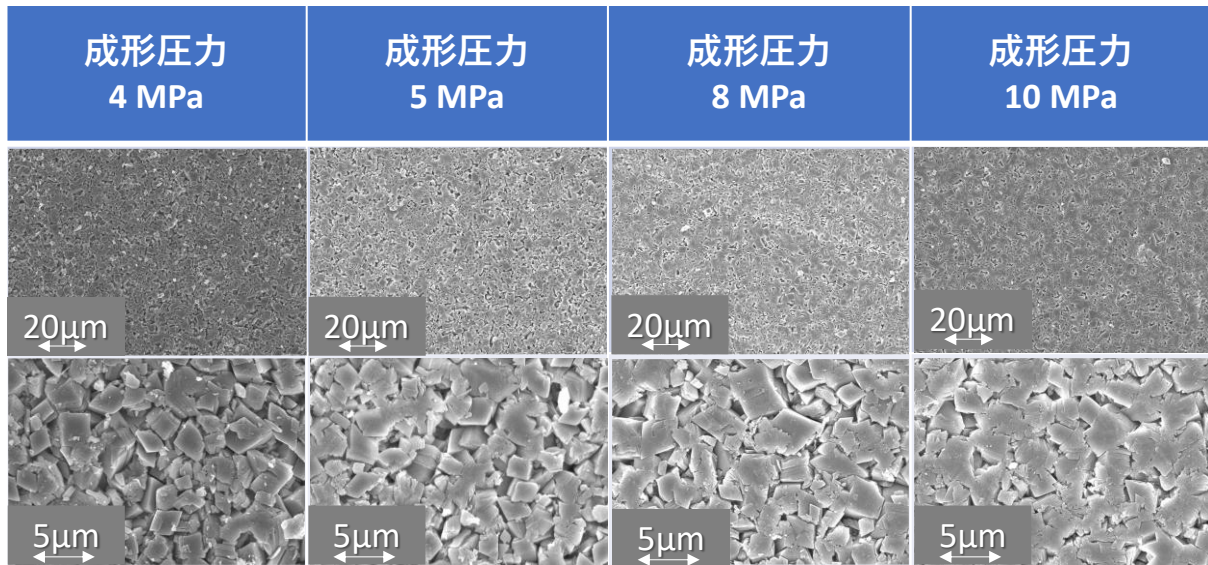


図2 ベーマイト加圧成形体の表面の電子顕微鏡像

3.1 高熱伝導ベーマイトの加圧成形体

作製した成形体のうち、成形圧力が4 MPa以下の試料は容易に角が欠けた。このため、触って崩れない強度を持つ成形圧力5 MPa以上試料についてのみ熱伝導率を測定することができた。図1に5、8、10 MPaで加圧して作製した成形体の熱伝導率測定結果を示す。成形圧力が高まるにつれて熱伝導率は向上している。これは、成形圧力を上げるとベーマイト間の空隙が減り、粒子同士の接触面積が増えたためと考えられる。

次いで、図2に加圧成形体の表面を観察した結果を示す。高圧成形体ほど表面の隙間が減少していることが確認できた。手で触って欠けやすい4 MPa成形体ではベーマイトが元の立方体状の形状を維持しているが、成形圧力が高圧になるに従い潰れて原形をなくし、強固な成形体となっていることを確認した。5 MPa以上では表面に隙間が少なく、加圧成形体にそのまま樹脂を含浸させることは困難と考えられた。一方で、5 MPaの成形体は見かけの体積と重量から求めた密度とベーマイト粒子の密度から計算すると30%程度の空隙を持ち、内部には樹脂が入る空間は存在すると思われる。今後、ベーマイトに表面修飾等を行い、エポキシ樹脂との親和性を上げることで樹脂の含浸を促進させる試みを行う予定である。

3.2 樹脂と高熱伝導ベーマイトの複合体

50wt%まではベーマイト未添加の樹脂と同程度の流動性があったため硬化用の容器に移して硬化させたが、75Aは図3に示すように自転公転ミキサーで混練した直後でも粘土状であったため混練用の容器に入れたまま硬化させた。

また、樹脂だけを減圧脱泡して硬化させた試料0Aには目視で確認できる気泡はなかったが、ベーマイトと樹脂を混練した25A、50A、75Aは泡が残ったまま硬化し



図3 硬化前の75A

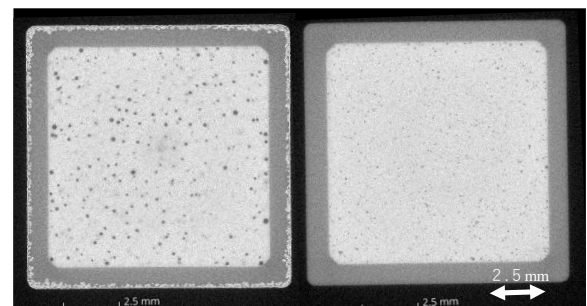


図4 25A (左) と25B (右) のCTスキャン

た。このため、自転公転ミキサーの脱泡機能を使用して常圧回転脱泡25B、50B、75Bを作製した。75Bは75Aと同様に粘土状になったため混練用の容器に入れたまま硬化させた。

図4にベーマイトを25wt%混練して内寸10 mm角×高さ40 mmのポリスチレン製容器に注入して硬化させた樹脂のCTスキャン結果を示す。減圧脱泡した25Aは100~400ミクロン程度の気泡が多数残っていたが、常圧回転脱泡した25Bは25Aに比べて気泡が明らかに減少していた。樹脂のみ(0A)の場合は減圧脱泡で気泡

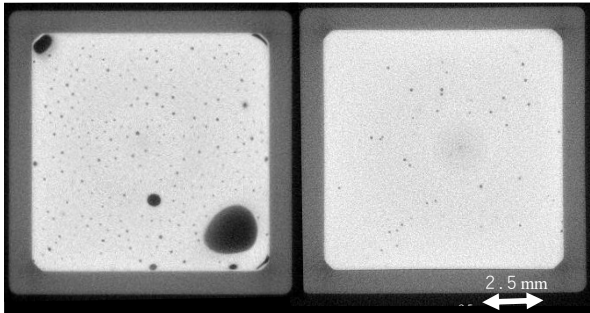


図5 50A (左) と 50B (右) の CT スキャン

表1 エポキシ樹脂とベーマイトの複合体の密度

ベーマイト割合 (wt%)	A グループ (g/cm ³)	B グループ (g/cm ³)
0	1.15	—
25	1.30	1.34
50	1.62	1.65
75	2.07	2.07

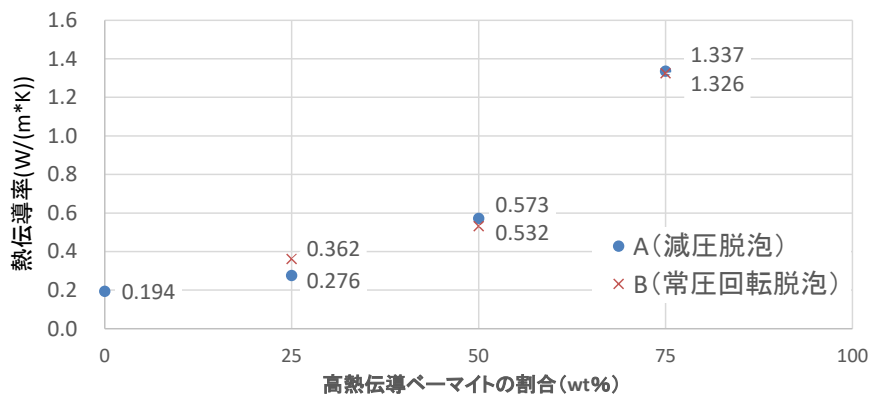


図6 エポキシ樹脂とベーマイトの複合体の熱伝導率

が無くなることから、ベーマイトを混ぜることで粘性が上がり、気泡が抜けにくくなったと推定される。図5に示す50Aと50Bにも同様の傾向がみられ、「25Aよりも25Bの方が高密度であり、50Aよりも50Bの方が高密度」という表1に示す乾式密度測定結果とも一致している。75Aと75BはCTスキャン像で大きな差を確認できず、密度もほぼ同じ値となった。

次いで、図6にエポキシ樹脂とベーマイトとの複合割合と熱伝導率の相関グラフを示す。ベーマイトの割合と熱伝導率には正の相関があり、75wt%では熱伝導率が1.33 W/(m·K)まで向上した。この値は市販の高熱伝導接着剤や他の高熱伝導樹脂の熱伝導率に近いが、75A・75Bの試料は樹脂にベーマイトを練り込んだ段階で固くなってしまったため実用的とは言えない。今後はベーマイトの割合を減らしながら同程度の熱伝導率を目指す。

最後に空隙（気泡）の有無について考察する。目視で気泡を確認できなかった0Aにヘリウムガス（乾式密度測定に使用）が入らない独立孔は存在しないと仮定し、その測定値（1.15 g/cm³）をエポキシ樹脂の密度として取り扱うものとする。この値とベーマイトの乾式密度測定値（3.04 g/cm³）からベーマイトが25wt%、50wt%、75wt%のとき複合体の理論密度は1.36 g/cm³、1.67 g/cm³、2.16 g/cm³と計算される。これらの値から空隙量を見積もると複合体中に空隙は1～5%残っていると推定される。この空隙によりどの程度熱伝導率が低下したかは不明で

あるが、混練/脱泡の条件を変えることで空隙を減らし、熱伝導率を向上させることは可能と考えられる。

4 まとめ

本研究では、エポキシ樹脂と高熱伝導ベーマイトを複合化した材料を開発することを目的に、二つの手法を検討した。一つ目のベーマイトを加圧成形した後に樹脂を含浸させる手法では、形状を維持できる強度になるまで圧縮すると表面に隙間が少なくなり樹脂の含浸が困難であることが分かった。今後は表面修飾等によりベーマイトと樹脂の親和性向上を試みる。

樹脂にベーマイトを練りこんで硬化させる二つ目の手法では、ベーマイトの割合が75wt%の試料で熱伝導率が1.33 W/(m·K)まで向上できた。しかしながら混練段階で固くなり実用的とは言えない。今後はベーマイトの割合を減らしつつ熱伝導率を維持、もしくは向上させることを試みる。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、試料を提供いただきました河合石灰工業株式会社に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 岡田ら, 科学と工業 第96巻, pp275-285, 2022
- 三村, マテリアルステージ Vol.25, pp58-62, 2026

表面処理による無機フィラーの高機能化に関する研究（第1報）

池川祥平*

Research on the functionality of an inorganic filler via surface modification (I)

IKEGAWA Shohei*

パワーエレクトロニクス製品において、高い熱伝導性と絶縁性を有する窒化ホウ素は、基板等で用いられる樹脂に複合化させる無機フィラーとして近年注目を集めているが、樹脂との親和性が低いことが問題として挙げられる。そこで、本研究では窒化ホウ素に表面修飾剤を共有結合させ、樹脂との親和性の向上などの高機能化を目指す。本年度は、複合化する予定であるエポキシ樹脂と親和性が高いことが期待できる表面修飾剤の設計および合成を行った。合成した表面修飾剤は側鎖にグリシジル基、ベンジル基、トリメトキシシリル基を有するポリメタクリレートであり、シランカップリング剤として機能する。さらに検証実験として、シリコンウエハを用いた表面修飾を実施した。その結果、表面の撥水性が確認され、合成した修飾剤によるシリコンウエハの表面修飾が可能であることが示唆された。

1 はじめに

パワーエレクトロニクス製品の高性能化およびコンパクト化に伴い、デバイス内部の放熱対策は極めて重要な課題となっている。IC回路から発生する熱を効率的に排出する高熱伝導性材料が求められているが、基板等で用いられる樹脂材料は熱伝導性が低いため、放熱性フィラーの複合化による熱伝導性の付与が一般的である。中でも、高い熱伝導性と絶縁性を有する窒化ホウ素は、放熱フィラーとして注目されている。

窒化ホウ素を樹脂へ高充填するには良好な親和性が不可欠であるが、窒化ホウ素表面には水酸基やアミノ基等の官能基が少なく樹脂との界面結合力が弱いことが課題である。解決策として、樹脂と親和性が高い有機化合物を共有結合させる表面修飾法が挙げられるが、先述したように窒化ホウ素の表面には反応の起点となる官能基が少なく、有効な表面修飾法は未だ確立されていない。

本研究では、樹脂と親和性がある表面修飾剤を開発し、その修飾剤で表面修飾した窒化ホウ素を樹脂に添加することにより、樹脂に高熱伝導性を付与することを目指す。今年度は複合化する予定のエポキシ樹脂に対し高い親和性が期待される表面修飾剤の合成を行った。本修飾剤は側鎖にグリシジル基、ベンジル基、トリメトキシシリル基を有するポリメタクリレートであり、シランカップリング剤として機能する。さらに、本修飾剤の反応性を検証するために、シランカップリング剤との反応性に富むシリコンウエハを用いた表面修飾試験を実施した。

2 実験

2.1 試薬等

メタクリル酸ベンジル（東京化成工業（株））、メタ

クリル酸グリシジル（東京化成工業（株））、メタクリル酸3-（トリメトキシシリル）プロピル（東京化成工業（株））は、重合禁止剤/安定剤除去剤（Sigma-Aldrich）を詰めたカラムで精製してから使用した。アゾビスイソブチロニトリル（AIBN）（富士フイルム和光（株））は精製せずそのまま使用した。反応溶媒にはトルエン（超脱水、富士フイルム和光（株））を使用した。再沈殿で用いた溶媒はヘキサン（富士フイルム和光（株））を使用した。¹H NMR測定用溶媒は0.05% TMS含有クロロホルム-*d*（富士フイルム和光（株））を使用し、GPCの移動相はテトラヒドロフラン（THF）（富士フイルム和光（株）、安定剤含有）を使用した。GPCの濾過に使用したフィルターはMillex-LH（孔径：0.45 μm、メルク（株））を使用した。表面修飾に使用した基板はシリコンウエハ6インチP型（100）（（株）グローバルトップケミカル）を用いた。基板の洗浄に用いた溶媒はアセトン（富士フイルム和光（株））を使用した。

2.2 高分子の合成および分析

2.2.1 合成

Yuchin Hsu らが報告した方法¹⁾を参考にし、図1に示

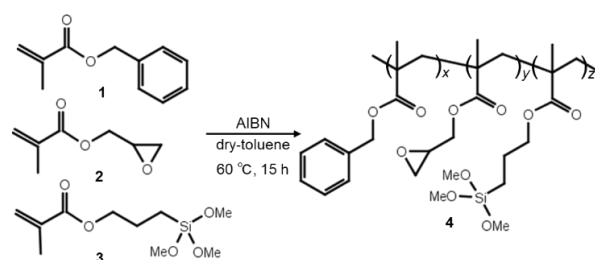


図1 化合物4の合成スキーム

*化学部

した合成スキームで化合物 **4** の合成を行った。窒素雰囲気下、耐圧チューブにメタクリル酸ベンジル **1** (1.78 g、10.1 mmol)、メタクリル酸グリシジル **2** (0.0798 g、0.56 mmol)、メタクリル酸 3-(トリメトキシシリル)プロピル **3** (0.139 g、0.56 mmol)、AIBN (9.2 mg、0.056 mmol)、およびトルエン (9.19 mL) を加え、60 °C で攪拌した。15 時間後、反応溶液を同量のトルエンで希釈し、250 mL のヘキサン中に滴下して再沈殿を行った。得られた沈殿を吸引ろ過し、ヘキサンで数回洗浄した後、室温で減圧乾燥することで、生成物 (白色固体、0.830 g) を収率 41.5% で得た。

2.2.2 ¹H NMR 測定

得られた生成物をクロロホルム-*d* に溶かし溶液 NMR 装置 (Bruker Avance 400、ブルカー社製) を用いて ¹H NMR (400 MHz) を測定した。

2.2.3 GPC 測定

各標準物質が 1 g/L となるように THF で溶解した混合標準液および生成物の 1 g/L THF 溶液を調製した。これらを Millex-LH で濾過し、得られた濾液について表 1 の条件で GPC 測定を行った。

2.3 シリコンウエハへの表面修飾および評価

始めに UV/O₃ 洗浄改質装置 (SKB401Y、サンエナジー (株) 製) を用いてシリコンウエハを洗浄した。次いで、生成物の 5% アセトン溶液を調製しこれを綿棒でシリコンウエハに塗布した後、100 °C で 30 分間加熱処理をした。放冷後、アセトンで洗浄し、パスツールピペットを用いて超純水を 1 滴滴下してその撥水性を目視で評価した。

表 1 GPC 測定条件

項目	型式もしくは設定値
装置	ポンプユニット : LC-10ADvp
	RI 検出器 : RID-10A
	カラムオーブン : CTO-10Avp
	コントローラー : SCL-10Avp
溶媒分離カラム	KF-800D
	8.0×100 mm (10 μm) (株) レゾナック
カラム	KF-805L
	8.0×300 mm (10 μm) (株) レゾナック
移動相	THF
流量	1 mL/min
オーブン温度	40 °C
注入量	20 μL
サンプル濃度	1 g/L
キャリブレーションに用いる標準 (ポリスチレン)	STANDARD SM-105 (株) レゾナック

3 結果および考察

3.1 生成物の評価

図 2 に示した ¹H NMR の結果より、原料のメタクリレート の二重結合 (ビニル基) に由来するピーク (約 δ 5 ~ 6 ppm) が検出されず、重合反応が進行したこと、なら

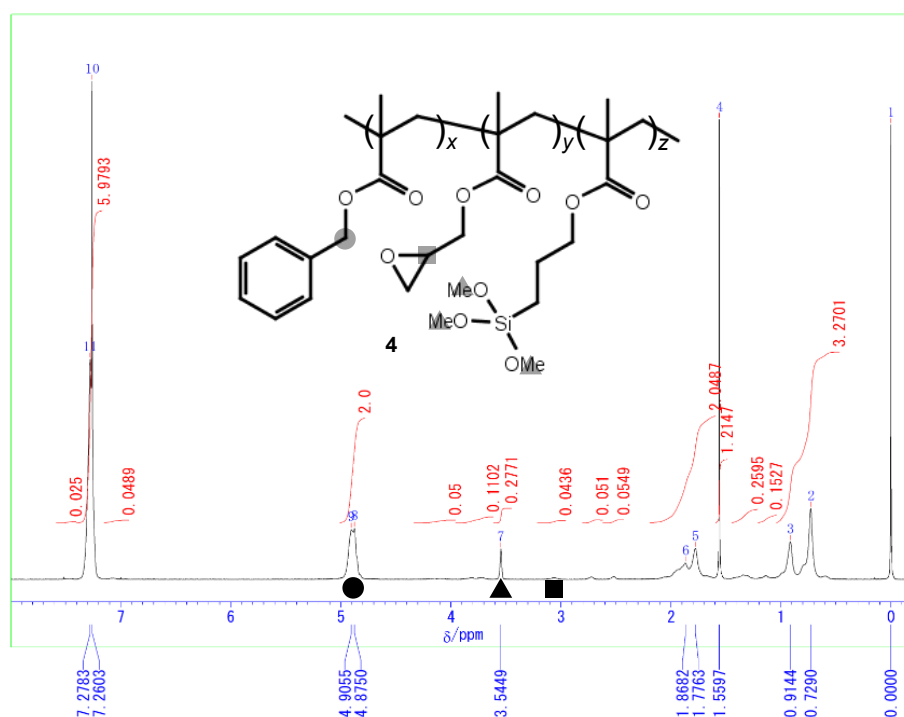


図 2 ¹H NMR チャート

びに、精製操作により原料が除去されていることを確認した。生成物における各モノマーの組成比を、図2に示した各ピークの積分比に基づき算出したところ(表2)、モノマー2および3について仕込み比と比較して組成比は低いことがわかった。

表2 生成物のモノマー組成比

モノマー	仕込み比 (%)	組成比 (%)
1 (x)	90	93.1
2 (y)	5	4.1
3 (z)	5	2.9

GPC 測定(ポリスチレン換算)では、単一のピークが得られ、重量平均分子量は(M_w) 130252、分子量分布(M_w/M_n)は1.92であった(表3)。

表3 GPC 結果

検出方法	
RI	
数平均分子量(M_n)	67991
重量平均分子量(M_w)	130252
分子量分布(M_w/M_n)	1.92

以上より、分子量1万以上の単一のピークが得られ、 ^1H NMR でモノマー由来のピークが確認できなかったことから、化合物4の合成が確認できた。

3.2 シリコンウエハへの表面修飾および評価

図3に撥水性評価試験の写真画像を示す。表面修飾前のウエハでは滴下された超純水がシリコンウエハの表面全体に広がったのに対し、表面修飾後のシリコンウエハでは超純水をはじく様子(撥水性の発現)が確認された。この結果から、シリコンウエハが化合物4により表面修飾されたことが示唆された。

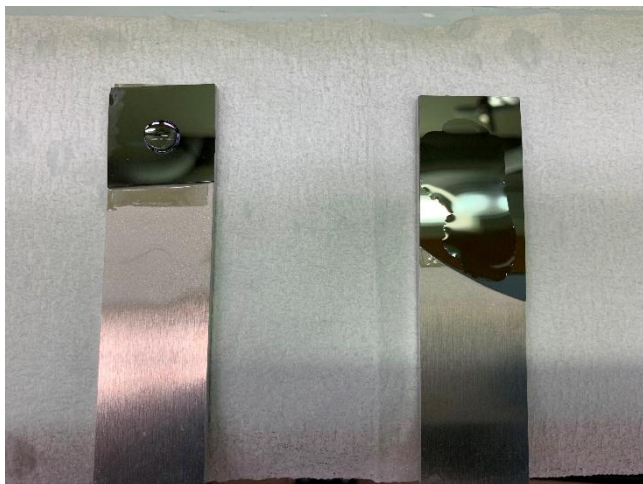


図3 表面修飾の有無による撥水性評価試験

左：表面修飾したシリコンウエハ

右：表面修飾する前のシリコンウエハ

4 まとめ

エポキシ樹脂との親和性を高める表面修飾剤として、グリシジル基およびベンジル基を有する化合物4を設計し、合成することができた。シリコンウエハを用いた検証実験では、化合物4で修飾したシリコンウエハ表面の撥水性が確認され、表面修飾が可能であることが示唆された。今回の知見を活かし、当センターで窒化ホウ素の表面修飾剤の合成を進めていく予定である。なお、先述したとおり窒化ホウ素の表面には反応の起点となる官能基が少ないため、窒化ホウ素への官能基の導入も併せて検討する必要がある。

【謝 辞】

本研究は国立研究開発法人産業技術総合研究所が主催する令和7年度地域産業活性化人材交流事業で実施した研究内容を一部抜粋した内容である。本研究の遂行にあたり、ご尽力いただきました材料基板研究部門 首席研究員の秋山陽久様をはじめ、接着・界面研究グループの皆様深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) Yuchin Hsu *et al.*, *Polymer Journal*, **50**, pp355-363, 2018

繊維・紙

繊維端材のリサイクルによる資源循環型部材開発に関する研究（第3報）

一端材を原料とした吸音材の開発（2）

中島孝康*、立川英治*

Development of resource-recycling materials through recycling fiber scraps (III)

- Development of sound absorbing materials using fiber scraps (II) -

NAKASHIMA Takayasu* and TACHIKAWA Eiji*

不織布の構成繊維同士が熱で融着されてボード状になっている製品の端材について、リサイクル手法を検討した。バージン繊維層の間に端材粉砕片を挟んだ構造のニードルパンチ不織布を試作し、繊維のみの不織布と吸音性を比較した。端材を挟んだ構造では繊維のみの不織布と比較して、加熱処理なしの場合には「端材を挟んで目付が増えると吸音性が向上」、「同じ厚さ、目付の条件では同等の吸音性」という結果になった。加熱処理を施した場合は、加熱処理なしの場合に比べて相対的に吸音性が低下した。

1 はじめに

繊維業界においても SDGs の重要性が広く認識されるようになり、その一環で、工程で発生する端材の活用に関する相談が当所に寄せられるようになった。繊維製品のリサイクル手法としては、以前から反毛が知られている。生地を解きほぐして単繊維同士をばらばらにする方法で、糸や不織布などに再利用されるが、繊維同士が熱などで強く融着している場合は適用が困難である。そこで、繊維同士が熱で融着したボード状製品のリサイクル手法を検討することとし、これまで、分解片をバージン繊維層（以後「繊維層」）に挟む方式（以後「サンドウィッチ構造」）の不織布について検討してきた。昨年度までは、カード処理後の繊維ウェブを利用してニードルパンチせずに加熱・成形する方式で、肉厚（20 mm 前後）で嵩高な不織布の検討を行ってきた¹⁾。これに対し本年度は、ニードルパンチにより薄く嵩密度が高めの不織布を作製した場合について検討した。

2 実験

2.1 ニードルパンチ不織布の試作

図1のように「端材サンドウィッチ構造不織布」2種と、比較のために「繊維のみの不織布」3種を試作した。端材層には、ボード状製品（厚さ3 mm、目付700 g/m²程度）の端材を粉砕機（株式会社ホーライ製 UGO₃-280）により排出スクリーン径4 mmの条件で粉砕したものを使用した。繊維層の構成は、昨年度に嵩高な不織布を検討した時と同様、ポリエステル繊維で「繊維長51 mm」を80%、バインダー繊維として「繊維長4.4 dtex、繊維長51 mm」（芯鞘型・鞘部軟化温度110℃）を20%とした。まず繊維層1層分について、前述の繊維2種を所定割合になるよう秤量してローラーカード機（大和機工株式会社製）によりウェブを作製した。その

後ニードルパンチ機（大和機工株式会社製）により、ニードルパンチを1回実施した。さらに図1に示したように、それら1回パンチ後の繊維層を所定枚数、または端材粉砕片を所定重量積層した後、2回目のニードルパンチを行った。繊維1層分の目付は、2回目のニードルパンチ後で目付が約140 g/m²となるようにした。端材はパンチ後に全体のおよそ30%になることを想定し、積層時に、「繊維2層+端材」については140 g/m²（パンチ後繊維層1層分）、「繊維4層+端材」については280 g/m²（パンチ後繊維層2層分）となるよう散布した。ニードルパンチ後はパンチにより不織布の面積が広がるので、端材層部分の正確な目付、混合割合は不明であったが、繊維のみ品の繊維1層分の目付の平均値を利用して、繊維層部分を減じて推定した。

2.2 ニードルパンチ不織布の加熱処理

ニードルパンチだけでなく加熱処理を施した場合の影響も検討するため、2.1で試作した不織布をベーキング試験機（大栄科学精器製作所製 DK-1M）により190℃

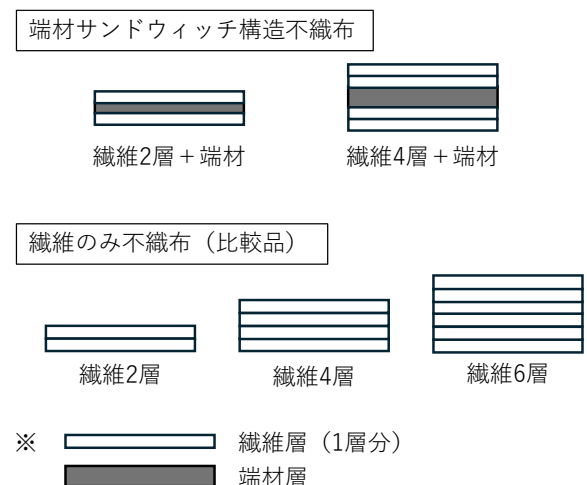


図1 試作不織布の概要

* 繊維・紙業部

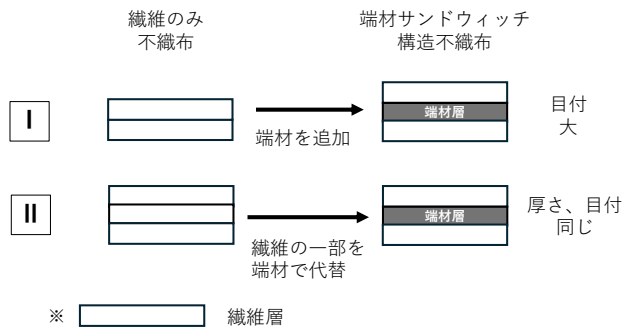


図2 端材サンドウィッチ不織布と繊維のみ不織布との比較検討パターン

で5分間加熱した。サンプル面に垂直、水平方向ともに拘束のないフリーな状態で加熱した。

2.3 試作品の評価

試作不織布について、加熱処理前後の各時点で、厚さ、目付、嵩密度、吸音率を評価した。厚さは圧力 0.5 kPa をかけて測定した。重量を測定して、面積から目付を、厚さ、目付から嵩密度を算出した。吸音率は垂直入射吸音率測定装置（ホッティンガー・ブリュエル・ケアー製 4206T）で、100 mm、29 mm の音響管を利用し背後空気層なしで 50～6,300 Hz の範囲で測定した。

2.4 端材の影響検討

繊維のみの不織布と比較して端材を混合する場合の吸音性への影響を考えるにあたって、図2に示した2パターンで検討することとした。パターンIは、繊維層の間に新たに端材を追加して挟む場合を想定したものであり、端材重量分だけ目付は増加する。この場合は、図1で示した「繊維2層」と「繊維2層+端材」、「繊維4層」と「繊維4層+端材」の実測値で比較可能と考えられる。パターンIIは、繊維のみ品と厚さ、目付を揃えて端材サンドウィッチ構造品を作製する場合を想定したものである。ニードルパンチで厚さ、目付を揃えるのが難しかったので、繊維のみ品の吸音率については、数理モデルによるシミュレーションで予測し、それを端材サンドウィッチ構造品の実測値と比較することとした。シミュレーションには、積層構造音響特性予測ソフトウェア（日本音響エンジニアリング株式会社製 STRATI-ARTZ）で KATO モデルを使用した。KATO モデルは不織布用の吸音率予測モデルで、厚さ、嵩密度、構成繊維の繊維径、密度、配合割合などの比較的把握が容易なパラメータで吸音率を予測する。嵩密度は、厚さと目付から計算可能である。まずは KATO モデルの適用性を検討するため、繊維のみ品の試作品3種について、実際の厚さ、目付等から、KATO モデルにより吸音率の予測値を導き出し、それと実測値を比較した。比較の結果、補正が必要と判断される場合は補正を行い、想定する厚さ、目付での繊維のみ品の吸音率を予測した。

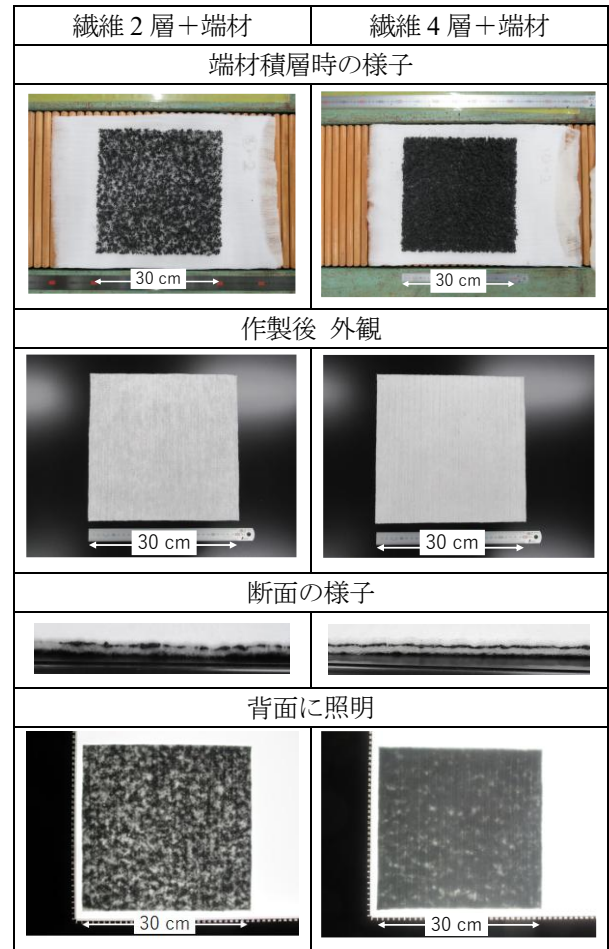


図3 端材サンドウィッチ構造不織布の写真

表1 試作不織布（加熱処理なし）の諸元

	厚さ (mm)	目付 (g/m ²)	嵩密度 (kg/m ³)	端材層分（推定）	
				目付 (g/m ²)	混合 割合
繊維2層+端材	5.0	369	73.2	97	26%
繊維4層+端材	6.9	752	109.3	208	28%
繊維2層	4.7	269	57.4	—	—
繊維4層	7.0	533	75.9	—	—
繊維6層	8.6	841	98.2	—	—

3 結果及び考察

3.1 ニードルパンチ不織布（加熱処理なし）

端材サンドウィッチ構造不織布について、試作時に端材を積層した時の様子、作製後の外観、断面の様子、および背面に照明を置いて、透かして撮影した写真を図3に示した。「繊維2層+端材」では端材層での隙間が目立ち、断面も不均一であった。「繊維4層+端材」については、隙間が多少残るものの少なく、断面観察からも端材層は比較的均一になっていると考えられた。試作品の諸元を表1に示した。端材サンドウィッチ構造品の嵩密度は、不織布の内部構成が一樣とした場合の見かけ上の数値である。また、端材層の数値については、繊維

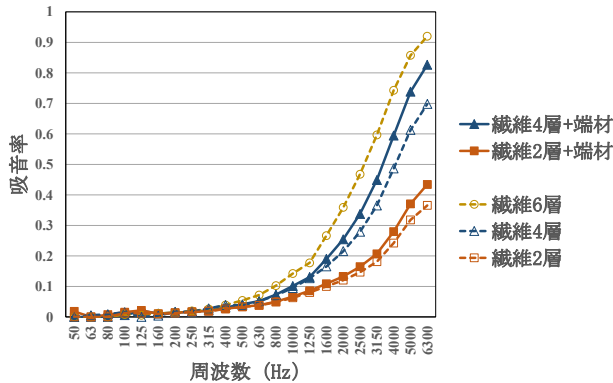


図4 試作不織布の吸音率（加熱処理なし）

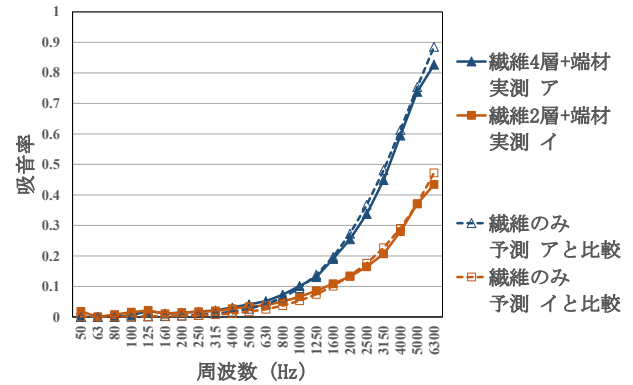


図6 厚さ、目付が同じ場合の吸音率比較（加熱処理なし）

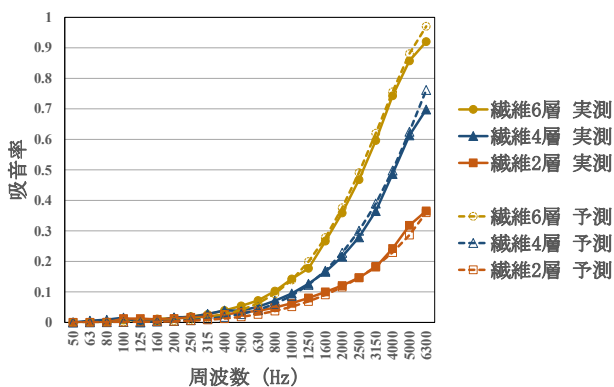


図5 繊維のみ不織布（加熱処理なし）での吸音率実測値と KATO モデル予測値との比較

のみ品3種の試作品の繊維1層分の目付の平均値が136 g/m²であったので、これを利用して推定したものである。試作品の吸音率を測定した結果を図4に示した。端材サンドウィッチ構造品と繊維のみ品との比較で、「繊維4層+端材」は「繊維4層」より、「繊維2層+端材」は「繊維2層」より、それぞれ吸音率が高かった。目付が増えても構わないのであれば、繊維層の間に端材を挟むことで吸音性能が向上することを意味し、端材利用の有用性はあると考えられた。厚さと目付を揃えた場合（図2・パターンII）の比較にあたっては、まず KATO モデルの適用性を検討した。繊維のみ品3種について、実際の試作品の厚さ、目付の数値を利用して KATO モデルによる予測値を導き出し、それと実測値とを比較した。結果を図5に示した。モデル予測値と実測値がよく一致し、今回のケースでは KATO モデルによる予測が有効であると思われた。よって、端材サンドウィッチ構造品と厚さ、目付を揃えた繊維のみ品を想定した予測には、KATO モデルの予測値をそのまま利用することとした。結果を図6に示した。厚さと目付を揃えた場合、端材サンドウィッチ構造品と繊維のみ品とで、吸音性がおよそ同じであった。前報においてニードルパンチせずに肉厚な不織布を作製した場合には、端材サンドウィッチ構造

品のほうが繊維のみ品より吸音率が低かったが、今回は違う結果となった。同じ厚さ、目付の条件下でバージン繊維の一部を端材で代替しても吸音性が低下しないことを意味し、端材の利用を進めるには好ましい結果であった。今回利用した端材のももとの嵩密度がかなり高めのため、端材サンドウィッチ構造品の中で、繊維層の嵩密度は端材層より小さくなっていると考えられる。前報のような全体として肉厚で嵩高な不織布を作製する場合、端材サンドウィッチ構造品の中での繊維層と端材層の嵩密度の差が大きい。これと同じ厚さ、目付の繊維のみ品で、その中で嵩密度が一樣になることを想定すると、イメージ的には端材層に集中していた重量が繊維層部分に分散することになるので、その嵩密度は端材サンドウィッチ構造品における繊維層部分よりかなり大きくなる。嵩密度の上昇が吸音性向上に寄与するため、前報のようなケースではその効果が大きく、繊維のみ品のほうが高い吸音性を示した一因と考えられる。それに対し今回は、ニードルパンチすることで繊維層も比較的密になって、端材層との嵩密度差が小さくなっていると考えられる。よって同じ厚さ、目付で繊維のみ品を想定する場合も、繊維層部分の嵩密度の差が小さくなり、そのことが前報の結果との違いの一因であると考えられた。

3.2 加熱処理後

ニードルパンチ不織布に加熱処理を施した試作品の諸元を表2に示した。加熱処理により収縮して、嵩密度は加熱処理前よりも大きくなった。吸音率を図7に示した。端材サンドウィッチ構造品と繊維のみ品との比較で、「繊維4層+端材」は「繊維4層」と、「繊維2層+端材」は「繊維2層」とほぼ同程度の吸音性であった。加熱処理なしの時のような端材追加による吸音性向上効果を確認できなかった。厚さと目付を揃えた場合の比較にあたって、前項同様、まず繊維のみ品の実測値と KATO モデルによる予測値を比較した結果を図8に示した。加熱処理なしの時とは違い、全体的に実測値のほうがモデル予測値より低くなり、このケースでは KATO モデル

表2 試作不織布（加熱処理後）の諸元

	厚さ (mm)	目付 (g/m ²)	高密度 (kg/m ³)
繊維2層+端材	5.6	450	80.2
繊維4層+端材	6.9	891	130.1
繊維2層	5.3	331	62.7
繊維4層	7.4	648	87.7
繊維6層	8.2	997	121.3

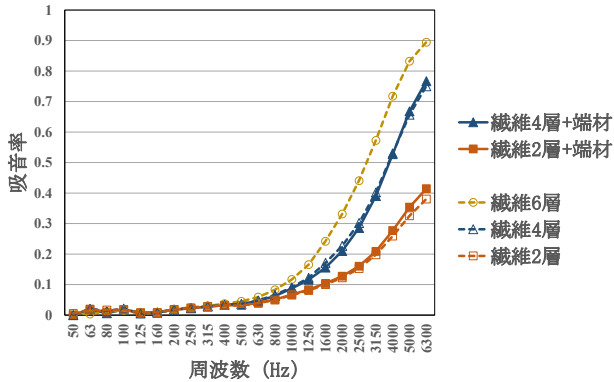


図7 試作不織布の吸音率（加熱処理後）

がそのまま適用できないと考えられた。KATOモデルは繊維の集合体を想定しているのに対し、今回は、加熱によりバインダー繊維の溶融が進んでいるのが原因と考えられた。そこで、実際の予測にあたっては、周波数ごとに「実測値／モデル予測値」の平均値を算出し、それを補正係数とし KATO モデル予測値に乗ずることとした。結果を図9に示した。加熱処理なしの時とは違い、端材サンドウィッチ構造品のほうが繊維のみ品よりも若干吸音性が低い結果になった。加熱処理なしの時と比べると、図2における2パターンのいずれにおいても端材を利用した場合の結果が相対的に低下した。原因は不明であるが、今回利用した端材は加熱により溶融する成分が多いものであった。よって加熱処理することで、端材層部分では繊維層に比較してより溶融が進み、多孔性が失われた塊状になったのではないと思われる。その結果、端材層の吸音性への寄与が低下したことが原因の一つとして考えられた。

4 まとめ

本研究では、不織布に端材を混合する場合の吸音性への影響を検討するため、ニードルパンチによる不織布で、繊維層の間に端材粉砕片を挟んだ「端材サンドウィッチ構造品」とバージン繊維のみの「繊維のみ品」を試作し、吸音率を比較した。結果を表3にまとめて示した。加熱処理をしない状態では、端材利用にメリットがあると考えられる結果であった。加熱処理をすると、端材サンド

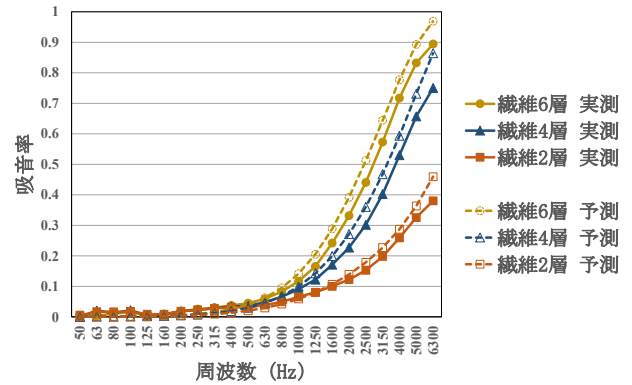


図8 繊維のみ不織布（加熱処理後）での吸音率実測値と KATO モデル予測値との比較

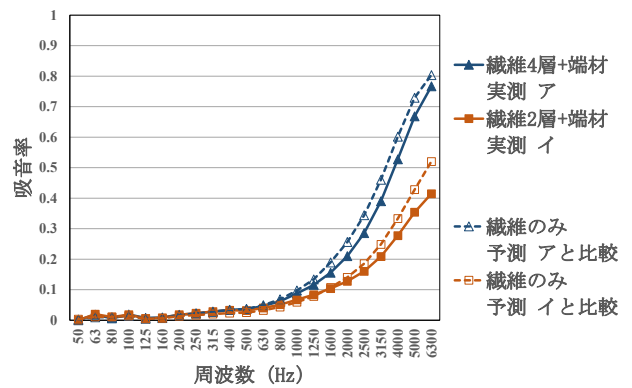


図9 厚さ、目付が同じ場合の吸音率比較（加熱処理後）

表3 吸音性能の比較結果まとめ

加熱 処理	端材混合不織布を作製する場合の想定	
	繊維層間に端材を追加 (目付は増加)	同じ厚さ、目付
なし	端材サンドウィッチ構造品 > 繊維のみ品	端材サンドウィッチ構造品 ≒ 繊維のみ品
あり	端材サンドウィッチ構造品 ≒ 繊維のみ品	端材サンドウィッチ構造品 < 繊維のみ品

ウィッチ構造品は繊維のみ品に対して、加熱処理がない時と比べて相対的に吸音性が低下した。

【謝 辞】

端材サンプルの提供など、ご協力いただきました株式会社オーツカ様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 中島ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp63-64,2024
- 2) 中島ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp53-54,2025

繊維端材のリサイクルによる資源循環型部材開発に関する研究（第4報）

－異種ポリマーブレンド物の熔融紡糸技術の開発（2）－

堀口結以*、中島孝康*、立川英治*

Development of resource-recycling materials through recycling fiber scraps (IV)

- Development of melt spinning technology of polymer blends (II) -

HORIGUCHI Yui*, NAKASHIMA Takayasu* and TACHIKAWA Eiji*

異種の熱可塑性材料が混在している端材から、熔融紡糸法により繊維を再生する技術の開発を目指している。基材としてポリエステル（以下「PET」）と、接着用樹脂として変性ポリエステル（以下「変性 PET」）を想定し、実際の端材を使用してこれらの混合物から繊維の作製条件の検討を行った。端材由来の樹脂（以下「端材 PET」）100%で未延伸繊維が作製できたため、PET と端材 PET のブレンド比および延伸倍率を変化させ延伸繊維を作製し力学物性を調査した。端材 PET の割合が大きくなるほどいずれの延伸倍率でも強度が低下し、また、延伸倍率が高くなるほど伸び率の低下を確認した。端材 PET100%、延伸倍率5倍のとき、繊維度 6.4 dtex、強度 0.27 N/tex、伸び率 53.0%の繊維を得ることができた。

1 はじめに

SDGs の重要性が広く認知されるようになり、繊維のリサイクル技術の開発およびその技術による製品開発の要望が強くなっている。繊維業界では古くから「反毛」という方法でリサイクルが行われており、これにより、生地、紐、落ち綿などが自動車内装材に使用されるフェルト、製綿用中綿、軍手などに生まれ変わっている¹⁾。しかしながら、繊維同士が熱などで融着していると反毛を適用することが困難であり、焼却処分されているものも多い。

一方、PET ボトルは再繊維化が既に行われており、再生 PET 繊維はバージン繊維と同様に使用されている。このように樹脂を熔融して再繊維化する方法もあるが、繊維製品には異種の繊維や接着のためのバインダー樹脂が使用されていることが多く、これらは熔融してもポリマーレベルでは混ざりあわないことが多いため、熔融紡糸による再繊維化は困難である。

本研究では、異種の熱可塑性材料が混在している端材について、従来では困難とされている熔融紡糸法で繊維を再生する技術の開発を目指す。本年度は基材として PET 樹脂、接着用樹脂として変性 PET が使用されている繊維製品について、実際の端材を使用してこれらの混合物から繊維を作製する条件の検討を行った。

2 実験

2.1 材料

PET 樹脂は、ユニチカ（株）NEH-2050（IV 値 0.78）を使用した。端材 PET として、PET と変性 PET が 86.5/13.5 の割合で混在する端材を使用した。なお、端材については、ハンドリング性の向上を目的に、RPF ペレット化を

行い、さらに二軸混練ペレットを作製した。

それぞれの樹脂について、105℃で12時間以上乾燥してから試験に使用した。

2.2 熔融紡糸による繊維の作製

熔融紡糸機（中部マシン（株）製 小型熔融紡糸機ポリマーメイト V（単軸、スクリー径 25 mm、L/D28））を使用した。PET ペレットおよび二軸混練ペレットを 100/0、80/20、60/40、40/60、20/80、0/100 の割合でドライブレンドした後、熔融して、36 孔、各孔径 0.35 mm、L/D2 の口金から 0.56 g/(min・fil) で吐出した。さらに速度 200 m/min で巻き取って未延伸繊維を作製した。未延伸繊維を 4.0、4.5、5.0、5.5 倍で延伸して延伸繊維とした。繊維度は繊維の直径から密度 1.38 として算出した。

2.3 メルトフローボリュームレイト（MVR）

メルトフローレイト測定装置（（株）安田精機製作所製 120-FWP）を使用し、JIS K 7390-2：2015 に準拠して PET 樹脂および端材 PET 樹脂の MVR を測定した。それぞれの樹脂について、105℃で12時間以上乾燥してから試験に使用した。

2.4 繊維の強伸度

万能試験機（（株）島津製作所製 AGS-J）を使用し、JIS L 1015：2021 を準拠して繊維の引張強さおよび伸び率を測定した。

3 結果と考察

端材 PET 由来の二軸混練ペレットのみで未延伸繊維の作製を試みたところ、繊維作製が可能であった。これを踏まえ、二軸混練ペレットとバージン PET 樹脂をドライブレンドし繊維化を行った。結果を表 1 に示す。いずれのブレンド比においても繊維作製が可能であった。また、PET 樹脂および端材 PET 樹脂の MVR はそれぞれ、21、247

* 繊維・紙業部

表1 未延伸繊維の作製

No.	ブレンド比		繊維中の樹脂の割合		巻き取りの可否
	PET	端材PET	PET	変性PET	
1	100	0	100	0	○
2	80	20	97.3	2.7	○
3	60	40	94.6	5.4	○
4	40	60	91.9	8.1	○
5	20	80	89.2	10.8	○
6	0	100	86.5	13.5	○

であったことから、本研究で用いた樹脂において 21～247 の範囲内で熔融紡糸可能であることが確認できた。次に、作製した未延伸繊維を延伸した。延伸繊維の強度を図1に、伸び率を図2に示す。図1より端材PETの割合が大きくなるほどいずれの延伸倍率でも強度が低下した。また、図2より延伸倍率が高くなるほど伸び率の低下が確認できた。端材PET100%、延伸倍率5倍のとき、繊度 6.4 dtex、強度 0.27 N/tex、伸び率 53.0%の繊維を得ることができ、この強度があれば、不織布の原綿として利用可能と考えられる。

4 まとめ

従来は困難とされている、異種の熱可塑性材料が混在する端材から熔融紡糸法で繊維を再生する技術の開発を目指し、検討を行った。本年度は基材として PET 樹脂、接着用樹脂として変性 PET が使用されている繊維製品について、実際の端材を使用してこれらの混合物から繊維を作製する条件の検討を行った。

PET と端材 PET のブレンド比および延伸倍率を変化させ延伸繊維を作製し力学物性を調査した。端材 PET の割合が大きくなるほどいずれの延伸倍率でも強度が低下し、また、延伸倍率が高くなるほど伸び率の低下がした。端材 PET100%、延伸倍率 5 倍のとき、繊度 6.4 dtex、強度 0.27 N/tex、伸び率 53.0%の繊維を得ることができた。

【謝 辞】

端材サンプルの提供など、ご協力いただきました株式会社オーツカ様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 島上, 繊維学会誌 (繊維と工業) Vol. 64, No. 7, pp238-241, 2008

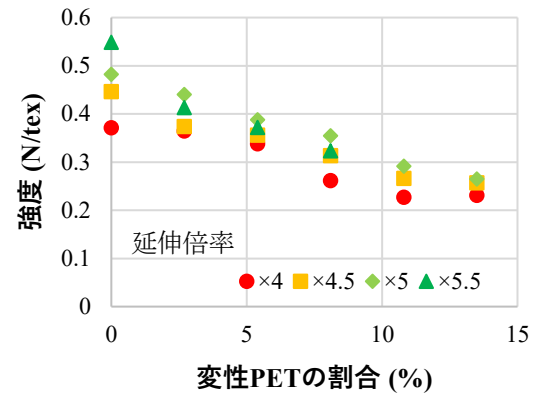


図1 延伸繊維の強度

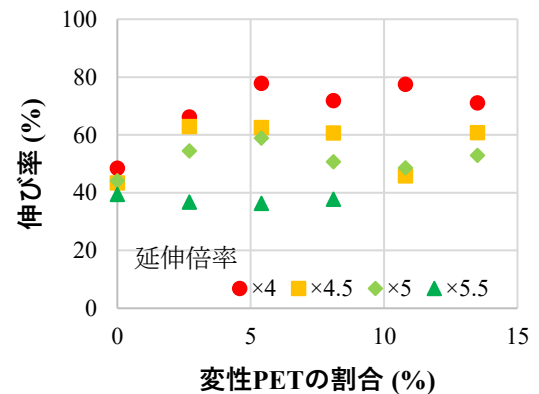


図2 延伸繊維の伸び率

繊維製品の快適性に関する研究（第1報）

山内寿美*、堀口結以*

Study on comfort of textile products (I)

YAMANOUCHI Hisami* and HORIGUCHI Yui*

本研究では、ストレスフリーな衣服の開発を目指して、同一デザインで生地のみを紙糸・綿・ポリエステルとしたブラウスを対象に、衣服圧、衣服内の温湿度、表面温度の測定および、着用アンケートを実施して快適性について検討を行った。衣服圧は背中心部・肩甲骨上部・肩部の3点を測定した結果、紙布ブラウスが低い値を示した。衣服内の温湿度については、紙布ブラウスは着用初期の温度が低く、時間経過に伴う湿度低下が顕著であった。着用アンケートでは、紙布ブラウスが「着た直後に冷たい」「涼しい」「軽い」との評価を得た。紙布ブラウスの衣服圧が高いのは、紙布の硬さが原因でセンサーとの接触特性に影響したと思われる。一方で、皮膚との接触面積が少ないことが軽さや涼しさの知覚につながったと考えられる。快適性の評価には、衣服圧、衣服内の温湿度、主観評価を組み合わせた複合的指標が有効であることが分かった。

1 はじめに

繊維業界ではSDGsやフェムケアの潮流を背景に、快適・ストレスフリーな衣服が求められている。産地企業からは、「快適性の評価方法が分からない」「紙糸の特性を製品に反映させたい」などのニーズが寄せられている。そこで、本研究では、当所の評価機器を用い、快適性評価方法の確立と衣服デザインの開発を目指す。

2 実験

2.1 衣服圧の測定

図1に示す同一デザインで素材のみをほぼ同じ織度の紙糸、綿、ポリエステル（以下、PET）に変えたブラウスを対象に快適性評価を行った。衣服圧の測定は、接触圧測定装置（株）エイエムアイ・テクノ製AMI 3037-10-II）を使用し、体型の影響を排除するためボディを用いた。測定は、あらかじめ衣服圧のかかる箇所として抽出した背中心部、肩甲骨上部、肩部の3点（図2）で実施した。

2.2 衣服内の温湿度の測定

所内の30～50歳代の女性職員5名に対して行った。測定は、小型温湿度計（KNラボラトリーズ製ハイグロクロン）を腹部および腰部に貼付し、その上から図1の各ブラウスを直接肌に着用し15分間測定した。実験環境は室温30℃、相対湿度65%RHとした。

2.3 衣服の表面温度の測定

着用直後と15分後にサーモカメラ（NEC Avio 赤外線テクノロジー（株）製赤外線サーモグラフィーR300）を用いて表面温度を測定した。

2.4 着用アンケートの実施



図1 実験に用いたブラウス（左から紙布、綿布、ポリエステル布）

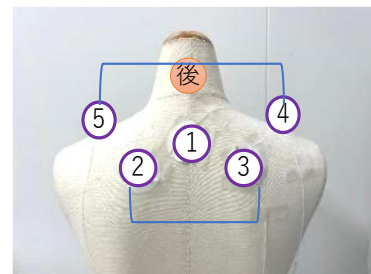


図2 衣服圧測定箇所（①背中心部
②③肩甲骨上部 ④⑤肩部

着た直後の冷温感、涼しさ、軽さ、風通し、肌触り、通気性の6項目について、5段階評価のアンケート（SD法）を実施した。

3 結果及び考察

3.1 衣服圧の測定結果

図3のとおり、測定箇所における衣服圧の測定結果（図2に示す測定箇所の②と③、④と⑤の平均値）では、紙布ブラウスが肩甲骨上部および肩部で高い値を示し、綿布ブラウスは肩部でやや高い値を示した。PET布ブラウスは全体的に低い傾向を示した。紙布ブラウスは曲げ

* 繊維・紙業部

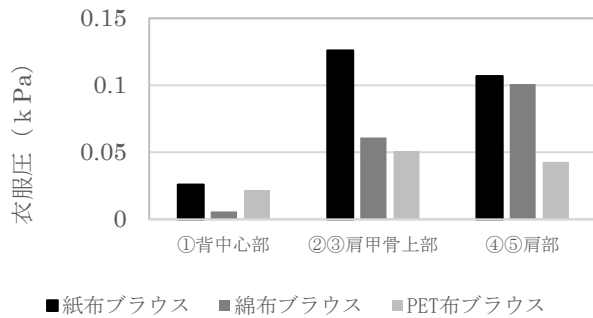


図3 衣服圧の測定結果

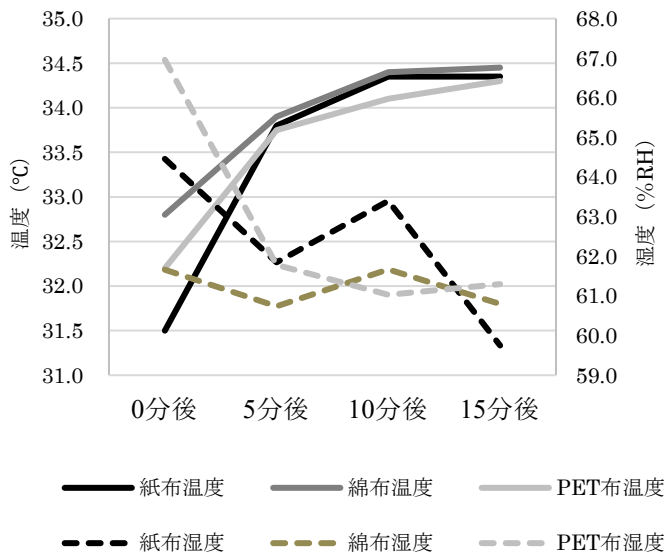


図4 衣服内の温湿度

剛性が高いことが報告されており、センサーに面で接触しやすいため、衣服圧が高く測定されたと考察する。

3.2 衣服内の温湿度の測定結果

図4に示すように、3種類のブラウスにおける衣服内温度（腹部と腰部の平均値）は時間経過とともに収束する傾向が見られた。紙布ブラウスは着用直後の温度が低く、時間経過に伴う湿度の低下が顕著であった。PET布ブラウスは着用直後の湿度が高く、その後大きく低下するが着用10分後から上昇傾向を示した。綿布ブラウスは湿度変化が小さかった。

3.3 衣服の表面温度の測定結果

衣服の表面温度は、皮膚の表面温度が衣服に伝わりやすい鎖骨下の箇所を測定値を抽出した。図5に示すように、紙布ブラウスでは変化が小さく、綿布およびPET布ブラウスでは上昇傾向が認められた。紙布ブラウス着用時の皮膚表面温度は、他の2種類と比較して低く、経時変化が少ないと考えられる。

3.4 着用アンケートの実施結果

図6に示す着用アンケート結果（SDプロフィール）では、紙布ブラウスが「（着用直後）冷たい」「涼しい」

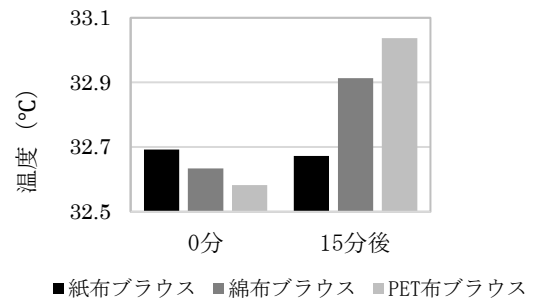


図5 ブラウスの表面温度

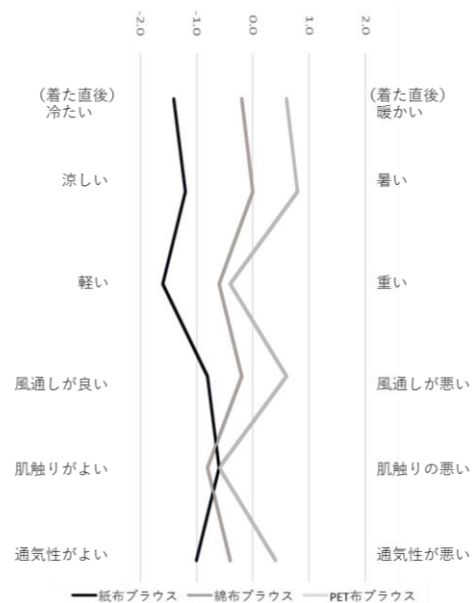


図6 着用アンケートの結果

「軽い」と評価された。衣服圧の測定値は高いが、生地は自立して皮膚への接触が少ないため、軽さ・涼しさの知覚と整合する結果となった。紙布の接触冷感（ q_{max} ）の高さが着用初期の温度の低さと主観的冷感に寄与したと考えられる。PET布ブラウスは「暑い」「風通しが悪い」と評価された。綿布ブラウスは全項目において中庸な評価であった。

4 まとめ

本研究により、素材差に基づくブラウスの快適性に関する傾向が把握できた。紙布ブラウスは衣服圧が高めであるが、接触冷感・涼しさ・軽さの主観評価が高かった。快適性評価は、物理量（衣服圧・温湿度）と主観評価を統合した複合的指標で行う必要があることが確認できた。今後はパンツの快適性評価へと対象を拡張し、身体負担の少ないデザインの試作と評価を進める。

【参考文献】

- 1) 林ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.2, pp57-60, 2021

重量物用パルプモールドの軽量化技術の開発（第1報）

浅野良直*、仙石倫章*

Development of lightweighting technology for heavy-load pulp molds (I)

ASANO Yoshinao* and SENGOKU Tomoaki*

発泡スチロールなどのプラスチック製緩衝材に代わる環境対応材料としてパルプモールドの利用が進んでいる。重量物の輸送用緩衝材として用いられるパルプモールド（以下、テックスモールド）は、耐衝撃性や耐圧強度に優れる一方で、厚みが大きく重量もあることから、輸送時の燃費悪化が課題となっている。本研究では製紙用薬品である紙力剤を使用せず、主原料であるリサイクルパルプに叩解したバージンパルプを補強材として添加することで、テックスモールドの強度向上による軽量化を図る技術の開発を目的に検討を行った。本年度は、叩解度が異なるバージンパルプを紙力補強用パルプとして添加し、リサイクルパルプとの配合比を変えたボードを作製して曲げ強さによる評価を実施し、叩解条件および配合条件が曲げ強さに与える影響を把握した。

1 はじめに

近年、海洋プラスチック問題や地球温暖化対策への関心の高まりを背景に、製品輸送に使用される梱包・緩衝材において、発泡スチロールなどのプラスチック製材料に代わる材料が求められている。古紙パルプを主原料とするパルプモールドは、使用後もリサイクル可能なため、プラスチック代替材料として注目されている。

重量物の輸送用途に用いられるテックスモールドは、高い耐衝撃性および耐圧強度を有するが、必要な強度を確保するには厚みが大きくなる傾向がある。その結果、重量増加による輸送効率の低下や輸送時の燃費悪化に伴う二酸化炭素排出量の増加が課題となっている。プラスチック代替材料とするには、環境負荷低減の観点から、軽量化による物流工程全体での負荷低減が重要である。

一般に、紙製品の強度向上には紙力剤などの製紙用薬品が用いられている。テックスモールドは使用後に原料として再利用されることが多く、紙力剤の使用は離解性の低下や再生工程での品質のばらつきを引き起こすおそれがある。そのため、テックスモールドの軽量化には、紙力剤に依存しない強度向上技術¹⁾の確立が求められる。

本年度は、リサイクルパルプを主原料とし、叩解によってフィブリル化したバージンパルプを紙力補強用として添加することで、テックスモールドの強度向上と軽量化を図るための基礎的検証を行った。

2 実験

2.1 曲げ試験用ボードの作製

2.1.1 原料

紙力補強用としてリサイクルパルプに添加するバージンパルプは、広葉樹漂白クラフトパルプ（LBKP）、

針葉樹漂白クラフトパルプ（NBKP）、針葉樹未漂白クラフトパルプ（NUKP）を使用した。叩解はビーター（熊谷理機工業（株）製 No.2505 試験用ナイヤガラビーター）を使用して、各原料のろ水度が約 400 mL・CSF、約 200 mL・CSF となるように調整した。なお、未叩解パルプのろ水度は約 700 mL・CSF とする。リサイクルパルプはテックスモールド製造企業より提供された、ろ水度が約 500 mL・CSF の原料を使用した。

【紙力補強用パルプの条件】

- ・種類 : LBKP、NBKP、NUKP
- ・ろ水度：未叩解 700 mL・CSF
叩解 400 mL・CSF、200 mL・CSF

2.1.2 ボード作製

紙力補強用パルプの添加による曲げ強さへの影響を評価するため、以下の条件でボードを作製した。なお、ボード作製にはタッピ抄紙機（熊谷理機工業（株）製 No.2555 角形シートマシン（吸引タンク付））を使用し、手動油圧加熱プレス機（（株）井元製作所製 1A46 型）で脱水し、送風乾燥機（（株）いすゞ製作所製 SSSF-116）を使用して、105℃で乾燥処理を行い、恒温恒湿室（23±1℃、50±2%RH）で24時間以上静置した。

【ボードの作製条件】

- ・寸法：幅 250mm、長さ：250mm、厚み：5mm
- ・坪量：3,200g/m²
- ・リサイクルパルプと紙力補強用パルプの配合比
配合比 1：100%：0%
配合比 2：90%：10%
配合比 3：80%：20%

* 繊維・紙業部

3 評価方法

3.1 繊維長測定

繊維長分布測定機（ABB 製 FiberTester912）を使用して、リサイクルパルプおよび叩解した紙力補強用パルプの繊維長を測定した。ただし、リサイクルパルプにはパルプ以外の添加物等も含まれている。

1 サンプルあたり約 20,000 本を測定して、0.2～7.5 mm までの繊維長分布と測定本数に対する 0.2 mm 以下の繊維割合（以下、Fine）を求め、走査型電子顕微鏡（以下、SEM）（日本電子（株）製 JSM-IT100(LA)）による観察も行った。

3.2 曲げ試験

紙力補強用パルプの添加による曲げ強さへの影響を評価するため、万能試験機（（株）島津製作所製 AG20-KNGMI）を用いて、3 点曲げ試験を行った。

試験方法は「JIS K7171 プラスチック ー曲げ特性の求め方」を準用して、以下の試験条件で実施した。試験片の厚みは紙厚試験機（（株）東洋精機製作所製 デジシクネステスタ）を用いて、任意の 20 点の平均値をボード厚とした。

【試験条件】

- ・試験片：長さ 120 mm×幅 15 mm
- ・支点間距離：80 mm
- ・試験速度：2 mm/min
- ・圧子の半径：5 mm±0.2 mm
- ・支持台の半径：5 mm±0.2 mm
- ・1 水準あたり 12 回測定し、最大値と最小値を除去した 10 回の平均値とした。

4 結果及び考察

4.1 繊維長分布

繊維長分布の結果を図 1 に示す。リサイクルパルプの繊維長は 1.5 mm 以下が 90%程度を占めていた。パルプはリサイクルを繰り返すことで繊維の切断と併せて繊維に亀裂が生じ、切断されやすい状態になる。そのため、リサイクルパルプは長繊維が減少し、短繊維への分布にシフトしたと考えられる。LBKP の 700 mL・CSF（未叩解）における 0.5～1.5mm は 75%程度であり、3mm 以上がほとんどない。叩解を進めることで 0.5mm 以上が約 10%減少し、0.5mm 以下が約 10%増加した。NBKP は 400 mL・CSF まで叩解を進めると、3 mm 以上が約 15%減少し、1.5 mm 以下が約 15%増加したが、200 mL・CSF まで叩解を進めても 3 mm 以上の減少および 1.5 mm 以下の増加はいずれも数%程度であった。NUKP は叩解を進めることで 3mm 以上が減少し、1.5mm 以下が増加する傾向を示したが、700 mL・CSF（未叩解）の分布状態から大きな変化はなかった。

叩解を進めることで、繊維はフィブリル化と切断をされるが、LBKP および NBKP は 1.5mm 以下の割合が増

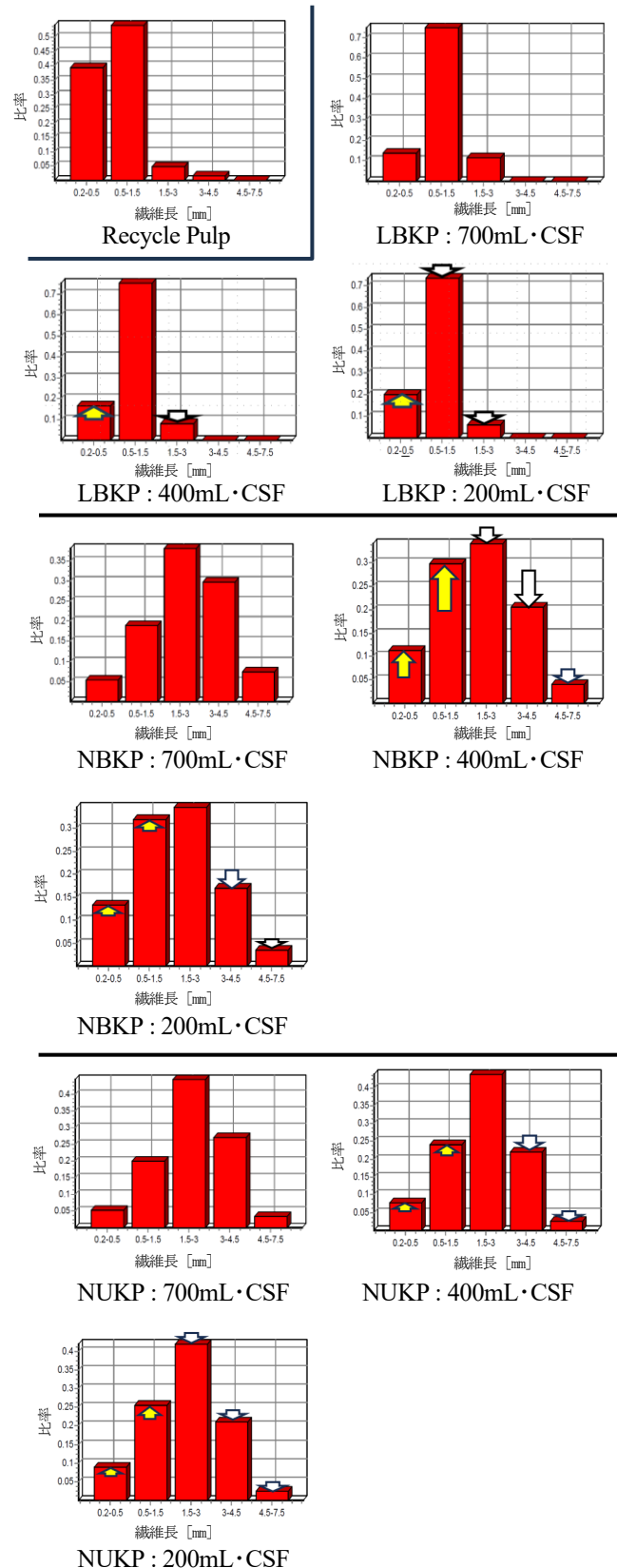


図 1 繊維長分布の測定結果

加しているため繊維の切断が多く、一方、NUKP は繊維長分布に大きな変化がないため繊維の切断は少ないと考えられる。

Fine の測定結果を図 2 に示す。リサイクルパルプは切断された微細繊維を多く含むため、叩解した紙力補強用パルプと比較して Fine の割合が多い結果になったと考えられる。LBKP、NBKP、NUKP は叩解を進めることで増加する傾向を示した。

図 3 にリサイクルパルプおよび紙力補強用パルプ表面の SEM 観察画像を示す。叩解を進めることで、繊維は扁平化し、フィブリル化した繊維や繊維間の隙間を膜状に覆っている部分が増加していた。リサイクルパルプではフィブリル化した繊維に加え、粒子状の物質なども確認できた。

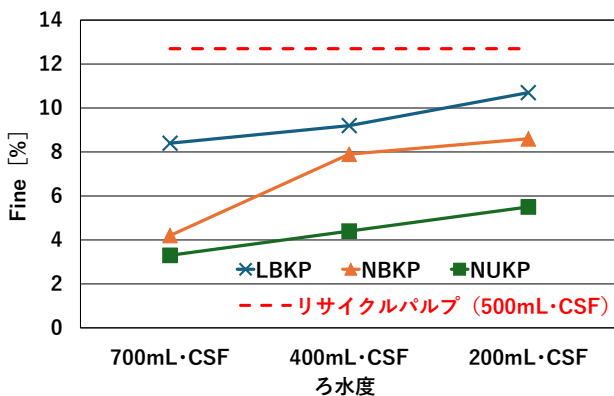


図 2 Fine の測定結果

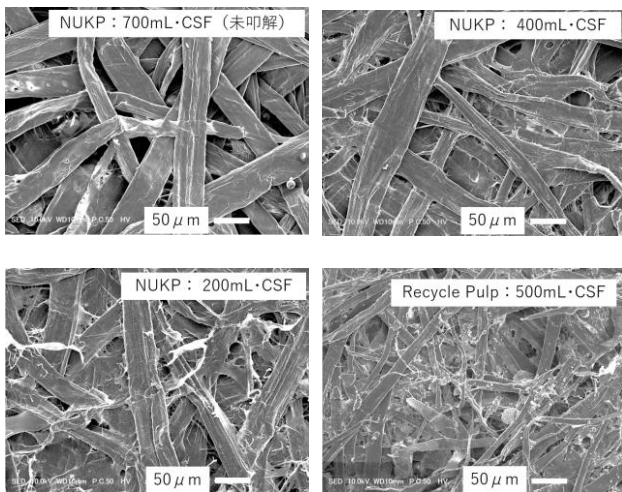


図 3 繊維表面の SEM 像

4.2 比曲げ強さ

曲げ強さの評価は、リサイクルパルプ単体で作製したボードを基準として行った。なお、ボードの坪量は試料ごとに異なるため、曲げ強さを坪量で除した値（以下、比曲げ強さ）を用いて比較した。

4.2.1 紙力補強用パルプのろ水度の違いによる影響

ろ水度が異なる紙力補強用パルプを 20% 添加した場合の比曲げ強さの結果を図 4 に示す。700 mL-CSF（未叩解）の紙力補強用パルプを添加するとリサイクルパルプ単体よりも比曲げ強さは低下をしたが、200 mL-CSF まで叩解した紙力補強用パルプを 20% 添加した場合は約 70~100% 増加する結果となった。

未叩解パルプは、リサイクルパルプに比べて長繊維を多く含み、繊維強度は高いと考えられるが、フィブリル化は進行していない。リサイクルパルプにはフィブリル化した繊維も含まれるが、未叩解パルプを添加するとフィブリル化繊維の割合は相対的に低下する。それにより、繊維間の絡まりが減少し、水素結合が減少するため、リサイクルパルプ単体より比曲げ強さが低下したと考えられる。叩解した紙力補強用パルプを添加した場合は、長繊維による繊維強度に加え、フィブリル化した繊維による絡まり、つまり、水素結合が増加した結果として、比曲げ強さが向上したと考えられる。

ろ水度と比曲げ強さの増加率を比較すると、紙力補強用パルプは未叩解から 400 mL-CSF まで叩解すると平均で約 60% 増加した。一方、400 mL-CSF から 200 mL-CSF まで叩解しても増加率は平均で約 40% となった。この要因の 1 つとして、叩解では繊維のフィブリル化と切断が同時に進むことが挙げられる。繊維長分布の推移でみられるように、未叩解から 400 mL-CSF まで叩解すると短繊維の割合が大きく増加したことから、多くの繊維がフィブリル化したと考えられる。一方、400 mL-CSF から 200 mL-CSF までの叩解では短繊維の増加率が低下したため、フィブリル化繊維の増加も限定的であったと推察される。また、繊維長分布の結果から、NUKP は LBKP や NBKP よりも繊維の切断が少なく、フィブリル化繊維と長繊維が多いため、比曲げ強さの増加が大きくなったと考えられる。

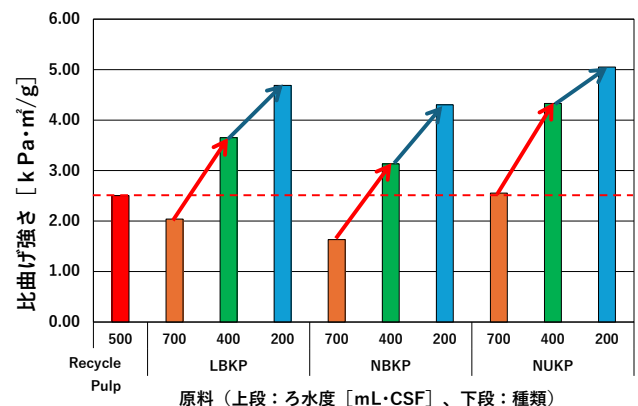


図 4 紙力補強用パルプのろ水度が比曲げ強さに与える影響

4.2.2 紙力補強用パルプの添加率による影響

紙力補強用パルプの添加率を10%および20%にした場合の結果を図5に示す。

400 mL・CSF の10%添加では、リサイクルパルプに対し、NUKP が約25%増加し、最大であったが、LBKP は約10%低下し、NBKP では大幅な増加は確認できなかった。一方、20%添加では LBKP および NUKP は50%以上増加した。

200 mL・CSF の10%添加では、LBKP と NBKP は数%の増加にとどまり、NUKP が約30%増加した。20%添加では LBKP が90%、NBKP が70%、NUKP は約100%増加した。

結果として、紙力補強材として利用した、いずれのパルプも20%以上添加することで、比曲げ強さは大幅に増加した。しかし、バージンパルプはリサイクルパルプに比べてコストが高いため、添加率を抑えることが望ましい。ろ水度が200 mL・CSF のように、叩解が促進されたパルプを添加することで比曲げ強さは増加しやすいが、保水性が高いため、脱水性は低くなる。テックスモールドはプレス加工による成型時に脱水を行うため、叩解を促進した原料は、プレス時に原料が流出したり、立体成型した際に型崩れを起こしたりする可能性がある。400 mL・CSF において NUKP は LBKP や NBKP よりも比曲げ強さは増加していることから、叩解では繊維の切断量を抑えながら、フィブリル化を増加させる処理条件の把握が必要と考えられる。

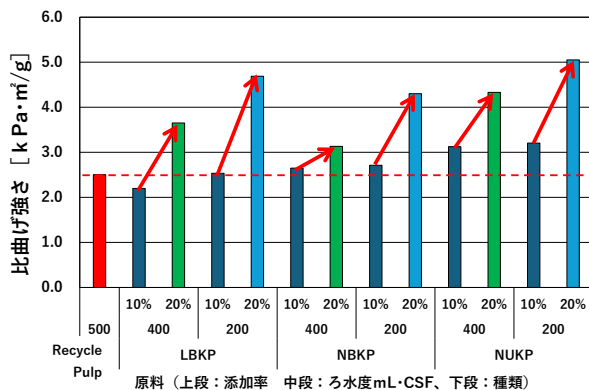


図5 紙力補強用パルプの添加率が比曲げ強さに与える影響

5 まとめ

本研究では、テックスモールドの原料であるリサイクルパルプに叩解したバージンパルプを紙力補強材として添加することで強度向上と軽量化を図る技術の検証を実施し、以下の結果を得た。

- ① 叩解したパルプの繊維長分布測定の結果、LBKP および NBKP は叩解により短繊維が増加しフィブリル化が進む一方、NUKP は繊維切断が少なくフィブリル化が主体で進行することを確認した。

- ② 曲げ強さは、ろ水度が400 mL・CSF の紙力補強用パルプを20%以上添加することで、50%以上の増加し、200 mL・CSF を20%以上添加することで、70～100%以上程度の増加が見込まれる。

今後は、テックスモールドの成形加工に適した紙力補強用パルプの叩解条件等について取り組む予定である。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたりご協力頂いた有限会社尾藤梱包工業所に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 村松ら, あいち産業科学技術総合センター研究報告 2020, pp40-43, 2020

廃棄繊維を活用した抄紙技術の開発（第1報）

仙石倫章*、浅野良直*

Development of papermaking technology utilizing waste fibers (I)

SENGOKU Tomoaki* and ASANO Yoshinao*

SDGs への関心の高まりを背景に、資源循環および環境負荷低減を目的とした材料開発が強く求められている。特に、従来は廃棄処分されてきた繊維廃材や食品残渣等を有効活用し、製紙原料として再資源化する取り組みが注目されている。そこで本研究では、廃棄される綿繊維を製紙原料の一部として活用することを検討した。綿材料の粉碎処理を行った後、パルプ繊維と混合して叩解・解繊処理を実施し、抄紙を行った。得られた試験紙について各種物性評価を実施し、綿材料の配合による物性低下の影響を把握することができた。

1 はじめに

繊維業界、製紙業界において SDGs への関心が高まっており、従来は廃棄処分されてきた繊維廃材や食品残渣等を有効活用するための技術開発、製品開発の要望が増加している。そこで我々は廃棄繊維を製紙原料として再資源化する取り組みに着目した。廃棄繊維の製紙原料化は廃棄物削減や CO₂排出抑制に寄与するとともに、原料多様化の観点からも重要であるが、紙の強度等の物性への影響が懸念されるため、その評価が必要である。

本研究では、利用する繊維として綿繊維を採用し、粉碎機による粉碎・解繊処理を施した後、パルプ繊維と混合しディスクリファイナーによる叩解・解繊処理を行った。その後、タッピ抄紙機で抄紙を行い、得られた試験紙について引張強さ試験、破裂強さ試験及び引裂強さ試験を行ったので、その結果について報告する。

2 実験

2.1 材料と粉碎・解繊

本研究では製紙材料化する繊維として綿繊維を選定した。材料の供給や品質の安定性の観点から綿繊維は廃棄繊維でなく医療用脱脂綿（川本産業（株）製）を使用した。綿繊維はラシャ鉄にて 1 cm 角に切断し粉碎機（（株）ホーライ製 UGO₃-280）により粉碎・解繊した。綿繊維を添加するバージンパルプは針葉樹漂白クラフトパルプ（以下 NBKP と表記）を使用した。

叩解処理のため NBKP に粉碎した綿繊維を添加し、水中に分散させ、1wt%濃度のスラリーを調整した。スラリーに添加する綿繊維の配合割合は 5wt%、10wt%、20wt%、50wt%とした。このほかに NBKP のみ、綿繊維のみのスラリーも調整し、スラリーの水準は合計 6 条件とした。

2.2 叩解・解繊プロセス

繊維の叩解・解繊はディスクリファイナー（熊谷理

機工業（株）製 KRK 型）を使用した。ディスクリファイナーの回転数を 3000rpm に設定し、ディスクは精砕用で繊維の切断が少ない D 型を使用した。初めにディスクのクリアランスを 1 mm に設定し 4 回処理した後、クリアランスを 0.1 mm に変更し処理した。

2.3 ろ水度測定と繊維長分布測定

叩解・解繊した綿繊維のろ水度測定は、ろ水度試験器（熊谷理機工業（株）製 カナディアン・フリーネステスター）で行った。平均繊維長と平均繊維幅は、繊維長分布測定機（ABB 社製 FiberTester912）にて測定した。1 サンプルあたり約 20,000 本を測定し、繊維長と繊維幅の平均値を算出した。

2.4 抄紙

ディスクリファイナーでろ水度が 450mL・CSF となるよう調整したスラリーに、1%濃度に調整した粘剤（明成化学工業（株）製 アルコックス SP）を 50ml 添加した後に、ブレンダー（ワーリング社製 LB10XS）で 30 秒攪拌し、タッピ抄紙機（（株）東洋精機製作所製 角形シートマシン（200×250 mm 角））を用いて抄紙した。抄紙後は、熱プレス（（株）ハシマ製 HP54A 型）を使用し、温度は 115℃、加圧力は 1.0(kg/m²)Mpa、加圧時間は 10 分で乾燥処理を行い、手抄き試験紙とした。乾燥した試験紙は恒温恒湿室（23±1℃、50±2%RH）で 24 時間以上静置した。

2.5 物性評価

試験紙を用いて以下の 3 項目の試験を実施した。なお、引張強さと引裂強さはサンプルの坪量が測定値に影響を与えるため、測定値を坪量で除算した値である比引張強さ[N・m/g]と比引裂強さ[mN・m²/g]により比較した。

【試験方法】

- ・引張強さ試験：紙及び板紙—引張特性の試験方法—第 2 部：定速伸長法（JIS P8113）
- ・破裂強さ試験：紙—破裂強さ試験方法（JIS P8112）
- ・引裂強さ試験：紙—引裂強さ試験方法—エルメンドルフ形引裂試験機法（JIS P8116）

*繊維・紙業部

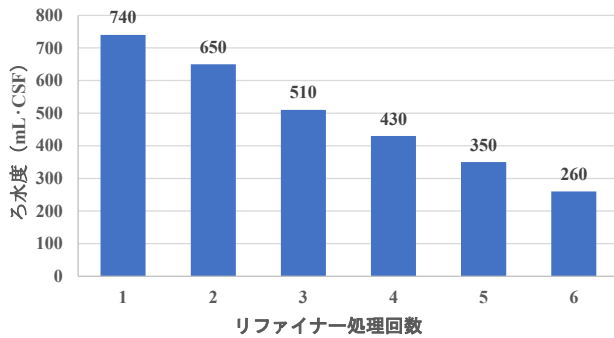


図1 リファイナー処理回数が綿繊維のろ水度に与える影響

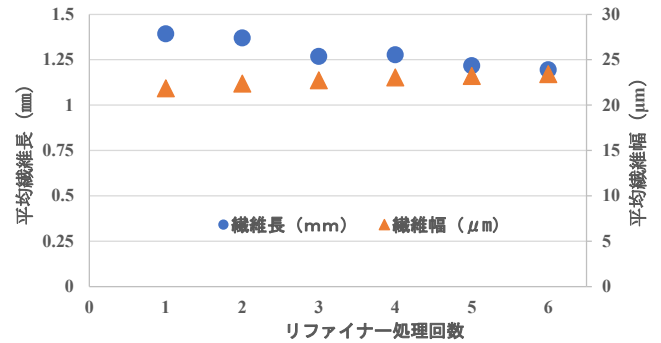


図2 リファイナー処理回数が綿繊維の平均繊維長及び平均繊維幅に与える影響

3 結果及び考察

3.1 叩解・解繊した綿繊維のろ水度と繊維長分布

図1に綿繊維のスラリーをディスクリファイナーで処理した際の、クリアランス 0.1 mmでの処理回数とろ水度の関係を示す。ディスクリファイナー処理回数の増加に伴い、ろ水度が低下することがわかった。これは綿繊維が叩解・解繊され、繊維幅が変化し、繊維のフィブリル化が進行したと考えられる。図2に綿繊維のディスクリファイナーの処理回数と繊維長及び繊維幅の関係を示す。処理回数が増えるに従い、綿繊維の繊維長が短く、繊維幅が太くなり、その傾向を把握することができた。

3.2 物性評価結果

図3に試験紙の引張強さ試験の結果を示す。比引張強度はNBKP100%の試験紙が一番強く、綿の配合割合が増えるのに伴い比引張強さが低下し、50wt%添加時に約20%の強度が低下した。図4に破裂強さ試験の結果を示す。破裂強さに関してもNBKP100%の試験紙が一番強い結果となった。綿繊維の添加量を増やすと強度は低下し、5wt%の添加で約16%、50wt%の添加で約40%の強度低下が確認できた。図5に引裂き強さ試験の結果を示す。比引裂き強度に関してもNBKP100%の試験紙が一番強い結果となり、NBKPに綿繊維を5wt%、10wt%、20wt%含有すると約11%強度が低下し、50wt%含有時に21%の強度低下が認められた。今回行った物性評価では綿繊維の添加によりいずれの強度も低下したが、特に破裂強さが影響を受けた。

4 まとめ

1 cm角に切り出した綿繊維を粉砕機で処理し、その後ディスクリファイナーで叩解・解繊した際のろ水度と繊維長及び繊維幅を測定し、処理回数による各特性を把握することができた。抄紙した試験紙について物性試験を行い、NBKPへ綿繊維を添加することによる物性低下の影響を把握することができた。

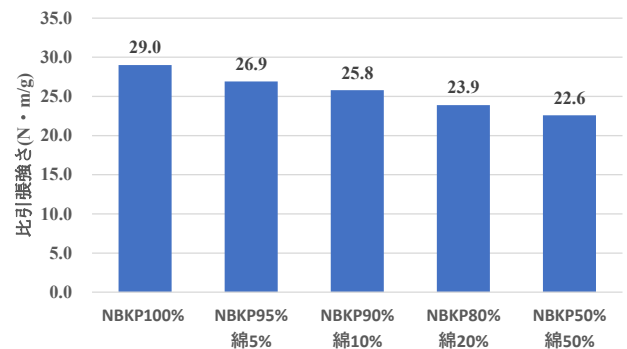


図3 試験紙の引張強さ試験結果

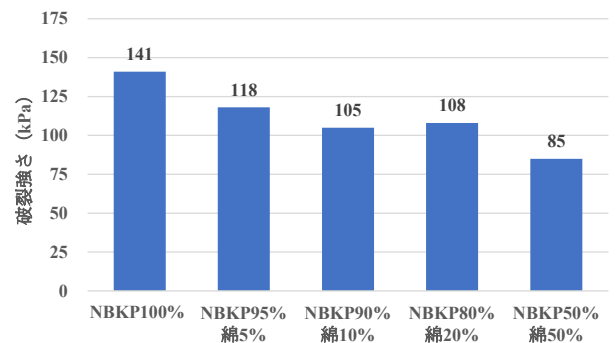


図4 試験紙の破裂強さ試験結果

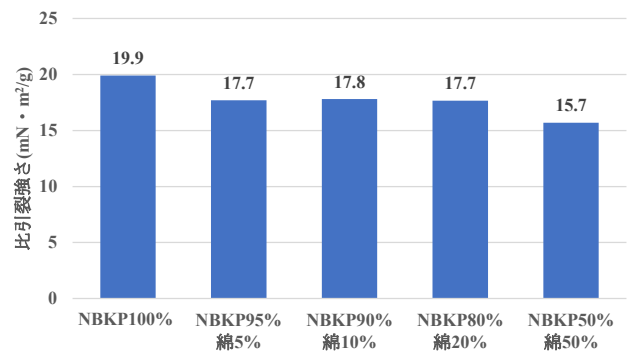


図5 試験紙の引裂き強さ試験結果

複合材料

カーボンニュートラルな材料を用いた脱炭素社会実現のための機能性材料の開発（第2報）

－PP／セルロース複合材料の耐衝撃性向上のための配合要素の検討－

浅倉秀一*

Development of functional materials using carbon-neutral materials to realize a decarbonized society (II)

- Investigation of formulation factors for improving the impact resistance of PP/cellulose composites-

ASAKURA Shuichi

本研究では、セルロース繊維強化ポリプロピレン（PP）複合材料における剛性向上と衝撃特性低下のトレードオフの関係に着目し、剛性を維持しつつ耐衝撃性を向上させることを目的として、熱可塑性エラストマー（TPE）を併用した材料設計を検討した。セルロース単独添加では引張および曲げ弾性率ならびに荷重たわみ温度は向上したが、特にノッチ無しシャルピー衝撃強度は低下した。一方、TPE 単独添加では衝撃強度は大幅に向上したものの、剛性および耐熱性は低下した。セルロースと TPE を適切な割合で併用することで、曲げ弾性率を維持・向上させつつ、ノッチ有りシャルピー衝撃強度を PP 単体以上に改善できることを示した。さらに、破断面観察および押出条件の検討から、界面構造および分散均一性、ならびにエラストマー相の塑性変形挙動が衝撃特性発現を支配する主要因であることを明らかにした。

1 はじめに

ポリプロピレン（PP）は、優れた加工性、耐薬品性、軽量性および低コスト性を有することから、自動車部品、建材、包装材など幅広い分野で利用されている代表的な熱可塑性樹脂である。近年、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、再生プラスチックの利用拡大やバイオ由来材料の活用が強く求められており、再生 PP への適用を見据えた材料設計指針の構築は重要な技術課題となっている。

再生 PP は、バージン材と比較して分子量低下や不純物混入の影響により、機械的特性や耐熱性が低下する傾向がある。そのため、再生 PP の実用範囲を拡大するためには、物性低下を補完する補強技術の導入が不可欠である。このような背景から、炭酸カルシウムなどの無機フィラーや、バイオ由来材料を用いた複合化による剛性向上や薄肉化による樹脂使用量削減が注目されている。天然繊維強化複合材料は、環境配慮型材料として広く研究されており、特にセルロース繊維は高い比強度と低比重を併せ持つことから、環境負荷低減と機械的特性向上を両立できる補強材として期待されている¹⁾²⁾。

昨年度は、低コストかつ環境負荷の小さいトイレットペーパー由来セルロースを PP に少量添加することで、引張および曲げ強度、弾性率、荷重たわみ温度（HDT）が向上することを報告した³⁾。しかし一方で、セルロース繊維の添加により材料が硬化し、シャルピー衝撃強度が低下するという課題も明らかとなった。特にノッチ無し条件における衝撃強度の低下は顕著であり、ノッチ有り条件においても衝撃強度の低下が認められた。

このような剛性向上と靱性低下のトレードオフの関係は、セルロース繊維強化 PP 複合材料において一般に指

摘されている課題である¹⁾²⁾。衝撃特性評価においては、ノッチ有り条件は既存欠陥を想定した材料耐性評価として広く用いられ、ノッチ無し条件は材料固有のき裂発生抵抗や延性挙動を評価する指標として重要である。衝撃強度に及ぼす添加剤やプロセスの影響についても多数報告されている¹⁾²⁾。したがって、両条件において安定した衝撃特性を示す材料設計が求められている。

本研究では、セルロース繊維強化 PP 複合材料における衝撃特性低下を改善するため、衝撃エネルギーを吸収・分散可能な熱可塑性エラストマー（TPE）に着目した。熱可塑性エラストマーは、熱可塑性プラスチックの加工性とゴム弾性を兼ね備えた材料であり、柔軟性や延性付与に利用される材料である⁴⁾。セルロースによる剛性強化と TPE による靱性付与を両立させる複合化手法を検討するとともに、界面構造および分散状態、さらに混練条件が破壊挙動および衝撃特性に及ぼす影響を体系的に評価し、配合設計およびプロセス条件が剛性と耐衝撃性のバランスに与える役割を明らかにすることを目的とした。

2 実験方法

2.1 材料

マトリックス樹脂として、サンアロマー製ホモポリプロピレン（PP, PM900A）を使用した。PP 本来の力学特性を基準として各配合要素の影響を明確に評価するため、ランダム共重合体ではなくホモポリマーを選定した。

補強材としてセルロース繊維を用いた。本研究では、市販のセルロース粉末（中越パルプ工業製ナノフォレストパウダー）ならびにセルロース含有 PP マスターバッチ（中越パルプ工業製ナノフォレスト MB; セルロース分 30 wt%、および大王製紙製セルロース MB; セルロース分 50 wt%）を用いた。

* 次世代技術部

セルロース単独添加系およびタフマー単独添加系では、外部からの相溶化剤添加は行わなかった。一方、セルロース MB を用いた複合系では、MB 中に含有される改質成分の影響を受けるが、その詳細組成は公表されていない。

靱性付与材として、エチレン- α -オレフィン共重合体系の熱可塑性エラストマー（TPE）（三井化学製タフマー）を使用した。

2.2 複合化および成形方法

セルロース粉末およびセルロース MB は、80℃で3時間乾燥後に使用した。PP および TPE は乾燥処理を行わず使用した。所定の配合比となるよう PP、セルロース粉末またはセルロース MB、および TPE をドライブレンドした後、二軸押出機（Thermo Scientific™ Process11）を用いて熔融混練を行った。押出条件は、スクリュー径 11 mm、L/D 比 40、シリンダ温度 190～200℃、スクリュー回転数 500 rpm とした。セルロース濃度は主に 5～10 wt%、TPE 濃度は 5～10 wt% とし、セルロース単独添加系、TPE 単独添加系、およびセルロースと TPE を併用した複合系を作製した。

得られた押出物はストランドカットによりペレット化し、再度 80℃で6時間真空乾燥した後、射出成形機（日精樹脂工業製 NPX7-1F）を用いて試験片を作製した。射出成形時のシリンダ温度は 200℃とした。成形後、80℃で6時間アニール処理を施した試験片を用いた。セルロース単独添加系については、アニール処理の有無による影響を評価するため、アニール有りおよび無しの試験片を作製した。

2.3 物性評価

引張試験および曲げ試験は、万能試験機（島津製作所製オートグラフ AG20-KNGMI）を用いて実施した。試験条件は JIS K 7161（引張）および JIS K 7171（曲げ）に準拠し、試験速度はいずれも 2 mm/min とした。引張試験ではつかみ具間距離を 58 mm とし、ダンベル型試験片を用いて引張応力および引張弾性率を評価した。曲げ試験では支点間距離を 64 mm とし、短冊形試験片を用いて曲げ応力および曲げ弾性率を評価した。引張、曲げ試験共、n=5 で測定した。

衝撃特性の評価にはシャルピー衝撃試験（JIS K 7111 準拠）を用いた。ハンマー容量 7.5 J を使用し、短冊形試験片に対しエッジワイズ方向で試験を行った。ノッチ有り試験片は、射出成形後に専用ノッチ加工機により V ノッチを付与した後に試験を実施した。ノッチ有りおよびノッチ無しの両条件について評価し、各条件 n=7 で測定した。

耐熱性の指標として荷重たわみ温度（HDT）を測定した。HDT 試験は JIS K 7191 に準拠し、短冊形試験片を用いて曲げ荷重 0.45 MPa、昇温速度 120℃/h の条件で実施した。

2.4 分散状態および破断面観察

複合材料中におけるセルロース繊維および TPE の分散状態を評価するため、光学顕微鏡および三次元粗さ解析電子顕微鏡（SEM; エリオニクス製 ERA-600G）を用いて観察を行った。

光学顕微鏡観察用試料は、射出成形後のダンベル型試験片中央部を切り出し、200℃に設定した熱プレスにより厚さ 15～20 μ m の薄膜に加工して作製した。得られた薄膜を光学顕微鏡により観察し、セルロースの凝集状態および分散均一性を評価した。

また、シャルピー衝撃試験後の破断面について SEM 観察を行い、ノッチ有りおよびノッチ無し条件における破壊形態の違いを比較した。

3 結果および考察

3.1 配合およびアニール処理が力学特性に及ぼす影響

まず、セルロース繊維を PP に 5 wt% 添加した系について評価を行った（表 1）。アニール処理後の試験片では、セルロース添加により引張弾性率は約 24%、曲げ弾性率は約 22% 向上し、明確な補強効果が確認された。一方で、シャルピー衝撃強度は低下し、特にノッチ無し条件において顕著な低下が認められた。これは、硬質なセルロース相の導入により塑性変形能が制限され、き裂進展が促進されたためと考えられる。

次に、アニール処理の影響について検討した。セルロース 5 wt% 添加系では、アニール処理により引張弾性率および曲げ弾性率はさらに増加し、曲げ強度および HDT についても向上する傾向が認められた。これは、アニール処理により PP の二次結晶化が進行し、結晶化度の増加やラメラ構造の安定化が生じたこと、さらに内部応力の緩和が進んだことによるものと考えられる。一方で、アニール処理後では最大引張応力およびシャルピー衝撃強度はアニール無し試験片と比較して低下する傾向が認められた。結晶化度の増加は剛性や耐熱性の向上に寄与する一方で、塑性変形能の低下を招き、延性破壊から脆性破壊への移行を促進するためと推察される。また、アニール処理を行わない場合には、成形直後と数週間後で物性値に差が生じることが確認された。これは、

表 1 セルロース 5 wt% 添加系におけるアニール処理の有無が力学特性に及ぼす影響

特性	PPのみ アニール有り	中越パルプセル ロース粉末5wt% アニール無し	中越パルプセル ロース粉末5wt% アニール有り
引張応力(MPa)	32.0	37.1	32.7
引張弾性率(GPa)	1.77	2.05	2.20
曲げ応力(MPa)	47.6	50.5	52.5
曲げ弾性率(GPa)	1.61	1.89	1.97
シャルピー衝撃強度 ノッチ有り(kJ/m ²)	1.78	2.16	1.71
シャルピー衝撃強度 ノッチ無し(kJ/m ²)	88.6	33.5	31.8
荷重たわみ温度(℃)	102	102	109

時間経過に伴う二次結晶化の進行や内部応力の緩和に起因するものと考えられる。このため、本研究では物性値を安定化させる目的で、以降の評価はアニール処理後の試験片に統一した。

このように、セルロース添加により剛性は向上するものの、衝撃特性が低下するという課題が明確となった。そこで、この衝撃強度低下を補うために、本研究では熱可塑性エラストマー（TPE）を添加することとした。

TPE を 10 wt%単独添加した系では、引張弾性率、曲げ弾性率および HDT はいずれも PP 単体より低下した。一方、シャルピー衝撃強度は PP 単体比で、ノッチ有り条件において約 150%向上し、ノッチ無し条件でも約 42%向上した（表 2）。これは、PP 中に分散した柔軟なエラストマー相が衝撃負荷時に変形し、エネルギー吸収および応力緩和機構として機能したためと推察される。このように、TPE 単独添加では耐衝撃性は向上するものの、剛性の低下は避けられず、剛性と靱性の両立は困難であった。

以上の結果を踏まえ、セルロースによる剛性向上効果と TPE による靱性向上効果を両立させることを目的として、セルロースおよび TPE の配合割合を種々検討した。本報告では、良好な結果が得られたセルロース 5 wt%/TPE 5 wt%系および 10 wt%/10 wt%系の結果を示す（表 3）。その結果、ノッチ有りシャルピー衝撃強度は、セルロース 10 wt%/TPE10 wt%系において PP 単体比で約 110%向上し、セルロース単独添加系で顕在化していた衝撃強度低下が大きく改善された。一方、ノッチ無し条件では、セルロース単独添加系では PP 単体比で約 64%の低下を示したのに対し、セルロース 5 wt%/TPE 5 wt%系では低下率は約 40%に抑制された。標準偏差を考慮してもこの改善傾向は明瞭であった。ノッチ有り条件とノッチ無し条件では最も高い改善効果を示す配合割合が異なる傾向が認められたが、これはき裂発生条件および破壊進展挙動の違いに起因する可能性があり、その詳細は後述する。

また、複合系においては曲げ弾性率は PP 単体より向

表 2 TPE (10 wt%)単独添加系と PP 単体の力学特性比較

特性	PPのみ	TPE10wt%
引張応力(MPa)	32.0	27.4
引張弾性率(GPa)	1.77	1.48
曲げ応力(MPa)	47.6	38.1
曲げ弾性率(GPa)	1.61	1.27
シャルピー衝撃強度 ノッチ有り(kJ/m ²)	1.78	4.44
シャルピー衝撃強度 ノッチ無し(kJ/m ²)	88.6	126
荷重たわみ温度(°C)	102	98.7

表 3 セルロース/TPE 複合系（5 wt%/5 wt%および 10 wt%/10 wt%）の力学特性比較

特性	PPのみ	ナノフォレスト トMB 5wt% + TPE 5wt%	ナノフォレスト トMB 10wt% + TPE 10wt%
引張応力(MPa)	32.0	31.3	30.9
引張弾性率(GPa)	1.77	1.87	1.80
曲げ応力(MPa)	47.6	47.2	46.7
曲げ弾性率(GPa)	1.61	1.70	1.81
シャルピー衝撃強度 ノッチ有り(kJ/m ²)	1.78	2.86	3.72
シャルピー衝撃強度 ノッチ無し(kJ/m ²)	88.6	52.9	41.1
荷重たわみ温度(°C)	102	108.9	111.4

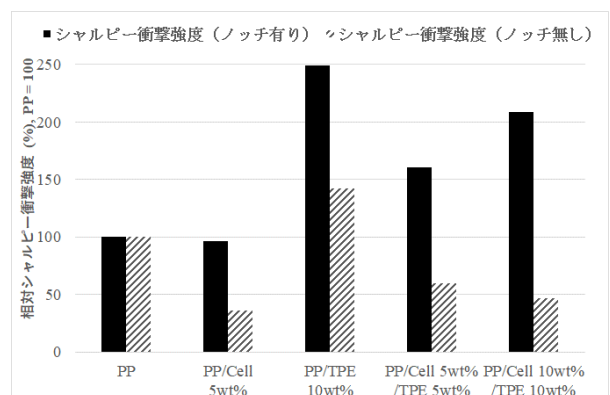


図 1 各配合系におけるシャルピー衝撃強度（ノッチ有り／無し）の比較（PP 単体=100%）

上した一方で、最大引張応力および曲げ応力は PP 単体と同等程度を維持しており、著しい強度低下は認められなかった。すなわち、セルロースによる剛性向上効果を維持しながら、TPE の導入により衝撃特性の改善が達成されたことが示された。

これらの配合設計による衝撃特性の変化を図 1 にまとめて示す。なお、衝撃強度は PP 単体を 100%とした相対値で示した。図 1 より明らかなように、セルロース単独添加では衝撃特性が低下する一方、TPE 単独添加では大幅に向上し、両者を併用することで剛性を維持しつつ衝撃特性を改善できることが視覚的にも確認できる。

以上より、本研究で検討した PP/セルロース/TPE 複合材料においては、弾性率および曲げ特性は主としてセルロース添加およびアニール処理による結晶化度増加により向上し、耐衝撃特性は TPE 相による応力緩和およびき裂進展抑制機構により支配されることが示された。一方、最大引張応力は界面状態および微視的構造における最弱点に支配されることが明らかとなった。すなわち、配合設計により剛性と靱性のバランス改善は可能である一方で、最大引張強度のさらなる向上には界面接着性および分散状態の制御が重要であることが示唆された。

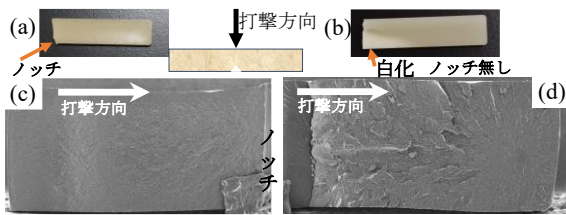


図 2 PP 単体試験片のシャルピー衝撃試験後の外観および破断面 SEM 像：(a) ノッチ有り試験片外観、(b) ノッチ無し試験片外観、(c) ノッチ有り破断面 SEM 像（低倍率）、(d) ノッチ無し破断面 SEM 像（低倍率）

3.2 破断面観察による衝撃破壊挙動の考察

3.1 で示したように、セルロース単独添加系では剛性は向上するものの衝撃特性は低下し、TPE 単独添加系ではその逆の傾向が認められた。一方、両者を併用することで剛性と靱性のバランス改善が可能であることが示された。本節では、これらの力学特性の違いが破壊挙動とどのように対応しているかを明らかにするため、シャルピー衝撃試験後の破断面を SEM により観察し、ノッチ有りおよびノッチ無し条件における破壊様式の違いについて考察した。

まず、PP 単体試験片の外観および破断面を図 2 に示す。ノッチ有り条件では破断面は比較的平滑で光沢を有し、顕著な塑性変形は認められなかった（図 2(c)）。これはノッチ先端に生じた強い応力集中により亀裂が急速に進展する脆性的破壊が支配的であったことを示している。一方、ノッチ無し条件では試験片外観に白化が観察され（図 2(b)）、破断面は凹凸の大きい粗い形状を示した（図 2(d)）。これは材料内部でき裂が新たに発生し、広範囲に塑性変形を伴う延性的破壊が生じたことを示唆している。

次に、セルロース 5 wt%を単独添加した複合材料の破

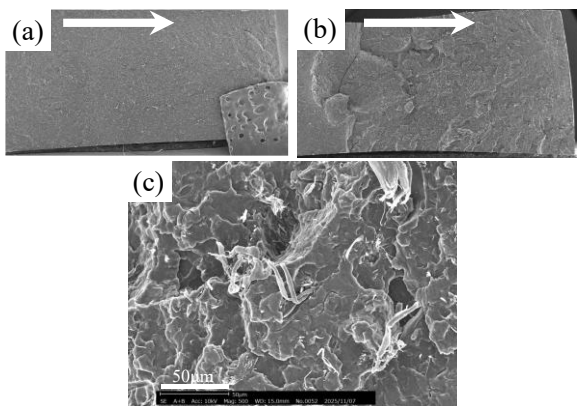


図 3 セルロース 5 wt%単独添加系のシャルピー衝撃試験後の破断面 SEM 像：(a) ノッチ有り破断面、(b) ノッチ無し破断面、(c) ノッチ無し破断面（高倍率）

断面を図 3 に示す。ノッチ有り条件では PP 単体と同様に比較的平滑な破断面が観察され、脆性的破壊の傾向が強かった。一方、ノッチ無し条件では破断面に不均一な凹凸や界面剥離痕が認められ、セルロース繊維の凝集部や PP との界面が破壊起点となっている可能性が示唆された。これらの結果は、セルロース添加により弾性率は向上するものの、界面状態や微視的構造の不均一性に起因して局所的な応力集中が生じやすく、その結果として衝撃強度が低下することを支持するものである。

続いて、TPE10 wt%を単独添加した系では、ノッチ有りおよびノッチ無しのいずれの条件においても、破断面は微細な凹凸を伴う延性的な破壊形態を示した。PP マトリックス中に分散した TPE 相は数 μm スケールのドメインとして存在し、衝撃負荷時にこれらのエラストマー相が塑性変形することでエネルギー吸収および応力緩和機構として機能したと考えられる。このような延性化挙動は、3.1 で示したシャルピー衝撃強度の大幅な向上と整合する。

さらに、セルロース 5 wt%/TPE5 wt%を併用した複合材料の破断面を図 4 に示す。ノッチ有り条件では、破断面に繊維状構造と微細な凹凸構造が同時に観察され、セルロース繊維の引き抜き様挙動および TPE ドメインの塑性変形痕が確認された。高倍率観察では、TPE 相が変形し空洞状構造を形成している様子が観察され、これらのエラストマー相が亀裂先端近傍でエネルギー吸収に寄与したことが示唆された。この挙動は、3.1 で示したノッチ有りシャルピー衝撃強度の大幅な向上と整合する。

一方、ノッチ無し条件では、セルロース単独添加系で顕著であった界面起点の脆性的破壊は緩和されていたが、改善幅はノッチ有り条件ほど大きくはなかった。

SEM 観察から、TPE 相は平均 2~5 μm 程度のドメインとして観察されたのに対し、セルロース繊維はそれより大きいスケールで存在していることが確認された。こ

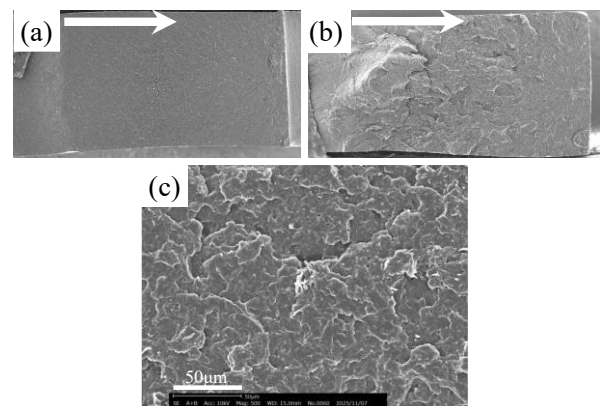


図 4 セルロース 5 wt%/TPE 5 wt%複合系のシャルピー衝撃試験後の破断面 SEM 像：(a) ノッチ有り破断面、(b) ノッチ無し破断面、(c) ノッチ有り破断面（高倍率）

のスケール差により、TPE 相はき裂先端近傍での局所的な応力緩和およびエネルギー散逸を担い、セルロース相は荷重分担による剛性向上に寄与するという役割分担が生じたと考えられる。

さらに、同じ複合系内で配合比を増加させた場合の影響について検討したところ、セルロースおよび TPE の体積分率増加に伴い、曲げ弾性率およびノッチ有り衝撃強度が向上する傾向が認められた。曲げ弾性率の増加はセルロース体積分率の増大による補強効果の強化に起因すると考えられる。一方、ノッチ有り条件ではノッチ先端からの亀裂進展挙動が衝撃特性を支配しており、エラストマー相の体積分率増加によりき裂先端近傍での応力緩和域が拡大したことが衝撃強度向上に寄与したと推察される。

ただし、引張強度および曲げ強度が同様に顕著に増加しなかった点については、強度特性が材料中の最弱部に支配されることによると考えられる。引張試験および曲げ試験における破壊は、主として引張側の界面状態や三相境界などの微視的構造的不均一部から開始するため、体積分率増加のみでは最大応力は必ずしも向上しない。この傾向は 3.1 で整理した結果とも整合する。

以上の破断面観察結果より、セルロース繊維と TPE の併用による衝撃特性改善は、破壊様式の延性化および亀裂進展抑制機構と密接に関係しており、その効果はエラストマー相の分散スケールおよび各相の体積分率に依存することが示唆された。特に、分散状態および界面構造の制御が力学特性発現の鍵となる。この点については、次節においてセルロース分散性および混練条件の影響としてさらに検討する。

3.3 セルロース分散性および混練・押出条件が物性に及ぼす影響

セルロース繊維強化 PP 複合材料においては、3.1 で示したように、最大引張応力は界面状態および分散均一性に強く依存することが明らかとなった。図 5 に示すフィルム観察結果からも、セルロース単独系および複合系においてセルロース凝集部の存在が確認されており、これらの凝集部が局所的な応力集中源となる可能性が示唆される。したがって、配合比のみならず、混練および押出工程における分散状態の制御が最終物性に大きな影響を及ぼすと考えられる。本節では、セルロース MB を用い

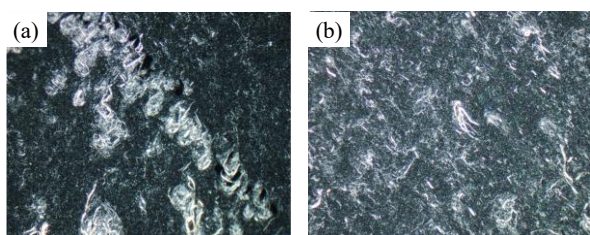


図 5 セルロース分散状態の光学顕微鏡観察結果
(a)セルロース単独系、(b)セルロース/TPE 複合系

表 4 セルロース 10 wt%系における押出有無が力学特性に及ぼす影響

特性	PPのみ	大王製紙MB 10wt% 押出無	大王製紙MB 10wt% 押出有
引張応力(MPa)	32.0	33.2	37.9
引張弾性率(GPa)	1.77	2.30	2.52
曲げ応力(MPa)	47.6	55.7	60.1
曲げ弾性率(GPa)	1.61	2.30	2.26
シャルピー衝撃強度 ノッチ有り(kJ/m ²)	1.78	1.59	1.89
シャルピー衝撃強度 ノッチ無し(kJ/m ²)	88.6	12.4	33.2
荷重たわみ温度(°C)	102	138	125

表 5 セルロース 10 wt%/TPE 10 wt%系における押出回数の違いが力学特性に及ぼす影響

特性	PPのみ	大王製紙MB 10wt%TPE10 wt%押出1回	大王製紙MB 10wt%TPE10 wt%押出2回
引張応力(MPa)	32.0	31.3	29.8
引張弾性率(GPa)	1.77	2.22	2.07
曲げ応力(MPa)	47.6	49.8	47.8
曲げ弾性率(GPa)	1.61	2.02	1.87
シャルピー衝撃強度 ノッチ有り(kJ/m ²)	1.78	3.34	2.52
シャルピー衝撃強度 ノッチ無し(kJ/m ²)	88.6	33.7	35.9
荷重たわみ温度(°C)	102	122	117

た場合における押出工程の有無、ならびに押出回数の違いが力学特性および衝撃特性に及ぼす影響について検討した。

まず、セルロース含有率を 10 wt%に統一し、ドライブレンド後に直接射出成形した試験片（押出無し）と、二軸押出機により熔融混練した後に射出成形した試験片（押出有り）を比較した（表 4）。その結果、引張応力、曲げ応力およびノッチ有りシャルピー衝撃強度は、押出有り試験片の方が押出無し試験片より高い値を示した。一方、曲げ弾性率および HDT については、押出無し試験片が高い値を示す場合が認められた。

次に、セルロースおよび TPE を併用した複合材料（セルロース 10 wt%/TPE10 wt%系）について、押出回数の影響を検討した（表 5）。その結果、ノッチ無しシャルピー衝撃強度を除く各特性において、押出 1 回で作製した試験片が押出 2 回で作製した試験片より高い値を示した。特にノッチ有りシャルピー衝撃強度は、押出 1 回で平均 3.34 kJ/m²、押出 2 回で 2.52 kJ/m²となり、押出 2 回で明確な低下が認められた。一方、ノッチ無し衝撃強度は押出 1 回で 33.7 kJ/m²、押出 2 回で 35.9 kJ/m²であり、ばらつきを考慮すると両者は概ね同程度と判断した。

図 6 に、セルロース MB 単独系および MB/TPE 複合系における押出条件の違いによるノッチ有りシャルピー

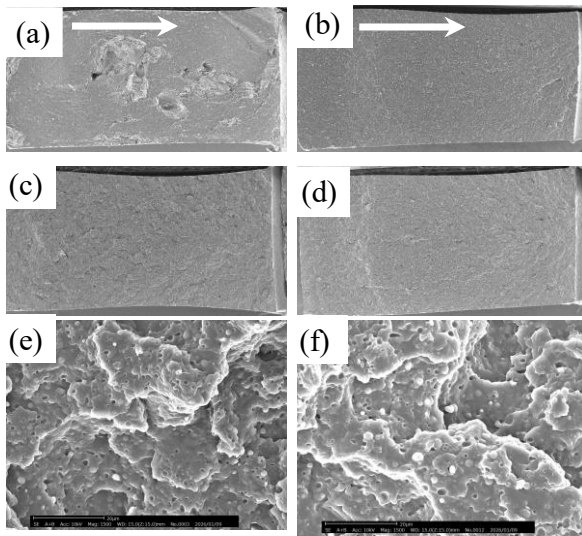


図6 セルロース MB 単独系および MB/TPE 複合系における押出条件の違いによるノッチ有りシャルピー衝撃試験後破断面の SEM 像：(a) MB 単独：押出無し、(b) MB 単独：押出有り、(c) 複合系：押出1回、(d) 複合系：押出2回、(e) 複合系：押出1回（高倍率）、(f) 複合系：押出2回（高倍率）

衝撃試験後の破断面 SEM 像を示す。セルロース MB 単独系では、押出無し試験片においてセルロースの凝集体が明瞭に観察され、分散が不均一であることが確認されたのに対し、押出有り試験片ではセルロース繊維が比較的均一に分散していた。押出混練により凝集体が解砕され、マトリックス中での繊維分散が向上したことが、強度およびノッチ有り衝撃特性の改善につながったと考えられる。

一方で、押出無し試験片において曲げ弾性率および HDT が高くなる場合があったのは、射出成形時にスキン層近傍へセルロースが局所的に偏在し、高配向構造が形成された可能性によると推察される。このような局所的高剛性層は曲げ負荷や高温下での変形抵抗に寄与する一方で、構造の不均一性に起因する靱性低下の要因ともなり得る。実際にシェア D 硬度を測定したところ、押出無し試験片では測定位置によるばらつきが大きく、局所的に高い硬度を示す箇所が確認されたのに対し、押出有り試験片では硬度は比較的均一であった。この結果は、押出無し試験片における表層構造の不均一性を示唆するものである。

MB/TPE 複合系では、低倍率観察において押出1回試験片の方が押出2回試験片より凹凸の大きい破断面を示す傾向が認められた。高倍率観察では、押出2回試験片では TPE ドメインが比較的原形を保って残存していたのに対し、押出1回試験片では TPE ドメインのより大きな変形痕が観察された。これらの結果は、押出1回試験片では TPE 相が破壊時により大きく塑性変形し、衝撃エネルギー吸収に寄与した可能性を示唆する。一方、

押出2回試験片では TPE 相による塑性変形が十分に生じず、界面剥離が優先したことでエネルギー散逸が抑制されたと考えられる。この挙動は、押出2回試験片でノッチ有り衝撃強度が低下した結果とも整合する。

このような押出回数による TPE 変形能の差は、衝撃試験条件によって異なる形で現れた。ノッチ有り条件では既存き裂の進展抵抗が支配的であるため、TPE 相の塑性変形能の差が衝撃特性に直接反映されたと考えられる。一方、ノッチ無し条件ではき裂発生が支配的となるため、押出回数の影響は顕著でなかったと推察される。

以上の結果より、セルロース繊維強化 PP 複合材料においては、配合設計のみならず、混練・押出条件の最適化が極めて重要であることが明らかとなった。均一分散を確保するための適度な押出混練は強度およびノッチ有り衝撃特性の向上に寄与する一方、過剰な混練は繊維の破断による短繊維化やマトリックス特性変化、さらには TPE 相のエネルギー吸収能の低下を通じて物性低下を招く可能性がある。したがって、分散均一性と繊維形態維持、さらにエラストマー相の変形能を両立させるプロセス設計が重要である。

4 まとめ

本研究では、セルロース繊維強化 PP 複合材料における剛性向上と衝撃特性低下のトレードオフ改善を目的に、熱可塑性エラストマー（TPE）を併用した材料設計を検討した。セルロース添加により弾性率および HDT は向上したが、衝撃特性は低下した。一方、TPE 単独添加では衝撃特性は向上するものの、剛性および耐熱性は低下した。両者を併用することで、曲げ弾性率を維持しつつノッチ有り衝撃強度を PP 単体以上に改善できることを示した。破断面観察からは、セルロース相による荷重分担と TPE 相によるき裂進展抑制が同時に作用することで破壊様式が延性化することが示唆された。さらに、混練・押出条件は分散状態および衝撃特性に影響し、押出回数の増加による過度な混練はエネルギー吸収機構を阻害する可能性が示された。以上より、配合設計とプロセス設計を統合的に最適化することで剛性と耐衝撃性のバランス改善が可能であることを明らかにした。今後は界面構造および分散状態の制御により、ノッチ無し条件を含めた衝撃特性のさらなる向上を目指す。

【参考文献】

- 1) Sobczak L., et al., Composites Science and Technology, Vol.72, No.5, pp550-557, 2012.
- 2) Mihalic M., et al., Journal of Composites Science, Vol.3, No.3, pp82-94, 2019.
- 3) 浅倉ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp.69-72, 2025.
- 4) 竹村泰彦, 日本ゴム協会誌, Vol.83, No.9, pp269-276, 2010.

D Xを活用した繊維配向樹脂の成形技術に関する研究（第1報）

栗田貴明*、西垣康広*、山田孝弘*

Study on molding technologies for fiber-oriented resins utilizing digital transformation（I）

KURITA Takaaki*, NISHIGAKI Yasuhiro* and YAMADA Takahiro*

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic：CFRP と記す）サンドイッチ材の立体成形を目的として、混抄シートを用いた膨張型コア材を作製し、成形性と力学特性を評価した。加熱による炭素繊維のスプリングバックによりコア材は最大4倍まで膨張することを確認した。圧縮試験では膨張量の増加に伴う内部空隙の増加により、圧縮強度が低下する傾向が示された。X線CT観察では、膨張量の増加による空隙の増加が確認でき、コア材作製時における成形条件の最適化が必要であることが明らかとなった。

1 はじめに

近年、軽量化と高剛性化を同時に満たす構造材料への要求は、航空宇宙分野、自動車分野、産業機械分野、スポーツ用品分野など、多岐にわたる分野で高まっている。中でもCFRPは、比強度および比剛性に優れ、耐疲労性や耐腐食性にも優れることから、金属材料に代わる次世代材料として注目されている。

また、さらなる軽量化およびコスト削減を目的として、熱可塑性炭素繊維強化プラスチック（CFRTP と記す）をスキン材とし、軽量なコア材と組み合わせたサンドイッチ材の適用が進められている。サンドイッチ材は、曲げ剛性の向上、局所座屈の抑制、振動特性の改善などの利点を有する。一方で、界面接着特性、繊維配向、成形プロセスなど、性能に影響を及ぼす要因が多く、成形手法の検討が必要とされている。特に、CFRTP サンドイッチ材の立体成形においては、剛性の異なるスキン材とコア材を同時に成形する際に、コア材が圧壊する課題があり、実用的な成形手法は十分に確立されていない。また、成形したCFRTP サンドイッチ材には、曲げ強度、圧縮強度、せん断強度といった各種強度が求められており、必要強度に応じたスキン材とコア材の選定が重要となっている。

このような課題を解決するため、当センターではこれまでの研究においてCFRTP サンドイッチ材の立体成形に取り組み、お盆形状の成形に成功している¹⁾。この際、スプリングバックを利用して膨張するコア材を開発し、このコア材を用いることでスキン材およびコア材を同時に任意形状へ賦形する成形手法を検討しており、厚みが数ミリ程度の製品であればこの手法で成形が可能であることを確認した。今後、より多様な立体形状の成形をするにあたり、コア材の強度特性、内部構造、繊維配向などの情報は、成形品の強度設計および信頼性評価において重要となる。前報において、コア材の曲げ強度を評価

したが、圧縮強度についても評価を行う必要があるため、本研究では、CFRTP サンドイッチ材に用いるコア材の性能評価を目的として、各種評価を実施した。

2 実験

2.1 材料

コア材はタッピ抄紙法を用いて作製した混抄シートを使用して作製した。混抄シートの材料には、ポリプロピレン樹脂繊維（JNC株製、PP 繊維と記す）と炭素繊維（日本ポリマー産業株製）を使用した。繊維長は、PP 繊維が5mm、炭素繊維が6mmである。

2.2 コア材の作製

PP 繊維および炭素繊維を水中で分散させて混合した後、タッピシートマシン（株東洋精機製作所製、角形シートマシン（200×250mm））で抄紙を行い、簡易プレスで乾燥させて混抄シートを作製した。混抄シートの坪量は2000g/m²とした。作製した混抄シートを複数枚積層し、熱プレス成形することでコア材となるCFRTP板を作製した。作製した混抄シートおよび積層した混抄シートを図1、図2に示す。図2に示す積層した混抄シート



図1 混抄シート

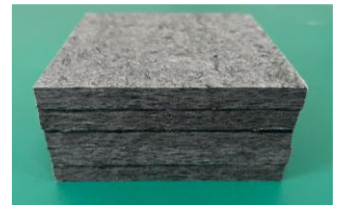


図2 積層した混抄シート



図3 作製したコア材

* 次世代技術部

トを熱プレス成形により図3に示すコア材を作製した。成形条件は、成形温度 190 °C、プレス圧力 20 MPa とし、厚み 10 mm のスペーサーを用いることで、板厚が 10 mm となるように調整した。

2.3 スプリングバックによるコア材の膨張

前節で作製したコア材は加熱することでスプリングバックにより膨張し、厚みが大幅に増加する。その特性を利用し、強度評価用の試験片を作製した。図4にコア材加熱時の概略図を示す。図4のように熱プレス成形機内部にコア材（厚み 10 mm）をセットし、190 °Cにて 10～15 分程度加熱し任意の厚みまで膨張させた。厚みは 20 mm（2 倍膨張）、30 mm（3 倍膨張）、40 mm（4 倍膨張）の 3 種類とした。膨張前後の各種コア材を図 5(a) から(d)に示す。膨張量が大きいほど指定の厚みまで膨

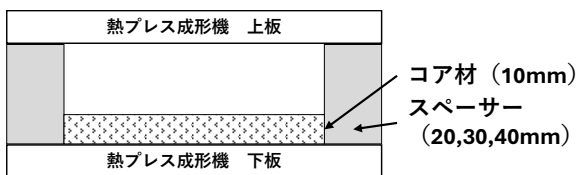


図4 コア材加熱時の概略図

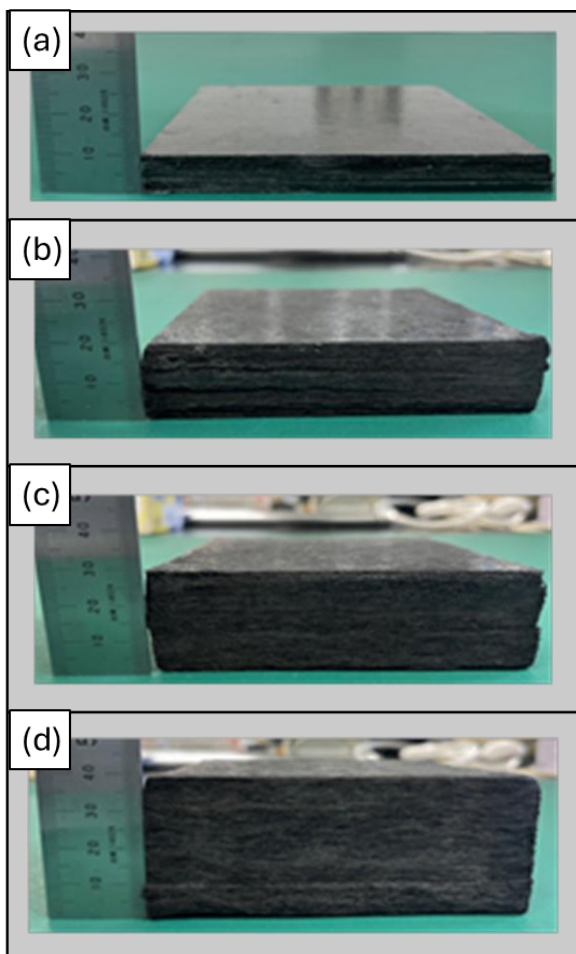


図5 膨張前後の各種コア材
(a)加熱前、(b)2 倍膨張品、
(c)3 倍膨張品、(d)4 倍膨張品

張するのに要する時間が長くなる傾向にあった。5 倍膨張も試みたが、膨張による空隙の増加により直方体形状を維持できず圧縮強度試験を行うことが困難であった。

2.4 コア材膨張時の温度測定

コア材膨張時に表面と内部で温度差が発生している可能性があり、均一に膨張していないことが懸念されたため、熱電対を図5のように設置し、表面と内部の温度測定を行った。なお、温度測定は、温度差が最も大きくなると考えられる4 倍膨張時に行った。

2.5 コア材の圧縮強度試験

2.3 で作製したコア材 3 種類について、万能試験機（Instron 製、5985 型）を使用して圧縮強度試験を行った。圧縮治具には直径 150 mm の円形加圧板を使用し、試験速度は（試験片厚みの 10 %）/min とした。圧縮強度は試験片が 10 %変形するまでに到達した最大の荷重をもとに算出した。

2.6 X 線 CT によるコア材の内部評価

膨張後のコア材の内部状態は、マイクロ X 線 CT（東芝 IT コントロールシステム(株)製、TOSCANER-32300μFD）と解析ソフト（ボリウムグラフィックス(株)製、VGSTUDIO MAX）を使用して評価した。観察した試験サンプルは、加熱前、2 倍膨張品、3 倍膨張品、4 倍膨張品の 4 種類である。

3 結果及び考察

3.1 コア材膨張時の温度測定結果

測定の結果、コア材加熱時のコア材の表面と内部の温度差は約 10～11°Cであった。このため、スプリングバックによる膨張は、表面近傍から開始するため、均一にスプリングバックができていない可能性が懸念された。この点については、3.3 で詳しく記述する。

3.2 圧縮強度試験結果

加熱により膨張したコア材と市販品発泡体 A、B の密度、圧縮強度、圧縮強度/密度を表1に示す。表1より、コア材 2 倍膨張時の圧縮強度は 4.1 MPa、3 倍膨張時は 1.0 MPa、4 倍膨張時は 0.4 MPa となり、コア材膨張量が大きくなるほど圧縮強度は低下した。これは、コア材膨張量が大きくなるほど内部の空隙が増加するため、圧縮強度が低下すると考えられる。圧縮強度/密度においても、膨張量が大きくなるほど圧縮強度/密度は低下する傾向が見られた。また、市販品発泡体 A、B の圧縮強度/密度は、本研究で作製したコア材よりも高い結果であった。しかし、市販品のコア材は形状加工が困難である

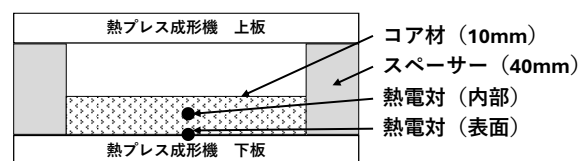


図6 温度測定時の概略図

ため、賦形を行う場合は削り出しが一般的な手法である。一方、本研究で作製したコア材は、加熱のみで任意形状の賦形が可能であるため、成形性において優位性が高い。また、膨張量を制御することで必要に応じた強度とすることが可能であるため、製品に応じた強度設計ができる。しかし、強度が市販品に比べて低いことは適用範囲を狭める要因となるため、市販品と同等の値まで強度の向上を目指し、使用材料の選定や作製手法の最適化を行う必要がある。

表1 各種コア材の圧縮強度試験結果

サンプル	密度 (kg/m^3)	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度/密度 (10^{-3})
2倍膨張品	490	4.1	8.32
3倍膨張品	325	1.0	3.21
4倍膨張品	233	0.4	1.70
市販品 A	32	0.4	12.50
市販品 B	105	1.4	13.33

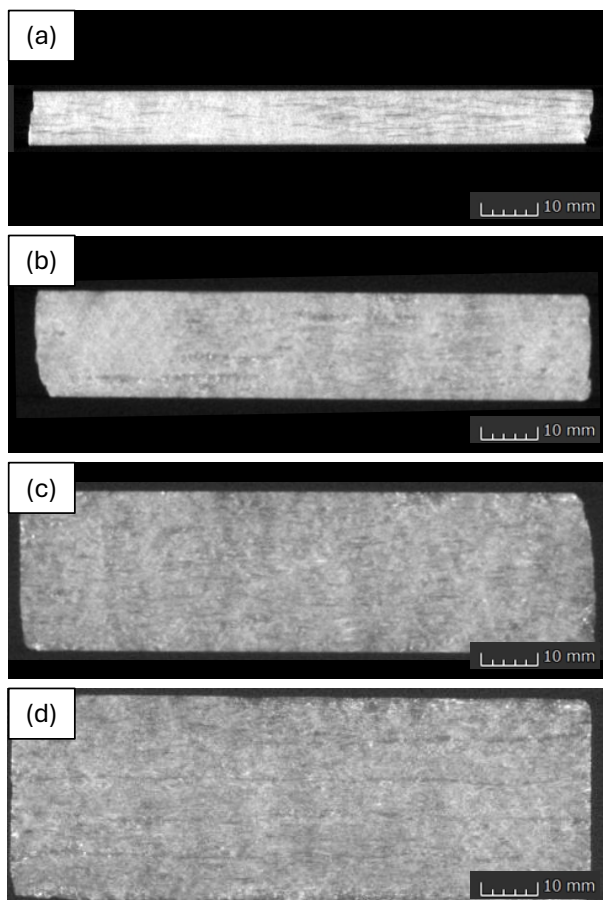


図7 加熱前後の各種コア材の X 線 CT 観察結果

(a)加熱前、(b)2 倍膨張品、
(c)3 倍膨張品、(d)4 倍膨張品

3.3 X 線 CT によるコア材の内部評価結果

X 線 CT によるコア材の加熱前、2 倍膨張品、3 倍膨張品、4 倍膨張品の内部観察結果を図 7(a)、(b)、(c)、(d)に示す。X 線 CT 像は、コア材の膨張方向に対して直行する方向から観察した結果である。図 7(a)から、コア材作製時において内部に大きな欠陥は存在していないことが確認された。図 7(b)、(c)から、膨張により局所的に樹脂が足りないことによる空隙は存在しているが、大きな層間剥離やボイド等の欠陥は見られなかった。図 7(d)から、膨張方向と直行する方向に筋のような空隙が確認された。これは、コア材作製時に混抄シートを複数枚積層（図 2）してコア材を作製しているため、混抄シートの界面において界面同士の溶融が不完全であるため、膨張により空隙となったためであると考えられる。この問題の解決には、コア材作製時の加熱温度を上げることで界面同士の溶融を十分に行う方法と、混抄シートの単層作製方法が考えられる。後者の方法では混抄シート自体を厚く作製するため、坪量の大幅な増加が必要となる。しかし、装置の大型化が必要となるため、当センターでの作製は困難である。コア材の均一な膨張は、強度や形状賦形に大きく影響をおよぼすため、今後は前者の方法にて改善を行う予定である。

4 まとめ

本研究では、CFRTP サンドイッチ材に用いるコア材の性能評価を目的として、混抄シートを用いたコア材を作製し、その膨張挙動および力学特性を評価した。加熱によるスプリングバックを利用することで、最大 4 倍までの安定した膨張が可能であることを確認した。一方、膨張量の増加に伴い内部空隙が増加し、圧縮強度が低下する傾向が明らかとなった。X 線 CT 観察により、4 倍膨張品においてコア材の作製方法に起因する空隙の発生が確認された。今後は、界面溶融の改善を目的としたコア材作製条件の最適化および市販コア材と同等の強度発現を目指す。

【謝 辞】

サンプルの提供にご協力いただきました JNC 株式会社様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 栗田ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp77-80,2025

二液型接着剤の接着工程効率を改善するデバイスの開発（第1報）

西村太志*、栗田貴明*

Development of a device to mix two component adhesive efficiently(I)

NISHIMURA Futoshi* and KURITA Takaaki*

二液型接着剤は主剤と硬化剤を定められた比率で均一に混合した後に接着すると所定の接着力を発揮する。混合作業にスタティックミキサーを利用すると誰でも定められた比率で均一に混合できる。しかし、スタティックミキサーを使うと中に残留した接着剤は利用できず廃棄される欠点がある。この研究の目的は均一に混合でき、同時に内部に残留する接着剤の量を従来品より少なくできるスタティックミキサーを開発することである。本報では接着の良否を判断するため、混合不足の接着剤に対する接着強度への影響や硬化時間を調査した。

1 はじめに

自動車では車体の重量を軽くし、剛性を高くするほど走行性能が向上する¹⁾。軽量化と高剛性化を実現するには、異種材料を適材適所に用いる「マルチマテリアル化」が必要と言われている²⁾。従来の金属製車体は溶接で接合していたが、異種材料製車体では構造用接着剤による接着が有望な接合手段である。構造用接着剤の代表であるエポキシ樹脂接着剤は、一液型と二液型があるが、本報では加熱不要な二液型接着剤に注目する。二液型接着剤は塗布前に定められた比率で均一に混合する必要があり、混合には外部動力により強制的に混合するダイナミックミキサーや自転公転式かくはん機、あるいは外部動力を使わないスタティックミキサーが利用される。特に接着面積が小さいものを扱う現場ではスタティックミキサーがよく使われている。しかしスタティックミキサー内に残留した接着剤は廃棄されてしまうことが課題である。

本研究の目的は混合容積が小さく、かつ均一に混合できるスタティックミキサーを開発することである。本報では、混合度を知るため、レオメーターで硬化時間を調べ、DCB (Double Cantilever Beam) 試験で接着力を調べる。これにより十分な混合を定量化し、本研究の目的に合うスタティックミキサー開発に適用する。

2 実験装置

レオメーター（ティー・エイ・インスツルメント製 Discovery HR-2）で動的粘弾性を測定し、接着剤が硬化する時間を調べる。ここでは直径 25mm のアルミ合金製平行プレートを用い、温度 30℃、ギャップ 1000 μm、ひずみ 0.1%、周波数 1Hz となるように回転振動を与えて動的粘弾性を測定する。

DCB 試験はインストロン製万能試験機 5985 型で行う。ロードセルの容量は 5kN または 50kN である。試験片の

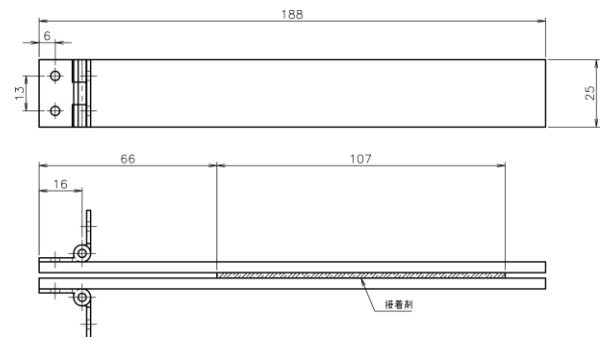


図1 DCB 試験片

形状を図1に示す。被着材の材質はA6061であり、接着面はサンドブラスト処理を行っている。

3 結果および考察

3.1 接着剤の硬化時間

前報³⁾で市販のスタティックミキサー（3M 製 EPX S/G/NOZ）を改造し、接着剤の混合が不足する状態を実現した。図2にスタティックミキサーを示す。(a)が市販のスタティックミキサーの外観であり、(b)がスタテ

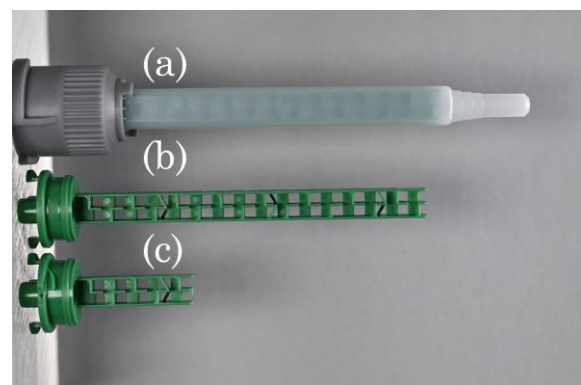


図2 スタティックミキサー外観
(a)市販品 (b)市販品の内部流路 (c)切断した内部流路

* 次世代技術部

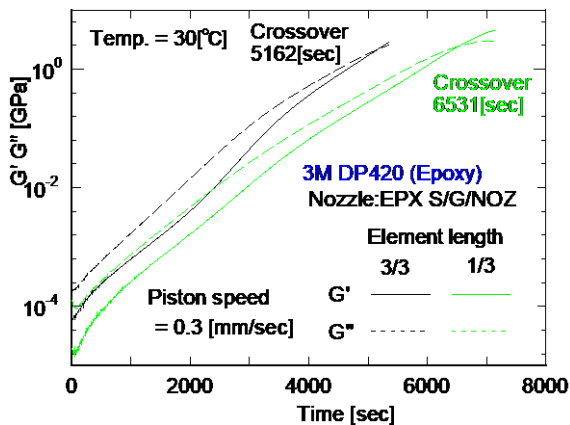


図3 動的粘弾性の時間変化

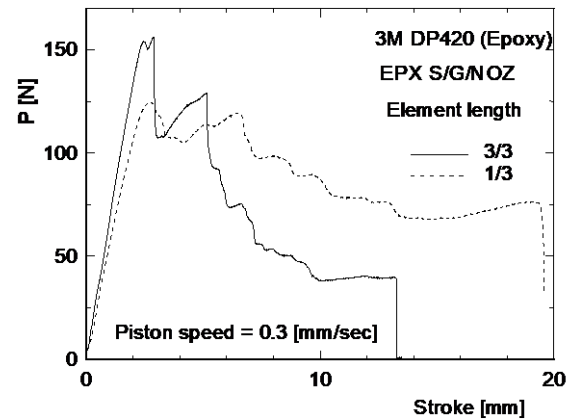


図5 開口変位と荷重

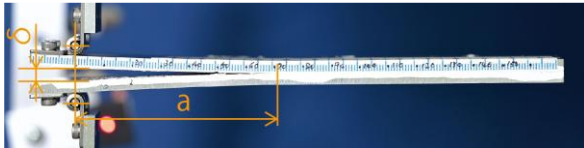


図4 DCB試験の様子

ミックミキサーの流路を取り出したものである。(c)が流路を切断し、市販品の1/3にしたものである。

前報で流路長が市販品(以下、標準長という)の1/3になると、引張せん断接着強さが低下し、バルクの引張強さも低下することを示した。そこで、流路が標準長と短縮したもので混合した接着剤をそれぞれレオメーターで動的粘弾性を測定し、硬化時間を調べる。接着剤混合後の動的粘弾性の時間変化を図3に示す。高野⁴⁾は時間経過とともに架橋反応の進行で貯蔵弾性率 G' 、損失弾性率 G'' ともに上昇し、あるところで両者が交差し、この弾性率交点はゲル化点と定義されると報告している。ゲル化するまでの時間を硬化時間とすると、図3から標準長のスタティックミキサーで混合した場合の硬化時間は5162秒、短縮した場合は6531秒となる。混合が不足するとこの接着剤では硬化時間が長くなることがわかる。

3.2 DCB試験

図4にDCB試験の様子を示す。DCB試験片にヒンジを取り付け、万能試験機により接着面を引きはがしている。エネルギー解放率⁵⁾⁶⁾を

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2B(a+|\Delta|)} \cdot \frac{F}{N} \quad (1)$$

と定義する。P: 荷重、 δ : 開口変位、B: 板幅、a: き裂長さ、 $|\Delta|$: き裂長さの補正項、F: 梁の変形量に対する補正係数、N: 支点形状に対する補正係数、E: 縦弾性率、I: 断面二次モーメントである。この G_{IC} はき裂進展に対する抵抗の大きさを表している。ここでは $F=N=1$ とする。き裂長さのずれを補正するCBT法を用いて

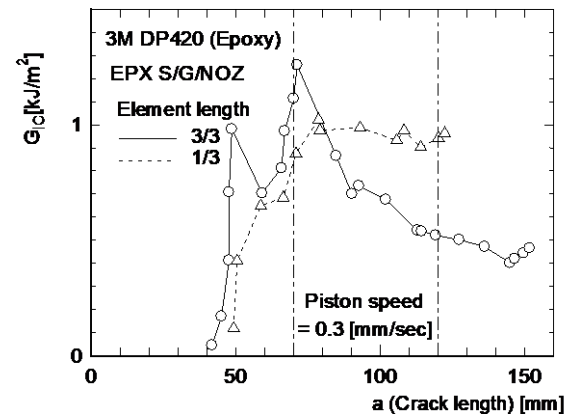


図6 き裂長さとエネルギー解放率

$$a + |\Delta| = \frac{3EI}{2} C^{1/3} \quad (2)$$

とする。

ただし、コンプライアンスCを

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (3)$$

とする。

図5にDCB試験での荷重変化を示す。横軸は万能試験機のカrossヘッド移動量、縦軸は荷重である。標準長のスタティックミキサーも短縮のものも移動量が3mmで最大荷重となった後、荷重は小さくなっている。図6にエネルギー解放率を示す。横軸はき裂長さ、縦軸はエネルギー解放率である。撮影した動画から30秒ごとに静止画(例えば図4)を切り出し、その静止画からき裂長さと開口変位を測定している。エネルギー解放率はき裂長さが70~120mmで評価する。この区間のエネルギー解放率の平均値は標準長のスタティックミキサーで0.773 kJ/m²、短縮したものでは0.953 kJ/m²である。この接着剤は、不十分な混合のときエネルギー解放率が大きくなる。

4 まとめ

本研究のまとめを示す。

- (1) 不十分な混合で二液型エポキシ接着剤 (DP-420) を硬化させると、硬化時間は十分な混合のものより長い。
- (2) 不十分な混合の試験片は十分に混合した試験片よりエネルギー解放率は大きい。

【謝 辞】

本研究を実施するにあたり、国立研究開発法人産業技術総合研究所ナノ材料研究部門接着界面グループ秋山陽久主席研究員から接着試験に関して丁寧な指導を受けました。厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 堀重之, 自動車の走行性能と構造 開発者が語るチューニングの基礎 グランプリ出版, 2021
- 2) 原賀ら, 自動車軽量化のための接着接合入門, 日刊工業新聞社, 2015
- 3) 西村ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, PP73-76, 2025
- 4) 高野雅嘉, 日本接着学会誌 Vol.58, No.11, pp403-410, 2022
- 5) 関口悠, DCB 試験法による接着剤エネルギー解放率測定の基礎理論 自費出版, 2021
- 6) 北條恵司, 構造用接着接合の基礎と耐久性評価 丸善出版, 2025

情報

AIを用いたカメラ映像解析による作業支援技術に関する研究（第2報）

— ロウ付け作業におけるスキル評価指標の検討 —

松原早苗^{*}、前田紗良^{*}、浜田忠美[†]、生田健治[†]

Study on a work support system using AI-based image analysis (II)

- Investigation of skill evaluation indicators in brazing operations -

MATSUBARA Sanae^{*}, MAEDA Sara^{*}, HAMADA Tadayoshi[†] and IKUTA Kenji[†]

本研究では、銅管継手のロウ付け作業の標準化および教育支援に向けたスキル評価指標の設計を目的として、計測データに基づき複数作業者のトーチおよびロウ棒の操作の違いを可視化し、操作特徴を抽出した。まず、温度計測およびウェアラブル映像解析により複数作業者を比較し、比較の基準とする作業者を選定した。次に、作業環境およびトーチを統一した条件下でモーションキャプチャによりトーチの操作を計測した。基準とした作業者では、トーチおよびロウ棒の角度変動が小さく、加熱局面の初期に加熱位置を銅管上に保持する傾向が認められた。また、ロウ供給局面では加熱位置を銅管から外す操作が確認され、温度推移との対応から温度制御に関与する可能性が示唆された。

1 はじめに

近年、製造現場では熟練者の減少や多品種少量生産への対応を背景に、作業の標準化と教育の効率化が重要な課題となっている¹⁾。特に経験への依存度が高い手作業の品質安定化にはスキル差を客観的指標で定量化し、教育へ反映させることが不可欠である。こうした観点から、製造・組立分野では作業動作を計測・可視化し、熟練者との差異抽出に基づき技能伝承や教育に活用する取り組みが報告されている^{2)~4)}。

本稿では空調機器等に使用される銅管継手のロウ付け作業を対象とする。ロウ付けとは、ガストーチ（以下、トーチ）で接合部を加熱し、溶加材（ロウ材）を毛細管現象によって流し込む接手法である。この作業は製品の耐久性や信頼性を左右する重要工程であるが、適切な加熱位置や加熱量、トーチ姿勢、ロウ材供給のタイミングといった諸条件の判断は、依然として熟練者の経験則に依存する傾向にある⁵⁾⁶⁾。さらに外観から良否判定が困難なため、教育は現場指導に依存し、指導のばらつきや習熟の長期化が課題となっている。

そこで本研究では、当該作業を対象にトーチおよびロウ棒の操作と作業状態を計測し、複数作業者の操作の違いを可視化するとともに操作特徴を抽出し、スキル評価指標を検討する。本年度は指標化の前段階として、まず温度計測および映像解析により複数作業者の操作の違いを把握し、再現性および安定性の観点から比較の基準とする作業者（以下、基準作業者）を選定した。次に、作業環境およびトーチ等を統一した条件下で基準作業者と他作業者を比較し、基準作業者の操作特徴を抽出した。本稿では、基準作業者の選定結果と、統一条件下で抽出した操作特徴を報告する。

2 研究方法

本稿では対象作業における複数作業者の操作特性を計測データから可視化し、二段階で整理した。操作特性とはトーチおよびロウ棒の位置・姿勢の時系列変化を指すものとする。第一段階では操作特性の違いから基準作業者を選定し、第二段階では条件を統一してモーションキャプチャでトーチの位置・姿勢を計測し、基準作業者の特徴的な操作パターンを抽出した。なお、操作特性と銅管表面温度の温度応答の対応関係に着目した。

試験片は同一寸法の銅管を縦方向に接続する継手形態とし、ロウ材にはリン銅ロウを用いた。

2.1 温度・映像解析による基準作業者の選定手法（実験1）

基準作業者の選定に向けて作業者 A~F を対象に温度計測および映像解析を行い、作業者間の操作特性の違いを可視化した。計測項目は銅管表面温度とトーチ角度およびロウ棒角度の時間変化とした。

2.1.1 試行条件・計測方法

加熱条件として、火口が1つのシングルトーチと、2つの火口で配管を両側から挟み込むダブルトーチの2種とした。ダブルトーチは均一な加熱や加熱時間の短縮に寄与すると考えられる一方、ヘッドが大きく、狭所における操作性には制約が生じる。データ取得にあたっては、シングルトーチを常用する作業者 A~E に対し、シングルトーチ条件で各3試行を実施した。一方、ダブルトーチを常用する作業者 F については、ダブルトーチ条件で4試行に加え、比較用にシングルトーチ条件で1試行のデータを取得した。

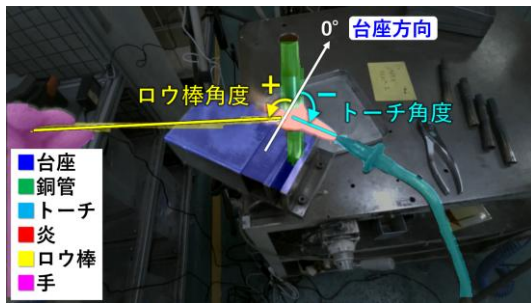
計測時のカメラ配置の概要を図1に示す。銅管表面温度はサーモカメラ（日本アビオニクス社製 R500EX Pro）により取得し、角度算出に用いる映像はウェアラブルアイトラッカー（Tobii 社製 Pro Glasses 3）のシーンカメラ映像を用いた。なお、本稿では視線データは解析対象外

^{*} 情報技術部

[†] 東プレ株式会社岐阜事業所



図1 実験1における計測機器配置例



(a)シングルトーチ



(b)ダブルトーチ

図2 セグメンテーション結果例と角度算出の定義

とした。

2.1.2 解析方法

銅管表面温度はサーモカメラ画像における銅管領域内の最高温度を代表値として算出し、時系列データとして取得した。

角度を算出するため、ウェアラブルカメラ画像に AI 画像処理であるセグメンテーションを適用し、銅管、炎、トーチ、ロウ棒、台座の各領域を抽出した。図2にセグメンテーション結果例と角度算出の定義を示す。

シングルトーチ条件（図2(a)）では銅管領域の重心を通る台座方向ベクトルを 0° 基準とし、反時計回りを正、時計回りを負と定義し、トーチ角度およびロウ棒角度を算出した。トーチ方向は炎領域の重心と同重心に最も近いトーチ領域の点を結ぶ方向、ロウ棒方向はロウ棒領域の長軸方向として定義した。図2(a)ではロウ棒は正、トーチは負となる。これらに基づき、各時刻のトーチ角度およびロウ棒角度を算出し、時系列で取得した。

さらにロウ供給のタイミングを表す指標として「ロウ棒接触区間」を定義した。具体的には、セグメンテーション

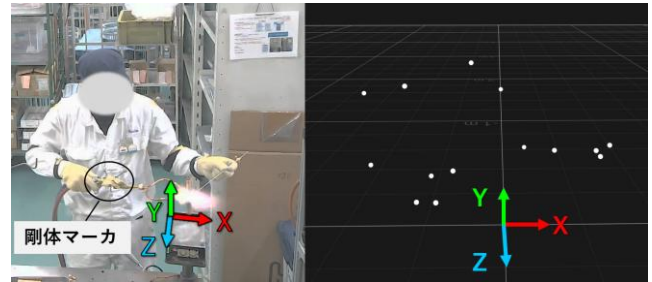


図3 モーションキャプチャによるマーカの3次元位置取得例（左：可視画像，右：点群）

ョン結果においてロウ棒先端が銅管または炎に接触しているフレームが連続する区間を指すものとした。

ダブルトーチ条件では図2(b)に示すように2つの火口の領域を個別に抽出し、それぞれの長軸方向を求め、同様の手順によりトーチ角度（トーチ1角度、トーチ2角度）およびロウ棒角度を算出した。

基準作業者は良否判定の絶対基準ではなく、作業者間比較の基準として位置づけ、試行間のばらつきが小さいこと（再現性）と、トーチ角度およびロウ棒角度が概ね一定であること（安定性）を重視して選定した。

2.2 統一条件下でのモーションキャプチャによる操作特徴抽出手法（実験2）

実験1の結果に基づき、作業者Fを基準作業者として選定した。実験2では作業者間の操作特性を同一条件で比較するため、作業環境およびトーチ条件をダブルトーチに統一し、モーションキャプチャでトーチの位置および姿勢を計測した。

2.2.1 試行条件・計測方法

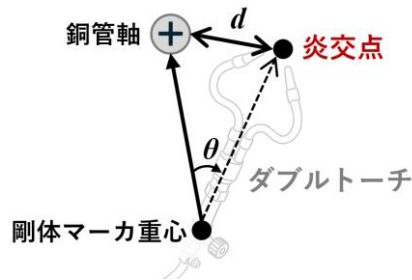
対象作業者は作業者Fに加え、比較対象として作業者AおよびBとし、各作業者について3試行ずつ作業データを取得した。

モーションキャプチャ計測では作業者の上肢部位、トーチおよびロウ棒にマーカを装着して計測した。トーチには4点構成の剛体マーカを装着し、モーションキャプチャにより各マーカの3次元位置を取得した。図3に各マーカの3次元位置取得例を示す。併せてサーモカメラで銅管表面温度を同時計測した。

2.2.2 解析方法

トーチに装着した4点構成の剛体マーカについて、取得した各マーカの3次元位置から剛体マーカの重心位置とトーチの姿勢を算出した。姿勢はワールド座標系に対するトーチ座標系の回転角として表した。トーチ座標系において剛体マーカ重心に対する炎交点の位置は既知であるため、重心位置と姿勢から炎交点の3次元位置を算出した。

算出した炎交点を平面視へ投影し、図4に示すように2つの指標を時系列で算出した。指標として平面視における炎交点と銅管軸との距離を d 、剛体マーカ重心を基準点として銅管軸方向ベクトルと炎交点方向ベクトルが

図4 炎交点指標（距離 d 、角度 θ ）の定義（平面視）

なす角度を θ とした。角度は反時計回りを正、時計回りを負と定義した。これらにより、加熱位置とトーチ操作の変化を時系列で評価した。

また、指標選定の参考として、姿勢および炎交点の銅管軸方向位置の時間変化も確認した。姿勢については、作業員 F および B では銅管軸と炎方向のなす角度は約 90 度であり、炎を銅管軸に対してほぼ垂直に当てていたのに対し、作業員 A では約 30 度であり、下から上へ向けて加熱していた。一方、炎交点の銅管軸方向位置は作業員間で推移傾向が概ね共通していた。銅管を効率的に加熱するには炎を銅管軸に対して垂直に当てることが望ましいことから、本稿では平面視における炎交点と銅管軸の距離 d および角度 θ を作業員間比較の指標として採用した。

3 結果および考察

3.1 温度・映像解析による基準作業員の選定結果（実験 1）

3.1.1 結果

図 5 に作業員 A～F のトーチ角度、ロウ棒角度および銅管表面温度の時系列変化を示す。作業員 F は、シングルトーチ条件を F(S)、ダブルトーチ条件を F(D)として表記した。ロウ棒角度はロウ棒が銅管に接触している区間のみを表示した。なお、図 5 は各作業員の複数試行から代表例を示したものであり、F(S)は1試行のみの結果である。基準作業員の選定は、代表例に加えて全試行の傾向を確認したうえで行った。

作業員 A～E では作業の進行に伴ってトーチ角度およびロウ棒角度が変動する様子が確認された。角度変動の大きさや推移傾向については作業員間で差異が認められた。ロウ供給についてもロウ棒接触区間の回数や開始タイミングに作業員間の違いが確認された。銅管表面温度は加熱に伴い上昇したが、立ち上がりの形状やその後の推移は作業員ごとに異なる傾向を示した。

一方、作業員 F では F(S)および F(D)のいずれにおいても、トーチ角度とロウ棒角度が作業中ほぼ一定の角度範囲で推移し、角度変動は小さかった。また、ロウ供給は開始から終了まで連続した 1 回のロウ棒接触区間として現れた。銅管表面温度は F(D)が F(S)より立ち上がりが速かったが、いずれの条件でも角度推移の安

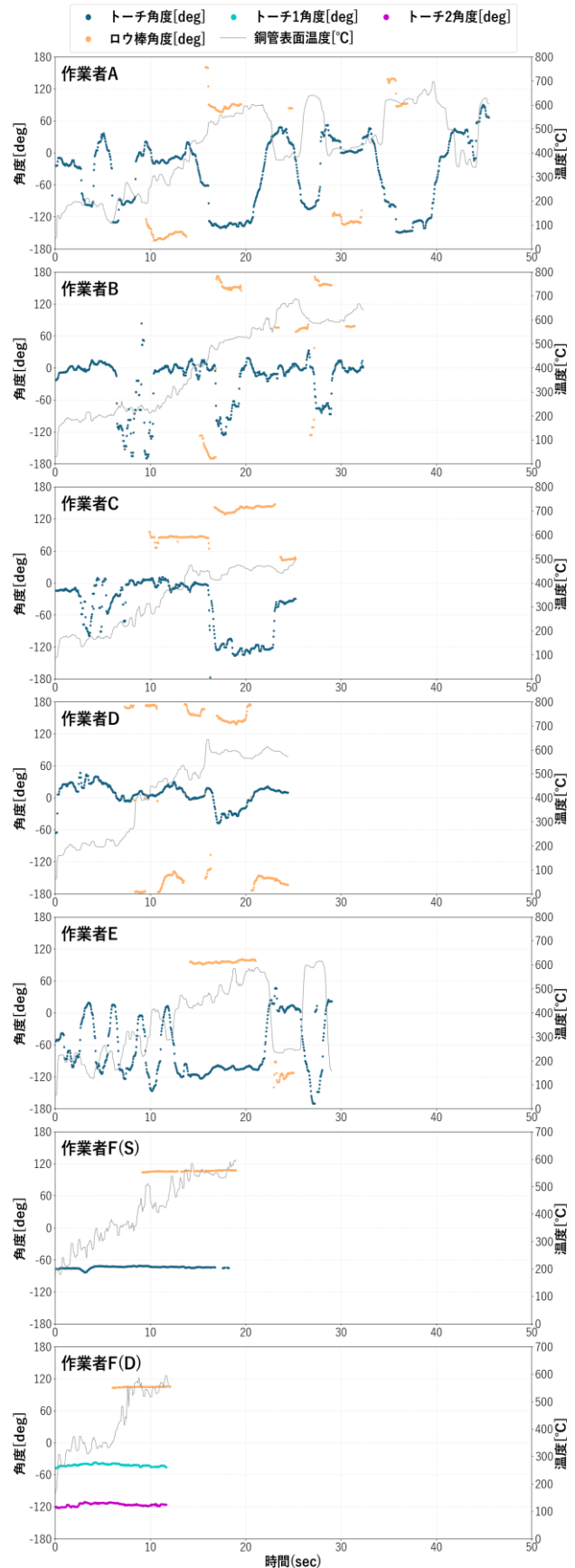


図5 作業員 A～F におけるトーチ角度、ロウ棒角度および銅管表面温度の時系列変化

定性は保たれていた。

3.1.2 考察

本実験では基準作業者を良否判定の絶対基準ではなく、作業者間の操作特性の違いを比較し、特徴を抽出するための基準として位置づけた。基準作業者の選定にあたっては同一作業者の複数試行で時系列推移の傾向が概ね一致すること（再現性）と、作業中のトーチ角度・ロウ棒角度およびロウ供給の現れ方が大きく変動しないこと（安定性）を重視した。

再現性の確認では、図5の代表例に加えて各作業者の全試行を対象とし、角度の推移傾向、ロウ棒接触区間の現れ方、および銅管表面温度の立ち上がり形状に着目して時系列推移を比較した。その結果、作業者Fは試行間のばらつきが小さく、高い再現性を有することが確認された。

安定性の観点では、作業者A～Eで角度の推移傾向の変化やロウ棒接触区間の現れ方の変動が確認されたのに対し、作業者Fではトーチ角度・ロウ棒角度が作業中ほぼ一定で推移し、ロウ供給も開始から終了まで連続した1回のロウ棒接触区間として現れるなど、トーチおよびロウ棒の操作変動が抑制されていることが示された。また、作業者Fではダブルトーチ条件がシングルトーチ条件より温度立ち上がりが速かった一方で、角度推移の安定性は保たれていた。

以上より、作業者Fは再現性と安定性の両面で基準作業者として適していると判断した。そこで、モーションキャプチャ計測では作業者Fを基準作業者として用い、温度立ち上がりが速いダブルトーチ条件を統一条件として、作業者間の違いを比較した。

3.2 統一条件下でのモーションキャプチャによる操作特徴抽出結果（実験2）

3.2.1 結果

図6に基準作業者Fと作業者A、Bにおける炎交点指標 d 、 θ および銅管表面温度の時系列変化を示す。ロウ棒接触区間は灰色で示した。ここで θ は銅管軸方向ベクトルと炎交点方向ベクトルがなす角度であり、 d は平面視における炎交点と銅管軸との距離である。 θ が0付近のとき、炎交点は銅管軸方向とほぼ同一直線上に位置する。また、 $|\theta|$ または d が大きい状態は炎交点が銅管から外れる傾向を示している。

基準作業者Fでは、加熱局面の初期に θ が0付近、 d も小さい値で推移しており、炎交点を銅管上に維持していることが確認された。その後、ロウ棒接触区間の直前に d が変動し、炎交点を銅管軸方向に対して前後に揺らす動作が確認された。さらにロウ棒接触区間中には、 d および θ が一時的に増大する場面があり、炎交点を銅管から外す操作が現れた。銅管表面温度はロウ棒接触区間に向けて上昇したのち、ロウ棒接触区間中は概ね一定の温度帯で推移し、顕著な温度ピークは確認されなかった。

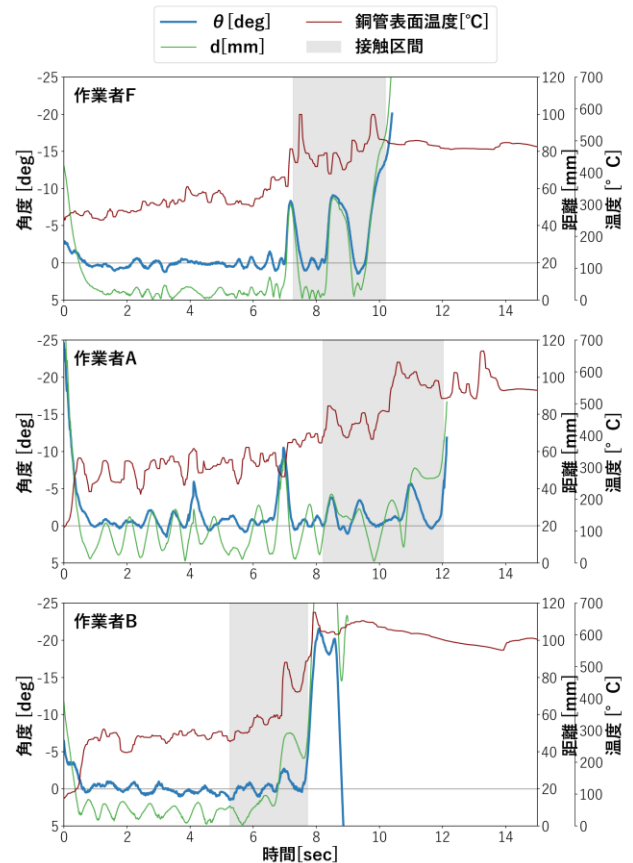


図6 基準作業者Fおよび作業者A、Bにおける炎交点指標 d 、 θ と銅管表面温度の時系列変化（灰色はロウ棒接触区間）

一方、作業者AおよびBでは、 θ は作業全体を通じて概ね0付近で推移したのに対し、 d が周期的に変動する傾向が確認された。これは炎交点を銅管上に概ね維持しつつ、加熱局面の初期からロウ棒接触区間を含む作業全体にわたり、炎交点を銅管軸方向に対して前後に揺らし続けていることを示している。特に作業者Bでは、 θ が0付近で推移したまま d の前後揺らしが継続し、銅管表面温度が急速に上昇するとともに、ロウ棒接触区間の終了後に温度ピークが現れる傾向が認められた。

3.2.2 考察

実験2では炎交点指標 d 、 θ と銅管表面温度、ならびにロウ棒接触区間の対応関係から、作業は主として加熱局面とロウ供給局面に整理できることが確認された。ここで加熱局面は昇温を目的とした区間を指し、ロウ供給局面はロウ棒接触区間を中心に、その直前・直後の操作変化を含むものと定義した。

基準作業者Fでは加熱局面の初期に θ および d が小さい状態が維持され、炎交点を銅管上に保持したまま昇温を進めていると解釈できる。これは加熱位置を大きく移動させず、狙った領域への熱入力を集中的に行う操作に対応する可能性がある。一方、ロウ供給局面に移行する

直前からロウ棒接触区間中にかけて、 d および $|\theta|$ が一時的に増大する場面が認められ、炎交点を銅管から外す操作が現れた。これらはロウ供給に合わせた加熱位置や姿勢の調整により、過度な加熱や温度変動を抑制しようとする操作である可能性がある。

これに対し、作業員 A および B では θ は概ね 0 付近で推移する一方で、 d の周期的変動が作業全体で継続しており、炎交点を銅管上に概ね保持したまま、銅管軸方向に対して前後に揺らす操作が中心であった。同時に温度推移にも作業員間の違いが認められ、特に作業員 B では急速な昇温に加え、ロウ棒接触区間の終了後に温度ピークが確認されたことから、操作パターンと温度推移の現れ方に関連がある可能性が示唆される。

以上より、統一条件下における作業員間の操作特性の違いは、加熱局面では炎交点の保持状態として、ロウ供給局面では炎交点を銅管から一時的に外す操作として整理できる。これらの違いが温度推移の違いとして現れる可能性が示された。

4 まとめ

本稿では銅管継手のロウ付け作業を対象に、計測データに基づいて作業員間の操作特性の違いを可視化し、スキル評価指標の検討に向けて基準作業員を選定するとともに、その操作特徴を抽出した。

実験 1 では温度計測および映像解析により作業員間の操作特性の違いを把握し、再現性および安定性の観点から作業員 F を基準作業員として選定した。基準作業員 F ではトーチ角度とロウ棒角度が作業中ほぼ一定の範囲で推移し、ロウ棒接触区間は連続した 1 回として現れることが確認された。

実験 2 では統一条件下でモーションキャプチャによりトーチの位置・姿勢を計測し、炎交点指標 d 、 θ と銅管表面温度、ならびにロウ棒接触区間の対応から、基準作業員 F の操作特徴を整理した。その結果、加熱局面の初期に炎交点を銅管上に保持する傾向と、ロウ供給局面の前後に炎交点を銅管から一時的に外す操作が確認された。これらは昇温の進行に応じて加熱位置や加熱の向きを調整し、温度推移を制御する操作に対応する可能性が示唆された。

以上より、基準作業員を含む複数作業員について、トーチおよびロウ棒の操作指標、温度推移、ロウ棒接触区間の対応関係を解析することで、作業局面に応じた操作特徴を抽出できることを示した。

今後は抽出した操作特徴を評価指標として指標化し、教育支援および作業標準化に有効な指標の提示方法と可視化方法を検討する。

【参考文献】

- 1) 経済産業省,2025 年版ものづくり白書,2025
- 2) 佐伯ら,精密工学会誌 Vol.87,No.2, pp169-172,2021

- 3) 横山ら,人間工学会誌 Vol56,No.5, pp204-207,2020
- 4) 松木,Synthesiology Vol3,No.1, pp47-55,2010
- 5) 岡根ら,溶接要論,理工学社,1985
- 6) Klimpel et al., Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Vol.28,No.1, pp89-90,2008

構造最適化を活用した創造的設計技術に関する研究（第2報）

坂東直行*、久富茂樹*

Research on creative design techniques utilizing structural optimization (II)

BANDO Naoyuki* and KUDOMI Shigeki*

本研究では、設計者の経験に頼らない効率的な製品開発手法として構造最適化技術に着目し、企業の現実課題である高剛性ボビンおよびばねローラの構造導出に取り組んだ。シートの締め付け力による変形が課題となっていたボビン設計では、トポロジー最適化を適用した。荷重条件を精査し、分散荷重を集中荷重としてモデル化することで明確なリブ構造を抽出した。さらに評価点の変位を最小化する条件を加えた結果、リブと外周の接合部に方づえ構造を設けることが、材料量を抑えつつ剛性を高める上で効果的であることを示した。一方、製品の高さ変化への追従が求められるばねローラの設計では、形状最適化を適用した。コンプライアンス（柔軟性）の最大化を目的関数とし、応力制限を設けて解析した結果、内周と外周をジグザグに結ぶ屈折ばね構造を導出した。構造解析の結果、目標とする径方向への柔軟な変位を実現し、具体的な荷重・変位特性を明らかにした。以上の結果から、経験則では導出が困難な複雑な設計課題に対し、構造最適化技術が有効な解決手段となることを示した。

1 はじめに

近年の製品開発においては、高機能化・軽量化・低コスト化といった、相反する複数の要求を高い次元で両立させることが不可欠となっている。従来、これらの設計は技術者の経験や知見に依存してきたが、要求条件が複雑化するにつれ、手作業による試行錯誤では膨大な工数と時間を要することが大きな課題となっている。

こうした設計上の困難を解消する手法として、構造最適化技術がある。この技術は、あらかじめ設定された設計範囲や境界条件に基づき、数理的な計算によって所望の性能を最大化する構造を導き出すものである¹⁾。

そこで本研究では構造最適化技術に着目し、その活用方法について検討してきた²⁾。

本報では、構造最適化技術を活用した企業の現実課題の解決を目指し、高剛性ボビンおよびばねローラの構造導出に取り組んだので報告する。

2 高剛性ボビンの構造導出

シート状の部材は芯となるボビンに巻き付けて扱われる。巻き付けられたシートがすべて利用されたボビンは回収され、再度シートが巻き付けられる。弾力性のあるシートを巻きつける場合、巻きつける時にシートが伸びることに起因する締め付け力がボビンに作用する（図1）。これは、シートが巻き付いている間、常に作用し、ボビンをゆがませ、ボビンの製品寿命を縮める原因となっている。

この対処法の1つとして、ボビンの肉厚を厚くして剛性を高める方法があるが、その分使用する材料が多くな

り、ボビンの単価を高めることになる。

この問題の解決には材料量を抑えつつ、高い剛性を有するボビンの内部構造が求められる。

そこで、本研究ではこの課題に対しトポロジー最適化を活用して解決を図った。

トポロジー最適化とは構造最適化技術の一種であり、空間の中に材料を詰めた状態から力がかからない部分を

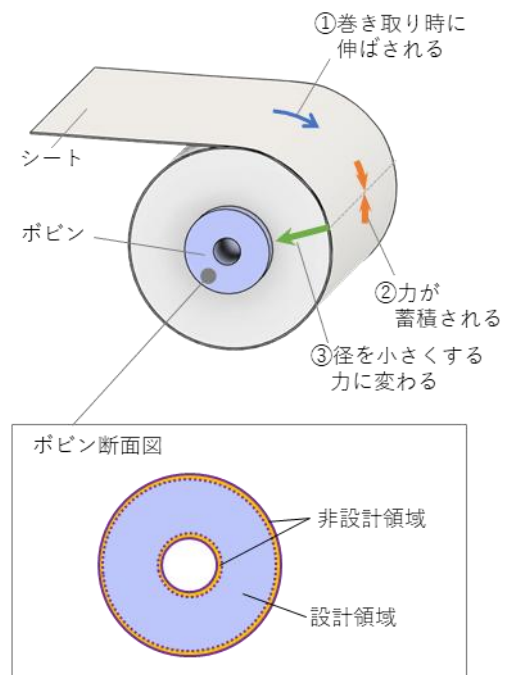


図1 ボビンに作用する力
および解析モデル

* 生産システム部

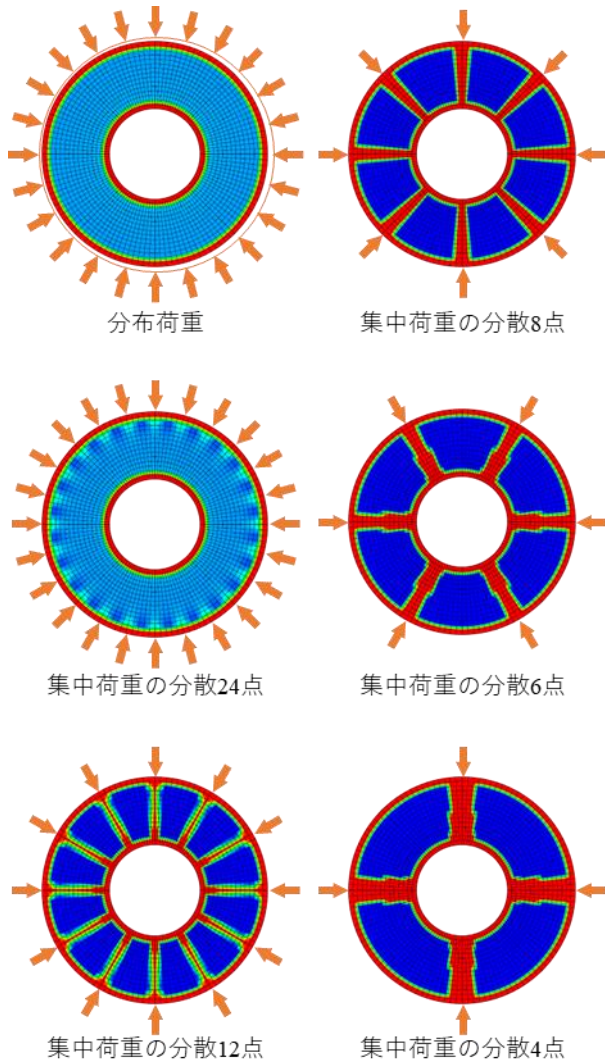


図2 導出されたボビンの内部リブ構造

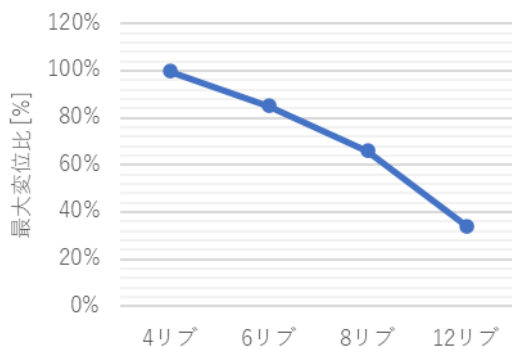


図3 リブ数と最大変位比の関係

削り落とす感覚で、与えられた空間の中で「どこに材料が必要か、どこが不要か」をゼロベースで計算する手法である。

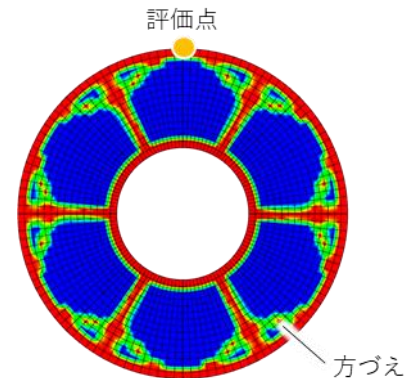


図4 6リブ構造における最適構造

また、構造最適化技術とは、形を変えてはいけない場所を非設計領域、自由に形を変えていい場所を設計領域と定め、達成したいゴールを目的関数、同時に守るべきルールを制約関数として条件を付け、この条件の中で、コンピュータを用いて理想的な形を数学的に導き出す設計手法である。なお、本研究では構造最適化にOPTISHAPE-TS 2025（(株)くいと製）を用いた。

手順は次のとおりである。

まず、外周から径方向に対して荷重が作用する中実ボビンに対し、外周、内周を非設計領域に、それらを除いた中心部を設計領域に設定し、設計領域の体積を減らす制約関数を設定したうえで、最も剛性が高くなる目的関数を設定し、ボビンの内部構造を導いた。このとき得られた構造を図2に示す。

図において、材料密度の濃い部分を赤色、材料密度の薄い部分を青色で表している。赤色領域を残し、青色領域を除くことで構造が得られる。

この解析モデルにおいて、作用する荷重が外周に均等に分布する場合、構造を明確に導くことができなかった。そこで便宜的に荷重を外周上に分散する集中荷重とし、分散数を減らしていった結果、12点となったところから明確なリブ構造が導かれた。以降、分散数に対応したリブが導かれている。これらの構造の剛性を比較するため、同一断面積の条件下で、外周に同一の荷重を加えたときの最大変位量を構造解析（NX Nastran V7.1（SIEMENS 製））により比較した。結果を図3に示す。ここで縦軸は4リブの場合の変位量を1とした場合の割合を示している。この結果からリブの数が増えるほど、最大変位量が減少することが分かる。よってボビンの剛性を高めるには、製作上可能な範囲でリブの数を増やすのが効果的であるといえる。

次に先の解析で導かれた構造の中から6リブ構造を選び、リブ間を結ぶ外円周の midpoint に評価点を設定し、評価点の変位を最小化する目的関数を追加して構造を導いた。このとき得られた構造を図4に示す。導出された構造に

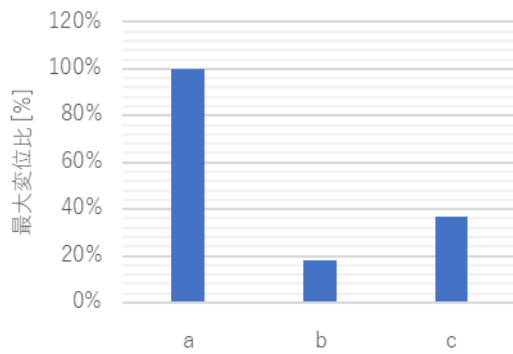


図5 6リブ構造間の最大変位比の比較

- a. 図2における6リブ構造
- b. 図4の構造
- c. aにおいて外周肉厚を2倍にし、その分リブの肉厚を薄くした構造

はリブと外周の接合部に方づえ構造が認められた。この効果を検証するため、同一断面積の条件下で、元の6リブ構造、方づえ構造、元の6リブ構造に対して外周の肉厚を2倍にした構造において、最大変形量を構造解析により比較した。なお、外周の肉厚を増やすという設計方針は、ボビンの剛性を高める目的を与えられたときに、人が勘や経験に基づき選択しやすいと思われるものである。結果を図5に示す。ここで縦軸は元の6リブ構造の変位量を1とした場合の割合を示している。ここから変形を抑制するには、リブと外周の接合部に方づえ構造を設けることが効果的であると示された。

3 ばねローラの構造導出

先の事例では剛性を高める構造を導出したが、ここでは逆に柔軟に変形する構造を導出する。

パッケージングのため、製品を上下2枚のシートで挟み込む際、ローラで上下から押さえ付ける。このとき、製品の高さがばらつくと、高さの高い部分にローラの位置が追従するため、高さの低い部分にはローラが届かず、シートを十分に押さえつけられない点が問題になっている(図6(a))。そこでローラを長手方向に分割し、分割されたローラがそれぞれ回転軸に対して、径方向に動くようにすれば、押しつけ力を保ったまま製品の高さ変化に対応することができる(図6(b))。これを実現するため、外力(押しつけ力の反力)によって、内周に対して外周が径方向に動くことが可能なローラ(ばねローラ)の内部構造が求められる。

本研究では、この課題に対し形状最適化技術を活用して解決を図った。

形状最適化とは構造最適化技術の一種であり、全体の構造や穴の数は変えずに、粘土細工のように表面をなでて滑らかにしたり、少し削ったりして整える感覚で、強度や性能を最大限に引き出す手法である。

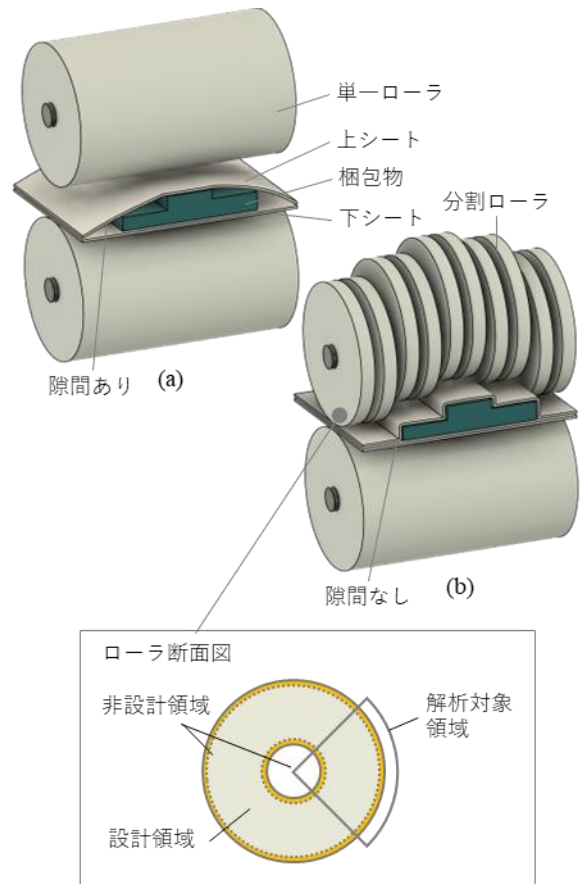


図6 分割ローラ方式における各ローラ(ばねローラ)の動きおよび解析モデル

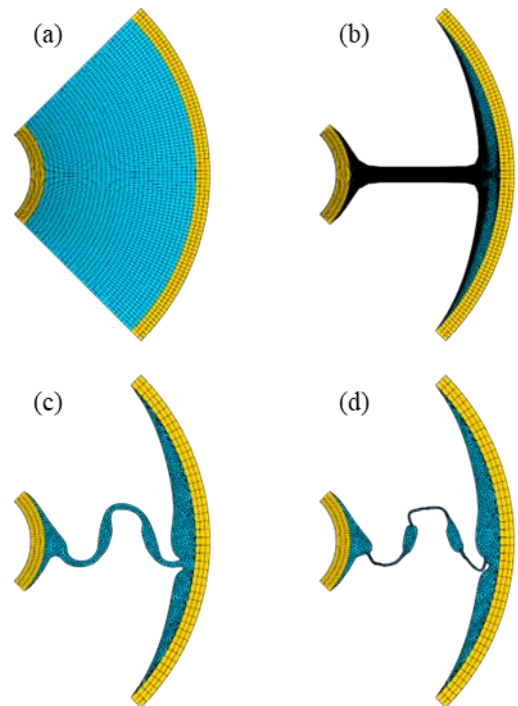


図7 導出されたローラの内部構造

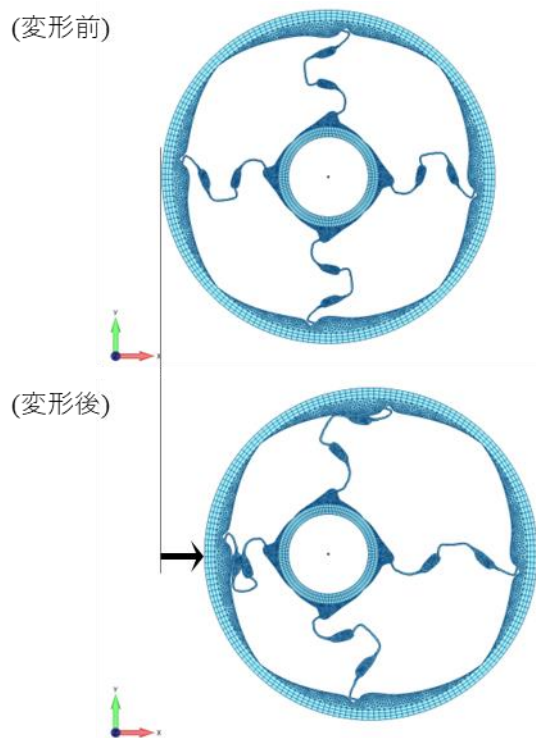


図8 ばねローラの変形の様子

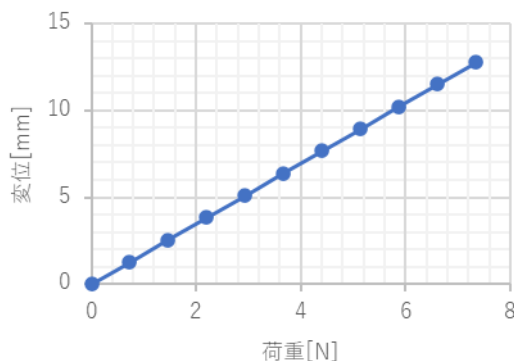


図9 ばねローラの荷重・変位関係

手順は次のとおりである。

まず、外周上の一点から径方向に対して荷重が作用する中実ローラに対し、外周、内周を非設計領域に、それらを除いた中心部を設計領域に設定し、設計領域の体積を減らす制約関数を設定したうえで、コンプライアンスが最大になる構造を導いた。ここで、コンプライアンスとは、剛性の逆数で、コンプライアンスが大きくなることは柔らかくなることを示す。また、解析モデルは、ローラ断面の1/4領域を対象とした(図7(a))。

このとき得られた構造を図7(b)に示す。

得られた構造は、内周と外周を直線状に結ぶリブとなった。

こうして導いた構造をベースに、設計領域の体積、お

よび部材に荷重が作用する際に生じる最大ミーゼス応力が、制限値を超えないよう制約関数に設定し、構造のコンプライアンスが最大になる構造を導いた。このとき得られた構造を図7(c)に示す。得られた構造は、内周と外周をジグザグに結ぶ屈折ばねとなった。

こうして導いた構造に対し、外力の大きさに対する変形量を調整するため、先の構造において、目的関数と制約関数を入れ替えた条件で、再度構造を導いた。このとき得られた構造を図7(d)に示す。得られた構造は、先に導いた構造の肉厚を薄くしたものとなった。

こうして導いた構造の剛性を評価するため、構造解析を行った。なお、解析モデルはローラ断面の全形状を対象とした。図8に、変形前および変形後の形状を示す。ここから、設計目的であった内周に対して外周が径方向に動く構造が実現できたとわかる。

荷重・変位の関係を具体的に評価するため、外周100mm、内周20mm、内周と外周の厚さ3mm、ローラの長手方向の肉厚を5mm、材質をポリアセタール(POM)とした場合の荷重・変位曲線を構造解析によって求めた(図9)。導いた構造は、この寸法、材質の条件の下では、荷重6Nの外部荷重に対し、約10mm変位した。

4 まとめ

本研究では構造最適化技術を活用した企業の現実課題の解決を目指し、高剛性ボビンおよびばねローラの構造導出に取り組んだ。

高剛性ボビンの構造導出では、リブと外周の接合部に方づえ構造を付加することが効果的であるとわかった。

ばねローラの構造導出では、内周と外周の間に屈折ばねを設けることが適当であるとわかった。

また、これらの課題のように、バランスの調整、構造の導出が容易でない設計課題解決において構造最適化は一つの手段となり得ること、企業課題(部材の強度を対象にした構造設計課題)に対し、構造最適化技術が有効であることを示した。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、サンソマプラテック株式会社 臼井裕亮氏にご協力をいただきました。ここに、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 西脇ら, トポロジー最適化 第2版, 丸善出版, 2025
- 2) 坂東ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp100-103, 2025

精密深絞りプレス加工の省エネルギー生産技術開発（第1報）

—断熱層を有する金型設計に向けたプレス加工による発熱率と熱伝達率の評価—

西嶋隆*、松原早苗**、岩田英司†、奥田智裕†、林達彦†

Energy-saving technology development for precision deep-drawing press forming (I)

- Evaluation of heat generation and thermal conductivity in press forming for die design with insulating layers -

NISHIJIMA Takashi*, MATSUBARA Sanae**, IWATA Eiji†, OKUDA Tomohiro† and HAYASHI Tatsuhiko†

製造業における国際競争力の強化や脱炭素化の観点から、デジタル技術を活用した生産効率の向上や生産工程の省エネルギー化を実現する生産技術の開発が注目されている。当センターでは、昨年度までに県内企業と実施してきた、デジタル技術を活用した生産技術に関する共同研究の成果を踏まえ、さらなる実用化を目指した取り組みを進めている。本研究では、精密深絞りプレス加工において生産工程上の課題とされる「捨て打ち」の削減を目的とし、金型のダイ温度の上昇速度および定常温度が制御可能な断熱層を有するプレス金型の開発を行う。本報告では、当該金型の熱設計に必要なパラメータとして、プレス加工時の発熱率および金型表面の熱伝達率について、実験および熱伝導解析を用いて評価した結果を報告する。

1 はじめに

県内における金属プレス加工業は、自動車関連部品のサプライチェーンにおいて重要な産業であり、脱炭素社会の実現に向けたカーボンフットプリントの評価¹⁾など、環境負荷低減につながる生産技術の開発が求められている。

金属プレス加工の中でも「精密深絞り加工」は、精密な部品を高速に生産できるため、内燃機関部品の量産などに用いられており、今後においてもEV化に伴う各種精密部品の量産技術として期待されている。

「精密深絞り加工」は高い生産性を有する一方で、一般的には量産前に「捨て打ち」（プレス加工機を暖機し、製品の寸法や形状が安定するまでの仕掛品を廃棄する工程）が行われていることや金型とワークの温度に依存する加工不良が課題となっている。これらの対策として、工場内の温度管理によりプレス加工機本体の熱膨張変動を低減させる方法や、金型やワークを加熱または冷却することで金型寸法やプレス油の粘度を安定化させ、加工不良を低減させる方法が知られている²⁾。

本研究では、プレス加工時の発熱を利用し、金型のダイ温度の上昇速度と定常温度を制御することで、金型やワークの予備加熱を用いることなく捨て打ちの削減を図る。

具体的な方法の一つとして、金型内部に断熱層を適切に組み込み、熱伝導を制御する金型設計が考えられる。このような設計には、FEM解析による熱伝導解析が不可欠となるが、実機のプレス加工時におけるワーク素材とダイの摩擦による発熱率(W)や、プレス油が付着した金型表面から周囲空気への熱伝達率のパラメータが未

解明であるため、これらを適切に評価する必要がある。

本報告では、実際の金型を用いたプレス加工時の熱伝導実験を行い、得られた金型表面温度の変化をFEM解析による熱伝導解析で再現することにより、これらのパラメータを評価する。

2 プレス加工の発熱率と金型表面の熱伝達率の評価

2.1 プレス加工時の金型表面温度の測定実験

評価対象となる金型のプレス加工時の温度変化を把握するため、金型表面に熱電対を設置し、加工開始後の温度変化を記録した。

図1は金型の模式図を示し、温度測定位置はダイホルダ下端面から高さ方向に10mmの位置(thermo1)、同80mmの位置(thermo2)、およびダイセット高さ方向の中央位置(thermo3)の計3か所とした。

表面温度の測定周期は、プレス加工速度（毎分17.5ショット）と同期させ、1ショットごとに取得した。

図2に各測定位置における温度変化を示す。縦軸は温度、横軸はプレス加工開始からの経過時間を示す。

2.2 プレス加工時の熱伝導解析

FEM解析にはCalculix（ソルバ）を、プレ・ポスト処理にはPrePoMax V.2.3.0を使用した。本解析では、実験

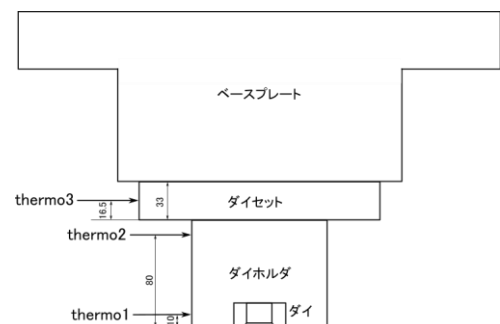


図1 金型の模式図と温度測定位置

* 技術支援部

** 情報技術部

† 株式会社加藤製作所

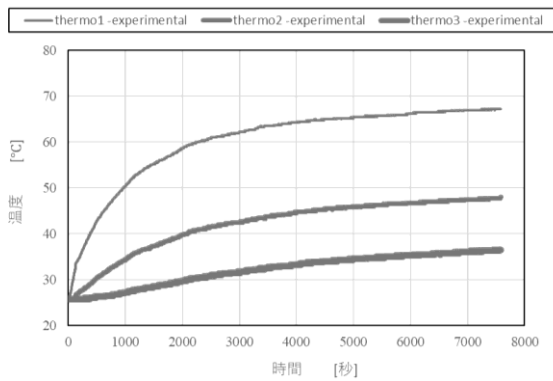


図2 各測定位置 (thermo1~3) の温度変化

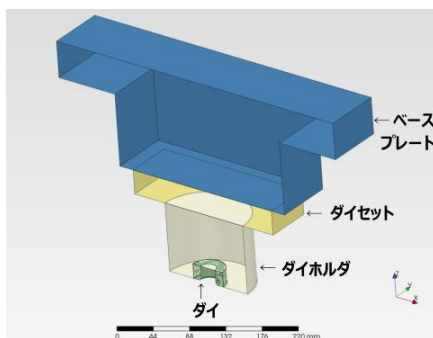


図3 プレス金型の解析モデル

表1 解析に用いた金型構成部品の物性値

構成部品名	密度 [kg/m³]	熱伝導率 [W/(m・K)]	比熱容量 [J/(kg・K)]
ダイ	14.7*10³	75	210
ダイホルダ	7.8*10³	26	460
ダイセット	7.8*10³	44	490
ベースプレート	7.8*10³	52	480

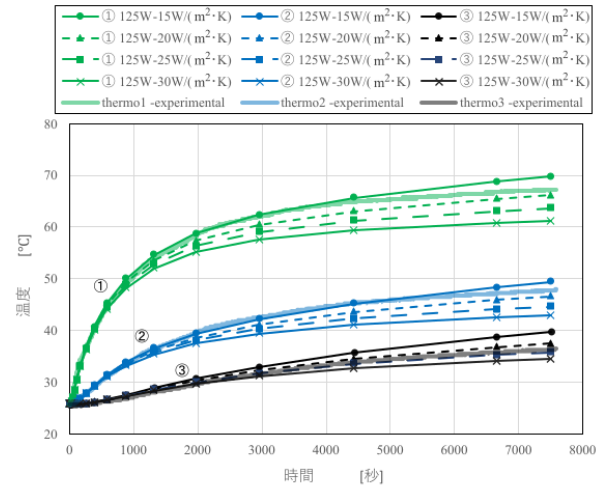
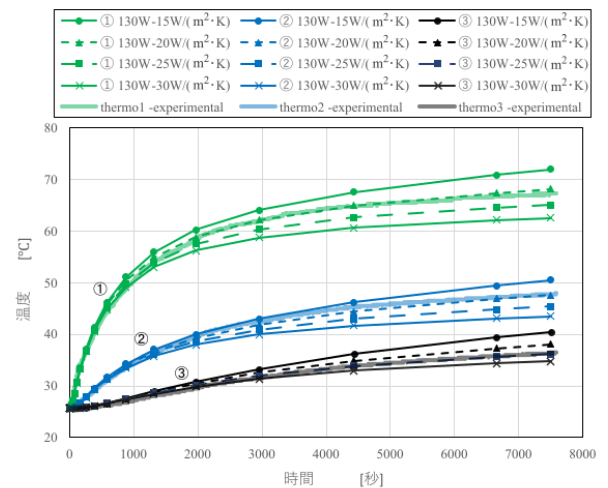
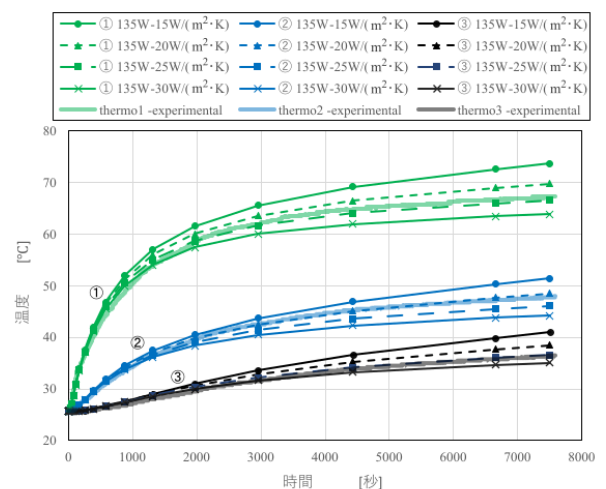
で得られた金型表面温度の変化を非定常熱伝導解析により再現することで、プレス加工の発熱率 (W) および金型表面から周囲空気への熱伝達率を評価する。なお、本解析では放射による放熱は考慮していない。

2.2.1 プレス金型の解析モデル

解析モデルは、プレス金型を構成するダイ、ダイホルダ、ダイセットおよびベースプレートを構成部品として設定した。図3に、XZ平面で2分割表示した解析モデルを示す。

実際の金型はベースプレート上面にプレス加工機本体のスライドが存在するが、スライドは解析対象外とし、ベースプレート上面から外部への熱流束は周囲空気への熱伝達として設定した。

表1に、解析に用いた金型構成部品の物性値を示す。これらは実験時の金型と同一とし、解析モデルの初期温度および周囲温度は、実験時の金型温度である25.7℃とした。

図4 金型表面の温度変化
(プレス加工による発熱率 125 W)図5 金型表面の温度変化
(プレス加工による発熱率 130 W)図6 金型表面の温度変化
(プレス加工による発熱率 135 W)

2.2.2 熱伝達率の設定

金型表面から周囲空気への熱伝達率は 15～30 W/(m²·K)の範囲で設定し、比較解析を行った。なお、熱伝達率は空気が流れている場合、一般に十数～数百 W/(m²·K)程度になることが知られている³⁾。

2.2.3 プレス加工時の発熱率の設定

プレス加工にて発生する熱は、実際はダイとワーク素材の接触部付近で発生し、その熱がダイに伝わる。解析では、発生した熱がダイ下部の面取り部分（ワーク素材と摩擦接触する部分）から熱流束として流入するモデルとした。

解析では、プレス加工時の発熱率をパラメータとして変化させながら実施し、実験で得られた金型表面3カ所の温度変化と近い傾向を示す発熱率を求めた。

2.2.4 解析結果

図4～図6に、プレス加工時の発熱率をそれぞれ125 W、130 W、135 Wに設定した場合の金型表面温度の解析結果を示す。なお、135 Wより高い発熱率の場合も解析を行ったが、135 Wの場合に比べて実験値からの乖離が大きくなるため、ここでは図示しない。

図4～図6の凡例①～③はそれぞれ、金型表面のthermo1～3の位置における温度変化の解析結果を示している。また、同図では比較のため、解析結果に加え2.1節の実験で得られた金型表面の3カ所（thermo1～3）の温度変化も併せて示す。

図4～図6の比較により、プレス加工による発熱率は130～135 W、金型表面の熱伝達率は20～25 W/(m²·K)程度の条件で、実験結果と解析結果が最も良く一致するこ

とを確認した。

3 まとめ

金型内部に断熱層を適切に組み込むことで熱伝導を制御する金型の設計を行うために必要となる、プレス加工による発熱率および金型表面の熱伝達率のパラメータを求めた。具体的には、実際の金型の表面温度変化を実験により測定し、FEMによる非定常熱伝導解析で実験状況を再現することにより、これらのパラメータを評価した。

その結果、プレス加工による発熱率は130～135 W、金型表面の熱伝達率は20～25 W/(m²·K)の場合に、実験結果と解析結果が良く一致することが示された。

今後は、これらのパラメータを用いて断熱層を有する金型の設計および開発を進める予定である。

【参考文献】

- 1) カーボンフットプリントガイドライン 環境省 HP https://www.env.go.jp/press/press_01409.html?utm_source=chatgpt.com/ (参照 2026/2/1)
- 2) 平成 29 年度 戦略的基盤技術高度化・連携支援事業 戦略的基盤技術高度化支援事業 研究開発成果等報告書「厚板小物高精度絞り部品の製造を可能とする工程独立式可変速押し込み複動機構を用いた押し込み絞りプレス加工技術の確立」, pp36-41, 2018
- 3) 熱管理便覧（改訂三版），一般財団法人省エネルギーセンター編, pp111, 1972

生産管理業務のデジタル化に関する研究開発（第1報）

－主軸モータの回転パターンを利用した工具番号の特定－
横山哲也*、加賀忠士*

Development on digitization of production control operations (I)

- Tool identification using spindle motor idling pattern -

YOKOYAMA Tetsuya* and KAGA Tadashi*

IoT 技術の発達によって生産管理のデジタル化が容易となり、生産性向上の期待が高まりつつある。本研究では工作機械の主軸モータの電流計測により加工内容を特定し、生産管理業務の自動化を目指す。具体的には、主軸モータを特定パターンで回転させ、モータ電流から加工内容を判別する。今年度は工場の実加工環境において、主軸モータに回転パターンを追加して電流を計測し、そのデータを解析することで使用中の工具番号を求めた。本結果より、工具番号と加工工程を紐づけることで、加工内容の特定につながる可能性を得た。

1 はじめに

IoT 技術の発達により、通信機能を有していない古い工作機械の稼働状況の可視化が可能となってきた。さらに加工対象や工程等の加工内容が特定できれば、生産管理業務のデジタル化や自動化が進むと考える。

古い工作機械の加工内容を特定するには、バーコードリーダーや情報端末を用いたシステム構築が必要となり、設備投資が課題となる。後付け可能な電流センサを用いて加工内容を特定できれば、安価にシステムを構築できるが、電流センサは加工負荷しか把握できない。

我々は過去、通信機能を有していない工作機械の NC プログラムに、加工とは直接関係ないスピンドルモータの回転（情報伝達回転）を意図的に追加することで、モータ電流を経由して外部装置に情報を伝達する手法を提案した¹⁾。この手法は情報伝達回転を予め決めた手順で変化させることにより、外部装置で動作するプログラムに情報を伝えることができる。

本研究では通信機能を有していない工作機械を対象に、主軸モータの回転パターン（以下、主軸回転パターン）と電流センサを用いて情報伝達を行うことで、加工内容を特定できるか検討する。具体的には、使用中の工具番号を特定することで、間接的に加工内容を求める。

2 主軸回転パターンによる工具番号の特定

ここでは使用する工具番号をモータ電流経由で外部装置に情報伝達する方法を考える。

2.1 計測構成

図1に計測構成を示す。電流計測には電流センサ（クランプセンサ）を用いた。主軸モータとサーボアンプ間の3相配線の1つに電流センサを取付け、その出力を電子回路経由でマイコンのAD入力に接続した。

マイコンでは電流実効値の算出と、計測電流から周波数を測定¹⁾する。なお、周波数 f を求めることで、式(1)

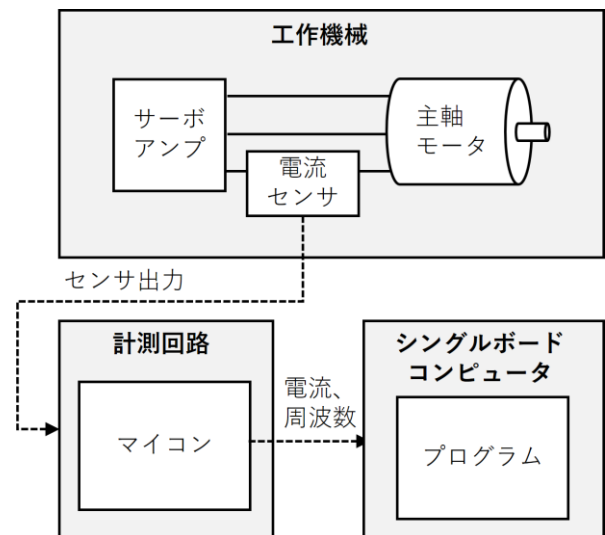


図1 計測構成

より回転数 $N(\text{rpm})$ を算出できる。

$$N = \frac{120f}{p} \quad (1)$$

ここで p はモータの極数である。

電流実効値と周波数は外部装置のシングルボードコンピュータに送られ、プログラムで主軸回転パターンを特定する。

2.2 主軸回転パターンによる情報伝達

NC プログラムに主軸回転パターンを追加する。以下に回転パターンの手順を示す。

- 1) X 秒間、モータを $N_1(\text{rpm})$ で回転
- 2) X 秒間、モータを $N_2(\text{rpm})$ で回転
- 3) X 秒間、モータを $N_3(\text{rpm})$ で回転

NC プログラムのドゥエル(送りの一時停止)を使って、 X 秒間回転させる。なお、1)の前、3)の後には主軸モータの回転を停止する。

* 機械部

回転数 N_1 は補助用とし、回転数 N_2 と回転数 N_3 で2桁の数値を伝えることとする。 T_{id} を工具番号(2桁数値)とした場合、 N_2 と N_3 は以下の計算式を用いて算出する。

$$N_2 = N_{20} + N_s f_{div}(T_{id}, 10) \quad (2a)$$

$$N_3 = N_{30} + N_s f_{mod}(T_{id}, 10) \quad (2b)$$

ここで N_s は回転数の刻み幅であり、 $f_{div}()$ は商のみを、 $f_{mod}()$ は余りのみを算出する。式中の N_{20} 、 N_{30} 、 N_s の値は回転数 N_1 、 N_2 、 N_3 が式(3)に示す3段階の単調増加を満たすように決定する。

$$N_3 > N_2 > N_1 \quad (3)$$

2.3 主軸回転パターンの特定方法

周波数 f の時系列データから回転パターンを特定する際、回転パターンのテンプレート(雛形)を設け、時系列データの中からテンプレートに類似したデータを、相関関数などを用いて探し出すことになる。この際のテンプレートは固定時間長のデータとなる。ただし、周波数の時系列データは、モータ回転の加減速の影響やドゥエルによる停止時間が正確でないため、固定時間とはならない。そのため、固定時間長のテンプレートを用いてはマッチングすることができない。

本研究では、図2に示す、値が3段階で単調増加する時系列データをテンプレートとして採用し、測定周波数の時系列データとの類似度を計算するために、動的時間伸縮法²⁾(Dynamic Time Warped: DTW)を用いる。図3にDTWのイメージ図を示す。図中左側がDTW適用前のテンプレート、右側が適用後のテンプレートになる。テンプレートを時間軸方向に伸縮することで、比較対象(周波数)の時系列データに類似した形に変形させる。このときのテンプレートの3つの段①②③の値は、比較対象のデータがとりうる範囲の中間値とする。

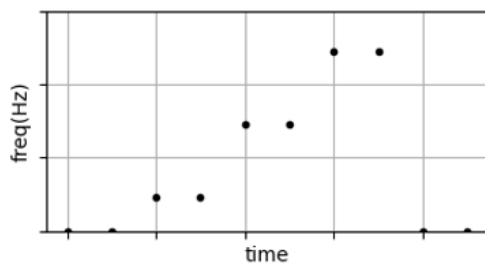


図2 テンプレートの時系列データ

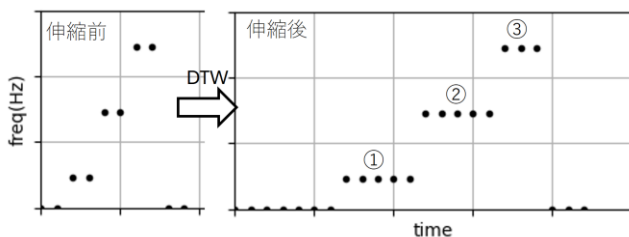


図3 DTWによる時間方向伸縮イメージ

なお、類似度は誤差距離で判断する。

誤差がある閾値を下回った際、DTWを施したテンプレートに対して3つの段①②③各々のデータ個数を求め、 X 秒に相当するデータ個数があるか確認する。既定以上の個数があれば、②③の周波数 f から式(1)を用いて N_2 と N_3 を算出し、式(2)を用いて2桁数値の工具番号を求めることになる。

以上より、オンラインで、窓サイズの時間区間を一定の時間間隔でスライドしながらデータを取得・処理することで、主軸回転パターンを検知し、工具番号を取得することができる。

3 実加工環境での試行

切削加工を行っている工場で、工作機械に計測装置を取り付け、特定の加工(タップ加工)の前後に主軸回転パターンを追加した際のデータを計測した。主軸回転パターンのパラメータは $N_{20}=300$ 、 $N_{30}=600$ 、 $N_{20}=30(\text{rpm})$ 、 $X=2$ 秒である。

図4にタップ加工前に追加した主軸回転パターン時の電流実効値と、計測電流から測定した周波数の時系列データを示す。図2に示したテンプレートを、この周波数時系列データに近づけるために、DTWを施すことになる。

図5にタップ加工時の時系列データのグラフを示す。図の上段が電流実効値、中段が周波数、下段が推定した工具番号になる。なお、工具番号の推定はオフライン解析で行った結果である。図中のハッチング箇所がタップ加工前後に追加された主軸回転パターンの時間帯である。図より、主軸回転パターンが発生した際に、工具番号54が認識できていることがわかる。

また、タップ加工前の N_1 と加工後の N_1 を、異なる回転数とすることで、加工の開始と終了を判断することもできる。

4 まとめ

本研究では通信機能を有していない工作機械を対象に、

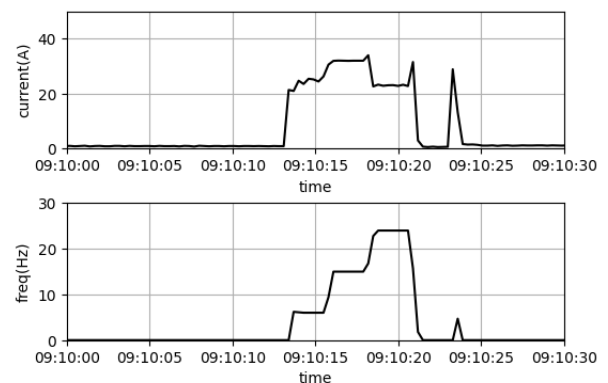


図4 主軸回転時の計測データ
(上段:電流実効値、下段:周波数)

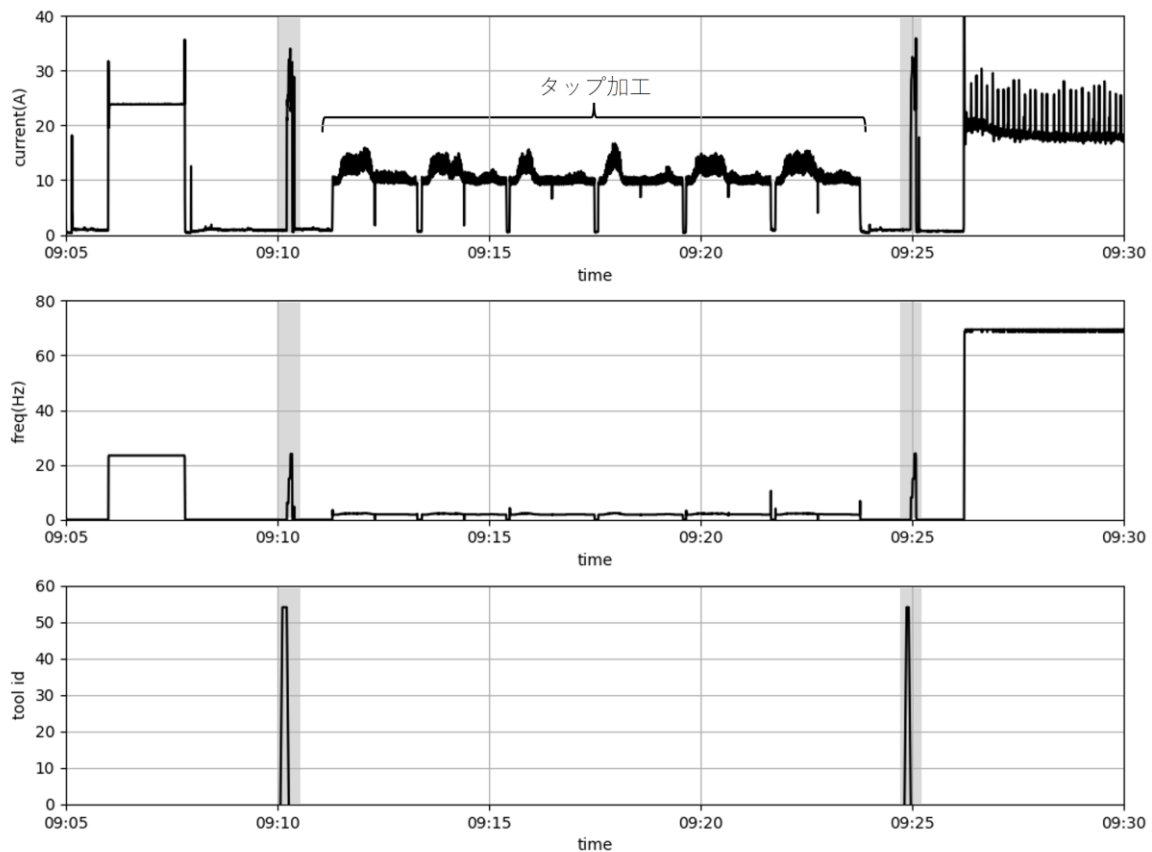


図5 計測データ（上段：電流実効値、中段：周波数、下段：工具番号）

切削加工における工作機械の主軸モータの電流を計測することで、加工内容を特定できるか検討した。具体的には、主軸モータに特定の回転パターンを追加し、計測した電流データから得られる周波数データに DTW を施すことで、回転パターンを特定することができた。さらに、回転パターンから 2 桁の数値を読み取ることができ、今回のケースでは工具番号を外部装置に情報伝達することができた。工具番号と加工工程（タップ加工、穴あけ加工、エンドミル加工など）を紐づけることで、間接的ではあるが加工内容を特定できると考える。

今後は読み取り精度の検証などを行い、改良を進め、

加工の進捗管理や工具毎の負荷管理を行う予定である。

【謝 辞】

工場でのデータ計測にご協力いただきました株式会社ナベヤ製作所の皆様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 横山ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp92-95, 2025
- 2) Sakoe, H. et.al., IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 26(1), pp.43-49, 1978

冷間鍛造機の初期不良品削減に用いる監視システムの開発（第1報）

横山貴広*、小寺将也*

Development of a monitoring system for reducing initial defects in cold forging machines (I)

YOKOYAMA Takahiro* and KODERA Masaya*

本県の主要産業である自動車部品産業は、多くの冷間鍛造部品を製造している。冷間鍛造は常温の金型で成形をはじめ、金型温度が上昇・安定するまで成形品の寸法精度が安定しない。また、成形時の金型の内圧も不安定であり、金型異常を検知・予知することが困難である。本研究は金型異常を早期に検知し、作業者に通知する「工程監視システム」を開発する。本年度は、まず金型異常を検知する「ボルト型圧電式荷重センサ」を用い、良品と不良品を成形する金型の状態をセンシング（電圧）波形にて比較・検証した。その結果、金型から成形品を取り出す時の電圧波形が良品と不良品で特徴的な差異があることを確認した。

1 はじめに

プレス加工や鍛造成形等の金型の異常検知には、圧電式ひずみセンサ、AE センサ¹⁾、ボルト型圧電式荷重センサ²⁾等が用いられている。これらのセンサは成形条件や金型形状等により使い分けられ、設置方法、適用温度、検出周波数、制御方式等の性能が異なる。

通常、冷間鍛造機には金型内部の成形圧を確認することができるが、金型が大きく破損しない限り、異常の検知・予知することは難しい。また、冷間鍛造の成形を開始してから品質が安定するまでは金型の内圧が大きく変動し、異常を検知することが困難である。そのため、冷間鍛造の成形初期には金型異常を検知し、成形が安定してからは金型異常を検知・予知できるような「工程監視システム」が求められている。

本研究は、冷間鍛造機によるフォーマー成形の金型異常をセンシング（電圧）波形から早期に検知・予知するシステムを開発する。本年度は、金型異常を検知する「ボルト型圧電式荷重センサ」に着目し、正常金型と成形品の先端に面割れが発生する異常金型を準備し、両者の電圧波形を比較する評価試験を実施する。

2 評価試験の概要

図1に評価試験の全体構成、表1に評価試験条件を示す。本研究で開発する「工程監視システム」は、ヤマナカゴーキン製ボルト型圧電式荷重センサ（以下、ピエゾボルト）、出力電圧を増幅するセンサアンプ、波形を表示するデータロガー、波形を分析する分析装置で構成している。ピエゾボルトは成形品の形状（品質）に影響する最終工程の5工程目の金型に取り付け、正常金型20ショット、異常金型40ショット成形し、両者の電圧波形データの差異を検証する。なお、測定時間は1ショット1秒間、測定周波数は100kHzとし、時系列データ

の電圧波形を取得・分析する。

3 結果及び考察

3.1 正常金型の電圧波形

図2に正常金型の場合の1ショットの電圧波形を示す。電圧のプラス側が引張荷重、マイナス側が圧縮荷重を示す。パンチとダイが接触した瞬間、ピエゾボルトには接触振動が伝わり、プラスとマイナスに大きな電圧が確認できる（図2のA部分）。その後、パンチが徐々に成形品をダイに押し込むため、ボルトに圧縮荷重がかかる（図2のB部分）。加工後、パンチとダイが離れるた

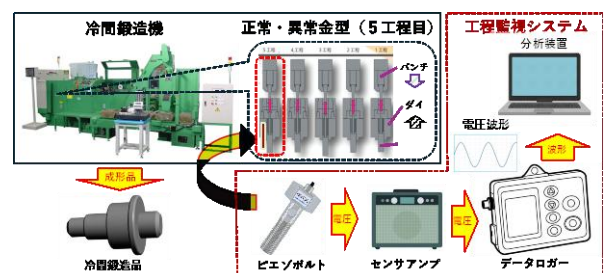


図1 評価試験の全体構成

表1 評価試験条件

成形品材質	SCM435
製造工程数	5
使用センサ	ヤマナカゴーキン製 ボルト型圧電式荷重センサ「PiezoBolt」（ピエゾボルト）
センサ取付箇所	5工程目（最終工程）
測定周波数	100kHz
測定時間	1ショット1秒間
測定回数	正常金型20ショット 異常金型40ショット
データ分析項目	1. プラスとマイナスのピーク間の電圧差（P-P値） 2. 波形率（波形の凸凹を表す指標：直線=1） 3. プラス積分値、マイナス積分値、積分和

* 機械部

めピエゾボルトにかかる荷重がなくなり電圧が 0V に戻り、最後にエジェクタピンで成形品を取り出すこととなる（図2のC部分）。このことから、パンチがピエゾボルトに圧縮荷重を加え、エジェクタピンで成形品を取り出す時に引張荷重となることが確認できる。

3.2 異常金型の電圧波形

図3に異常金型の場合の1ショットのピエゾボルトの電圧波形を示す。図2の正常金型の場合と比較すると、パンチがダイと接触する瞬間（図2のA部分・図3のa部分）の差異は確認されなかった。しかし、パンチとダイが離れる前の下死点付近と考えられる時点で、図3のb2部分のような波形が確認された。これは成形品が塑性変形する時、下死点付近で成形品の先端に面割れが発生し、割れた部分の振動が金型を通じてピエゾボルトに伝達したと考えられる。

3.3 成形品を取り出す時の電圧波形

図4と図5に正常金型と異常金型の場合の成形品を取り出す時の電圧波形の拡大図（図2のC部分・図3のc部分）を示す。異常金型の場合、正常金型の場合よりエジェクタピンと成形品の接触時に発生したと考えられる電圧波形が大きい（図5のa部分）、また、エジェクタピンが成形品を取り出す最初の山の形をした電圧波形にパルスが多い（図5のb部分）、さらに成形品を取り出した後の電圧値が 0V に戻っていない（図5のc部分）ことが確認できる。

次に、これらの現象を定量的に評価するため、図4に示すように3つの範囲に分割する。範囲1でプラスとマイナスの電圧差（以下、P-P値）を測定し、範囲2で波形率を算出する。また、範囲2から範囲3における電圧波形の積分値について、引張荷重側を「+積分値」、圧縮荷重側を「-積分値」として算出するとともに、両者の和を「積分和」として算出する。

図6と図7に正常金型と異常金型の場合のP-P値と波形率を示す。P-P値と波形率とも、正常金型の場合は低い値となり、異常金型の場合は高い値となった。これは、正常金型では成形品を取り出すエジェクタピンにかかる接触抵抗が小さいが、異常金型では成形品の変形や割れ等が金型とエジェクタピンの接触抵抗を大きくしたと考えられる。

図8に正常金型と異常金型の場合の積分値と積分和を示す。正常金型の場合、+積分値が-積分値より極めて大きく、-積分値がゼロ近傍であることから、積分和がほぼ+積分値と一致する。これは、エジェクタピンがピエゾボルトの引張荷重方向に成形品を取り出しているからである。一方、異常金型の場合、ショット数が少ない領域（20ショット以下）では、+積分値と-積分値が正常金型の場合と同様の傾向であるが、正常金型の場合と比べ積分値が大きく、積分和が低くなった。また、

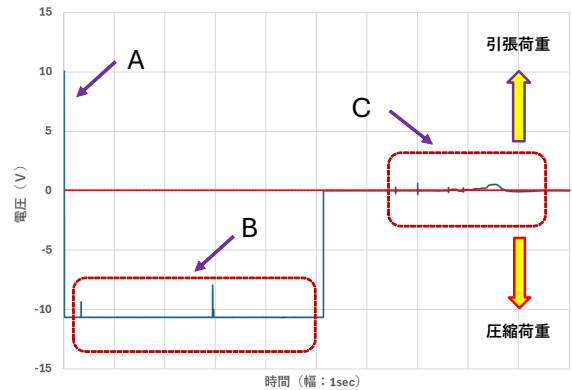


図2 ピエゾボルトの電圧波形（正常金型）

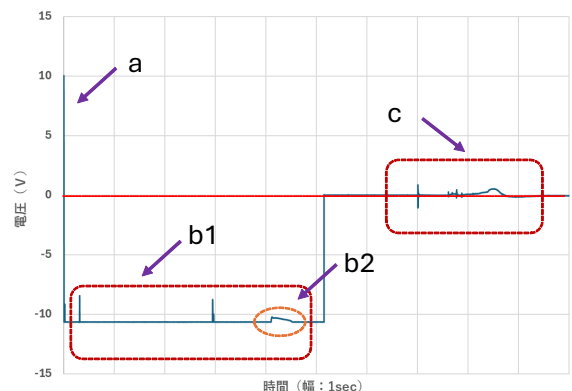


図3 ピエゾボルトの電圧波形（異常金型）

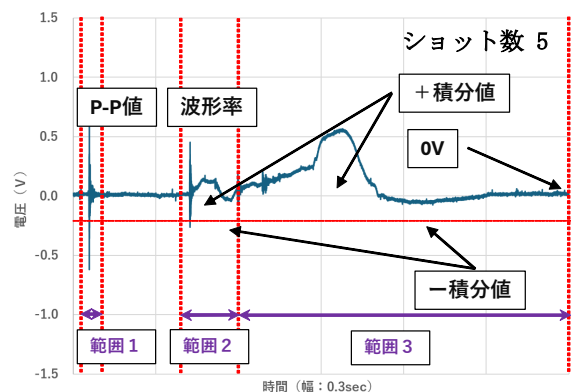


図4 成形品を取り出す時の電圧波形（正常金型）

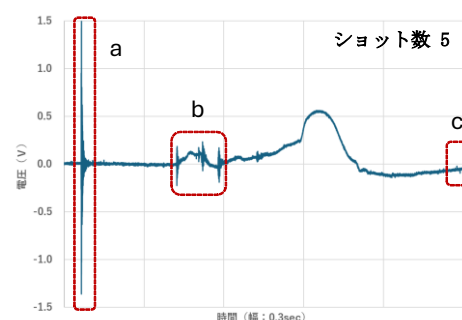


図5 成形品を取り出す時の電圧波形（異常金型）

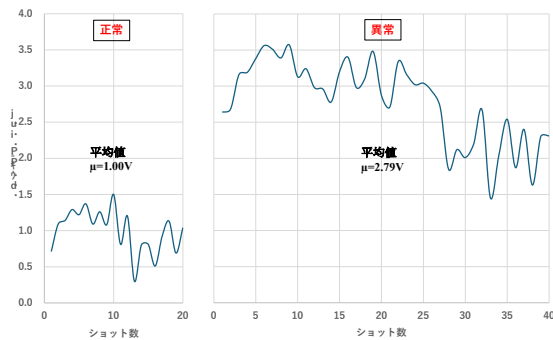


図6 P-P 値 (正常金型・異常金型)

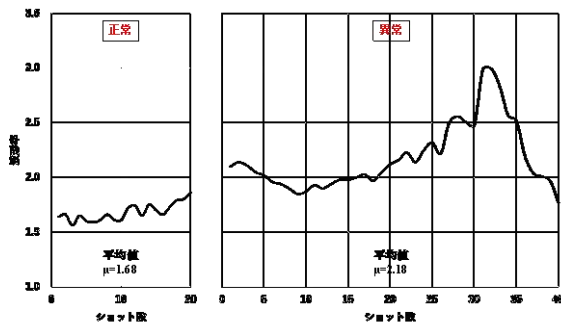


図7 波形率 (正常金型・異常金型)

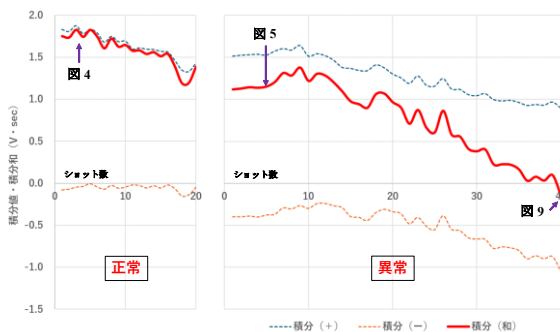


図8 積分値と積分和 (正常金型・異常金型)

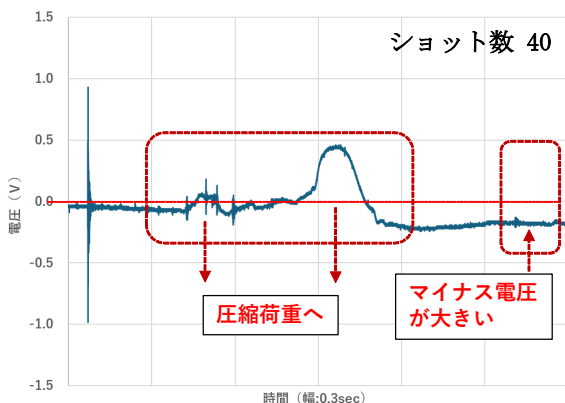


図9 ショット数40の成形品を取り出す時の電圧波形 (異常金型)

ショット数が多い領域 (20 ショット以上) では、ショット数の増加とともに+積分値が減少し、-積分値が大きくなり、積分和が減少しながら、最終的にマイナスとなり圧縮荷重となる。これは、異常金型の場合はショット数の増加とともに、ピエゾボルトの圧縮荷重が増加するためであると考えられる。さらに、図9に異常金型の40 ショットの場合の成形品を取り出す時の電圧波形の拡大図 (図3のc部分) を示す。図8の異常金型のショット数が少ない場合 (図5: ショット数5) と多い場合 (図9: ショット数40) の電圧波形を比較すると、図9は図5より全体的に圧縮荷重側となり、エジェクタピンで成形品を取り出した後でも-積分値がゼロにならない状態で、次の成形が始まっている。以上より、異常金型で成形を繰り返す (ショット数を重ねる) 場合、以下の現象が発生していると考えられる。

- ① 金型の損傷状況の悪化
- ② 図面と成形品の寸法誤差の拡大
- ③ 成形品の表面性状・面割れの悪化
- ④ 成形品の取り出し時に、成形品と金型の接触抵抗の増大

4 まとめ

金型異常を検知・予測する「工程監視システム」の開発として、正常金型と異常金型の成形時のピエゾボルトの電圧波形を比較・検証し、以下の結果を得た。

- (1) 金型から成形品を取り出す時の電圧波形が良品と不良品で特徴的な差異がある。
- (2) 金型から成形品を取り出す時の電圧波形の積分値・積分和が「工程監視システム」の開発に向けた指標 (パラメータ) のひとつとして活用できる。

今後、成形データを収集・分析しながら、金型状況の見える化に向けた「工程監視システム」の開発を検討する。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、評価試験にご協力いただきました、株式会社ギフ加藤製作所様、和田山精機株式会社様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 横山ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No3, pp1-4, 2022
- 2) 金, 塑性と加工 (日本塑性加工学会誌) 第58巻 第681号, pp878-882, 2017-10

協働ロボットを活用したデータ駆動型生産システムに関する研究開発(第1報)

生駒晃大*、渡辺博己*、坂東直行**

Research and development of data-driven manufacturing systems using collaborative robots (I)

IKOMA Akihiro*, WATANABE Hiroki* and BANDO Naoyuki**

本研究では、製造現場における生産プロセスの効率化や省人化を実現するため、協働ロボットとAI等のデジタル技術を組み合わせたデータ駆動型生産システムの構築に取り組んでいる。今年度は、製品の検査工程を対象に、双腕型協働ロボットとAI技術を活用した外観検査システムの試作を行い、柔軟かつ高精度な外観検査が実現可能であることを確認した。さらに、ロボットと人との協働作業の安全性を高めるためのセンシングシステムについても検証を行い、その有効性を確認した。

1 はじめに

製造業における慢性的な人手不足への対応として、属人的な生産プロセスを効率化、省人化するための手段が求められており、ロボットの導入もその手段の一つである。ロボットの現場導入においては、産業用ロボットによる工程全体の自動化だけでなく、近年では、協働ロボットと人との協働作業による工程の部分的な効率化や省人化の取り組みも進められている。

一方、単にロボットを導入するだけでは、生産現場における作業条件の調整や工程改善が依然として作業者の経験や勘に依存する場合も多い。特に、多品種少量生産の工程では、ワークの特徴に応じた動きをロボットに教示する手間も増加することから、ロボットの運用が困難であるという課題がある。また、協働ロボットの導入においては、ロボットに搭載されている機能だけでは作業者の安全確保が十分でない場合もあり、状況に応じた適切な安全措置が求められる。

こうした中、近年のAI(人工知能)技術の発展により、これらの課題解決を目的としたAIとロボットの組み合わせによる高度なロボティクス技術やシステムが様々な開発されており、より多用途なロボットの社会実装が期待されている。そこで本研究では、ロボットや周辺設備等から取得される現場データをAI等のデジタル技術により分析し、その結果を作業条件や工程設計に反映させることで、生産プロセスの効率化および省人化を図るデータ駆動型生産システムの構築に取り組んでいる。

今年度は製品の検査工程を対象に、双腕型協働ロボットとAI技術を活用した外観検査システムの試作を行い、現場データの取得および活用に関する基礎的な検証を実施したので報告する。また、ロボットと人との協働作業の安全性を高めるためのセンシングシステムについても検証したので併せて報告する。

* 情報技術部

** 生産システム部



図1 「NEXTAGE NXA」外観

表1 「NEXTAGE NXA」基本スペック

項目	仕様
関節軸数	15軸(右腕6軸、左腕6軸、腰1軸、首2軸)
駆動出力	各軸80W以下
可搬重量	片腕:2.5kg、両腕:5.0kg
動作精度	±0.03mm
頭部カメラ	カラー、ローリングシャッター、1936×1096 pixel
手先カメラ	カラー、グローバルシャッター、1280×1024 pixel
ハンド	2爪エアチャック
電源	AC100～240V
外形寸法	620(W)×970(D)×1690(H) mm
質量	56kg(本体:36kg、コントローラー:20kg)

2 協働ロボットとAIによる外観検査システム

2.1 双腕型協働ロボット

ロボットとAIを活用した外観検査システムの構築にあたり、本研究では、カワダロボティクス製の双腕型協働ロボット「NEXTAGE NXA」を使用した。本ロボットの外観および基本スペックを図1および表1に示す。

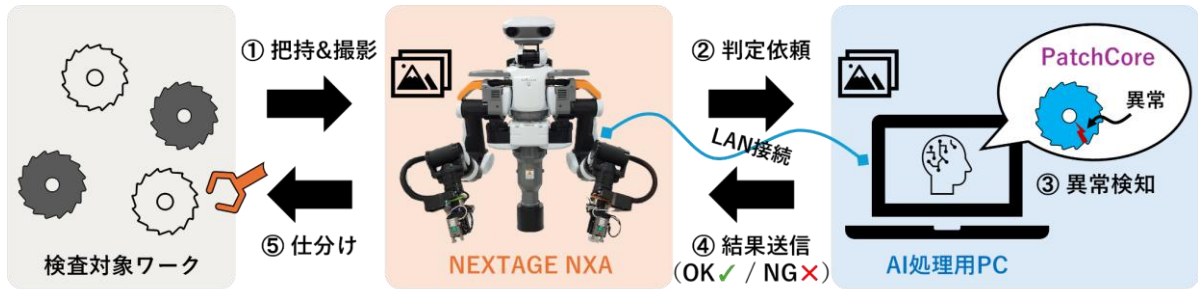


図2 外観検査システムの構成

NEXTAGE NXA は、人の両腕に相当する双腕構造を有しており、把持したワークの持ち替えによる姿勢変更など、両手動作を必要とする作業への適用が可能である。また、頭部や左右手先に搭載されたカメラにより、対象ワークや周辺環境の状態を認識するためのデータを効率的に取得可能である。

これらの特徴から、本ロボットは、検査工程における柔軟なワーク操作と効率的な画像取得を統合した処理が可能であり、本研究における外観検査システムの構築や、データに基づく作業条件の最適化の検証に適した構成となっている。

2.2 AIによる外観検査

AIを用いた外観検査手法として、本研究では、深層学習による特徴量ベースの異常検知手法を採用した。

本手法は、大規模データセットで事前学習されたニューラルネットワークモデルを特徴抽出器として利用し、正常データの特徴分布をモデル化することで、その分布からの逸脱度を異常度として算出するものである。そのため、異常データを用いた学習処理が不要であり、不良サンプルの収集が困難な場合でも有効な手法となる。

具体的な特徴量ベースの異常検知手法として、本研究では、PatchCore²⁾を用いた。PatchCoreは、正常データから抽出した特徴量をメモリバンクと呼ばれるデータベースに保持し、検査時には、入力データの特徴量との最近傍探索により異常度を算出する手法である。特徴量の類似度に基づく比較により、高精度な異常検知が可能になることに加え、画像中の検査対象の位置ズレにも頑健なため、ロボットで画像を取得した際に生じる撮像位置の揺らぎにも対応可能である。

2.3 外観検査システムの構成

本研究で構築した外観検査システムの構成を図2に示す。本システムでは、ロボットとAIが相互に連携し、ロボットが撮像・搬送を担い、AIが解析・判定を担う構成となっている。

具体的な動作手順として、まずNEXTAGE NXAにおいて、頭部カメラを用いたワークの位置姿勢推定機能により、作業エリア内のワークの検出と把持を行う。そして、把持したワークの持ち替えによる姿勢変更を行いながら、手先カメラを用いてワークの画像データを収集する。次にAI処理用PCにおいて、ロボット側からLAN

経由のソケット通信で送られてくる収集データの判定依頼に従い、PatchCoreによる異常検知とロボット側への結果の送信を行う。最後に、判定結果に基づいてNEXTAGE NXAによるワークの仕分け動作が行われる。

このように、本システムでは、ロボットによるデータ取得、AIによるデータ解析、解析結果に基づくロボット動作を一連の処理として繰り返すことで、外観検査の自動化を実現する。また、検査時に取得される画像データや判定結果を蓄積・分析することで、作業条件の改善や工程最適化への活用も可能となる。

3 安全確保のためのセンシングシステム

3.1 協働ロボットにおける安全制御

高速かつ高出力で動作する産業用ロボットでは、作業者の安全確保のため、ロボット周囲の作業空間を安全柵などで隔離する必要がある。一方、協働ロボットは人と同一空間で作業することを前提に設計されており、安全柵を設置せずに運用することも可能である。

しかし、協働ロボットにおいても安全対策が不要となるわけではなく、ロボットとの接触や衝突のリスクを低減するための適切な安全設計が求められる。特に、作業者がロボット作業領域に接近した場合には、ロボットの動作速度を低下させるなど、状況に応じた動作制御を行うことが重要である。

そこで本研究では、協働ロボットにおける安全制御の仕組みとして、ロボットへの人の接近を検知するために深度カメラとAIを組み合わせたセンシングシステムを構築し、ロボット動作速度の制御を行った。

3.2 深度カメラとAIによる人の接近検知

ロボット周囲への人の接近検知として、レーザースキャナやマットスイッチなどのセンサを用いる方法が知られている。しかし、これらの方法は距離情報のみを取得する仕組みのものが多く、作業空間内に侵入したのが人か人以外なのかの判別が困難である。そこで本研究では、画像情報と距離情報が同時に取得可能な深度カメラとAIによる人物検出を組み合わせることで、人の検出と距離推定を同時に行うセンシングシステムを構築した。

本研究では、深度カメラとしてIntel製のRealSense (D435)を使用し、RealSenseで取得したカラー画像からの人物検出にはSAM3³⁾を用いた。SAM (Segment

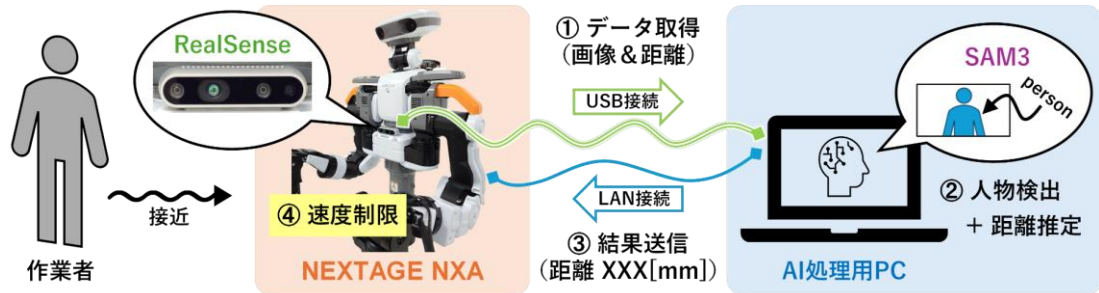


図3 人の接近を検知するセンシングシステムの構成

Anything Model) は、画像中の物体を画素単位で識別するセグメンテーション処理に特化した基盤モデルの一つであり、画像座標やテキストなどをプロンプトとしてモデルに入力することで、対象領域を柔軟に指定できる特徴を有している。本研究では、プロンプトとして「person」というテキスト情報を入力することで、画像中の人物領域のみを抽出する。最終的な接近状況の判定では、RealSense で取得した深度画像と SAM3 によって抽出された人物領域を対応付けることで人物までの距離を推定し、しきい値による接近判定を行う。

3.3 センシングシステムの構成

構築したセンシングシステムの構成を図3に示す。本システムでは、RealSense を NEXTAGE NXA の前面（腹部）に設置し、ロボット前方領域を接近検知の監視対象とした。SAM3 による人物検出は、外観検査システムで使用したものと同様の AI 処理用 PC で実行し、RealSense から USB 接続で取り込んだ画像や距離データと組み合わせることで接近判定を行った。判定結果はソケット通信でロボットに送信され、ロボット側では非同期での速度制御処理により、他動作を実行中でも動作速度を変更できるように設計した。

このように本システムでは、深度カメラによる距離情報取得と AI による人物検出を組み合わせることで、作業空間内における人物の接近状況を把握し、その結果をロボットの動作制御に反映することで作業者の安全確保を可能とする。

4 実験

4.1 外観検査システムの評価

4.1.1 NEXTAGE NXA による検査対象ワークの撮影

構築した外観検査システムの評価のため、図4に示す L 型ブラケットを検査対象ワークとして実験を行った。

本ワークでは、4 つの面の状態をそれぞれ検査する必要があるため、図5に示す手順で NEXTAGE NXA を動作させ、ワークを左右の手で持ち替えながら手先カメラにより各面の画像を取得した。なお、図5の動作手順では、右手から動作を開始しているが、ワークがロボットの左側に配置された場合には、ワークとの距離が近い左手から動作するよう設計した。

図6に、NEXTAGE NXA の手先カメラで取得した各

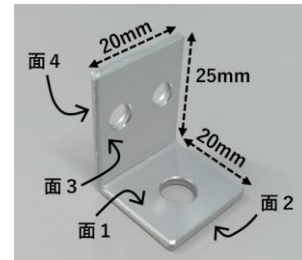


図4 外観検査の対象ワーク（L型ブラケット）

面の画像から、検査対象となるワーク部分のみを切り出したワーク画像を示す。撮影画像からのワーク部分の切り出しは、あらかじめ設定した画像中の固定位置から行い、切り出しサイズは 224×224 pixel とした。

4.1.2 PatchCore による異常検知

取得したワーク画像に対して PatchCore による異常検知を行い、正常・異常を判定した。

実験用データセットとして、学習データには正常なワーク画像 24 枚を使用した。また、評価データには、学習とは異なる正常画像 24 枚と、ワークに人為的な欠陥を付与した異常画像 32 枚の計 56 枚を使用した。

PatchCore のパラメータとして、特徴抽出器には DINOv2 (ViT-S/14) ⁴⁾ を使用し、抽出した特徴量の次元数は Random Projection により 256 次元まで圧縮した。また、メモリバンクに保持する正常特徴量の点数は 2,000 点とした。

図7に PatchCore による評価データ 56 枚に対するワーク画像単位の異常度をヒストグラム表示した結果を示す。本結果から、適切なしきい値の設定により、評価データに対して正常と異常を完全に分離できることが確認された。これにより、ロボットにより取得したワーク画像から正常・異常を正しく判定可能であることが示された。

また、図8に異常画像におけるピクセル単位の異常度をヒートマップとして可視化した結果を示す。図中の赤丸で示す人為的に付与した欠陥部分において異常度が高くなっていることから、異常箇所を視覚的に特定できることを定性的に確認した。

4.2 センシングシステムの評価

4.2.1 SAM3 による人物検出

人の接近検知による安全確保のためのセンシングシステムの評価のため、ロボット作業領域に人が接近した場

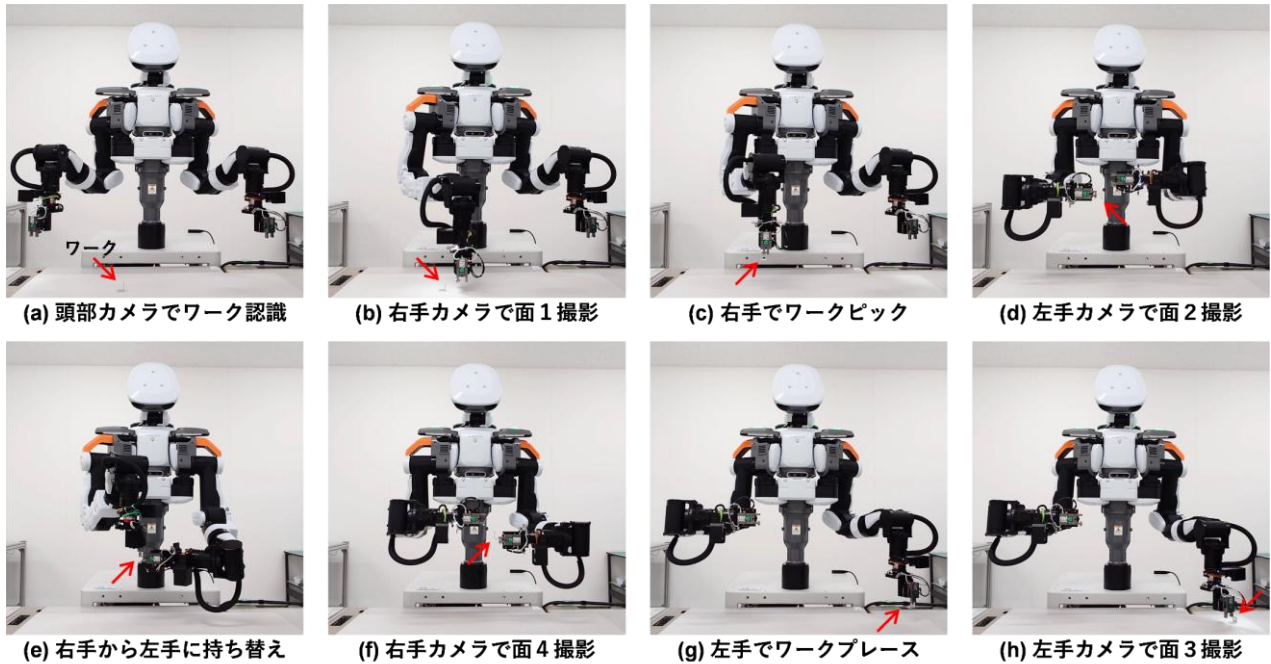


図5 NEXTAGE NXA によるワーク撮影の動作手順（右手動作から開始する場合）

合の人物検出および距離計測の精度確認を行った。

本システムで用いた RealSense (D435) により取得されるカラー画像および深度画像の解像度は 1280×720 pixel であり、カラー画像を 644×644 pixel にリサイズしたものを SAM3 への入力とした。なお、SAM3 から出力される人物領域のマスク画像は、 1280×720 pixel にアップサンプリングすることで、RealSense の深度画像との位置関係を対応付けた。

図9に RealSense で取得したカラー画像および深度画像と、SAM3 で検出した人物領域のマスク画像を組み合わせ、画像中から検出された人物領域のみに距離情報を重畳表示した画像を示す。図9の3枚の画像は、左から順に人が徐々にロボットへ接近している様子を示しており、すべての画像で人物領域のみに正しく距離情報が表示されていることが確認できる。また、人物領域に表示された距離情報も、遠方を示す赤色から近傍を示す青色へと段階的に色合いが変化していることから、RealSense と SAM3 を組み合わせることで、人の接近状況を適切に把握できることを確認した。

4.2.2 RealSense による距離計測

SAM3 により検出した人物領域における距離計測精度を検証するため、RealSense による計測値と実距離との比較実験を行った。なお、人物領域から取得される距離情報のうち、全体の下位 10% の距離の平均値を人とロボット間の距離の計測値とした。

図10にロボットに対して 30cm から 150cm までを 10cm 間隔で接近した場合の計測値と実距離の比較結果を示す。計測値と実距離が完全に一致する場合、結果は図中の破線上に分布するが、実験の結果、ロボットとの距離が増加するにつれて、計測値は実距離よりも小さく

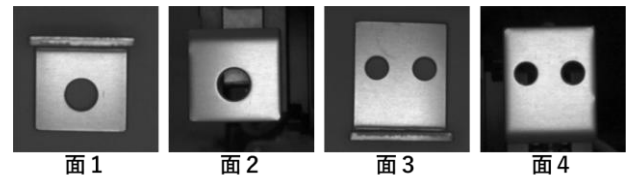


図6 撮影画像から切り出したワーク画像

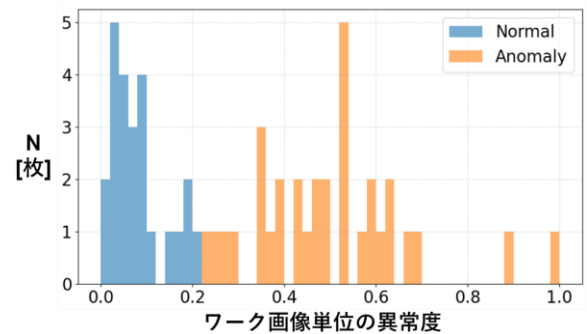


図7 評価用データに対する異常度のヒストグラム

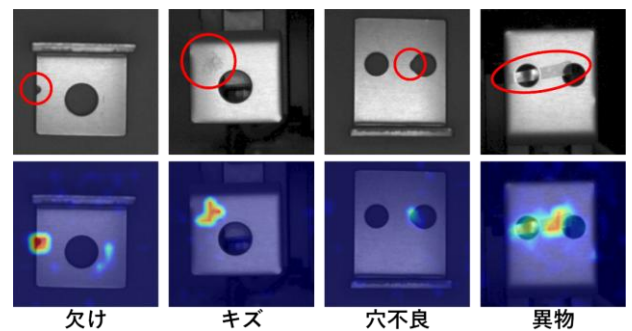


図8 ピクセル単位の異常度のヒートマップ

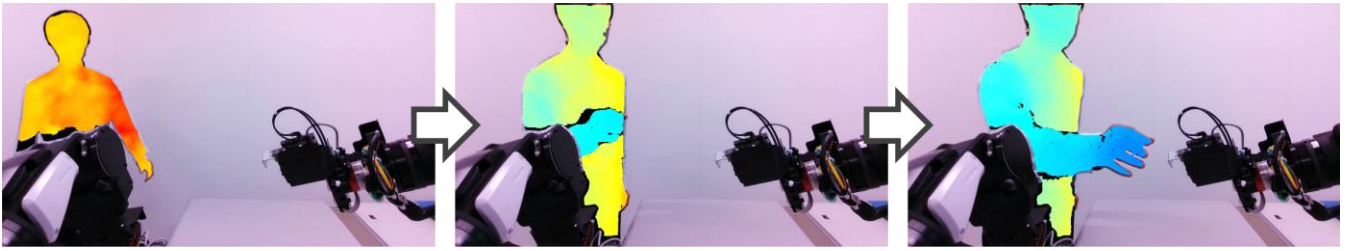


図9 SAM3で検出した人物領域に RealSense で計測した距離情報を重畳表示した画像

なる傾向が確認された。また、その誤差は最大で 10% であった。

本実験より、測定対象との距離が遠くなるにつれて計測誤差は増加するものの、過小評価方向の誤差であり、センシングシステムの目的である接近検知による安全制御の観点では、安全側に作用する結果が得られた。そのため、本研究で想定する用途においては、実用可能な誤差の範囲内であると考えられ、ロボットの安全制御に利用可能であると言える。

4.2.3 安全確保のためのロボットの動作制御

RealSense と SAM3 で計測した人の接近検知に基づく安全確保のためのロボットの動作制御について検証するため、計測値が 100cm 未満の場合に NEXTAGE NXA の動作速度を 50% 低減する非同期速度制御を実装し、その速度変化を確認した。

検証の結果、人の接近や退避に応じて NEXTAGE NXA の動作速度が適切に変化することを確認した。一方で、実験に使用した AI 処理用 PC の性能や SAM3 のモデルサイズの影響から、距離測定の間隔は約 3FPS と低速であり、急速な人物の動きへの追従性には課題が残る結果となった。

5 まとめ

本研究では、協働ロボットと AI を組み合わせたデータ駆動型生産システムの構築を目的として、双腕型協働ロボットを用いた外観検査システムおよび安全確保のためのセンシングシステムの試作とその検証を行った。

外観検査システムでは、NEXTAGE NXA によるワークの持ち替え動作と手先カメラによる画像取得を組み合

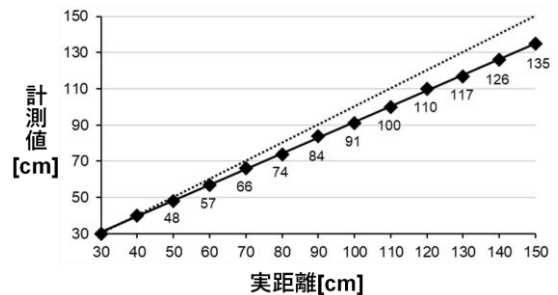


図10 RealSense による計測値と実距離との比較

わせることで、ワークの複数面の画像を取得し、特徴量ベースの異常検知手法である PatchCore により正常・異常の判定が可能であることを確認した。また、安全確保のためのセンシングシステムでは、RealSense による距離計測と SAM3 による人物検出を組み合わせた人の接近検知の仕組みを構築することで、人の接近に伴うロボットの速度制御により、作業者の安全性を高められることを確認した。

今後は、処理速度の高速化や適用工程の拡大など、データ駆動型生産システムとしての実用性向上に向けた検討を進める。

【参考文献】

- 1) K. Kawaharazuka, et al., Advanced Robotics, Vol.38, No.18, pp.1232-1254, 2024
- 2) Z. Liu, et al., Proc of ICCV, pp.10012-10022, 2021
- 3) N. Carion, et al., arXiv:2511.16719, 2025
- 4) M. Oquab, et al., arXiv:2304.07193, 2023

製造ラインを最適化するフレキシブル生産システムに関する研究開発(第1報)

ー生産システム研究会の設立とデジタル化に向けた共通基盤の構築ー

坂東直行*、久富茂樹*、渡辺博己**、生駒晃大**

Development of a flexible manufacturing system for optimizing production lines (I)

- Establishment of the Production System Study Group and construction of a common foundation for digitalization -
BANDO Naoyuki*, KUDOMI Shigeki*, WATANABE Hiroki** and IKOMA Akihiro**

製造現場の労働力不足と多品種少量生産への対応が急務となる中、デジタル技術の導入と人材育成を目的とした「生産システム研究会」を立ち上げたので、その活動成果を述べる。本研究会では、県内中小企業のニーズに基づき、自動化に関する知識共有として講演会および技術セミナーとしてハンズオンを実施した。汎用性の高いIoTベースシステムとして、M5StackとNode-REDを採用した監視システムを、プログラミングの敷居を下げるローコードで開発するハンズオンを通じ、短期間でのシステム構築とデータ可視化の手法を提示した。

1 はじめに

製造業では生産性向上とコスト削減が常に求められている。特に中小企業では競争力を高めるためにより効率的な生産体制の構築が不可欠である。多品種少量生産においては、柔軟な生産計画と迅速な対応が重要であり、自動化技術の導入が急務となっている。また、労働力不足が深刻化する中で、自動化技術を活用することで、人手不足の問題を解決し、持続可能な生産体制を実現することが求められている。

そこで本研究は製造業における多品種少量生産に対応するため、AIカメラやIoTを活用したセンシング技術を開発し、製造ラインでのリアルタイムでのデータ収集と生産計画の比較・分析を可能とする。これにより、生産ラインの効率を最適化し、生産計画の変更に迅速に対応する柔軟性の確保を目指している。

一方で、県内製造業においては自動化を推進する人材が不足しており、如何に人材を確保し、また育てていくかが課題になっている。

こうした状況を踏まえ、本研究では、研究成果を普及する活動の一環として、生産システム研究会を設立した。この研究会は、県内製造業を会員とし、生産体制の自動化に関する知識や技術を学ぶ場であり、技術セミナーや講演会の開催、会員間の情報交換・技術交流などによって、自動化技術に関する疑問・悩みの解消、新たな気づきの発見を目指している。

本報告では、この生産システム研究会について報告する。

2 生産システム研究会

研究会の設立にあたり、入会を希望する県内製造業に「デジタル化・自動化に関して、解決したい課題」および「課題解決に向けて、この研究会に期待すること」に

ついてアンケートで尋ねた。そこで得た回答を以下に示す。

デジタル化・自動化に関して、解決したい課題

- ・ デジタル化・自動化およびAIに関する知識の習得
- ・ 低コストで導入できるデジタル化・自動化手法の確立
- ・ 社内システムの属人化解消と自動化可能業務の整理
- ・ 製造現場の自動化・省人化（ロボット、AGV、無人運転など）
- ・ 検査や設備保全へのデジタル技術の活用（外観検査、異常検知）
- ・ 生産関連データのデジタル化と見える化（図面、生産状況など）

課題解決に向けて、この研究会に期待すること

- ・ AI・ロボット・デジタル技術に関する基礎知識の習得
- ・ デジタル化・自動化の事例の共有と学習
- ・ 課題整理からPoC、本番導入までの進め方の習得
- ・ 単純作業などの自動化の実現
- ・ 社内課題の整理・優先順位付けと社内展開
- ・ 小規模生産に適した自動化作例の共有・議論

こうした回答を受け、生産システム研究会では、会員に資する情報発信、学習機会の提供を行った。会員は22社27名（令和7年3月3日時点）であり、令和7年度は計3回開催し、内容は以下のとおりである。

第1回 説明、基礎知識のレクチャー

（令和7年8月29日）

初めての会合であったため、研究会の運営方針について会員間で協議し、会員間の交流を促す目的で、各会員から研究会に期待することについてのコメントを頂戴した。また、この研究会における生産システムとは何か、

* 生産システム部

** 情報技術部



図1 第1回研究会の様子



図2 第2回研究会の様子



図3 第3回研究会の様子

およびデジタル技術の基礎知識について解説した（図1）。

第2回 IoT システム構築ハンズオン

（令和7年11月27日）

事前知識・技術レベルが会員間で様々であったため、まずは議論できる共通の知識基盤をつくるべく、IoT システム構築のハンズオンを行った（図2）。

ハンズオンの内容については次章で詳しく説明する。

第3回 公開技術講演会

（令和8年2月2日）

県内企業の経営者ら3名を講師に招き、生産性向上に向けた取り組みについて講演頂いた（図3）。その中で、大規模な生産管理システムを導入した際に、逆に人手不足を助長してしまうという経験や、社内の細かな困りごとをデジタルツールを使って個別に解決することによって効果を上げた事例などを紹介いただいた。付加価値を生まないがやらなければいけない作業として、例えば手順書の作成などの業務を効率化することなどが労働時間の削減につながるなどの話題を提供いただいた。また DX 推進においては近視眼的な費用対効果を求めず、社内人材にデジタルツールを使える環境を与え、結果が出るまで耐える覚悟をするなど、経営者に向けたアドバイスがあった。

3 IoT システム

本章では、ハンズオン教材とした IoT システム（以降、本システム）について説明する。

本システムの概要を図4に示す。本システムはセンサデバイスとホストコンピュータで構成される。センサデ

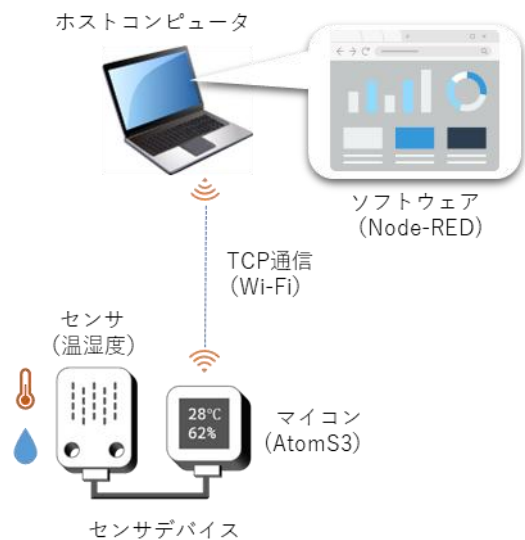


図4 IoT システムの概要

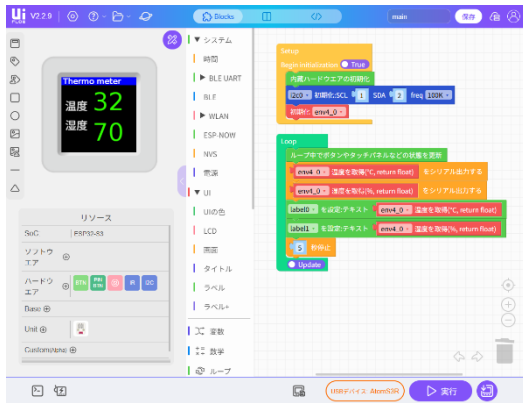


図5 M5Stack のプログラム開発環境

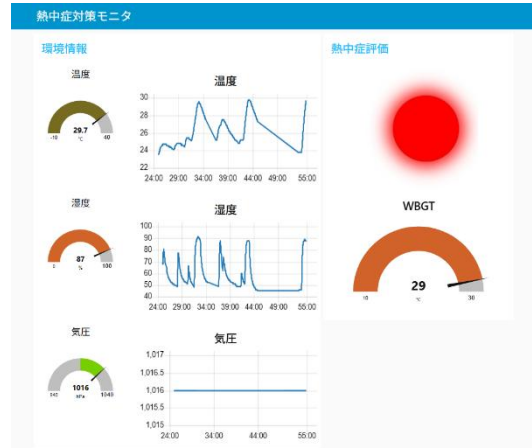


図7 システムの運用画面

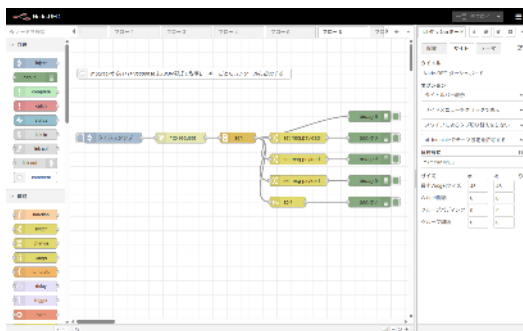


図6 Node-RED のプログラム開発環境



図8 応用事例の紹介風景

バイスは各種センサおよびセンサから取得したデータをホストコンピュータに送信するマイコンにより構成される。センサには、ハンズオン環境でデータが取得しやすい温湿度センサを採用した。マイコンには、M5Stack 社の M5Stack シリーズ AtomS3 を採用した。M5Stack は Wi-Fi 等の通信機能を標準搭載したマイコンであり、これを使うことで IoT デバイスが簡単に開発できる。

ホストコンピュータには、センサデバイスから送られてきたデータを受け取り、データ処理、保存および可視化するためのソフトウェアが必要になる。本システムでは、ソフトウェアに Node-RED を採用した。Node-RED とは、ハードウェアとそれを動かすためのソフトウェア、インターネット上の各種サービスを簡単につなげられるようにすることを目標に開発されたソフトウェアであり、オープンソースのため無償で誰でも利用できる。M5Stack および Node-RED を採用した理由は、ローコードでプログラムを開発できるためである(図 5、6)。中小製造業において、プログラムをソースコードから作成するプロコードは敷居が高い。また企業において継続的に開発・運用される場合、担当者の交代が想定される。そのため開発環境は一目でプログラム内容がイメージできるグラフィカルな開発環境が適当と考えた。

データ通信には、TCP 通信を採用した。これは TCP 通信が広く普及したデータ通信方法であるとともに、製

造業における IoT の利用では多くの場合、屋内環境が想定され、そこには既に LAN が敷設され、それを利用できると考えたためである。また、Wi-Fi を利用すれば配線作業が不要であるため、センサデバイス数の増加にも対応しやすい。なお、製造業において社内に導入する IoT システムの開発に携わる者は、社内の情報機器担当も兼任することが想定されることから、ここで学んだ知識をもとに、社内のネットワークのトラブルにも対処できるようになる効果も期待できる。

本システムの運用画面を図 7 に示す。グラフィカルにデータを可視化できており、画面を切り替えることなく各データを一目で確認できるダッシュボード機能を実現している。データの可視化においては、取得したデータの処理も学べるようにしており、本システムでは、温度、湿度情報から熱中症評価指数 WBGT の近似値を計算し、この値に基づいたアラート機能を搭載している。こうした経験を通じて、より複雑で高度な分析・判断に繋げていく足掛かりとなることを意図している。なお、本システムの構築はおおよそ 1 日のレクチャーで可能である。

本システムは製造現場における情報収集等に汎用的に使えるベースシステムとなることを意図して構成している。その応用例として、AC 電力消費量モニタ、QR コードリーダー、RFID リーダなどを紹介した(図 8)。ハンズオン受講者に対して、ここで習得した知識の活用先

についてアンケートで尋ねたところ、業務効率化や見える化への活用、センサやマイコンを用いた様々な応用可能性に関する意見が見られた。具体的には以下の回答が得られた。

- ・ ツールを使いこなせば色々なことができるため、生産現場の成形機や事務所の温湿度管理に役立つ。
- ・ 社内外の業務効率化、見える化に役立つ。
- ・ 定期的に人が行わなければならない作業を自動で行い、記録が残せるようになれば、効率化が実現できそう。
- ・ 小型で安価なマイコンモジュールで、センサを変えると様々な応用が考えられ、アイデア次第で役立つと考える。入退管理や物品管理など事務の効率化の場面で役立つ。
- ・ 各工程間にQRコードリーダーを設置して加工伝票のQRを読み、データベースとリンクさせることで、進捗状況のリアルタイム監視と在庫の見える化ができ、改善活動につながる。

また、今後どのような知識を得たいかを尋ねたところ、IoTシステム構築に関する実践的な知識、センサに関する知識、および収集データの処理・分析手法に関する知識を求める意見が見られた。具体的には以下の回答が得られた。

- ・ 組み合わせるハードウェア、ソフトウェアによって色々なことができるため、より実用的な知識を習得したい。
- ・ センサについての知識を取得したい。
- ・ 今回得た知識を土台から実用にするには、時間も構築経験も重ねていく必要があると考えるので、その構築上の考え方やノウハウを深耕するためのアドバイス等が欲しい。
- ・ (IoTシステム構築は)容易であることを社内で広め、最初の一步を踏み出すための壁を低くしたい。そのためにもどんな事ができるのか、他社ではどんなことをしているのかという情報を集めていきたい。
- ・ 収集したデータの処理・分析手法を学びたい。

こうした結果を受け、さらに実践的な知識の習得、また今回取り上げられなかったAIやロボットの活用に関する研究会を企画していく予定である。

4 まとめ

本研究では、県内製造業の多品種少量生産における生産性向上を目指し、AIやIoTを活用したリアルタイムでのデータ収集・分析基盤を開発するうえで、技術普及の一環として「生産システム研究会」を設立した。

会員へのアンケートの結果、現場では低コストで実現できる自動化やAI・ロボット活用への高い関心があるとわかった。そこで研究会ではM5StackとNode-REDを

用いたIoTシステム構築のハンズオンを実施しローコードによる開発手法を共有した。受講者からは現場の「見える化」や業務効率化への活用に期待が寄せられており、今後はより実践的なデータ分析手法の習得など、知識を深掘りする活動を継続していく。

【参考文献】

- 1) 後閑哲也,電子工作のためのNode-RED活用ガイドブック,技術評論社,2021
- 2) Node-RED User Group Japan,
<https://nodered.jp/docs/> (参照 2026/3/3)

デジタルツインを活用した危機予測 AI に関する研究（第2報）

安部貴大*、渡辺博己**

Study on AI for crisis prediction utilizing digital twin (II)

ABE Takahiro* and WATANABE Hiroki**

本研究では、近年注目を集めているデジタルツイン（DT）および AI を活用し、人、ロボットおよびモビリティが空間を共有する未来の実現を目指して、ロボットやモビリティに対する安全運転システムの開発に取り組んでいる。DT とは現実空間の情報を仮想空間上に再現する概念であり、様々な分野での活用が期待されている。本年度は、占有確率（Occupancy）と移動ベクトル（Flow）を同時に予測する AI モデルの試作を行った。ConvLSTM を用いた時系列予測により将来の占有分布と移動方向を推定し、接近・交差リスクの可視化を可能とした。

1 はじめに

近年、IoT や AI、ビッグデータなどの技術進展に伴い、デジタルツイン（DT）の実用化が進み注目を集めている。DT とは、現実空間から取得したデータを基に、対象物や環境を仮想空間上に再現する概念であり、設備監視、予兆保全、シミュレーション高度化などへの活用が期待されている。都市分野では Toyota Woven City¹⁾や Virtual Singapore²⁾などの取り組みが進められ、製造業分野でも Siemens の Digital Enterprise³⁾や三菱電機の e-F@ctory⁴⁾などが展開されている。このように、DT は多分野で活用が広がっているが、本研究では特に「空間を共有する移動体の安全確保」に焦点を当てる。近年は協働ロボットの普及により、人とロボットが同一空間で作業する環境が増加している。また、自動運転やモビリティサービスの発展を受け、国土交通省は人と車両が空間をシェアする生活道路の実現を目標として示している⁵⁾。このように人・ロボット・モビリティが空間を共有する社会においては、移動体同士の相互作用を考慮した高度な安全確保技術が求められる。

本研究では、空間内の移動体をセンサにより捕捉し、その情報を仮想空間へ投影することで DT を構築する。さらに、AI 技術を組み合わせることで移動体の将来挙動を予測し、衝突事故などの危機を事前に検知するシステムの実現を目指す。社会実装を見据え、高額なセンサに依存しない低コスト構成を前提としつつ、安全運転支援へ応用可能な基盤技術の確立を目標とする。

本研究では開発を3段階で進めている。第1段階は空間内の移動体を検出する人流計測の実装、第2段階は取得した位置情報の仮想空間への投影および DT の構築、第3段階は DT から得た時系列情報を用いて衝突予測を行う AI の実装である。昨年度までに第2段階までの基

盤整備を完了し、本年度は第3段階として、空間占有確率（Occupancy：ある領域に移動物体が存在する確率）と移動ベクトル（Flow：各地点における移動の方向と速さ）を同時に予測する AI モデルの試作を行った。本報告では、その設計および初期評価結果について述べる。

2 提案手法

人流予測に関する既存研究では、エージェントの将来位置を直接推定する点軌道型アプローチが主流である。代表例として、Alahi らの Social LSTM⁶⁾が挙げられる。同手法では、各エージェントの LSTM 状態を空間的にプーリングすることで社会的相互作用を考慮し、将来位置を確率分布として出力する。一方、自動運転分野では Occupancy および Flow を統合的に扱う研究も報告されている。例えば、Waymo による Occupancy Flow Fields⁷⁾は、将来の占有確率場と速度場を同時に予測する枠組みを提示している。ただし、これらは大規模自動運転データと高計算資源を前提とした設計であり、歩行者領域や軽量実装を主目的としたものではない。

本研究では「軽量かつ実装容易な Occupancy+Flow 同時予測モデル」の構築を目的とする。対象は歩行者領域であり、小規模データおよび単一 GPU 環境で学習可能な構成を前提とする。理論的拡張よりも、実時間応用およびエッジ実装を見据えた設計を重視する。

本モデルの全体構成を図1に示す。入力は過去8フレームの状態系列であり、各時刻における Occupancy

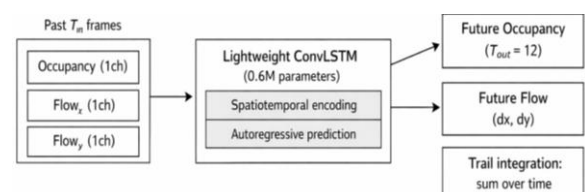


図1 モデル全体構成

* 生産システム部

** 情報技術部

(1ch)、Flow_x (1ch)、Flow_y (1ch) の3チャンネルで構成される。これらの時系列を ConvLSTM に入力し、将来12フレームの Occupancy および Flow を同時に出力する。本モデルは関数 f_{θ} として式 (1) のように定式化される。

$$(\hat{O}_{t+k}, \hat{\mathbf{F}}_{t+k}) = f_{\theta}(X_{t-T_{in}+1:t}) \quad (1)$$

式(1)において、 $\hat{O}_{t+k}$ は時刻 $t+k$ における各グリッドセルの占有確率予測値、 $\hat{\mathbf{F}}_{t+k} = (\hat{u}_{t+k}, \hat{v}_{t+k})$ は同時刻の推定変位ベクトルである。すなわち本モデルは、空間内の Occupancy と Flow を同時に推定する構造を持つ。また、人の位置を単一セルの二値占有として扱うのではなく、ガウシアン分布により連続的な確率場として表現する。各時刻 t における人 i の位置 (x_i^t, y_i^t) に対し、Occupancy 場 $O_t(x, y)$ は式 (2) で与えられる。

$$O_t(x, y) = \sum_i \exp\left(-\frac{(x-x_i^t)^2 + (y-y_i^t)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

ここで σ は空間的広がり制御する分散パラメータであり、本研究では固定値を用いる。この表現により、占有を連続確率密度場として扱うことが可能となり、勾配が滑らかになるため学習が安定する。

図1の中央ブロックに示す通り、ConvLSTMは空間的特徴抽出と時間的依存関係の学習を同時に行い、軽量でありながら時空間統合を実現している。図1右側に示すように、ConvLSTMの出力は2つのヘッドに分岐し、将来 Occupancy と将来 Flow を並列に生成する。Occupancy はロジット出力に対してシグモイド関数を適用することで確率場として解釈される。一方、Flow は連続値回帰により各セルの変位ベクトルを推定する。

Occupancy と Flow の整合性を確保するため、本研究では時間的整合性に基づく拘束を導入する。具体的には、前時刻の Occupancy を Flow に従って空間的に移動させた結果が現在時刻の Occupancy と近似的に一致することを期待する。この関係は「存在確率は推定された移動ベクトルに従って時間的に変化する」という概念を離散的に表現したものであり、Occupancy と Flow の物理的一貫性を保つことを目的とする。さらに、衝突回避応用を想定し、将来占有確率を時間方向に累積した Trail を式 (3) として定義する。

$$O_t^{\text{trail}} = \sum_{k=1}^{12} \hat{O}_{t+k} \quad (3)$$

時刻 t から将来12フレームにわたる占有確率を積算したものであり、各セルにおける将来通過可能性の累積値を表す。Trail は単一時刻の占有予測よりも広い時間的視野を持ち、潜在的な危険領域を帯状に可視化することができる。以上より、本手法は点軌道予測とは異なり、空間中心の確率場予測を行う軽量モデルである。

3 評価

本モデルの性能評価は、Occupancy 予測精度、時間積分 Trail の再現性、および Occupancy と Flow の時間的整合性の観点から行った。Occupancy はガウシアン分布に基づく連続確率場として定義されているが、実応用では危険領域の判定が必要となるため、本研究では一定閾値により二値化した上で IoU (Intersection over Union) を算出した。確率値の分布特性に依存する可能性を考慮し、固定閾値のみならず閾値スイープによる最大 IoU も併記している。IoU とは、予測領域と正解領域の重なり面積をそれらの和集合面積で除した指標であり、領域予測の一致度を評価するために広く用いられている。

予測時刻ごとの IoU の推移を図2に示す。t+1 において IoU は約 0.16 と最も高く、その後急速に低下し、t+3 以降では低水準で推移する傾向が確認された。これは短期では過去情報の影響が強く保持される一方、時間の経過とともに不確実性が増大し、確率場が拡散的になるためと考えられる。ただし、t+4 以降は大きな振動は見ら

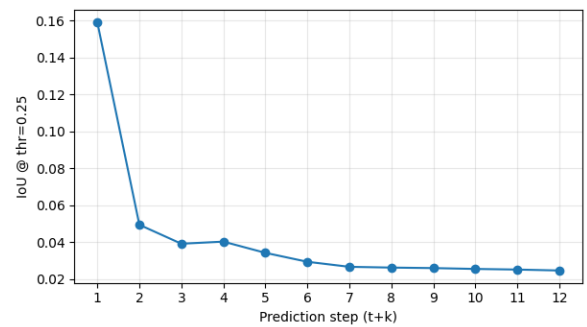


図2 予測時刻ごとの IoU 推移

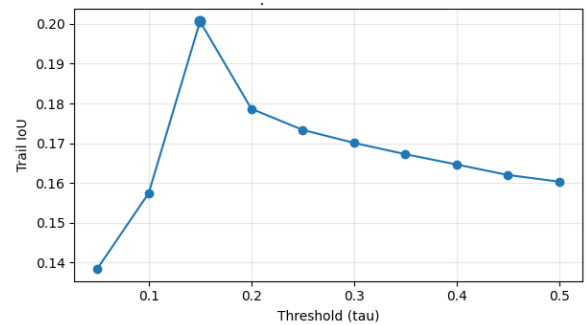


図3 Trail に対する IoU の閾値依存性

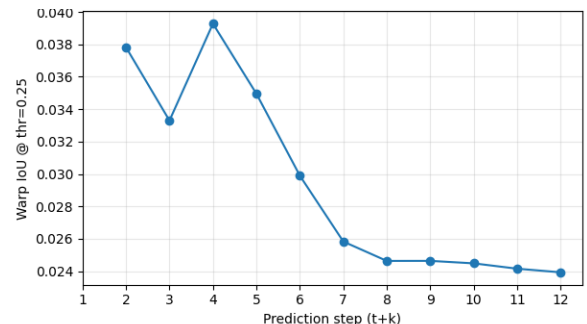


図4 Flow に基づく Occupancy の IoU

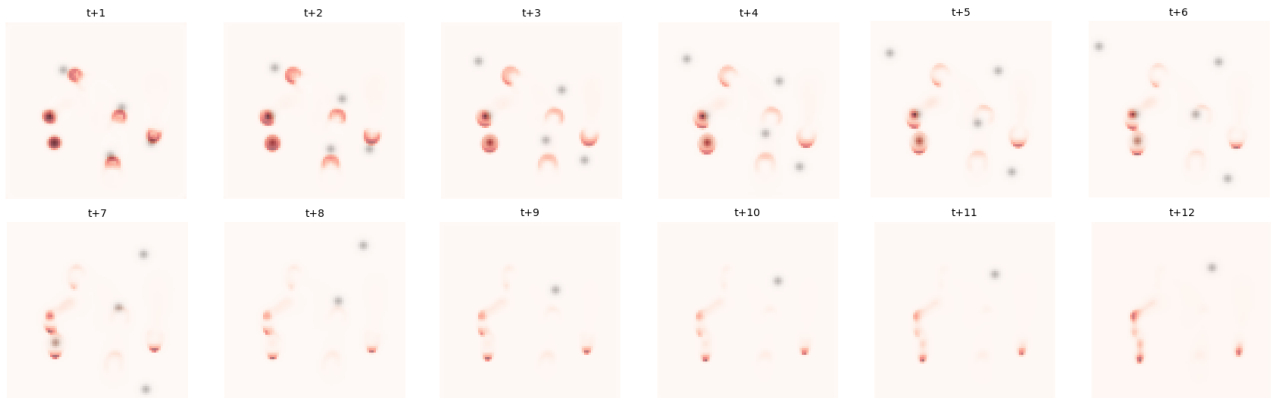


図5 提案モデルによる Occupancy 予測

れず、低値ながら安定的に推移しており、予測が完全に崩壊しているわけではないことがわかる。

次に、将来 12 フレームを累積した Trail に対する IoU の閾値依存性を図 3 に示す。閾値 $\tau=0.15$ 付近で最大 IoU 約 0.20 を示し、閾値が高すぎる場合には検出漏れが増加し、低すぎる場合には過検出が増加する傾向が確認された。この結果は、本モデルの出力が低値側に広がる確率場であることを反映している。一方で、単一フレーム IoU よりも Trail IoU の方が高い値を示しており、将来通過帯域としての空間的傾向は一定程度再現できていることが示唆される。さらに、Flow に基づき前時刻の Occupancy を空間的に変換した場合の IoU を図 4 に示す。t+2 から t+4 では一定の整合性が確認されるが、時間の経過とともに低下する傾向が見られた。これは短期では Occupancy と Flow の関係が学習されている一方、長期では Flow 誤差の累積および確率場の拡散により整合性が弱まることを示している。

以上より、本モデルは短期予測においては比較的高い再現性を示し、長期では確率場が拡散的になるものの、Trail として積分することで将来通過領域を一定程度保持できることが確認された。Occupancy と Flow の間にも短期的な時間的整合性が存在しており、本手法が空間確率場に基づく軽量予測モデルとして一定の有効性を持つことが示された。

図 5 に、未来 t+1 から t+12 までの Occupancy 予測結果を示す。グレーは正解 Occupancy、赤色は本モデルによる予測値を示している。本図は各時刻における Occupancy 分布を可視化したものであり、推定された移動ベクトルに基づいて空間的に移動する様子が確認できる。短期予測 (t+1~t+3) では、予測分布は正解分布と概ね重なっており、位置推定精度は良好である。一方で、時間が進むにつれて (t+8 以降)、予測分布は徐々に拡散し、ピーク値が減衰する傾向が見られる。これは多段予測に伴う不確実性の蓄積を反映したものである。それでもなお、主要な移動方向については時間経過後も整合が維持されており、Occupancy と Flow の時間的整合性が概ね確保されていることが確認できる。

4 まとめ

本研究では、人流予測における存在確率分布の時間的整合性向上を目的として、Occupancy と Flow を同時に予測する軽量モデルを提案した。Occupancy の予測精度を IoU により評価したところ、単一フレームの値は高水準ではないものの、短期予測では正解分布との重なりが一定程度確認された。さらに、予測 Flow により前時刻の Occupancy を変位させて次時刻との一致度を検証したところ、主要な移動方向の一貫性が維持されており、両者の時間的整合性が概ね確保されていることを確認した。今後は長期予測の精度向上および DT システムとの統合を進める予定である。

【参考文献】

- 1) TOYOTA WOVEN CITY ホームページ,
<https://www.woven-city.global/jpn/> (参照 2026/2/27)
- 2) Virtual Singapore, Virtual Singapore Official Website
<https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>
(参照 2026/2/27)
- 3) Siemens AG, Digital Enterprise,
<https://www.siemens.com/global/en/company/topic-areas/digital-enterprise.html> (参照 2026/2/27)
- 4) 三菱電機株式会社, e-F@ctory,
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/efactory/> (参照 2026/2/27)
- 5) 国土交通省, 2040 年, 道路の景色が変わる～人々の幸せにつながる道路～, 2020,
<https://www.mlit.go.jp/road/vision/pdf/01.pdf> (参照 2026/2/27)
- 6) A. Alahi, K. Goel, V. Ramanathan, A. Robicquet, L. Feifei and S. Savarese, Social LSTM: Human Trajectory Prediction in Crowded Spaces, Proc. CVPR, pp. 961-971, 2016
- 7) R. Mahjourian, J. Kim, Y. Chai, M. Tan, B. Sapp, and D. Anguelov, "Occupancy Flow Fields for Motion Forecasting in Autonomous Driving," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 2, pp. 5639-5646, 2022.

ものづくり現場におけるAI技術の活用に関する研究開発（第2報）

－協働ロボットとAIを活用した画像検査システムの開発－
内野義友輝*、生駒晃大*、横山方彦†

Research and development of AI technology utilization in manufacturing (II)
- Development of an image inspection system using collaborative robots and AI -
UCHINO Yoshiyuki*, IKOMA Akihiro* and YOKOYAMA Masahiko†

本研究では製造業における品質検査の自動化と効率化を目的として、AI技術を活用した画像検査システムの開発に取り組んでいる。本年度は部品に溶接したナットの有無と向きを自動で判定する画像検査システムを開発した。さらに、協働ロボットと画像検査システムを連携させることで、ワークの搬送から検査までの工程を自動化し、作業員の負担軽減と誤操作防止を実現した。本システムによる評価実験では大型および小型ワークの全工程で見逃し率0%（過検知率1.3%以下）の検査精度を達成した。

1 はじめに

製造業において製品の品質検査は人間の目視検査が主流である一方、労働力不足により十分な検査体制を継続的に確保することが業界全体の課題となりつつある。さらに、人間の作業にはヒューマンエラーが発生するリスクが伴い、これが品質管理の一貫性や精度に影響を及ぼす可能性がある。このような課題に対処するためには自動化と効率化が必要であり、AI技術の活用がその解決策として期待されている。

そこで本研究では、ものづくり現場へのAI活用に関する研究に取り組んでおり¹⁾、本年度は部品に溶接したナットの有無と向きを自動で判定する画像検査システムを開発した。従来の工程では作業員がマジックを用いて全数検査を行っており、検査箇所は1日におよそ9,000箇所にも及ぶことから作業負担が高く、検査品質にも個人差が生じていた。そのため、本システムを導入することで、作業員の負担軽減と検査品質の安定化を図った。

さらに、画像検査システムと協働ロボットとの連携機能も実装することで、溶接から検査までの工程を自動化し、作業員による誤操作防止にも取り組んだ。

本稿では協働ロボットとAIを活用した画像検査システムの構成および検査手法ならびに検査精度の評価結果について報告する。

2 生産工程の概要

画像検査システム導入後の生産工程を図1に示す。まず、作業員がセット台に設置したワークを協働ロボット（FANUC社製CRX-25iA）が溶接機へ搬送・保持し、部品へのナット溶接を自動で行う。

次に、溶接後のワークは協働ロボットによって検査台へ搬送される。ここで従来の工程では作業員が検査台上



図1 画像検査システム導入後の生産工程

のワークに対してすべてのナットの有無と向きを、マジックを用いた目視検査により確認していた。これに対し、画像検査システム導入後の工程では検査台上のワークに対して画像検査によりナットの有無と向きを自動で判定する。

その後、検査結果に問題がない場合には作業員がワークをパレットに収納する。

3 画像検査システムの構成および検査手法

3.1 システム構成

生産工程はワークサイズの違いにより2つに分かれており、それぞれの工程に対応した画像検査システムを構築した。図2に各工程のシステムの外観を示す。

大型のワークを検査対象とする工程Aでは対象となるワークは1種類であり、表面および裏面の両方にナットが取り付けられている。またワークの全長は約1mと大型である。このため、ワーク全体を撮影するために表面の撮影用として2台、裏面の撮影用として1台、合計3台のカメラ（ELP社製ELP-USB48MP01-AF70-J）を使用した。さらに、裏面の検査では十分な明るさを確保するため専用の照明（ミスミ社製LEDST980-W）を使用した（図2(a））。

一方、小型のワークを検査対象とする工程Bでは対象

* 情報技術部

† 株式会社東晃製作所

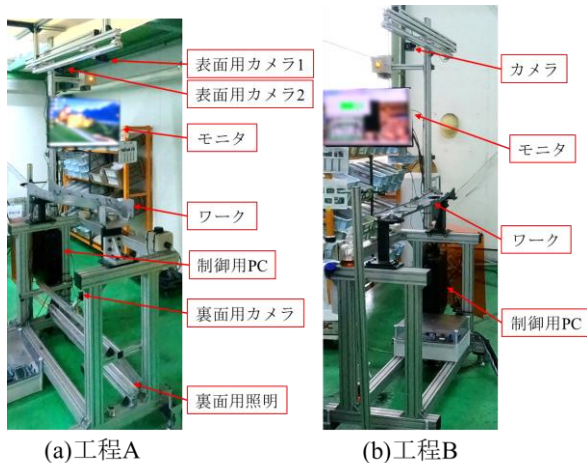


図2 画像検査システム

のワークは2種類存在し、それぞれナットの数は異なるものの、いずれもナットは表面のみに取り付けられている。そのため1台のカメラで検査が可能であり、専用の照明は使用していない（図2(b)）。

3.2 画像検査手法

本研究では画像検査システムにおける画像検査手法として Swin Transformer²⁾（以下、Swin）をベースとした画像分類モデルを構築した。検査対象となるワークに取り付けられた各ナットについては個別に画像を切り出して判定を行う構成としている。このため、1つのワークを検査するために多数の領域画像を処理する必要があり、計算量と認識精度のバランスに優れたモデルが求められる。Swin は画像を局所的な領域ごとに処理する Transformer ベースのモデルであり、多数の領域画像を処理する場合でも計算量を抑えつつ高精度な画像分類性能を示すことが報告されている²⁾。これらの特長から本研究の用途に適していると判断し、Swin を採用した。

画像検査ではまず、あらかじめカメラ画像上にナット位置に対応した検査枠を設定し、各枠を切り出す（図3）。次に、切り出した各枠の画像に対して Swin を用いて「正面ナット」「側面ナット」「ナットなし」の3クラスに分類を行う。その後、得られた分類結果に基づき各ナットについて不具合の有無を判定する。判定結果はナットごとに不具合の有無に応じて OK または NG としてモニタ上に表示され、いずれかのナットに不具合がある場合にはワーク全体の判定を NG とする（図4）。これにより、作業員はモニタに表示された検査結果を確認することで検査を行うことが可能となった。

3.3 検査精度の評価実験

検査精度の評価には見逃し率および過検知率の2つの指標を用いた。見逃し率は不良品を誤って良品と判定した割合であり、不良品が流出する可能性があるため本システムにおいて最も重要な指標である。本評価では意図的に作成した不良品サンプルを用いて見逃し率を評価した。一方、過検知率は良品を誤って不良品と判定した割



図3 検査枠内画像の切り出し



図4 モニタに表示される検査結果

合である。不良品と判定された場合には作業員が不良箇所を目視により再度確認を行うため、過検知は見逃しに比べて許容される指標である。本評価では一定期間に生産された製品を対象として過検知率を評価した。評価は大型ワークを対象とする工程Aおよび小型ワークを対象とする工程Bの両方で実施した。

工程Aでは良品6,000個および不良品24個について評価を行った。その結果、不良品を誤って良品と判定した件数は0件であり、見逃し率は0%であった。一方、良品を誤って不良品と判定した件数は76件であり、過検知率は1.3%であった。工程Aでは見逃しが発生しておらず、不良品の流出防止という観点から実用上有効な性能が得られたと考えられる。過検知については試験運用において不良品と判定された場合の画像を自動的に保存し、それらを学習データとして反映させる仕組みを取り入れている。この取り組みにより過検知のさらなる低減が可能であると考えられる。

工程Bでは対象となる2種類のワークを合わせて良品9,840個および不良品25個について評価を行った。その結果、不良品を誤って良品と判定した件数は0件であり、見逃し率は0%であった。また良品を誤って不良品と判定した件数も0件であり、過検知率は0%であった。工程Bでは見逃しおよび過検知のいずれも発生しておらず実用上有効な性能が得られた。

4 協働ロボットとの連動による工程の自動化

画像検査システムは協働ロボットとデジタル入出力信号により連動させることで、ワークの搬送から検査までの工程を自動化し、作業員の負荷軽減と誤操作防止を実現した。工程のタイミングチャートを図5に示す。

まず、協働ロボットは検査台にワークを設置すると画像検査システムに対して検査開始信号を出力する。画像検査システムはこの信号を検出すると検査台上にワーク

【参考文献】

- 1) 内野ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp111-113,2025
- 2) Z. Liu, et al., Proc of ICCV, pp.10012-10022, 2021

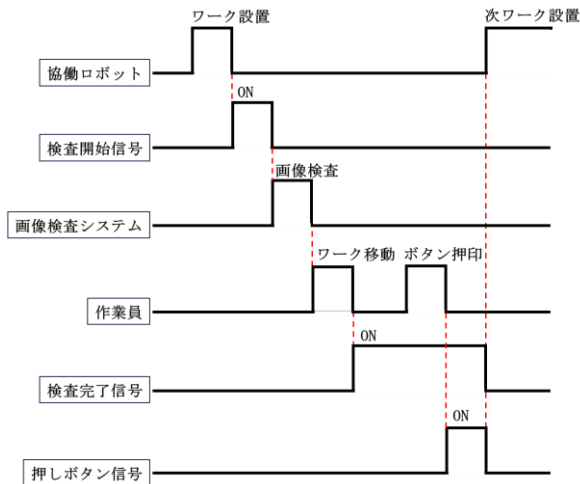


図5 工程のタイミングチャート

が設置されたものと判断し、自動的に画像検査を開始する。

次に、画像検査が完了し、作業員がワークをパレットへ移動させると検査台上からワークが除去される。画像検査システムはカメラ画像を用いて検査台上にワークが存在しないことを判定すると協働ロボットに対して検査完了信号を出力する。

その後、協働ロボットは画像検査システムからの検査完了信号の検出、かつ検査台に設置された押しボタンの作業員による押下を確認すると次のワークを検査台に設置する。

このように信号と操作の両方を確認する構成とすることで、作業員の誤操作を防止し、安全性の向上を図っている。

5 まとめ

本研究では部品に溶接されたナットの有無と向きを自動で判定する画像検査システムを開発した。大型ワークおよび小型ワークの生産工程それぞれに対応した画像検査システムを構築し、Swin Transformer をベースとした画像分類モデルを用いることで、ナットの有無と向きに関する不具合を判定できることを確認した。

さらに、協働ロボットと画像検査システムを連携させることで、ワークの搬送から検査までの工程を自動化するとともに作業員の誤操作防止による安全性向上を実現した。

今後は判定を誤った画像の追加学習を行うことで、さらなる検査精度の向上を図る。

【謝 辞】

本研究を遂行するにあたり、研究の遂行にご協力いただきました有限会社アイファームに深く感謝の意を表します。

生産リードタイムの短縮を目的とした適正在庫情報の可視化と管理技術に関する研究（第2報）

曾賀野健一^{*}、齊藤信之[†]、濱野敦子[†]、佐藤雅之[†]

Study on visualization and management technology of optimal inventory information for reducing production lead time (Ⅱ)

SOGANO Kenichi^{*}, SAITO Nobuyuki[†], HAMANO Atsuko[†] and SATO Masayuki[†]

電動車椅子はニーズの多様化に伴い製造時の在庫管理が複雑化し、欠品や余剰在庫の抑制が課題となっている。本研究では、これらのリスクを軽減する手段として、部品在庫の一元管理と即時共有を実現するシステムを開発した。発注と在庫の保管に要する経費を最小化する在庫管理手法を提案し、理論的に約 64%の経費削減効果が得られる事例を示した。

1 はじめに

電動車椅子は利用者の身体状況や生活様式に応じて仕様の個別化が進んでいる。生産現場では、この多種多様な受注に対し、部品供給の最適化と生産リソースの効率的運用が求められている。

電動車椅子は特定の機能を実現するための構成単位であるアセンブリ（以降、ASSY と記す）の複合体によって構成される。1 台の電動車椅子には約 30 種類の ASSY が必要となり、各 ASSY は約 30 種類の機工系や電装系部品から成る。機工系の部品は 700 点以上の品目を有しており、これらの部品を組み合わせることで駆動ユニット（図 1）等の ASSY を形成している。製品は特注や改造の受注（以降、オーダーと記す）に応じて設計されるため、ASSY の構成は様々ではない。そのため、設計仕様や図面の変更に伴う部品の入れ替えが頻繁に発生し、ASSY

と構成部品の相互情報が複雑かつ流動的である。

部品の入れ替えに際しては部品の使用に関する情報を確認するため、部品持出表（紙媒体）に記入する運用が行われているが、煩忙な現場では記入漏れや誤記といった人的過誤が発生している。部品持出表の情報は製造の業務に関わる部署（以降、製造部と記す）と購買の業務に関わる部署（以降、購買部と記す）に伝達され、製造部と購買部が各々管理する帳票（電子ファイル）に転記する運用（多重管理）が行われるが、誤入力やタイムラグによる在庫数の不整合が発生している。その結果、部品の使用に関する情報を管理しきれなくなり、正確な在庫数を把握できない状況となった。また、購買部では部品の手配調達が行われているが、前述の在庫数の把握問題に加え、適正な発注量に関する指標を把握しきれない。そのため、補充不足が欠品を生じさせ、工程待ちや納品遅れを招く事態や、必要以上の発注が余剰在庫を発生させる事態となっている。

本研究では、欠品や余剰在庫を抑制する適正な在庫管理の手法を検討すると共に、ASSY と構成部品に関する情報の一元化と即時共有可能なシステムを開発した。本稿では、一元管理システムの開発要件とその実装の詳細と、発注と在庫の保管に要する物量、期間、経費に関する変数を対象に変化傾向を解析し、発注と在庫の保管に要する経費を最小化するための要件を導く手法について述べる。

2 一元管理

ASSY と構成部品に関する情報を一元的に管理するための要件として、まず管理対象となる情報を一箇所に集約し、情報の網羅性を高めるしくみが必要となる。そしてオーダーごとに該当する情報を入力し、部品の持ち出しや入れ替えが発生した場合には該当する情報を即時更新するしくみが必要である。このしくみには入力漏れや

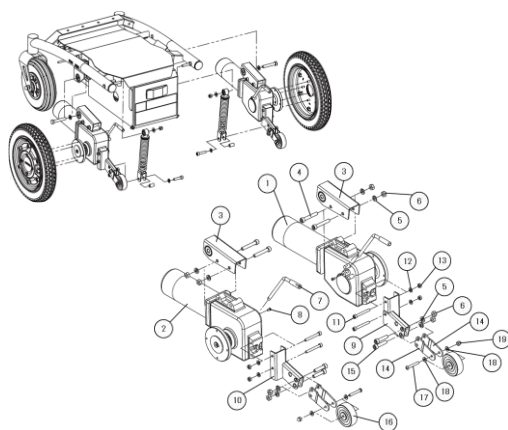


図 1 駆動系アセンブリの構造

* 生産システム部

† 株式会社今仙技術研究所

誤入力を抑制するため、入力負荷の軽減や入力を支援する機能が要求される。

2.1 開発環境

一元管理の要件に対応する方法としてリレーショナルデータベース管理システム（Relational Database Management System：以降、RDBMS と記す）を用いた。RDBMS は情報を表（以降、テーブルと記す）形式で管理し、複数のテーブル間の関連性を定義・操作することが可能なシステムである。本研究では、このシステムに MySQL（Ver8.0.32）を使用した。MySQL はオープンソースの RDBMS で情報を構造化して管理し、SQL と呼ばれる構造化クエリ言語を用いて情報を操作することができる。

MySQL と連携し、ASSY と構成部品に関する情報に対し入力・更新・照会等の機能を実現するための環境として MZ Platform（Ver4.0）を用いた。MZ Platform は企業のものづくり支援を目的に（国研）産業技術総合研究所が開発したシステム開発・実行環境であり、生産管理等のシステムをノーコードかつ無償で開発できる特長を有している¹²⁾。開発に用いたコンピューターの OS は Microsoft Windows 11 である。

2.2 システムの開発

MZ Platform と MySQL を活用し、ASSY と構成部品に関する情報を管理するシステムを開発した。システムの仕様は昨年度に実施した欠品や余剰在庫の発生要因と対応策³⁾に基づいて行った。開発したシステムを図 2 に示す。

在庫不一致の主因はリアルタイムな情報共有の欠如にある。この課題に対し、MySQL 上に ASSY および構成部品を一元管理するデータベースを構築した。データの構造は部品単体で扱う「独立系部品」と、ASSY や部品相互の関連付けを要する「非独立系 ASSY・部品」に分類して定義し、参照整合性を確保した。さらに、入庫情報の精度向上および入力負荷軽減を目的として、バーコードリーダーを採用した。設計変更に伴う部品入れ替えの際は、一意の識別子である「構成番号」を用いることで、情報の正確性と更新効率の向上を図った。また、選択方式の採用や既知情報の自動入力機能を実装することで手入力に起因する入力漏れや誤記を抑制する仕様とした。

2.3 企業人材育成支援

前節の MZ Platform と MySQL を活用したシステム開

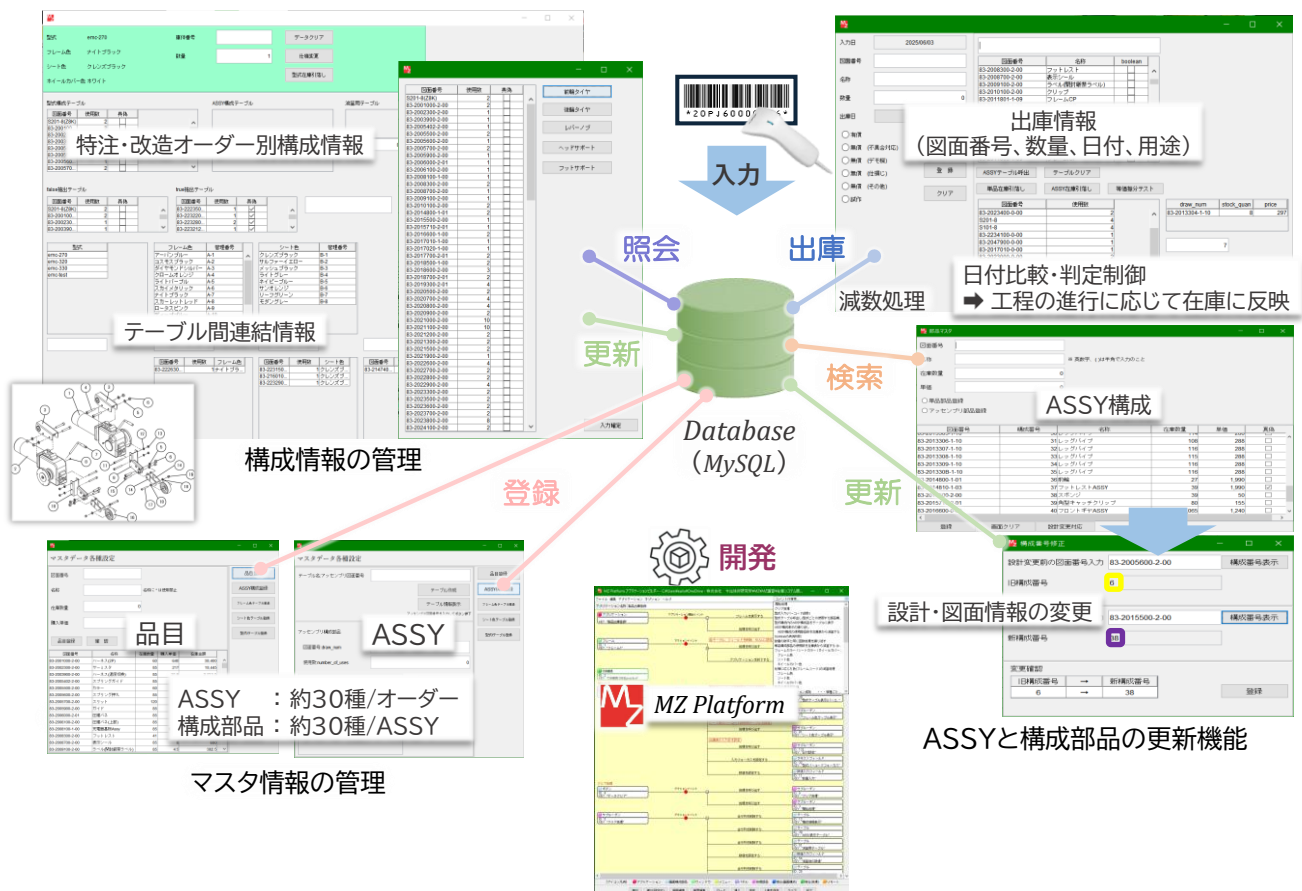


図2 ASSYと構成部品の一元管理システム

発では、企業が自らシステムの設計、開発、メンテナンスを行うことができるように、人材を育成する技術的な支援を兼ねて取り組んだ。これにより生産プロセス（在庫状況、手配調達、工程進捗等）の現状把握や計画的な生産管理に関する知見を有する技術者が現場に加わり、システムの設計変更や需要の変化に社内に対応し易くなる利点があり、外注や継続的な維持等に充てられている生産資源の使途を見直す契機になると考えている。

3 適正在庫

部品の補充不足が欠品を生み、工程待ちや納品遅れを招く事態や、必要以上の発注が余剰在庫を生み、過剰な在庫（経費）を抱える事態を防ぐため、欠品せず余剰在庫とならない適正な在庫管理の手法に関して考察を行った。

3.1 在庫数の量的な管理

部品の在庫数は概ね図3のような経時変化を示す。製造消費に伴い在庫数が減少し、ある時期に発注の手配が行われ、調達に要するリードタイムが経過すると在庫が補充される。電動車椅子の機工部品や電装部品の多くは購入ロットと呼ばれる最小購入単位が存在するが、1回に発注する数量や発注の頻度は定まっておらず都度変化する。ASSYと構成部品の最適な発注に関する指標を把握しきれていないため、欠品や余剰在庫に至るリスクが高まる。そこで本稿では最適な量の指標を導く手法に関して考察を行った。具体的には、発注と在庫の保管に関する要素として、物量、期間、経費に関する変数の変化傾向を解析し、最適な発注量（以降、経済発注量と記す）を導く。

3.2 経済発注量

年間の製造に要する総消費量を D 個、1回あたりの発注量を Q 個、発注1回に必要な経費を C_s 円とすると、

発注経費 OC は式(1)で表される。

$$OC = C_s \times \frac{D}{Q} \quad (1)$$

ただし前提条件として、 D は時間の経過に伴い、概ね一定の需要により消費される年間の総消費量を用いた。 Q は部品別に設定された購入ロット数を用いた。

部品1個あたりの1年間の保管に必要な経費を C_h 円、発注頻度を n 回とすると、平均 $D/2n$ ($= Q/2$) 個の部品を1年間保管することになるため、在庫経費 SC は式(2)で表される。

$$SC = C_h \times \frac{Q}{2} \quad (2)$$

従って、年間の発注と在庫の保管に要する総経費を TC とすると式(3)となる。

$$TC = OC + SC = C_s \times \frac{D}{Q} + C_h \times \frac{Q}{2} \quad (3)$$

図4は、座制御用ハーネスを対象に、式(3)の TC を構成する要素を入力し、発注頻度に対する経費の変化を示したものである。部品を1年間保管するために必要な経費 C_h 円は、便宜的に部品の製造原価 C_p 円に在庫維持費率 i を乗じた値を用いた。図4において TC の変化を辿ると、最小値を示すポイントが存在する。このポイントは、発注と在庫の保管に要する総経費が最小になることを示しており、経済発注量 Q^* は TC の極小値を求めることで得られ、式(4)で表される。この部品の最適な発注頻度は年間2回であった。

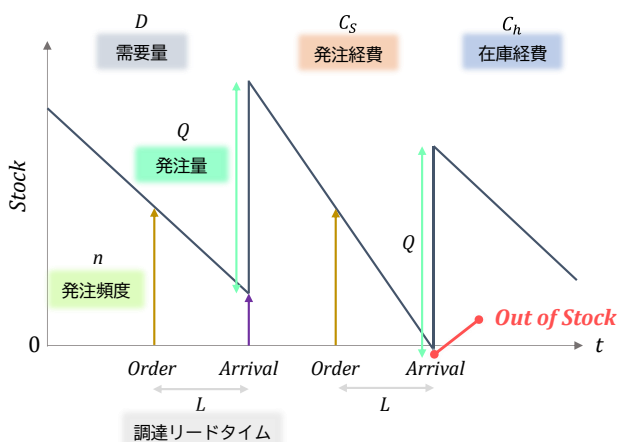


図3 在庫数の変化と量的な管理のイメージ

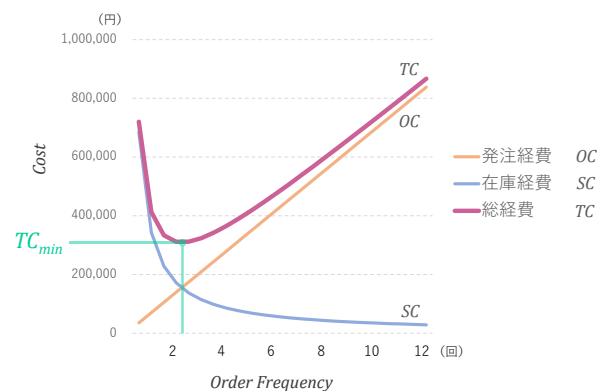


図4 発注頻度に対する経費の変化

$$Q^* = \sqrt{\frac{2C_s D}{C_p i}} \quad (4)$$

3.3 経費の削減効果

経済発注量を用いて発注した場合の最小総経費 TC_{min} は式(5)で表される。

$$TC_{min} = \sqrt{2C_s C_p i D} \quad (5)$$

図5は座制御用ハーネスを対象に、従来の発注頻度の場合に要する総経費 TC_{act} と、最適な発注頻度の場合に要する総経費 TC_{min} の比較を行ったものである。従来、年間12回行っていた発注を2回に見直すことにより、理論的には約64%の経費削減効果を得られる結果となった。座制御用ハーネスの過去1年間の月別在庫履歴を辿ると、発注と在庫の保管に必要以上の経費を要していた。適正な在庫管理の手法は、このような状況を見直す糸口として活用できるのではないかと考えている。

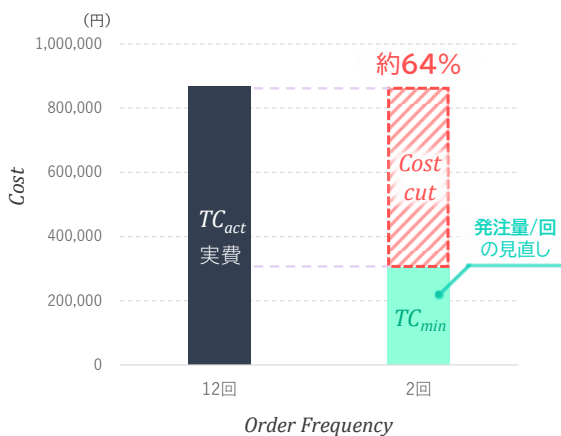


図5 発注頻度に対する経費の比較

4 まとめ

ASSYと構成部品の在庫管理に関する情報の一元化と即時共有を目的とし、MZ PlatformとMySQLを活用した在庫管理システムを開発した。このシステムは、バーコードリーダーを用いた情報入力負担軽減、入力漏れや誤入力を抑制する情報入力支援機能、関連付けられた情報の一括更新機能等を備えている。このシステム開発では、企業自ら設計、開発できる技術者の育成を兼ねて取り組んだ。発注と在庫に関する要素（物量、時間、経費に関する変量）の変化傾向を解析し、最適な発注頻度と経済発注量を導き、約64%の経費削減効果を得られる適用事例を示した。今後は、適正な在庫管理の手法を組み込み、管理の対象機種を段階的に現場に導入し、使用性の評価を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 澤田浩之, 徳永仁史, 古川慈之: Synthesiology, 8(3),158(2015)
- 2) 国立研究開発法人産業技術総合研究所, “MZプラットフォーム ユーザー会”, <https://ssl.monozukuri.org/mzplatform/> (参照 2026.2.1)
- 3) 曾賀野ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.6, pp114-117, 2025

筋変位センサを用いた動作解析と可視化に関する研究（第1報）

前田紗良*、松原早苗*、渡辺博己*

Research on motion analysis and visualization using muscle displacement sensors (I)

MAEDA Sara*, MATSUBARA Sanae* and WATANABE Hiroki*

力加減が測定可能な筋変位センサに着目し、これを用いたハンドジェスチャ分類の可能性について検討した。計測データに対して離散フーリエ変換によるノイズ除去を施した後、k-means 法によるクラスタリングを適用し、4 種類のハンドジェスチャ分類を行った。さらに、筋変位データと同時に取得したカメラ映像を用いて骨格推定に基づくハンドジェスチャ推定との性能比較を行った。その結果、カメラ映像による骨格推定ではオクルージョン（重なりによる隠れ）発生時に分類精度が低下したのに対し、筋変位データに基づく分類では安定した精度が得られた。

1 はじめに

近年、働き方改革の推進¹⁾により、製造業の現場においても作業時間の短縮や負荷軽減が求められている。

しかし、多品種少量生産や顧客の高度なニーズへの対応が必要とされる一方で、労働力不足も深刻な課題²⁾であり、作業員一人当たりの作業負担が増加しやすい状況にある。

作業員の負担を考慮した作業計画は、安全性、生産性に大きな影響を及ぼす重要なものであると考えられる。しかし、作業負荷を客観的かつ定量的に評価する手法は提案されているものの、製造現場で簡便かつリアルタイムに活用できる手法は確立されているとは言い難い。特に、作業中の力の入れ具合や身体内部の負担といった要素は外見から把握することが難しい。

本研究では、こうした背景を踏まえ、筋肉の動きをと捉えられる「筋変位センサ」に着目した。筋変位センサは、赤外線を用いて筋肉の膨らみ（変位）を直接計測するものである。これにより、一般的に筋肉の評価に用いられる筋電センサ（生体電気信号計測）と比較して電氣的なノイズの影響を受けにくく、製造現場等の複雑な環境下においても安定した計測が可能であるという特長を持つ。このデバイスを前腕に巻き付けて使用することで手や指の動きに連動する筋肉の変化を感知し、力加減を含めた動作解析および可視化技術の開発や作業負荷を評価できる可能性の検討を行う。本稿では、その基礎段階として、4 種類のハンドジェスチャを対象とした分析結果について報告する。

2 データ取得実験

本研究では、筋変位センサとして、H2L株式会社によって開発された UnlimitedHand³⁾を使用した。このデバイスは8個の筋変位センサと1個の6軸慣性センサ（加速

度・ジャイロ）を内蔵している。筋変位センサ（PR0～7）の値の変動は表1に示すように手の動きと対応している。デバイスはUSB接続によりコンピュータと接続し、筋変位センサの値について、シリアル通信を介して時系列の数値データとして取得した。以降、筋変位センサから取得したデータを筋変位データと呼ぶ。

実験では、1人の被験者の右腕前腕にデバイスを装着し、被験者の腕と手首を動かさないようにしながら、前腕を地面と水平に伸ばした状態で行った。この姿勢を保った状態で4種類のハンドジェスチャを対象に筋変位データを計測するとともに、カメラを用いて手の動きを同時に撮影した。実験は、カメラに手の平を向ける条件（手の平条件）と、手の甲を向ける条件（手の甲条件）で各1回行った。実験時間はそれぞれ約1分程度であり、その間、被験者はハンドジェスチャをランダムに変更した。筋変位データとカメラ映像はタイムスタンプを用いて同期させた。サンプリング周波数は両デバイスともに30Hzである。

3 データ解析方法

筋変位データについては、離散フーリエ変換を行って2Hz以上の周波数成分をノイズとして除去した。その後、各フレームに対して、データを類似性に基づいて自動的にグループ分けする手法である k-means クラスタリングを行い、データを分類した。なお、クラスタリング手法は、教師なし学習による分類可能性の検証を目的として

表1 筋変位データと手の動きの関係（右腕に装着した場合）

筋変位データ	手の動き
PR0 ～ 3	指を曲げる動き
PR4, 7	手首の動き
PR5, 6	手を開く動き、手首の動き

* 情報技術部

k-means を採用した。クラスタは、4 種類のハンドジェスチャに加えていずれにも分類されないクラスを含む計 5 つを設定した。得られたクラスタリング結果と、4 種類のハンドジェスチャについて手作業でラベリングした正解ラベルとを比較することで、ハンドジェスチャごとに分類可能であるかを検討した。

一方、カメラ映像からの骨格推定には MediaPipe Hands を使用した。MediaPipe Hands は Google が開発した機械学習モデルで、カメラ映像から手の骨格構造をリアルタイムで推定できる。ハンドジェスチャの判定はルールベースの手法を用い、指の先端位置が指の根元と比

較してどの位置にあるかに基づいて、各ハンドジェスチャを判定した。こちらの判定結果についても同様に正解ラベルと比較した。

4 結果

4.1 筋変位データと骨格推定による分類結果

表 2 は、手の平条件について、測定し記録した筋変位データを k-means クラスタリングした結果と正解ラベルとの比較を表している。具体的には、「各正解ラベルを有するフレームが、どのクラスにどの割合で分類されたか」を示している。表 2 より、「つまむ」「グー」

表 2 手の平条件における筋変位データの分類結果のクロス集計表(行:正解ラベル、列:クラスタ)

	クラスタ 0	クラスタ 1	クラスタ 2	クラスタ 3	クラスタ 4
つまむ	82.7 %	0.0 %	10.1 %	6.5 %	0.7 %
グー	0.6 %	78 %	2.3 %	18.6 %	0.6 %
チョキ	0.0 %	0.0 %	16.5 %	83.5 %	0.0 %
パー	0.6 %	0.0 %	54.9 %	9.0 %	35.5 %

表 4 手の甲条件における筋変位データの分類結果のクロス集計 (行:正解ラベル、列:クラスタ)

	クラスタ 0	クラスタ 1	クラスタ 2	クラスタ 3	クラスタ 4
つまむ	73.4 %	2.9 %	0.0 %	23.7 %	0.0 %
グー	13.4 %	1.3 %	77.4 %	5.0 %	2.9 %
チョキ	0.0 %	21.4 %	0.0 %	1.8 %	76.8 %
パー	5.7 %	82.4 %	2.4 %	7.8 %	1.7 %

表 3 手の平条件における骨格推定による判定結果のクロス集計表(行:正解ラベル、列:クラスタ)

	つまむ	グー	チョキ	パー	その他
つまむ	89.2 %	10.8 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
グー	0.0 %	98 %	0.0 %	0.6 %	1.4 %
チョキ	0.0 %	0.0 %	100 %	0.0 %	0.0 %
パー	0.0 %	0.3 %	0.0 %	98.6 %	1.1 %

表 5 手の甲条件における骨格推定による判定結果のクロス集計表(行:正解ラベル、列:クラスタ)

	つまむ	グー	チョキ	パー	その他
つまむ	49 %	47.8 %	0.3 %	2.9 %	0.0 %
グー	0.0 %	97.6 %	0.0 %	2.4 %	0.0 %
チョキ	0.0 %	1.8 %	96.4 %	1.8 %	0.0 %
パー	0.7 %	7.4 %	0.0 %	91.9 %	0.0 %

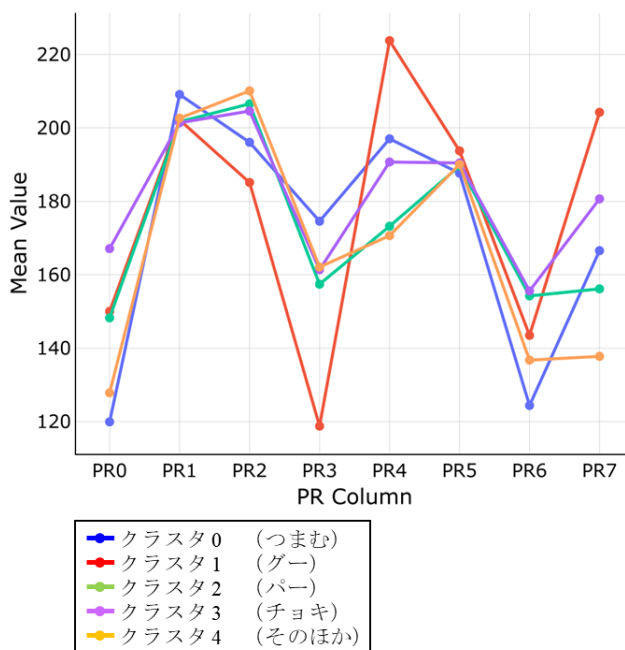


図 1 手の平条件における筋変位データのクラスタ別平均値

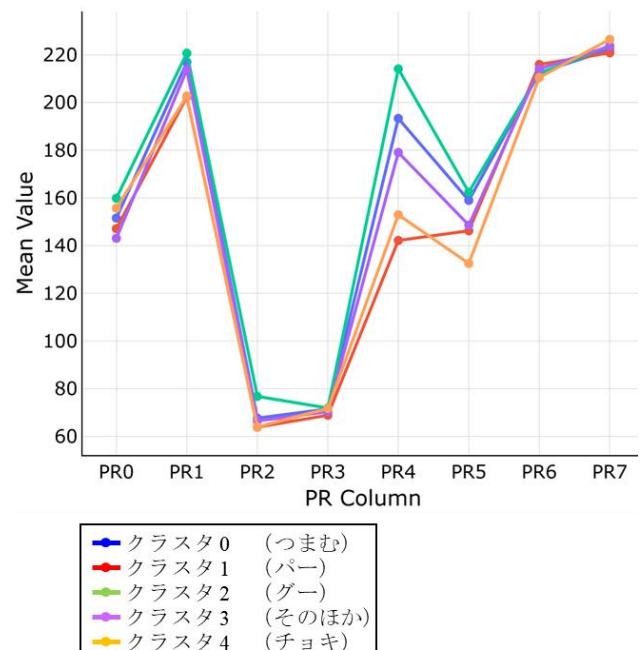


図 2 手の甲条件における筋変位データのクラスタ別平均値

「チョキ」は、それぞれ主としてクラスタ 0、1、3 に分類されており、各クラスタには対応するフレームの約 80%が含まれている。一方で、「パー」のフレームはクラスタ 2 と 4 に分散している。これに対し、骨格推定によるハンドジェスチャ判定では、表 3 に示すように、90%程度という高い分類精度でハンドジェスチャを判定できている。

次に、手の甲条件の骨格推定と筋変位データのクラスタリング結果について、それぞれ表 4 と 5 に示す。表 4 より、それぞれの正解ラベルを持つ筋変位データは特定のクラスタにそれぞれ 80%程度ずつ分類されており、手の平を上に向けた場合と同程度の分類傾向が確認された。一方、表 5 に示すように、骨格推定によるハンドジェスチャ判定では、「チョキ」と「パー」は 90%以上を正しく判定できているが、「つまむ」は「グー」と誤判定され、分類精度が低下した。

4.2 筋変位データのクラスタ傾向

それぞれの実験におけるクラスタの傾向についてクラスタごとの筋変位データの平均値を用いて比較した。図 1 は手の平条件、図 2 は手の甲条件について示している。凡例には、それぞれのクラスタについてどの正解ラベルを持つフレームがもっとも多く分類されているかを併記した。両条件を比較すると、筋変位データの値域およびクラスタごとの特徴に差異が確認された。具体的には、値域について、手の平条件の場合、すべての筋変位データは 118～223 の範囲で推移したが、手の甲条件では筋変位データの最低値は 63 であった。また、「グー」とラベリングされたフレームがもっとも多く分類されているクラスタは、手の平条件の場合クラスタ 1、手の甲条件の場合クラスタ 2 であったことが表 2 と 4 から分かる。図 1 では、クラスタ 1 は他のクラスタに比べて、指を曲げる動きに対応する PR3 が 118 で最低値、手首の動きに対応する PR4、PR7 が 223、204、手を開く・手首の動きに対応する PR5 が 193 で最大値をとる。しかし図 2

では、クラスタ 2 は指を曲げる動きに対応する PR0 が 159、PR1 が 220、PR4 が 214、手を開く・手首の動きに対応する PR5 が 162 で、それぞれ最大値をとっている。図 1 と傾向を比較すると、PR4、5 の値が他のクラスタと比較して最大値をとっている点是一致的しているが、手の甲条件でのみ PR0、1 で最大値をとっている。このように、2 つの実験で得られた筋変位データは、値域やクラスタごとの傾向に差があることが示された。

4.3 筋変位データ可視化プログラム

本研究では、記録した筋変位データをグラフとして推移を可視化し同時刻のカメラ画像と比較して表示する動画出力プログラムを開発した。図 3 に、手の平条件のデータに対するプログラムの出力画面例を示す。クラスタリング結果は背景の色で可視化している。カメラ画像はグラフの右端の時点 (23.84s) の手の様子で、MediaPipe Hands による骨格推定結果も同時に表示している。プログラム出力を時系列的に確認したところ、ハンドジェスチャの切り替わり時に筋変位データに基づくクラスタリング結果が短時間で頻繁に遷移する傾向が確認された。

5 考察

筋変位データの k-means クラスタリングでは、手の向きにかかわらずハンドジェスチャを異なるクラスタに分類可能であることが示された。しかし、手の平条件では「パー」の分類がクラスタ 2 と 4 に分散した。この原因について、被験者のハンドジェスチャ実行時における力の入れ方にばらつきがあった可能性がある。これによって同一のハンドジェスチャであっても筋変位データのパターンが変動し、クラスタ中心が複数形成されたと推測される。

骨格推定によるハンドジェスチャ判定では、手の平条件では正確にハンドジェスチャを判定できた一方で、手の甲条件では「つまむ」と「グー」の分類精度が大きく低下した。ここでは指が手に隠れているため、骨格推定

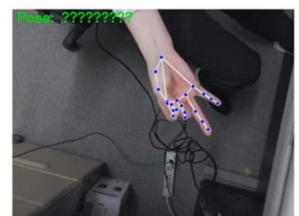
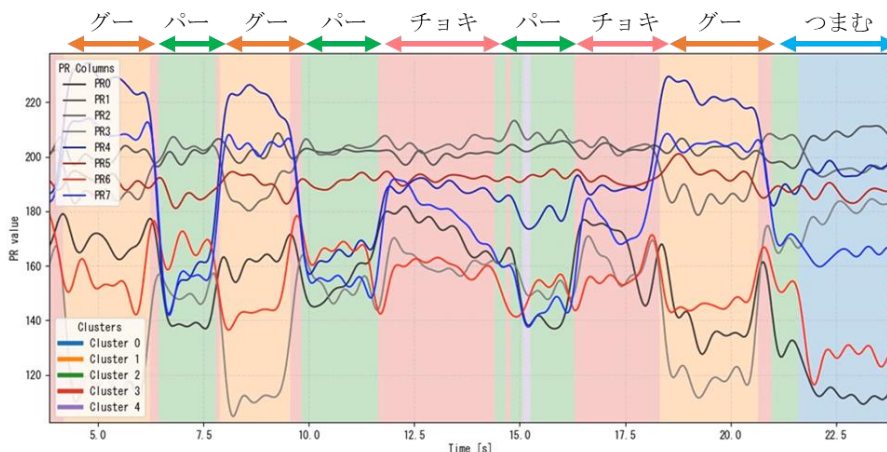


図 3 筋変位データと分類結果（背景色）の可視化及びカメラ映像（23.84s 時点）

において指の位置の推定が不安定になり、指の位置が重要になる「つまむ」と「グー」のハンドジェスチャの判定があいまいになったと推測される。

また、手の平条件と手の甲条件間で筋変位データの値域やクラスタ分布の傾向にばらつきが確認された。この差の発生要因として、計測条件による変動が考えられる。具体的には、センサの装着位置のずれや手の回転による筋肉の状態の変化などが考えられる。

筋変位データ可視化プログラムの出力を解析した結果、ハンドジェスチャが切り替わる遷移区間においてクラスターリングが安定せず、短時間に複数回切り替わる現象が確認された。これは、ジェスチャ遷移時に筋活動が連続的に変化しクラスタ中心との距離が不安定となるためであると推測される。また、筋変位データに対して腕や手の回転が大きな影響を与えることから、製造業の現場における手指に着目した動作解析で、課題となると考えられる。

6 まとめ

本研究では、筋変位データを用いたハンドジェスチャの分類可能性について検討した。UnlimitedHand に内蔵された筋変位データに対して離散フーリエ変換によるノイズ除去と k-means クラスターリングを適用し、4 種類のハンドジェスチャの分類を試みた。その結果、以下のことが明らかになった。

第一に、筋変位データのクラスターリングにより、約 80% の分類精度でハンドジェスチャを分類できることが示された。ただし、実験では「パー」のハンドジェスチャについては分類が分散した。この要因として、ハンドジェスチャの移り変わり時に筋肉の状態が中間的な値を示すことと、被験者の力の入れ方にばらつきがあることが挙げられる。第二に、カメラ画像に対する深層学習ベースの骨格推定では、手の平条件下において高い分類精度が得られた一方、オクルージョンが発生する手の甲条件では分類精度が低下する傾向が確認された。これに対し、筋変位データに基づく分類では、手の向きの違いにかかわらず約 80% の分類精度が得られた。第三に、2 回の実験でクラスタ分布の傾向にばらつきが確認できた。これはセンサの装着位置や手の回転による筋肉の動きの変化など、計測条件の違いが結果に影響を与えた可能性を示唆するものである。

本手法は、作業現場におけるジェスチャ認識や作業負荷評価への応用が期待される。今後は、時系列情報を含めたデータ解析や、センサ装着条件の標準化、および被験者数の拡大による再現性の検証を進める。

【参考文献】

- 1) 厚生労働省,働き方改革の実現に向けて,
<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000148322.html> (参照 2026/2/20)

- 2) 経済産業省,2025 版ものづくり白書(参照 2026/2/20)
- 3) UnlimitedHand
<http://UnlimitedHand.com/> (参照 2026/2/1)

切花フランネルフラワーの開花・出荷予測システムの開発（第1報）

前田紗良*、松原早苗*、大原藍†

Exploration of a flowering and harvest prediction system for cut flannel flowers (I)

MAEDA Sara*, MATSUBARA Sanae* and OHARA Ran†

フランネルフラワーの生育状態から出荷予測を行う技術に焦点を当て、生育期と蕾形成後の二つの段階について、それぞれ異なるシステムとして開発を行っている。生育期の出荷量予測では草丈と株幅から最適な作型モデルを自動選択するシステムを Excel の VBA を用いて自動化した。蕾形成後の開花予測では U-Net を用いた画像解析 AI による検出を試みた。蕾検出については初期段階の蕾に対して Recall 0.800 の高い検出率が得られ基礎的な有効性が確認できたが、蕾の成長段階別識別精度については課題が残った。また、蕾径と温度の関係から回帰式を導出し、現在の蕾径から開花時期を良好に推定できることを明らかにした。

1 はじめに

切花フランネルフラワーは本県の主要な花き品目であり、市場から高い評価を得ている。出荷量は増加しているが、出荷時期が集中すると需給バランスが崩れ、単価の維持が困難になる課題がある。出荷量や出荷時期を事前に把握し、販路の確保や出荷調整を行うことは経営規模の拡大に寄与するものである。そのため、蕾形成後の出荷予測技術と出荷時期を調整する技術の確立が求められている。

本研究では、フランネルフラワーの生育状態から出荷量予測を行う技術に焦点を当て、生育期と蕾形成後の二つの段階について、それぞれ異なるシステムとして開発を行っている。まず、第一段階の生育期の出荷量予測システムについては、播種時期によって基準となる成長曲線と月別の出荷量予測モデルを利用するが、実際の生育状況に応じた補正が必要になる。従来、この作業は手作業で実施されており時間を要していたため、本稿では自動化ツールを開発し、作業の効率化および省力化を図った。第二段階の蕾形成後における開花時期予測については従来は経験に依存していたため、出荷計画が立てにくいという課題があった。そこで画像解析 AI を用いた開花時期予測システムを構築し、出荷可能時期を週単位で予測することを目指している。本稿では、その基礎検討として画像から蕾を検出できるかについて実験を行った。また、植物の成長や開花は環境条件の影響を強く受けることが知られている。特に温度は植物の発育速度に大きく関係することから、温度と蕾径の関係について回帰式を導出した。

2 関連研究

深層学習を用いた画像解析技術は農業分野でも応用さ

れている。山口県農林総合技術センターでは、ユリのオリジナル品種について開花予測技術の開発に取り組んでおり、セマンティック・セグメンテーションモデルを用いた茎頂部の自動抽出と CNN モデルによる生育ステージ分類を実施している¹⁾。栽培画像から蕾長や出芽時期を画像診断により予測し、出荷予測精度の向上を目指している。

また、一般に植物の成長や開花は温度環境に強く依存することが知られており、その予測手法として有効積算温度が広く用いられている。有効積算温度は日平均気温から発育が停止する基底温度を差し引いた値を積算した量として定義される。福田ら²⁾はトルコギキョウに対して、発蕾日を起点とした収穫日予測モデルを開発し、有効積算温度を用いた予測が高い精度を示すことを報告している。ストックの開花予測に関する研究³⁾では、発蕾期以降の花蕾径と積算温度の関係から開花予測が可能であることが報告されている。花蕾径と積算温度の回帰式を用いることで、誤差1日の範囲で開花日を予測できると報告されており、有効積算温度による予測手法の有効性が示されている。

3 生育期の出荷量予測システム

生育期の出荷量予測は「作型モデル」と称される独自の成長曲線モデルによって行われている。このモデルは、播種時期や品種などの条件に応じて適用されるが、実際の生育は環境などによって変動するため、適宜補正が必要となる。現在、これらの補正作業は岐阜県農業技術センター（以降、農業技術センター）が、各農家の作付け情報を集約して行っている。本稿では、この補正手順を自動化するツールを開発した。

3.1 作型モデル

フランネルフラワーは播種時期や品種などによって基準となる成長曲線および月別の出荷量予測モデル（作型モデル）が存在する。この作型モデルは農業技術センタ

* 情報技術部

† 岐阜県農業技術センター 花き部

一が作成したもので計 49 種類が存在する。作型モデルは播種した月ごとに異なり、以下の情報から構成される。

- ・月ごとの草丈と株幅の成長曲線
- ・月ごとの一株からの切花収量予測

この作型モデルを用いることで、播種時期から出荷時期と出荷量を事前に予測することが可能である。

3.2 補正方法

実際の生育状況は日照や気温などの環境条件によって変動が生じやすい傾向にある。そこで株の成長過程において、同時期に播種した株のうちランダムな数株を抽出し、現在の草丈と株幅を計測する。これらの実測値に最も近似する作型モデルを再選択することで予測の補正を行っている。選択されたモデルの切花収量予測を適用することにより、実際の生育状況に即した出荷量予測が可能になる。

3.3 自動化ツールの処理手順

本稿では Excel の VBA とピボットテーブルを用いて自動化ツールを開発した。図 1 に示すように以下の 4 つのステップで処理を実行する。

- (1) 品種名、生産者名、月、株幅(cm)、草丈(cm)、株数、現在の作型を読み取る。
- (2) 株幅と草丈の絶対誤差の合計（ $|株幅差| + |草丈差|$ ）が最も小さい作型モデルを探索し、適用する。
- (3) 適用した作型モデルと、(1)で読み取った株数をもとに、月別の出荷量予測を算出する。
- (4) 生産者別、品種別に合計の出荷量予測を算出する。

本ツールの導入により、必要なデータを入力し、実行ボタンをクリックすることで、計算結果の出力が可能となった。開発した自動化ツールの補正精度や実用性については、今後の運用を通じて検証する予定である。完成後は、技術移転を目的にツールを各農家に配布することを目指している。

4 蕾形成後の開花予測システムに向けた基礎検討

画像解析 AI を用いた開花時期予測システムを構築するため、第一段階として蕾の自動検出について検討した。また、蕾径の推移データをもとに、積算温度を用いた開

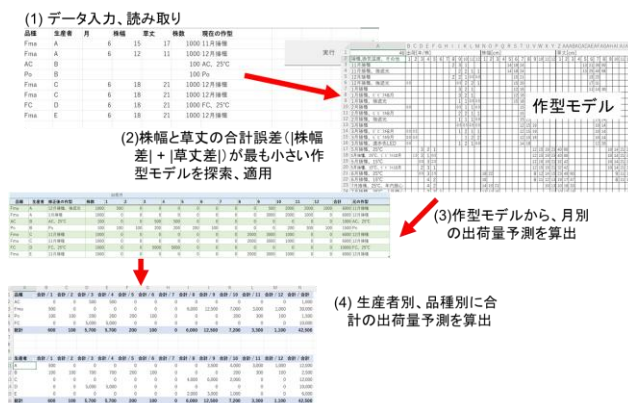


図1 自動化ツールの処理

花予測モデルについても検討した。

4.1 画像解析 AI による蕾検出

画像解析 AI の U-Net を用いて、栽培現場で撮影した蕾形成後のフランネルフラワーの画像から蕾を検出が可能であるかについて実験した。併せて蕾の成長段階の識別についても検討した。

4.1.1 教師データ

教師データとして農業技術センターで栽培されているフランネルフラワーを真上から撮影した画像を 83 枚使用した。本画像を 512×512pixel に 4 分割し、合計 332 枚の学習用画像を作成した。このうちランダムに選択した 264 枚を学習用データ、34 枚をテスト用データ、34 枚を検証用データとして割り当てた。また、アノテーションは蕾部分と株部分について実施し、それ以外は背景とした。蕾部分は大きさに応じて以下の 3 段階に分類することで成長段階の識別を試みた。

- ・蕾 A : ~8mm (最も小さい初期段階)
- ・蕾 B : 9~11mm (中程度の中期段階)
- ・蕾 C : 12mm~ (最も大きい後期段階)

株部分もアノテーションした理由として、株領域内に蕾が存在するため、株全体の領域を認識させることで、蕾をより正確に識別できると考えたためである。

4.1.2 学習モデル

セマンティック・セグメンテーションモデルである U-Net を用いて学習および推論を行った。エンコーダーには、ImageNet で事前学習済みの EfficientNet-B4 を用いた。開発言語には Python を使用し、学習回数は 100 エポック学習とした。学習過程では検証用データの平均誤差が最小になった時点でのモデルを最適モデルとして採用した。セマンティック・セグメンテーションモデルを使用した理由は蕾の大きさの分析に役立てられると考えたためである。

4.1.3 推論結果

U-Net による推論結果の例を図 2 と図 3 に示す。各図は、入力画像、アノテーション画像、推論結果の順に表示している。アノテーション画像と推論結果は視覚的に分かりやすいように入力画像に重ねて表示している。また、成長段階について、蕾 A は赤、蕾 B は橙、蕾 C は黄色で示している。図 2 は良好な検出例であり、蕾 A を精度よく検出できていることが確認できる。アノテーション画像と推論結果が概ね一致しており、モデルが蕾の位置と形状を正確に捉えることができています。しかし、図 3 では蕾 C を蕾 A として誤検出している。

表 2 は、U-Net による検出精度評価結果を示している。株部分を含めた学習条件よりも、蕾のみを有効なクラスとし、株部分を背景として処理した条件の方が蕾の検出精度が良好であった。本研究では蕾を検出することが主目的であるため、蕾のみを検出対象とすることにした。

この場合、蕾 A の検出については特に Recall が 0.800 と高い値を示したことから、概ね可能であることが確認

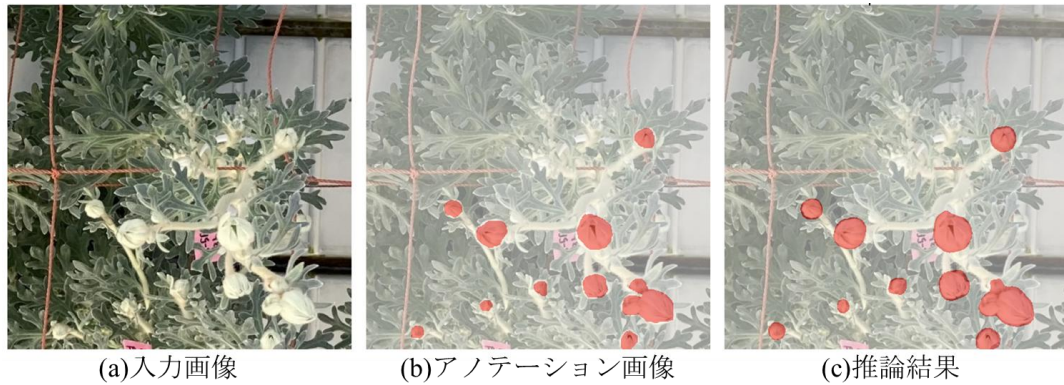


図2 U-Net による推論結果の例（良好な検出）

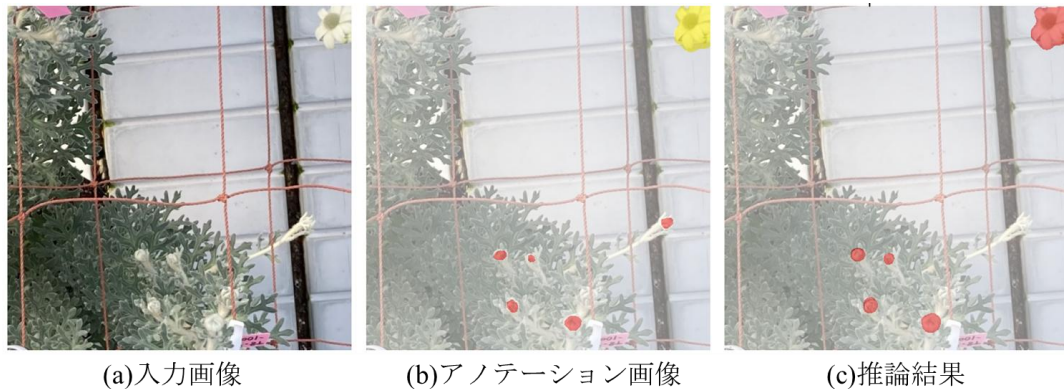


図3 蕾Cが蕾Aとして誤認識される例

表2 U-Net による検出精度評価結果

Class	蕾のみ			蕾+株		
	mIoU	Dice	Recall	mIoU	Dice	Recall
蕾A	0.543	0.671	0.800	0.528	0.656	0.716
蕾B						
蕾C	0	0	0	0	0	0
株				0.919	0.957	0.969

された。ただし、mIoU が 0.543 と中程度に留まり、精度向上に課題を残している。蕾Bについては、データ数が少なかったため検証用データセットに含まれず、評価不能であった。また、蕾Cの検出精度は0であった。

4.1.4 考察

蕾Aの検出については基礎的な有効性が確認されたが、成長段階の識別には至らなかった。この要因として、以下の2点が挙げられる。第一に、学習用データが少なかったことである。教師データは83枚の画像を512×512pixelに分割した332枚で構成されており、データの多様性が限定的であった。第二に、蕾A、B、Cの出現頻度に大きな差があったことが挙げられる。教師データに含まれる蕾について、赤色で示される最も小さなクラス（蕾A：～8mm）が全体の蕾の大部分を占め、他の成長段階の蕾が極めて少ない状態であった。具体的には、全蕾領域のピクセル数のうち、蕾Aに分類される領域が約90%、蕾Bが約8%、蕾Cが約2%であった。そ

のため、モデルは出現頻度の高い蕾Aの特徴を優先的に学習し、蕾B、Cの特徴の学習が不十分であった。その結果、図3で示すように蕾Cは識別されず、蕾Aとして誤識別された。このことが蕾AのmIoUを低下させる要因となっていると考えられる。

また、株部分を含めた学習条件では蕾の検出精度が低下した。これは学習データが限定的な中で、複数のクラス（蕾A、B、C、株、背景）を同時に学習することで、各クラスの判別境界が不明確になったためと推測される。

4.1.5 今後の課題と改善

蕾の検出について、成長段階の識別には至らなかった課題を解決するためには学習用データの拡充が重要である。特に出現頻度の低かった蕾B、Cのデータを増加させ、各クラスのサンプル数が均衡した学習データセットを構築する必要がある。また、他の画像解析AIの適用や物体検出AIとの併用を検討する。具体的には蕾検出のみに特化したシンプルなモデルと検出された蕾の成長段階を詳細に判別するモデルとの組み合わせなどが考えられる。

4.2 残り積算温度による開花予測

温度は植物の発育速度に強く影響する重要な環境要因であるので、本稿では蕾形成後のフランネルフラワーについて温度を用いた開花予測モデルの構築を試みた。

4.2.1 方法

温度と蕾径の関係を明らかにするため、両者の相関を

示す回帰式の導出を試みた。解析にあたり栽培空間の温度については1時間ごとに測定されたデータを使用し、蕾径については1週間ごとに計測した実測値を用いた。

蕾径の成長と開花予測の関係を定量的に分析するため、蕾径を説明変数とし、残り積算温度を目的変数とした成長曲線の描画を実施した。ここで積算温度は、日平均気温を積算した量と定義し、残り積算温度は、現時点から開花するまでに必要な積算温度とした。この関係式が得られれば、現在の蕾径から必要な残り積算温度の算出が可能となり、開花日の予測に寄与すると考えられる。

4.2.2 結果

図4に、蕾径と残り積算温度の関係とフィッティング結果を示す。使用した蕾径のデータは2020年から2024年にかけて測定されたもので、年次ごとに色分けして示している。蕾径と開花までに必要な残り積算温度の関係をフィッティングにより解析した結果、以下の回帰式を得た。

$$y = -236.68 \ln(1.94x - 1.81) + 1087.98$$

ここで y は残り積算温度、 x は蕾径で単位はmmである。得られた回帰式の決定係数 R^2 は0.78であった。

4.2.3 考察

本研究で使用した蕾径のデータは1週間ごとの計測であったため、実際の蕾の発生や開花は、観察日の前日から次の観察日までの1週間のいずれかの時点で発生している。例えば、観察日の夕方に蕾が発生した場合、その蕾が「発生した」と記録されるのは7日後の次の観察日である。観察直前に蕾が発生した場合と比べると、両者の実際の発生時期には最大7日間の差が生じることとなる。同様の誤差は、開花のタイミングについても生じると考えられる。このような要因から、開花までに必要な積算温度の算出において、実測値との間に一定の誤差が含まれることは避けられない。しかし、本研究で得られた回帰式の決定係数 R^2 は0.78であり、このような条件下においても、データの傾向を良好に説明できていると言える。この結果は蕾径と残り積算温度の間に強い相関関係が存在することを示唆している。

今後、より高精度な予測モデルを構築するためには、

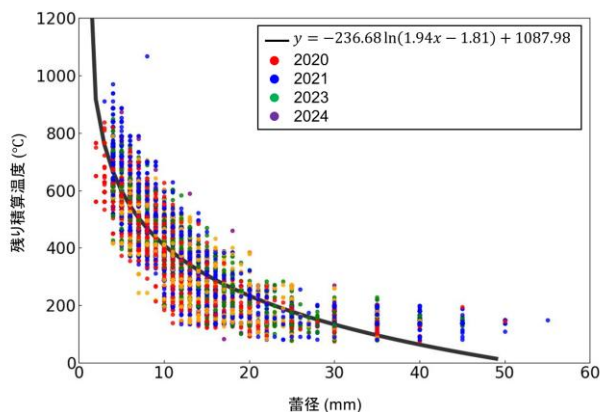


図4 蕾径と残り積算温度の関係

蕾の発生や開花のタイミングをより短い時間間隔で正確に記録することが必要である。また、開花に至る蕾径が個体によって異なる可能性もあり、さらなる検討が必要である。

5 まとめ

本研究ではフランネルフラワーの生育状態から出荷予測を行う技術の開発に取り組んだ。開発にあたっては、生育期と蕾形成後の二つの段階に分け、それぞれ個別のシステムとして構築を進めた。

生育期の出荷量予測システムでは、ExcelのVBAとピボットテーブルを用いて自動化ツールを開発した。従来の手作業による作型モデルの再選択と出荷量予測の補正を自動化することで、作業の効率化および省力化を実現した。

蕾形成後の開花予測では画像解析AIであるU-Netを用いた蕾検出システムの構築を目的とした。本稿では、その基礎段階として、栽培現場で撮影した蕾形成後のフランネルフラワーの画像から蕾の検出が可能であるかについて検証した。その結果、基礎的な検出能力を有することが確認され、画像解析AIによる蕾検出の基礎的な有効性が示された。一方、成長段階別の識別精度については、課題が残った。その原因として教師データに含まれる蕾の出現頻度が不均衡であったこと、教師データ自体が不足していたことが挙げられる。今後は画像認識精度の向上のための学習データの拡充に加え、物体検出AIや他の画像解析モデルの適用を検討し、これらの課題を改善することにより、より正確で実用的な開花予測システムの構築を目指す。

また、温度を用いる開花予測では蕾径と開花までに必要な残り積算温度を用いて回帰式を導出した。本式を活用することで、現在の蕾径と気象予報データから開花時期を推定できることが示唆された。今後は個体差に関する知見や、より短い間隔での蕾径のデータを活用することによって、さらに正確な開花予測について検討する。

【参考文献】

- 1) 藤田淳史, 山口県農林総合技術センター, <https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/uploaded/attachment/156796.pdf> (参照: 2026/2/1)
- 2) 福田ら, 園芸学研究, vol22, No.2, p173-182, 2023
- 3) 田邊ら, <https://www.pref.tottori.lg.jp/secure/1289920/kaikayosoku.pdf> (参照: 2026/2/1)

AI を用いたメタルアーチファクト低減技術の開発

遠藤善道*

Development of metal artifact reduction technology using AI

ENDOY Yoshimichi*

X 線 CT を利用する際に、CT 画像に発生するメタルアーチファクトという現象が問題となっている。メタルアーチファクトとは、金属などの X 線の吸収度が高い物質がある場合に生じる線状のノイズのことである。特に医療分野では診察の障害になることから、メタルアーチファクトを低減させる技術が研究され実用化されている。一方、AI 技術を利用してメタルアーチファクトを低減する研究がいくつか報告されているが、実用化には至っていない。本研究では、AI を利用してメタルアーチファクトを低減する技術を開発したので報告する。

1 はじめに

X 線 CT (Computed Tomography : コンピュータ断層撮影) は非侵襲で簡便に利用でき、人体の内部を 3 次元的に観察できることから、医療分野では必須の機器となっている。工業分野でも非破壊で試料の内部を可視化することができるため活用されている。当所の装置に関しては、例えば、鋳物巣の観察、製品にある亀裂の場所や形状の確認や不具合を起こした機器の内部観察などに利用されている。

X 線 CT を利用する際に、X 線の吸収度が高い物質があると、メタルアーチファクト (metal artifact) という現象が起きる。

図 1 に、本研究で取り組むメタルアーチファクトの例を示す。図 1(a)は樹脂製品の中に金属棒を 2 本埋め込んだ試料の CT 画像、(b)がコネクタを撮影した CT 画像で、矢印が示す線状の陰のように見える部分がメタルアーチファクトである。

医療分野では、歯にかぶせた金属キャップ、骨折の治療に埋め込んだボルトなどでメタルアーチファクトが生じ診察の障害となっている。

工業分野でも、金属が使われている製品内部の構造を

観察する場合に生じ、製品検査の障害となっている。

メタルアーチファクトに関しては、投影データ上で金属による影響を特定し、その領域を補正するアルゴリズム (MAR アルゴリズム¹⁾) が開発・実用化されている。また、異なる 2 種類のエネルギーの X 線を照射し、物質のエネルギー吸収特性の違いを利用して、金属の影響を低減するというデュアルエネルギー CT (DECT¹⁾) という技術も開発・実用化されている。

CT 装置開発企業や CT データ解析ソフト開発企業においても、メタルアーチファクトを低減するソフト・ハードの開発が行われている²⁾³⁾。しかし、技術の詳細は公開されていない。

一方、Deep Learning 技術が開発されてから、AI を用いた物体認識、製品検査など画像処理の分野で目覚ましい進歩があり、メタルアーチファクト低減に関する研究もなされているが、実用化されている技術はないようである。AI の学習には、数多くのメタルアーチファクト画像と、アーチファクトのない教師画像の組が必要であり、多くの画像を用意することができないために、汎化性能を出すことができないと思われる。

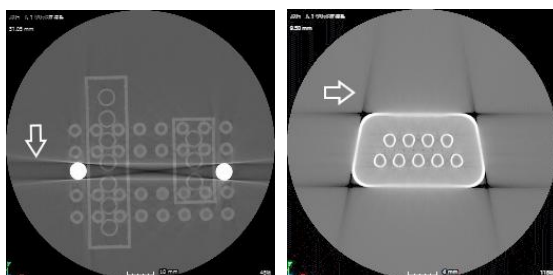
本研究では、多数の学習用画像を作成する手法を提案し、AI を利用してメタルアーチファクトを低減するニューラルネットワークを開発したので報告する。

2 実験方法

2.1 学習用画像の作成

2.1.1 メタルアーチファクト画像の作成

樹脂製品または木材に穴をあけて、金属棒や金属片を差し込む、または、試料と同じステージ上に金属棒を立て、CT 画像を撮影する。樹脂製品や木材と金属では、X 線の吸収度が違うために、図 1(a)に示すメタルアーチファクトがある画像を撮影することができる。図 1(a)で、左右にある白い丸の部分が金属、矢印で示している線状の影がメタルアーチファクトである。樹脂製品は内部に構造、木材は内部に木目を持つために、1 回の撮影で、



(a)樹脂製品の中の金属棒 (b)コネクタ
図 1 メタルアーチファクトの例

* 技術支援部

「模様が違う」多くの CT 画像を作成することができる。金属の大きさや位置、個数を変えることで多数のメタルアーチファクト画像を作成する。画像は、256 x 256 ピクセル・モノクロとする。

また、学習には用いないメタルアーチファクト画像を用意しておき、汎化性能の評価に利用する。

2.1.2 教師画像の作成

2.1.1 項で用いる樹脂製品や木材から金属を除いた CT 画像を作成する。樹脂製品や木材の位置、CT 撮影した断面の位置を揃えることで、2.1.1 項の画像から、金属とメタルアーチファクトを除いた画像を作成する。

作成した画像に、プログラムで、2.1.1 項の画像の金属の位置を白く塗りつぶし、メタルアーチファクトのない教師画像を作成する。

2.1.3 データの拡張

2.1.1 項、2.1.2 項の画像の組について、画像の回転、反転、フィルタ処理などでデータの拡張をおこなって、ニューラルネットワークの学習画像とする。

2.2 ニューラルネットワークの構築と評価

2.2.1 試用するニューラルネットワーク

AutoEncoder などの画像復元、DnCNN などのノイズ除去、PSPnet や U-Net などの画像セグメンテーションとして研究開発されたニューラルネットワークを試用する。

画像セグメンテーションは、画像を複数のパーツや領域に分割するための手法であるが、教師画像にノイズのない画像を用いることで、ノイズ除去にも使うことができる。

2.1 節で作成した 256 x 256・モノクロ画像に合わせて、ニューラルネットワークの階層数を調節する。また、各階層のチャンネル数や、バッチ正規化の有無などのバリエーションを付け、幾つかのネットワークを作成する。

さまざまなニューラルネットワークを試して、メタルアーチファクトを低減に適したネットワークを見つける。

2.2.2 ニューラルネットワークの評価

2.1 節で用意した画像を用いて、ニューラルネットワークの学習を行う。ネットワークの評価は、学習に用いた画像を復元することができるか（復元性能）、学習に用いていない画像からメタルアーチファクトを除くことができるか（汎化性能）でおこなう。

画像の評価には、SSIM (Structural Similarity Index) や PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) が用いられることが多いが、CT 画像は輪郭が曖昧であることから、SSIM などの数値評価はなじまないと考え、本研究では、ニューラルネットワークで処理した画像を目視で評価する。復元性能は、処理結果と教師画像を比較し、汎化性能では処理結果からメタルアーチファクトの現象の度合いを評価する。

3 結果と考察

3.1 学習用画像の作成

図 2(a)に木材に金属棒を刺した試料の外観を、図 2(b)に図 2(a)の CT 画像の例を示す。

図 2(b)に示すとおり、メタルアーチファクトが生じている CT 画像を作成できた。木材や樹脂製品は内部に構造を持つために、1 回の CT 撮影で、30~40 枚の「模様が違う」CT 画像を作成することができた。樹脂製品は樹脂製ブロックを組み合わせて作成した。

図 3(a)に金属棒を刺していない木材の CT 画像、図 3(b)に金属棒の位置を白く塗りつぶした画像を示す。

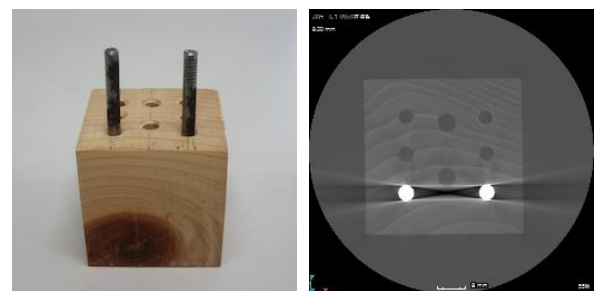
図 2 で作成したメタルアーチファクト画像と、試料の位置を揃えることで、図 3(b)に示すメタルアーチファクトがない CT 画像を作成することができた。

金属の位置や個数を変え、木材や樹脂製品も変えることで、容易に多数のメタルアーチファクト画像と教師画像の組を作成することができた。

本研究ではオリジナルのメタルアーチファクト画像と教師画像の組を 7854 作成し、データの拡張によって約 7 万組の画像を用意した。

3.2 ニューラルネットワークと評価

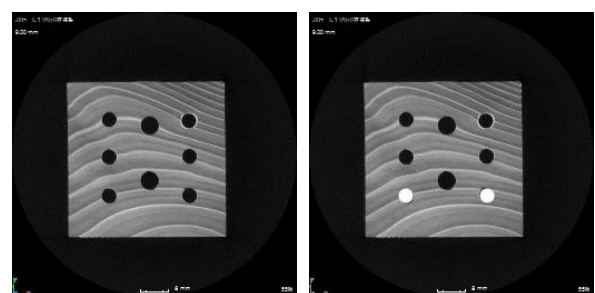
表 1 に本研究で試したニューラルネットワークと評価を示す。プログラム言語は python、ライブラリーは PyTorch を利用した。「モデルの種類」欄にある、#1、#2 等の数字は、ニューラルネットワークの構造は同じで、階層数やチャンネル数等を変えたものである。



(a)木材に金属棒

(b)CT 画像

図 2 メタルアーチファクト画像の作成



(a)金属棒のない CT 画像

(b)金属棒の位置にマーク

図 3 教師画像の作成

表1 試したニューラルネットワーク

No.	モデルの種類	復元性能	汎化性能
1	autoencoder #1	△	×
2	autoencoder #2	○	×
3	autoencoder #3	○	×
4	Deeplabv3+ #1	○	×
5	Deeplabv3+ #2	×	×
6	Deeplabv3+ #3	○	△
7	Dense-UNet #1	◎	◎
8	DnCNN #1	×	×
9	DnCNN #2	×	×
10	DnCNN #3	○	×
11	FFDNet #1	△	×
12	FFDNet #2	○	○
13	PSPNet #1	○	○
14	PSPNet #2	○	○
15	PSPNet #3	△	△
16	ResNet Autoencoder #1	◎	◎
17	ResNet Autoencoder #2	◎	◎
18	ResNet Autoencoder #3	◎	○
19	ResNet Autoencoder #4	○	×
20	ResNet Autoencoder #5	△	△
21	SegNet #1	○	△
22	SegNet #2	○	△
23	SegNet #3	△	×
24	U-Net #1	×	×
25	U-Net #2	◎	◎
26	U-Net #3	◎	◎
27	U-Net++ #1	◎	◎
28	U-Net++ #2	◎	◎

性能評価欄の記号は、性能が良い物から◎、○、△、×としている。◎の評価は実用的であることを示す。ResNet Autoencoder や U-Net などの、スキップ接続を持つニューラルネットワークが、復元性能、汎化性能ともに良好であった。

図4に汎化性能が良好であった ResNet Autoencoder #1 の学習曲線を示す。学習・検証ともに単調減少して収束

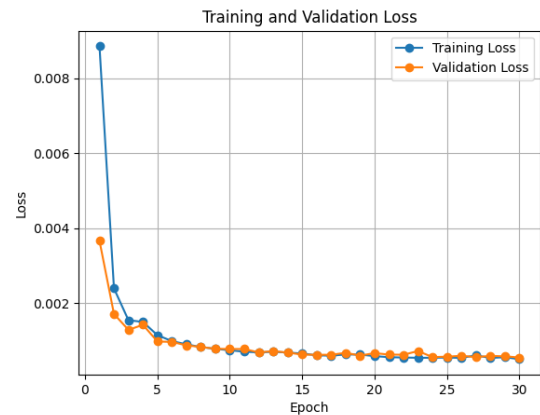


図4 ResNet Autoencoder #1 の学習曲線

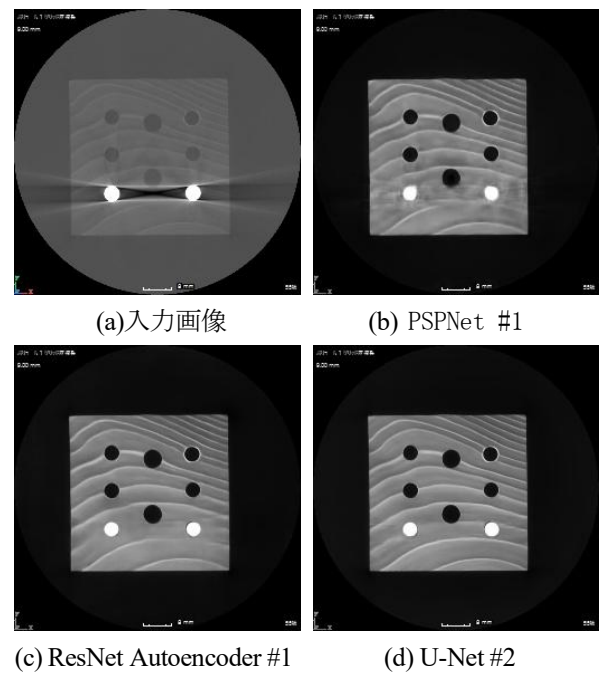


図5 画像の復元結果

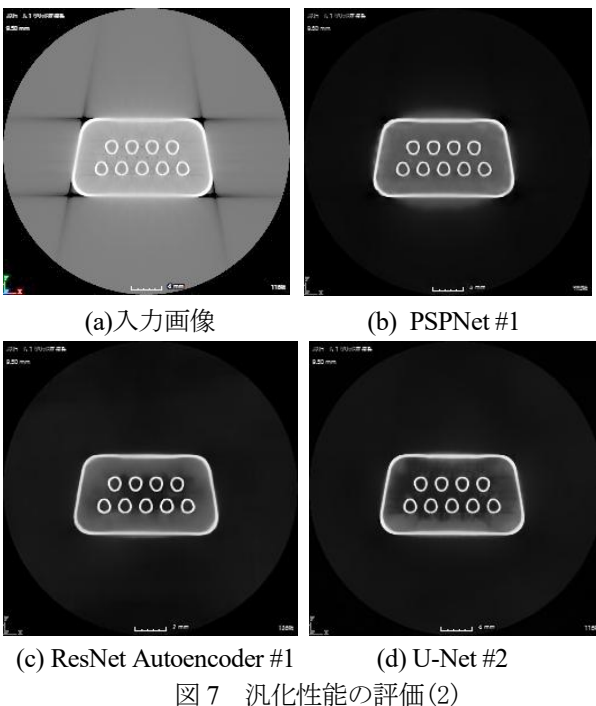
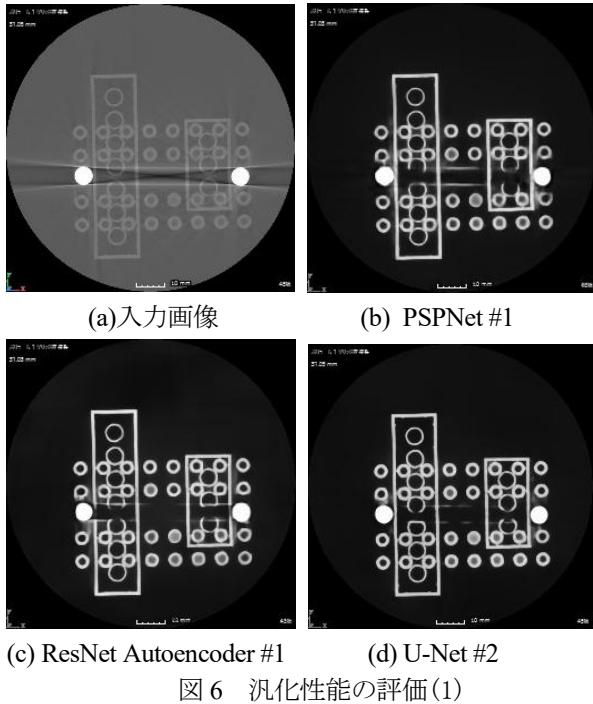
しており、ニューラルネットワークのモデル、データ量が適切であることを示している。

表1に示すニューラルネットワークについて、損失の絶対値は違うが、図4と同様の曲線となり、試したニューラルネットワークの学習については問題なく終了した。また、過学習は起きておらず、15~20 エポックで十分な性能が得られた。

図5に学習で用いたメタルアーチファクト画像と、各種ニューラルネットワークを用いて処理した結果の例を示す。

図5(a)のメタルアーチファクトを含む画像を処理した結果を図5(b)から(d)に示す。図5ではメタルアーチファクトが除去され、木目がきれいに復元されている。

図6、図7に、学習に用いていないメタルアーチファクト画像を各種ニューラルネットワークで処理した結果



の例を示す。

図6は金属棒を差し込んだ樹脂製品、図7はD-SUB9ピンコネクタの断面である。図に示すメタルアーチファクトは除去されるとともに、コントラストも改善されている。

表2に、表1で汎化性能が実用的であったニューラルネットワークのパラメータ数と、1エポックの学習に要した時間を示す。学習は、NVIDIA GeForce RTX4060で、混合精度演算を利用した。1エポックの画像枚数は約7

表2 パラメータ数と1エポックの処理時間

No.	モデルの種類	パラメータ数	時間(分)
7	Dense-UNet #1	46,280,577	36.7
16	ResNet Autoencoder #1	4,129,473	8.4
17	ResNet Autoencoder #2	46,635,137	27.1
25	U-Net #2	31,389,569	33.2
26	U-Net #3	31,042,369	27.4
27	U-Net++ #1	9,162,753	33.9
28	U-Net++ #2	48,929,089	40.5

万枚である。パラメータ数は、`torchinfo.summary()`関数で求めた。

ニューラルネットの学習には、パラメータ数の10倍以上の画像枚数が必要と言われるが、本研究では枚数がかなり少ないにもかかわらず、良い結果を得ることができるニューラルネットワークを数種類作成することができた。

4 まとめ

本研究では、多数の学習用画像を容易に作成する手法を提案し、メタルアーチファクトを低減することができるニューラルネットワークを開発した。

スキップ接続の構造を持つニューラルネットワークが汎化性能に優れていた。また、パラメータ数に比して少ない学習用画像でも実用的な性能を出すことができた。

本研究では、256 x 256ピクセルという小さな画像を扱った。CT処理ソフトでは、面積で16倍にあたる、1024 x 1024ピクセルの画像を出力することができるので、今後は、本研究を元に大きな画像を処理できるニューラルネットワークの開発を行う。

【参考文献】

- 1) 金属アーチファクトの発生原理とその低減技術：関連文献レビュー，
<https://jsrt-tohoku.jp/cms/wp-content/uploads/2022/02/61003dd3bf62110e0637de304af27669.pdf>(参照 2025/04/11)
- 2) TomScope ホームページ，
<https://tomoscope.com/technical-information/artifact>(参照 2025/04/11)
- 3) 金属アーチファクト低減ソフトウェア（島津製作所ホームページ），
https://www.an.shimadzu.co.jp/sites/an.shimadzu.co.jp/files/pim/pim_document_file/an_jp/brochures/20755/c251-4649.pdf(参照 2025/04/11)

令和8年7月 発行

令和7年度
岐阜県産業技術総合センター研究報告
第7号

編集発行 岐阜県産業技術総合センター

所在地 〒501-3265 岐阜県関市小瀬 1288 番地

電話 (0575) 22-0147

FAX (0575) 24-6976

E-mail info@gitec.rd.pref.gifu.jp

ホームページ <https://www.gitec.rd.pref.gifu.lg.jp/>

