

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

令和6年度
岐阜県産業技術総合センター研究報告
第6号

Report of Gifu Prefectural Industrial Technology Center
No.6 2025

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

目 次

○機械

ロボットを用いた製造業における人作業の負荷低減手法の開発（第3報）	1
転造ダイスの摩耗・チッピング異常を検出する工程監視システムの開発（第3報）	4
切削工具の工具寿命に関する研究（第1報）	7
金属積層造形材の被削性評価（第1報）	
－金属積層造形材の機械的特性評価－	11

○金属

刃物製品のブランド力向上のための切れ味評価技術の開発（第5報）	13
鋳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1報）	
－鋳造シミュレーションを用いた鋳造欠陥予測－	17
高湿度環境における金属腐食の防止に関する研究（第1報）	19
レーザー加飾技術の高度化に関する研究（第2報）	22
低融点金属による水栓製品欠陥補修技術の開発（第1報）	26

○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13報）	
－帯電防止プラスチックの開発(4)－	29
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14報）	
－難燃性プラスチック複合材料の開発(4)－	33
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15報）	
－軽量化・複合化によるマルチマテリアル製品の開発(4)－	37
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16報）	
－リサイクルプラスチックの物性向上技術の開発(4)－	41
有機被膜によるめっき微細欠陥の被覆に関する研究（第3報）	45

○繊維・紙

美濃楮の安定生産と品質評価に関する研究（第3報）	
－楮の品質評価－	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1報）	
－端材を原料とした吸音材の開発(1)－	53

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2報）

ー異種ポリマーブレンド物の熔融紡糸技術の開発(1)ー…………… 55

機能性を有する繊維の開発（第3報）…………… 57

ウールブレンド紙糸製品の開発（第2報）…………… 60

○複合材料

E V向け軽量化部材の開発（第3報）…………… 63

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1報）

ー持続可能なセルロース繊維を用いたPP複合材料の機能強化ー…………… 69

二液型接着剤の少量塗布時における混合比を安定化するデバイスの開発（第3報）…………… 73

CFRPの賦形加工技術に関する研究（第1報）…………… 77

○情報

協働ロボットによる作業者補助を実現する操作システムの開発（第4報）

ーToFカメラを活用したオブジェクト認識技術の開発ー…………… 81

協働ロボットとAIによる作業連動システムの開発（第3報）…………… 85

精密深絞り加工の安定生産に関する研究（第3報）…………… 89

加工機モータの回転を利用した情報伝達手法の開発…………… 92

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1報）

ー熟練・非熟練作業者の視線と手の動作の比較ー…………… 96

構造最適化を活用した創造的設計技術に関する研究（第1報）…………… 100

デジタルツインを活用した危機予測AIに関する研究（第1報）…………… 104

3Dプリンタの付加価値を高める空間充てん構造体の研究（第3報）…………… 107

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1報）

ーめっき処理部品の外観不良を検出する画像検査システムの開発ー…………… 111

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1報）…………… 114

カキの剪定トレーニングシステムの開発（第3報）

ーカキ栽培のデジタルトランスフォーメーション（DX）化に関する研究ー…………… 118

機械

ロボットを用いた製造業における人作業の負荷低減手法の開発（第3報）

塚原誠也*、横山貴広*

Study on the edging system of kitchen knife (Ⅲ)

TSUKAHARA Seiya* and YOKOYAMA Takahiro*

本研究では、人作業による粗刃付け研磨動作をロボットシステムで再現する方法を検討している。本年度は、昨年度に引続き粗刃付け研磨動作の自動化に向けたロボットシステムの構築と、構築したロボットシステムを用いた研磨加工実験を行った。その結果、ロボットシステムの加工条件をもとに、包丁の片面に粗刃付け加工ができたことを確認した。

1 はじめに

近年、刃物業界においては、熟練作業者の高齢化や労働力人口の減少に伴う職人の減少等が進んでいる。刃物企業においては、これらの人手不足の影響から、製造工程の内製化・自動化のニーズはさらに高まっている。加えて、様々な顧客要望に応じた多品種少量製品を効率的かつ安定、低コストで生産することが求められている。この状況下において、刃物企業の熟練作業自動化や作業者1人が複数の工程をこなせる多能工化のため、より踏込んだ自動化・負荷低減を図る必要がある。また、ロボットを活用し、製造工程の自動化に取り組む技術者をロボットシステムインテグレータ（以下、ロボットSIer）と呼び、近年その需要は高まる一方であるが、高度な技術的知見が必要であり、中小企業においてはその人材育成が課題となっている。更にロボットを高度に操作する方法としてオフラインプログラミングが挙げられるが、これは近年注目されているデジタル技術の応用例であり、仮想空間上に現実と同じ三次元空間を構築し、PC上で動作経路等を作成することで、実機を使用せずにロボット教示データの作成や動作シミュレーションを行う方法である。刃物業界においてもロボットSIerやオフラインプログラミング技術を活用するニーズはあるものの、業界として分業の歴史があり小規模事業者が比較的多い現状と、刃付けのような高度に精緻な加工技術を必要とする製造工程への活用事例はあまりない。

以上のような背景から、本研究では、刃物業界におけるロボット導入やデジタル技術の活用に関する技術課題を明確にし、今後進むと思われる刃物業界におけるロボット導入の技術課題について先行して取り組む。図1は産業ロボット導入の流れの一例を示しており、製造工程への産業ロボット導入までは、コア技術の確立、生産システムインテグレーションといった様々な自動化技術の活用が求められる。その中で、本研究では初期段階となるコア技術の確立を目的とし、ロボット技術を活用した

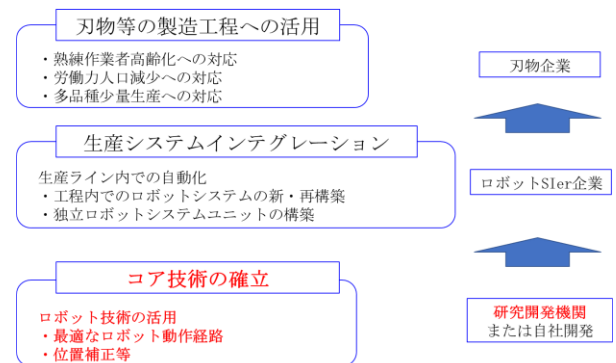


図1 産業ロボット導入の流れの一例

最適なロボット動作経路の作成や加工時の位置補正等を行った。

2 粗刃付けロボットシステム構成

粗刃付けロボットシステム構成を図2に示す。システムは、ロボット本体、架台、砥石、刃物固定ツール、ロボットコントローラ、PC（オフラインプログラミングソフト含む）から構成されている。また、本システム構成の特徴として、実際の刃物形状をもとに教示データをオフラインで作成できることが挙げられる。

2.1 座標と補正について

オフラインプログラミングソフトで作成した教示デー

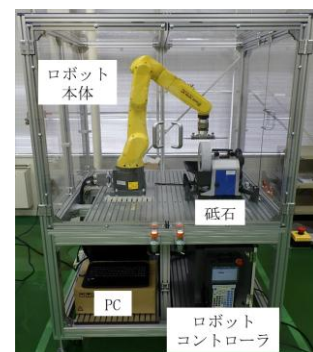


図2 粗刃付けロボットシステム構成

* 機械部

タをもとに実機を動作させると、位置等のずれが生じる。このずれは、加工物や砥石の摩耗により恒常的に発生することが考えられる。そこで、ロボット本体のツール座標とは別に砥石にユーザ座標を設定した。ツール座標とユーザ座標の座標位置を図3に示す。ツール座標はロボット先端にある座標で、ユーザ座標はユーザが任意に設定できる座標である。ユーザ座標を砥石上面上に設定して、位置ずれ等の調整を行うようにした。また、Z軸方向は特に研磨による砥石の摩耗等の影響が大きくなると考えられるため、Z軸補正ユニットにより研磨加工時の砥石上面へ刃先を押しつける研磨動作が常時可能となるようにした¹⁾。ロボット先端にZ軸補正ユニットを装着した様子を図4に示す。補正ユニットにより、荷重40Nで最大8mmの伸縮により、加工中の押付動作が可能になるようにした。

本研究では、刃先の角度が異なる加工において、砥石

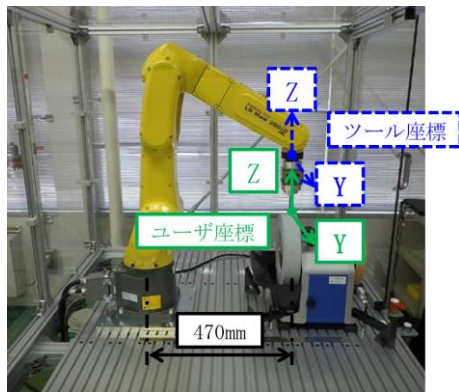


図3 ツール座標とユーザ座標

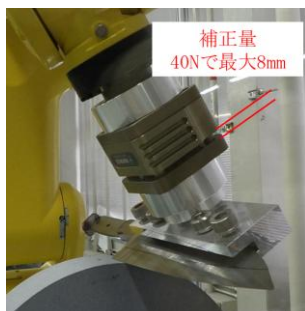


図4 Z軸補正ユニット

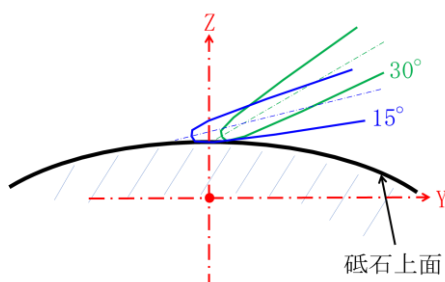


図5 異なる角度における研磨加工の模式図

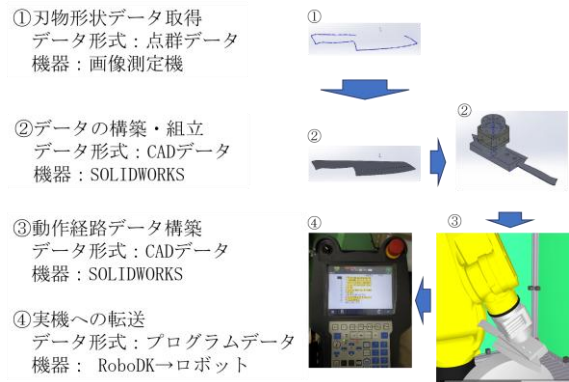


図6 動作経路データ構築の流れ

との接触位置や加工中のロボット速度を調整しながら加工を行うこととした。この位置調整による異なる角度における研磨加工の模式図を図5に示す。ユーザ座標を用いて、砥石との接触位置を調整することで、異なる刃先角度の加工を再現した。

2.2 教示データ作成方法の手順

刃物の形状データ取得から教示データ作成までの、動作経路データ構築の流れを図6に示す。はじめに画像測定機（ミットヨ QVH3-H606PIL-C）を使用して刃物の点群データを取得した。点群データをもとに刃物形状の輪郭データを取得した。次に、取得した輪郭データを使ってCADデータを構築した。CAD上で復元した刃物形状データを刃物固定ツールに取付けた。その後、オフラインプログラミングソフト RoboDK（RoboDK 社 RoboDK）を使用し、ロボット動作経路データを構築した。最後にオフラインプログラミングソフトから教示データを出力し、実機へ転送した。尚、データ修正については、RoboDK 上及び実機上で行った。教示データを抽出・解析・編集することで動作経路修正に活用した。

3 実験と結果及び考察

3.1 実験

研磨加工実験には、芯金がステンレス鋼で側面を機械加工したのみ（粗刃付け前）の一般的な三徳包丁を使用した。研磨加工条件を表1及び表2に示す。本実験においては、異なる角度の粗刃付けを行うために、表1のようにユーザ座標を使い角度毎のY軸座標値を変化させた。また、ロボットの動作速度も加工開始と加工中で変化した。これは、初速度を大きくすると接触時にロボットに過負荷が掛かることを防ぐためである。さらに、15°の加工時動作速度を遅くすることで加工量を増加させることを狙った。表2の研磨機は第1報²⁾で選定した砥石研磨機を使用した。また本研究では、表面粗さ測定機（テーラーホブソン フォームタリサーフ PGI Novus）を使用し、研磨加工面の測定を行った。測定条

表1 ロボットの研磨加工条件

項目	設定等	条件(角度15°)	条件(角度30°)
動作経路	教示データ	プログラム	プログラム
動作速度	加工開始時	5%	5%
	加工時	30%	100%
補正ユニット	Z軸	Max 8mm	Max 8mm
ユーザ座標設定	X軸	470mm	470mm
	Y軸	-10mm	10mm
	Z軸	10mm	13mm

表2 研磨機の研磨加工条件

設定等	条件
研磨方式	水冷式砥石研磨
砥石種類	酸化アルミニウム
砥粒サイズ	#220
回転数	90rpm

表3 表面粗さ測定機の測定条件

項目	設定等	数値等
動作経路	X軸方向	3mm
動作速度		0.2mm/s
測定ピッチ		0.0001mm
スタイラス	半径R	0.002mm

件を表3に示す。表面粗さ測定機を活用し、接触式でかつ細かい測定ピッチによる測定が可能な条件とした。

3.2 結果及び考察

図7に研磨加工した刃物例を示す。図7(a)は刃物全体を示し、加工した刃先を拡大した様子を図7(b)に示す。図7(b)では角度が異なる刃先の研磨痕をそれぞれ確認できた。刃角度が15°と30°になるような教示データ



図7 研磨加工した刃物例

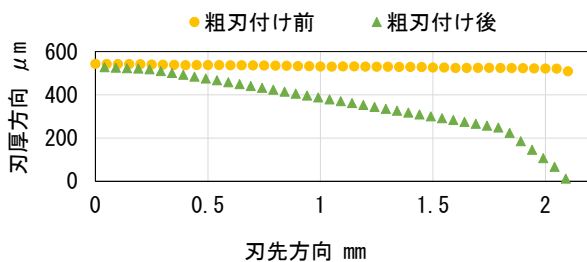
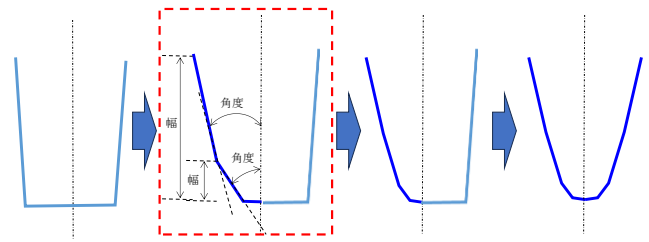


図8 刃先断面形状の比較



(a) 研磨加工前 (b) 刃線方向の研磨 (c) 刃線と直角方向の研磨 (d) 目標断面形状 (曲線的断面形状)

図9 研磨加工過程の模式図

を作成した結果、刃物に異なる角度の刃先が付いていることを確認できた。これは、ユーザ座標のY軸座標を活用し、砥石と刃物の接触位置を調整することで、刃先形状を再現できたと考えられる。また、図8は表面粗さ測定機で測定した粗刃付け前および粗刃付け後の刃先断面形状を示している。刃厚が粗刃付け前よりも薄くなっており、教示データとおりに研磨加工できていることが確認できた。

図9は研磨加工過程ごとの刃先断面の模式図を示している。(a)は研磨加工前、(b)は刃線方向に研磨したときの断面形状、(c)は刃線と垂直方向に研磨したときの断面形状(曲線的な断面形状)、(d)は目標断面形状を示している。本研究においては、(b)に示した異なる2つの角度と幅を持った刃先断面に加工することができた。今後、表計算ソフト等で教示データ内の位置データを抽出・解析・編集し、データを可視化することで(c)のような曲線的な刃先断面形状を作成し、最終的には刃物固定ツールの再設計等で(d)のような両刃に曲線的な断面形状を有した刃先の加工を目指す。

4 まとめ

オフラインプログラミングソフトを活用した粗刃付け用ロボットシステムを構築した。

粗刃付け用ロボットシステムを用いた研磨加工実験では、異なる刃角度を付ける研磨加工を行った。その結果、粗刃付けを片面に加工できたことを断面形状測定により確認した。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、ご協力頂きました丸章工業株式会社様に感謝致します。

【参考文献】

- 1) 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
- 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

転造ダイスの摩耗・チッピング異常を検出する 工程監視システムの開発（第3報）

横山貴広*、横山哲也*

Development of process monitoring system to detect wear and chipping of rolling dies (Ⅲ)

YOKOYAMA Takahiro* and **YOKOYAMA Tetsuya***

本研究は、ねじを製造する転造機に装着した転造ダイスの摩耗・チッピングを検出し、作業者に知らせる工程監視システムの開発を目的としている。昨年度は、転造ダイスに取り付けた AE (Acoustic Emission) センサから検出した低周波領域 (50kHz 以下) の総スペクトル強度の推移から、転造ダイスのチッピング検出が可能であることを確認した。本年度は、この知見を利用した工程監視システムを製作して生産機評価試験を実施した。その結果、チッピング・製品不良とシステムが検出したチッピング異常が一致した事例を確認することができた。

1 はじめに

AE センサを用いて工程異常を検出するためには、実測したデータの AE 電圧波形から算出したエネルギー、振幅値、信号継続時間などを用いることが一般的である¹²⁾。しかし、近年インバータ搭載型の転造機が主流になり、また AE 電圧はインバータノイズの影響を受けるため、データの算出値をそのまま利用することができない。昨年度は、実際に自動車部品のねじを生産する転造機を用いた生産機評価試験を実施した結果、低周波領域の総スペクトル強度はインバータノイズの影響を受けにくいことが判明し、この領域のデータを用いて転造ダイスのチッピング検出が可能であることがわかった³⁾。

本年度は、これらの知見を基礎にしたソフトウェア開発と、これを組み込んだ工程監視システムを製作し、このシステムを生産機に取り付け、転造ダイスのチップング・製品不良と、システムからのチップング異常検出結果の関係性を検証した。

2 工程監視システムの概要

図 1 に製作した工程監視システムの概要、図 2 に工程監視システムの外観およびモニター画面を示す。図 1 より、転造ダイスの固定側に取り付けた AE センサの低周波領域のスペクトル強度を PC に取り込んでデータ分析を実施し、分析後の結果をモニター画面に表示する仕様とした。また、転造ダイスにチッピングが発生したと判断した場合、表示器を通じて作業員へ通知するシステムを構築した。

このシステムを使用して生産機評価試験を実施した。表1に試験条件を示す。データ分析はチップング検出能力を向上させるためマイクロ分析³⁾とマクロ分析³⁾を併用

* 機械部

し、マイクロ分析は4種類の閾値、マクロ分析は3種類の閾値を設けた。閾値の種類と超えた回数により、システムは転造ダイスの状態を正常、警告または異常と判断し、

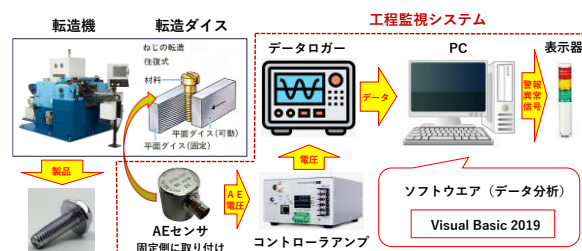


図1 工程監視システムの概要



図2 工程監視システムの外観およびモニター画面

表 1 試験条件

転造ダイス（可動側）	材質：ダイス鋼 長さ:250mm 高さ:55mm 厚み:30mm
転造ダイス（固定側）	材質：ダイス鋼 長さ:230mm 高さ:55mm 厚み:30mm
A E センサ	フィジカルアコースティック株式会社 型式:PK15I 共振周波数150kHz
A E センサ取付箇所	固定側ダイス
測定時間	1転造につき1秒間
測定周波数	0～50kHz（直流分を除く）
閾値	ミクロ分析：①閾値 1（上方）、②閾値 2（下方） ③変化分、④パルス閾値
異常判定	マクロ分析：①閾値 3（上方）、②閾値 4（下方）、③変化分 閾値の種類と超えた回数により、正常→警報→異常へと表示を変更

順に表示器の色を変更させることで、作業者は転造ダイスの状態を間接的に把握し、製品の品質管理の強化を促す仕組みになっている。

また、昨年の生産機評価試験結果を基にして、マイクロ分析の閾値は、チッピングによって増加した総スペクトル強度の変動分から決定し、マクロ分析の閾値はマイクロ分析によるチッピングの発生状況と過去のマクロ分析の分析結果から決定した。両分析ともに定常状態から遷移した状態も検出するため、総スペクトル強度の変動分にも閾値を設けている。さらに、マイクロ分析は微小なチッピングによって生じた総スペクトル強度の小さなパルスも検出できるように、パルス閾値も設けている。

なお、AE センサを転造ダイスに取り付けた際、ダイスの表面状態（金属粉や機械油の影響など）や配線ノイズの影響によって総スペクトル強度が通常より高めに推移することがある。この影響を少なくするため、強度の絶対値ではなく、基準値（正常で安定した状態）からの変動分を考慮したデータ分析を実施できるように、システムのソフトウェアを構築した。このため、本研究報告のマイクロ分析・マクロ分析グラフの総スペクトル強度は、基準値からの変動分を示している。

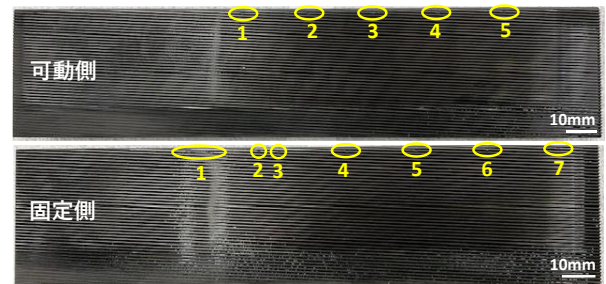


図3 取り外した転造ダイスの写真

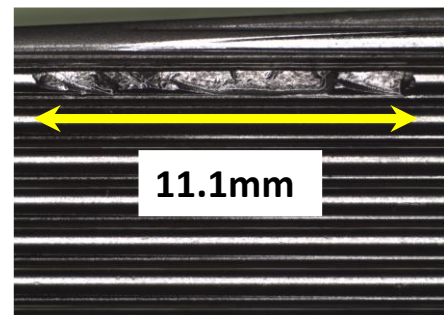


図4 固定側1のチッピングの拡大写真

3 結果及び考察

3.1 発生したチッピングが多数のケース

作業者が製品の外観にバリを確認した時に取り外した転造ダイスの写真を図3に示し、固定側1のチッピングの拡大写真を図4に示す。図3より、可動側には5箇所、固定側には7箇所チッピングが発生していた。通常転造ダイスに確認されるチッピングは、ほとんどが横幅3mm以下である。しかし、図4に示すように固定側には横幅11.1mmという巨大なチッピングが発生していた。

次に、この転造ダイスを用いて生産していた時のマイクロ分析とマクロ分析の結果を図5、図6に示す。図5のマイクロ分析結果を概観すると、転造回数5,977回と転造ダイス交換直前の16,765～16,821回に、システムが複数のチッピングを検出したことがわかる。

しかし、これらのチッピングパルスのみでは固定側1のチッピングの形成過程が説明できない。図5をさらに詳しく観察すると、転造回数12,500～13,500回と15,200～15,400回に多数の微小パルス波形が断続的に発生していることが確認できる。この領域のパルス波形から、固定側1のチッピングは1回の転造加工で全体がチッピングしたのではなく、最初に小さなチッピングが発生し、転造加工を重ねることによって徐々にその周辺が欠け、やがて巨大なチッピングに成長した過程を示していると推定できる。

この様子を図6のマクロ分析の該当する箇所を確認すると、12,500～14,000回にかけてさらに総スペクトル強度が上昇して閾値3を超え、システムは固定側1のチッピングを異常として検出していたことがわかった（ミク

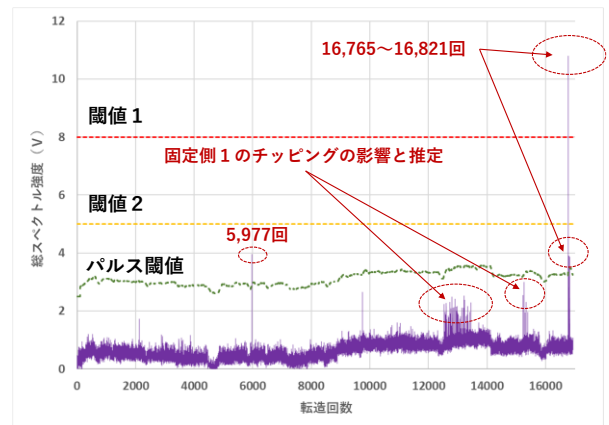


図5 ミクロ分析結果

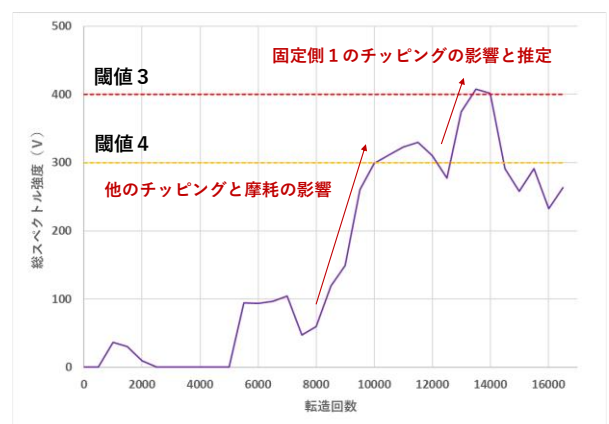


図6 マクロ分析結果

ロ分析はこの領域をチップング異常として検出していない)。ただ、その後に総スペクトル強度が若干低下している。これは、転造ダイスに付着したチップングの金属片が転造加工によって微細に粉碎され、製品に付着して払い出されたか、転造ダイスの表面を流動する機械油の影響でダイスの表面から除去された影響が考えられる。

このように、本事例は AE センサを用いた工程監視によって巨大なチップングの形成過程の概要が推定できる一例となった。

3.2 発生したチップングが少数のケース

本事例は、総転造回数 26,902 回目に転造ダイスに AE センサを取り付け、生産途中に作業者がシステムからの異常信号を確認したため、総転造回数 28,347 回で転造機を停止した。その後、製品を検査したところ製品不良が判明し、転造ダイスを取り外した。取り外した可動側の転造ダイスはへこみ 5 箇所のみでチップングがなく、固定側はチップングが 1 箇所（幅 5.5 mm）とへこみが 5 箇所に確認された。

本事例のマイクロ分析結果（図 7）を概観すると、総転造回数 28,168 回のみ閾値を超えるパルスが 1 箇所確認され、マクロ分析を含む他の領域には全く異常がなかった。このパルスはパルス閾値を超え、さらに直近の総スペクトル強度の推移と比較して変動分が大きかったため、システムはチップング異常と判断した。よって、このチップング異常は、固定側の転造ダイスのチップングの発生が唯一 1 箇所であることから、両者は一致していると断定できる。

次に、作業者が製品不良と判断した製品に着目する。図 8 に正常な製品と作業者が製品不良として取り出した製品を共焦点顕微鏡（レーザーテック株式会社 OPTELICS HYBRID L3）を使用して、ねじ山の 1 つの表面形状を測定した結果を示す。正常品はねじ山に沿ったゆるやかなカーブを描いた表面形状が確認された。しかし、不良品はねじ山の表面が正常品と比較して全体的に凸凹しており、また表面上に 52 μm と 37 μm の 2 つの突起（バリ）が確認された。よって、作業者が判別した製品は、目視やねじゲージにはめた検査から製品不良と判断したのみならず、顕微鏡観察からも不良品であることが再確認できた。

このように、本事例はシステムが検出したチップング異常と、唯一発生した 1 箇所の固定側転造ダイスのチップングと、作業者が判別した製品不良の 3 つが一致した事例となった。

4 まとめ

自動車部品のねじを生産する転造機に装着した転造ダイスのチップング検出を目的とした工程監視システムを開発し、生産機評価試験を実施した。その結果、低周波領域の総スペクトル強度の推移からチップングの形成過程が推定でき、システムが検出したチップング異常と

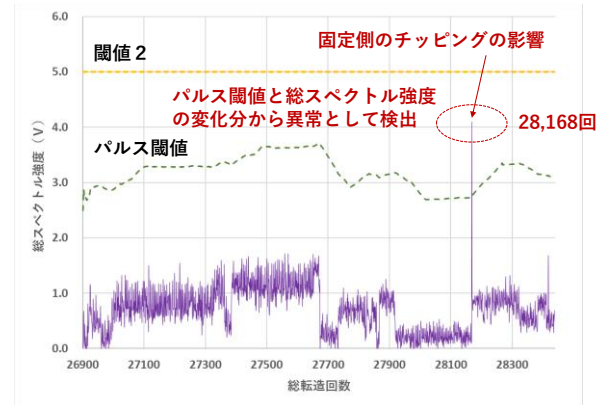


図 7 ミクロ分析結果

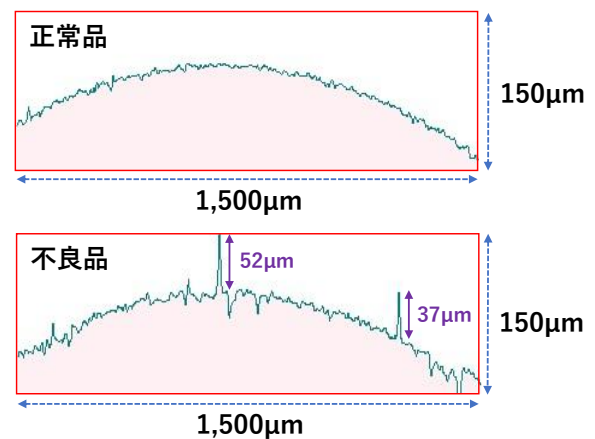


図 8 製品のねじ山の表面形状

転造ダイスのチップング・製品不良が一致した事例を確認することができた。しかし、チップングには様々な形成過程が想定され、現時点ではこれらのあらゆる状況に対応していないのが現状である。今後、生産機評価試験を継続し、システムで検出できるチップングと検出できない場合のパターンを区別し、ソフトウェアの修正を通じてチップングの検出能力を向上させることが必要になる。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、生産機評価試験にご協力して頂きました株式会社ギフ加藤製作所様に深く感謝をいたします。

【参考文献】

- 1) 大津, アコースティック・エミッションの特性と理論, pp19-25
- 2) 西本ら, アコースティック・エミッションによる IoT/AI の基礎と実用例, pp20-25
- 3) 横山ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp7-9, 2024

切削工具の工具寿命に関する研究（第1報）

加賀忠士*、横山貴広*

Study on tool life of cutting tool (I)

KAGA Tadashi* and YOKOYAMA Takahiro*

本研究では、切削油剤における工具摩耗の影響を調査する。本年度は基礎実験として、切削油剤の違い、切削速度変化、送り変化そして径方向切込み変化による切削抵抗及び工具刃先温度の関係を把握した。その結果、切削速度が増加すると切削抵抗は減少、工具刃先温度は増加している。1 刃あたりの送りが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度も増加する。径方向切込みが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度も増加することがわかった。なお今回の実験結果では、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かった。

1 はじめに

航空機産業分野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。このチタン合金の切削では、切削熱が刃先近傍に集中し、局部的に切削温度が上昇すること、そして刃先が高温になるため、工具の摩耗が加速するといった問題が挙げられている。現状、チタン合金の切削加工では、低速加工を採用しており、加工能率を上げるためには、送り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ており、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。

岐阜県産業技術総合センターでは、令和3年度から令和5年度にかけて、チタン合金における高能率切削加工の最適条件を求める手法を検討し、工具摩耗予測式を導き出した。この工具摩耗予測式は、切削条件の切削速度、送り量、及び径方向切込みを入力すると、工具摩耗の進行の早さを結果として出力することができる式である。この工具摩耗予測式を用いることで、工具摩耗の進行が現状と同じであっても、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⁾。

切削条件の一つである切削油剤を用いると、切削抵抗と切削温度が低下することで、工具摩耗が低減する。その結果、工具寿命が長くなる効果がある。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」の二つに大別できる。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⁾。そこで、本研究では、水溶性切削油剤に着目し、切削油剤における工具摩耗の影響を調査する。なお、チタン合金の切削に適用した水溶性切削油剤を調査したところ、エマルジョン形とソリ

ューション形があることを確認した。エマルジョン形は水、油及び界面活性剤で構成されており、油の粒子が大きい（粒子径：2～5 μm ）のが特徴である。一方ソリューション形は、油を全く含まず、水と溶解物質で構成されており、その粒子径が非常に小さい（粒子径：0.001 μm 以下）のが特徴である⁵⁾。本年度は基礎実験として、エマルジョン形及びソリューション形の切削油剤の違い、切削速度変化、送り変化そして径方向切込み変化による切削抵抗及び工具刃先温度の関係を把握したのでその結果を報告する。

2 実験

2.1 温度測定方法

工具刃先温度の測定は、工具・被削材熱電対法を採用した。これは切削加工中の工具と被削材間に発生する熱起電力を利用して切削温度を測定する手法である。この手法の原理となるゼーベック効果とは、2種類の金属棒でループをつくり、両端の接点間に温度差を与えた場合、接点間に起電力（熱起電力）が生じ、ループに電流が流れる現象である。この熱起電力は接点間の温度差と金属の材質によって決まるため、予め作成した温度校正曲線

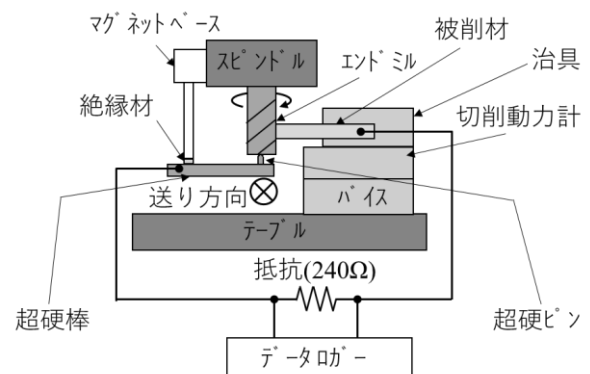


図1 熱起電力測定の概要

* 機械部

から切削温度を求めることができる⁶⁾。熱起電力測定の概要を図1に示す。本実験では、回転する工具から電圧を測定するために、エンドミルの底面中心にくぼみを持たせ、そこにテーパ形状のφ2 mmの超硬ピン(K40UF)を押し当てることで、熱起電力の測定を可能とした。また、工具空転時は回路が開放され、ノイズの影響で大きな電圧が測定されてしまうため、240 Ωの抵抗を挿入している。そして、主軸が回転すると弾性流体潤滑状態となり、軸受間の潤滑油の影響で主軸とマシニングセンター本体が短絡状態から絶縁状態になる現象を積極的に活用することで、被削材を絶縁しない状態で実験を行った。なお、熱電対の内部抵抗を測定した結果は1.6 Ωであり、今回用いた並列抵抗の抵抗値240 Ωに対し十分小さい。そのため熱起電力測定における内部抵抗の影響を無視することとした。

なお、工具材の超硬 K40UF と被削材のチタン合金 Ti-6Al-4V の組み合わせにおける温度校正曲線は、令和3年度名古屋大学との共同研究で得られたものを用いた。下記にその換算式を示す。

$$T = 7 \times 10^{-9} V^3 - 7 \times 10^{-5} V^2 + 3.17 \times 10^{-1} V \quad (1)$$

T : 温度(°C)

V : 電圧(μV)

2.2 切削実験

切削実験の概要を図2、実験条件を表1に示す。被削材はチタン合金 Ti-6Al-4V(60×100×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 の無垢でφ10 mmの1枚刃エンドミルを使用した。加工機のテーブル上に切削動力計(Kistler 9257B)を配置し、その上に治具を介して被削材を固定した。実験は切削速度 45.2m/min、60.0m/min、90.1m/min、1刃あたりの送り 0.1 mm/tooth、0.2 mm/tooth、0.3 mm/tooth、径方向切込み 1 mm、2 mm、5 mm、軸方向切

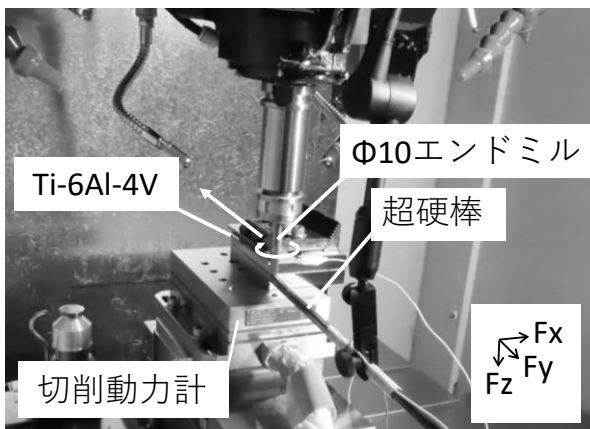


図2 切削実験の概要

込み2 mm、工具送り方向はダウンカット、切削油剤はエマルジョン形とソリューション形の10倍希釈をそれぞれ被削材に塗布し、被削材長さ100 mmの方向を直線に走らす加工を1パスとして行った。

なお、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 それぞれの値を合力に変換し、この合力を1パス(100 mm)で平均して評価を行った。次に、切削温度については切削時に発生する熱起電力を1パス(100 mm)で平均した値を用い、この平均値を換算式で温

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 mm/tooth	0.1, 0.2, 0.3
径方向切込み mm	1, 2, 5
軸方向切込み mm	2
工具送り方向	ダウンカット
切削油剤塗布	エマルジョン/ソリューション

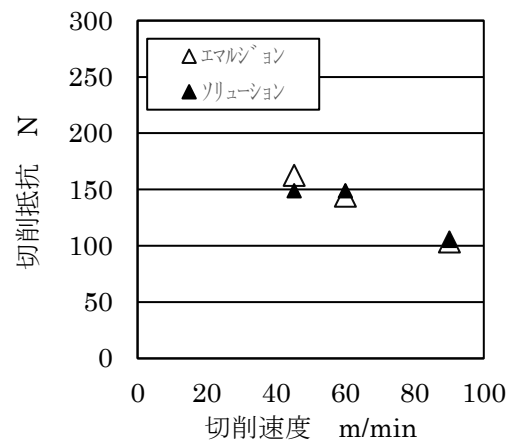


図3 切削速度と切削抵抗の関係
(送り 0.2 mm/tooth、径方向切込み 2 mm)

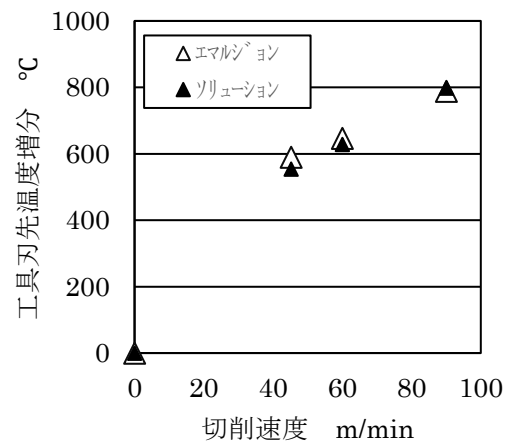


図4 切削速度と工具刃先温度増分の関係
(送り 0.2 mm/tooth、径方向切込み 2 mm)

度に変換した。この温度は、切削前の工具刃先温度を基準にし、切削時に上昇した工具刃先温度との差を示している。そのため、工具刃先温度は増分で評価を行った。

3 結果及び考察

3.1 切削速度変化

切削速度 45.2m/min、60.0m/min、90.1m/min と変化させたときとの切削抵抗の関係を図 3、工具刃先温度増分との関係を図 4 に示す。切削速度が増加すると切削抵抗は減少、工具刃先温度増分は増加している。杉田らによれば切削速度を速くすると、すくい面の温度上昇をもたらし、すくい面上の摩擦力が減少、その結果せん断角が増加し切削抵抗を減少させる。また、温度上昇は被削材を軟化させ、せん断応力を下げる働きをする。他方でひずみ速度の上昇はせん断応力を上げるが、これらの効果を合成すると切削抵抗は切削速度の増加に従って減少する⁷⁾と示されており、実験結果はその傾向と一致してい

る。なお今回の実験結果では、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かった。

3.2 送り変化

1 刃あたりの送り 0.1 mm/tooth、0.2 mm/tooth、0.3 mm/tooth と変化させたときの切削抵抗との関係を図 5、工具刃先温度増分との関係を図 6 に示す。1 刃あたりの送りが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度増分も増加している。杉田らによれば切削抵抗は切削断面積に比例し⁷⁾、社本によれば切削温度は切り取り厚さ及び切削幅が増加する場合、せん断発熱の面積増大により上昇する⁸⁾と示されており、実験結果はその傾向と一致している。なお、今回の実験結果では、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かった。

3.3 径方向切込み変化

径方向切込み 1 mm、2 mm、5 mm と変化させたときの切削抵抗との関係を図 7、工具刃先温度増分との関係を図 8 に示す。径方向切込みが増加すると切削抵抗は増加、

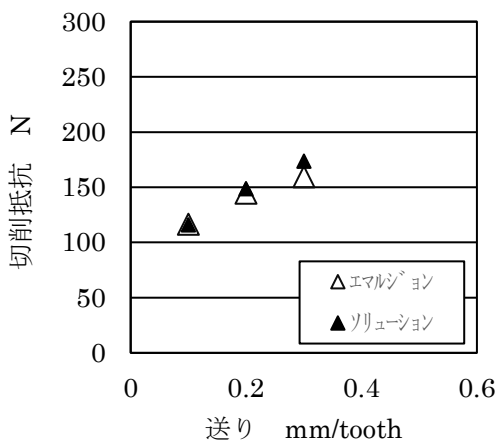


図 5 送りと切削抵抗の関係
(切削速度 60.0m/min、径方向切込み 2 mm)

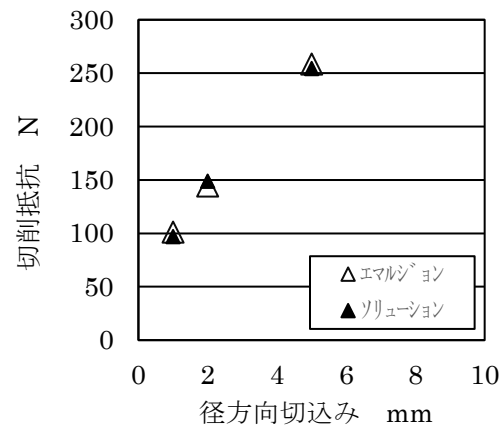


図 7 径方向切込みと切削抵抗の関係
(切削速度 60.0m/min、送り 0.2 mm/tooth)

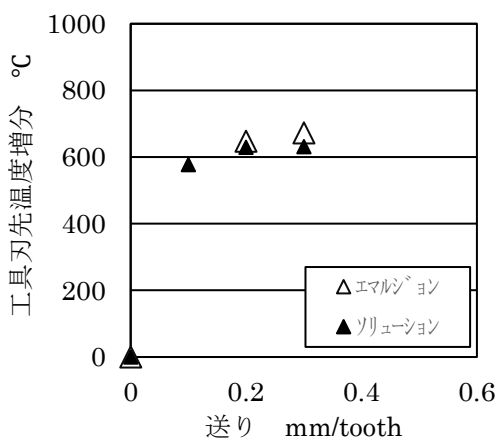


図 6 送りと工具刃先温度増分の関係
(切削速度 60.0m/min、径方向切込み 2 mm)

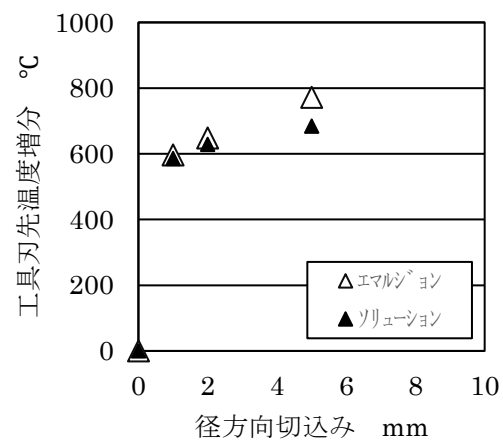


図 8 径方向切込みと工具刃先温度増分の関係
(切削速度 60.0m/min、送り 0.2 mm/tooth)

工具刃先温度増分も増加している。上記の送り変化に対する考察と同様に、切削抵抗は切削断面積に比例し、切削温度は切り取り厚さ及び切削幅が増加する場合、せん断発熱の面積増大により上昇することから、実験結果はその傾向と一致している。なお、今回の実験結果では、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かった。

今回実験に使用した水溶性切削液は、両方ともチタン切削に適したものを選択して用いていることから、切削抵抗、工具刃先温度に差異が認められなかったと考えられる。しかし、切削油剤への期待は、工具寿命の延長である。そのため、次年度は工具摩耗実験を行い、エマルジョン形、ソリューション形における工具寿命の差異を検証していく。

4 まとめ

本研究では、切削油剤における工具摩耗の影響を調査する。本年度は基礎実験として、切削油剤の違い、切削速度変化、送り変化そして径方向切り込み変化による切削抵抗及び工具刃先温度の関係を把握し、以下の結果を得た。

- 1) 切削速度が増加すると切削抵抗は減少、工具刃先温度は増加する。
- 2) 1 刃あたりの送りが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度も増加する。
- 3) 径方向切込みが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度も増加する。
- 4) 今回の実験結果では、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かった。

切削油剤への期待は、工具寿命の延長である。そのため、次年度は工具摩耗実験を行い、エマルジョン形、ソリューション形における工具寿命の差異を検証していく。

【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ことを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) 海野,絵とき切削油剤の基礎のきそ,日刊工業新聞社, pp64,2009
- 6) 深見ら,日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集

No.20-1, S13310,2020

- 7) 杉田ら,基礎切削加工学,共立出版株式会社, pp106-108,2014
- 8) 社本,切削機構を理解しよう,日本機械学会講習会テキスト, pp6-7,2008

金属積層造形材の被削性評価（第1報）

—金属積層造形材の機械的特性評価—
丹羽孝晴*、加賀忠士**

Machinability evaluation of metal additive manufactured materials (I)
- Evaluation of mechanical properties of metal additive manufactured materials -
NIWA Takaharu* and 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、従来とは異なる機械的特性であることは知られている。機械的特性は切削条件に影響を与えるため、従来の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は重要である。そこで、金属積層造形で作製された SUS316L について、硬さ・引張強度について調査し、JIS 規格で規定されている値と比較した。硬さについてはビッカース硬さで HV200 程度であり、引張強度については積層方向と平行な方向で約 556N/mm²、積層方向と垂直な方向で約 657N/mm² と積層方向によって異なる値となっていることが確認できた。

1 はじめに

金属積層造形とは、製品の CAD データをもとにして、電子ビームやファイバーレーザー等により必要な部分の金属粉末を溶解し積み重ねて 3 次元の造形物を作る技術のことで、その技術を用いた装置は金属 3D プリンタと呼ばれている。

金属積層造形は自由な形状の製品を作れる、設計から試作品製作までの時間の短縮につながる等のメリットがあるため、既にジェットエンジン用部品や産業用ガスタービン燃焼器、自動車部品の一部等に利用されている。そのため、製品の仕様に合った材料の硬さや引張強度などの機械的特性をもつ新たな材料の開発を目的とした金属の混合粉末の研究や、トポロジー最適化を利用した新しい設計手法の研究が進められてきている。

岐阜県の地場産業の一つであるプラスチック産業の製品製造では、その成形加工において金型が必要である。近年、金型製造においても金属積層造形の需要が高くなってきている。金属積層造形を導入することによって、従来の切削加工だけではできない形状の金型製作や、冷却機構の経路を自由に作製できることで、複雑形状の製品や最適な冷却方法による冷却時間の短縮が可能となり、品質の向上やコスト低下が期待されている。

しかしながら、金属積層造形装置の導入コストが高い、自社の製品に活用できるかの判断ができない、既存の設備の減価償却ができない恐れから、装置の導入が進んでいないのが現状である。

また、金属積層造形は設計モデルがあれば製品形状を製作することができるが、その特徴的な外観や精度の影響などから、仕上げ加工が必要となる。金属積層造形で作られた材料は、従来の塑性加工材料と同じ化学成分であっても機械的特性が異なることが報告されており¹⁾、

仕上げ加工の一つである切削加工においても金属積層造形材特有の課題が想定される。

本研究では、金属積層造形材料における最適な切削条件を把握することを目的とし、今年度は金属積層造形で製作された試料の機械的特性などについて調査した。

2 試験

2.1 試料

本研究では 100 mm×60 mm×3 mm の板形状で、パウダーベッド方式の金属積層造形装置(HBD 社製 HBD-150)で図 1 に示すとおり 60 mm の高さに積層し製作された SUS316L の金属積層造形材を用いた。

2.2 硬さ試験

ビッカース硬さにより評価を行うこととし、ビッカース硬さ試験機((株)アカシ製 AVK-CO)を用いた試験力 98 N、保持時間 10 s の条件により測定した。

2.3 引張試験

試験片の形状は JIS Z 2241 に記載されている 14B 号試験片とし、図 2 に示すとおり積層方向に対して垂直方向に切り出した試験片 Y と、積層方向に対して平行方向に切り出した試験片 Z を用いて、引張強度と突き合わせ伸びをそれぞれ 2 本ずつ測定した。試験は万能試験機((株)島津製作所製 AG-IS 100kN)を使用し、試験速度

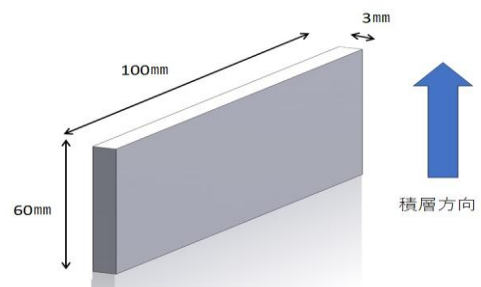


図 1 試料の形状

* 技術支援部

** 機械部

は3 mm/sとした。

2.4 表面観察

試料表面の二次電子像を、フィールドエミッション電子プローブマイクロアナライザ(日本電子(株)製 JXA-8530F)を使用し、観察をした。また、試料表面の算術平均粗さ(Ra)と最大高さ粗さ(Rz)を、表面粗さ測定機(アメテック(株)製 フォームタリサーフ PGINOVUS)を使用し、試験速度は0.2 mm/sの条件で測定した。

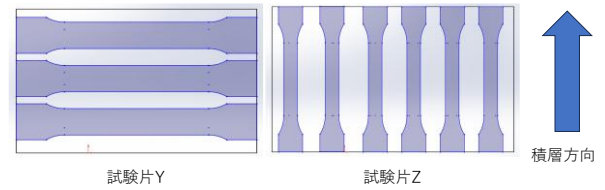


図2 引張試験片の切り出し方向

3 試験結果

3.1 硬さ試験

ビッカース硬さを測定したところHV208(10回測定の平均値)となり、JIS G 4303に規定されているSUS316Lの規格値(HV200以下)より若干ではあるが大きい数値を示した。

3.2 引張試験

引張試験の測定結果を表1に示す。JIS G 4303に規定されているSUS316Lの規格を満たしている結果となった。試験片Zに比べ試験片Yのほうが、引張強度が約100 N/mm²大きく、伸びが18%小さくなっており、積層方向に対しての強度の違いを確認できた。

3.3 表面観察

試料表面の二次電子像を図3に示す。表面には40 μm程度の大きさの粒子がいくつか確認できた。これは、積層造形に用いられた粉末粒子であると推定した。次に表面粗さを測定したところRaは12.5 μm、Rzは93.0 μm(10回測定の平均値)であった。一般に切削による仕上げ加工のRaは6.3 μm以下、Rzは25 μm以下であることから、この表面に付着している粒子が金属積層造形材特有の表面粗さに影響を与えており、仕上げ加工が必要であることを確認できた。

表1 引張試験の測定結果

	引張強度	伸び
試験片 Y	662 N/mm ²	44%
試験片 Y	652 N/mm ²	44%
試験片 Z	556 N/mm ²	62%
試験片 Z	555 N/mm ²	62%
規格値	480 N/mm ² 以上	40%以上

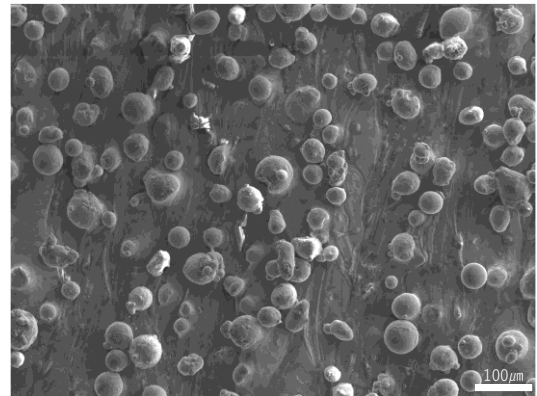


図3 二次電子像

4 まとめと今後の展望

金属積層造形で製作されたSUS316Lの機械的特性を調査したところ、硬さは若干ではあるがJIS G 4303に規定されているSUS316Lの規格よりも大きい値となった。引張試験については規格を満たす結果となった。また、引張強度は積層方向と同じ方向に対して荷重をかけるより積層方向に対して垂直方向に荷重をかけたほうが、引張強度が大きく、伸びが小さいという違いがあることが分かった。一方、金属積層造形材の表面には製作に使用した粉末粒子が残っており、製品形状を満たすため除去加工が必要であることが確認できた。

今後は得られた知見をもとにして加工実験を行い、金属積層造形材の被削性評価をする予定である。

【参考文献】

- 1) 豊川良平ら,長野県工技センター研報 No.17, M42-M45,2022

金属

刃物製品のブランド力向上のための切れ味評価技術の開発（第5報）

大津崇*、田中泰斗*、田中等幸*

Development of sharpness evaluation method to improve the brand power of cutlery products (V)

OTSU Takashi*, TANAKA Taito* and TANAKA Tomoyuki*

近年、食卓用刃物を対象とした切れ味試験方法が国際標準化機構（ISO）により規格化され、欧米企業を中心とした刃物製品の品質管理に利用されている。日本国内では本多式切れ味試験機による品質管理が従来から行われているが、その試験方法は規格化されていない。岐阜県では、本多式切れ味試験機を改良した独自の切れ味試験装置の開発に取り組み、試験の自動化により切れ味とその耐久性を容易に計測可能な試験機を実用化した。本研究では、ISO 規格に準拠した装置方式と岐阜県が開発した装置方式により4種類の包丁を使用した切れ味試験を行い、切れ味の劣化特性の違いを把握した。その結果、2方式の試験開始直後の順位は同一であり共通性が認められた。一方、試験回数の増加による切断深さの低下や刃先摩耗に伴う外観について相関は確認できず、本研究で行った実験の範囲においては、2方式の切れ味試験結果の互換性は認められなかった。

1 はじめに

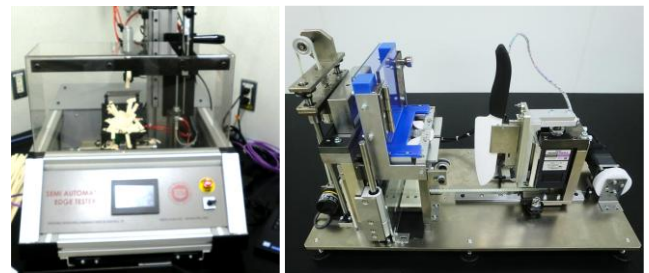
切れ味試験では、所定の被削材と刃物の刃先を一定条件で押し当て、引き切りに相当する切断動作を行った際の被削材の切断枚数や切断深さを「切れ味」として数値化している。近年、包丁などの食卓用刃物を含むカトラリーの要件やカトラリーの切れ味に関する試験方法と試験装置（以下、ISO 式）がヨーロッパ諸国を中心にまとめられ、国際規格化された¹⁾²⁾。岐阜県では地場産業である刃物産業を支援するため、本多式切れ味試験機を改良した独自の切れ味試験装置（以下、岐阜県式）を開発した^{3)~5)}。この装置は、従来の本多式の欠点である、①手動計測であること、②被削材と刃先および刃側面の接触により生ずる摩擦の影響が大きいこと、③測定作業に熟練した作業者が必要であることを改善したものであり、連続的な自動計測と作業者に左右されない安定的な計測を実現している。

前報では、ISO 式と岐阜県式の装置により市販のカッター刃の切れ味試験を行い、切れ味の劣化特性の違いを比較した。その結果、摩耗に伴う刃先曲率半径の増加と切れ味の低下が一定の逆相関を示すことや、材料（鉄鋼、ステンレス鋼）の違いによって切れ味低下や摩耗曲線が異なることを明らかにした⁶⁾⁷⁾。本報では、同様の試験を刃物材料や刃先形状の異なる複数の市販ステンレス鋼製の包丁を対象に行った結果について報告する。

2 実験

2.1 刃物（包丁）

実験には市販包丁4種類を使用した。これは、2種類の材料（ステンレス鋼：A, B）と2種類の刃先形状（三



(a) ISO 式

(b) 岐阜県式

図1 切れ味試験装置の外観

徳包丁、菜切包丁）の組合せである。材料（刃材質）の違いは添加された合金元素の量であり、Bの方が合金元素の添加量が多い（以下、三徳A、菜切A、三徳B、菜切B）。三徳Aと菜切A、三徳Bと菜切Bは同一材である。包丁の刃長は160~170 mmであり、それぞれ6本を試験に使用し平均した切れ味によって評価した。

2.2 切れ味試験装置

切れ味試験にはISO 式切れ味試験装置（CATRA 製、SAET）と岐阜県式切れ味試験装置（株式会社丸富精工製）を使用した。2方式は、いずれも連続的な切断動作で自動計測が可能な装置であり、試験回数1回（1往復）ごとに生じた切断深さをセンサーにより計測している。通常、この切断深さ（mm）が刃物の「切れ味」と呼ばれるものである。2方式の主な違いとしては、切断機構と被削材固定部の構造の他、切断荷重や被削材の填料（添加剤）の有無である。図1に実験で使用した2方式の装置外観を、表1に主要な試験条件を示す。

2.2.1 ISO 式装置と被削材

ISO 式の試験は刃物の刃先を上向きに固定し、上方に設置された被削材を切断することにより行う。刃物をス

* 金属部

表1 切れ味試験装置の主要な試験条件

装置	方 式	ISO式	岐阜県式
規格	番 号	ISO 8442-5	—
	対 象 刃 物	食品調理用の 切れ刃を持つ手動用刃物	— (主要な対象は包丁)
	基準回数・基準値	あり	—
切れ味	単 位	1サイクル当りの 切断深さ(mm)	1サイクル当りの 切断深さ(mm)
	形 式	引き切り、斜め20°	引き切り
	試 験 長 さ	約50 mm	約20 mm
計測	方 法	センサー、自動	センサー、自動
	頻 度	1サイクル(1往復、1回)	1サイクル(1往復、1回)
	単 位	0.01 mm	0.075 mm
切断	荷 重	約5.1 kg (50 N)	約0.85 kg
	被削材クランプ 圧	130 ± 2.5 N	指定なし
	ストローク幅	40 mm	10 mm
	速度(平均)	45 mm/s	20 mm/s
被削材	種 類	ケミカルパルプ紙	クラフト紙
	填 料	5 % SiO ₂ 含有	なし
	幅	10.0 ± 0.1 mm	約8 mm
	厚み(1枚当り)	0.31 ± 0.02 mm	約0.04 mm

トローク幅 40 mm、平均速度 45 mm/s で往復運動させながら、刃物と被削材を 50 N (約 5.1 kg) で押し当てること、積層した被削材が切断される。切断時に、鉛直方向から装置正面側へ 20° の角度で切断されることにより、切断済み被削材と刃物の摩擦を回避するとともに、切断された被削材が自動的に装置外に排出される。なお、被削材は 5% SiO₂ を含むケミカルパルプ紙で、SiO₂ 粒径の大きさや割合が調整された専用試験紙である。

2.2.2 岐阜県式装置と被削材

岐阜県式の装置では、試験の前準備として専用の刃物固定治具に試験用刃物を所定の条件で取り付け、これを本体に固定する。切れ味試験は、治具と一体となった試験刃物を一定荷重 (約 0.85 kg) で積層した被削材に押し付け、リニアアクチュエータによりストローク幅 10 mm、平均速度 20 mm/s で往復運動させることにより行う。被削材固定部は 1 つの円筒ピンと 2 つの紙押さえ用ローラーにより被削材を湾曲・固定する構造である。この構造により、試験での切断済み被削材が自動的に左右へ離れることで、試験刃物側面との摩擦の発生を回避しながら、連続的な試験が可能となる。なお、被削材には填料などの無機成分を含まないクラフト紙を使用した。

2.3 切れ味試験

ISO 式と岐阜県式のいずれにおいても「切れ味」は 1 サイクル (1 往復、1 回) で生じた切断深さ (mm) で定義されている。切れ味試験においては、被削材である紙の物性値の変化が試験結果に大きな影響を及ぼすことが知られている。このため、本研究では、紙の標準状態⁸⁾の環境に十分慣らした被削材を使用するとともに、試験機本体についても同環境に設置し試験を行った。

切れ味試験の回数は、ISO 式では 60 回とし、岐阜県式は 4000 回とした。2 方式で試験回数が大幅に異なるのは、ISO 式は岐阜県式と比較して、切断時の荷重が約

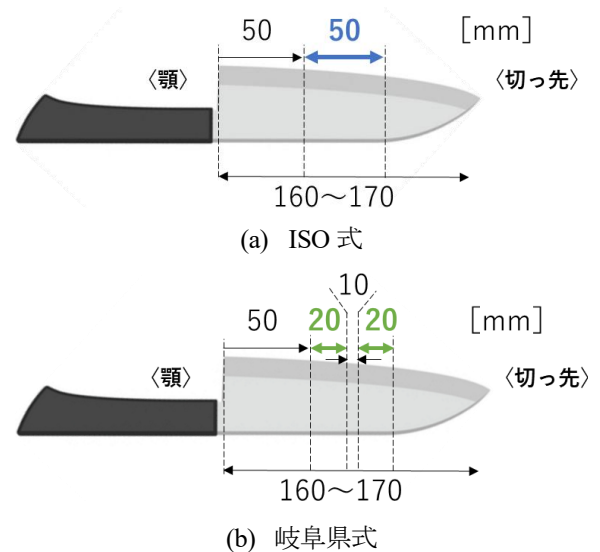


図2 切れ味試験の試験位置と試験長さ

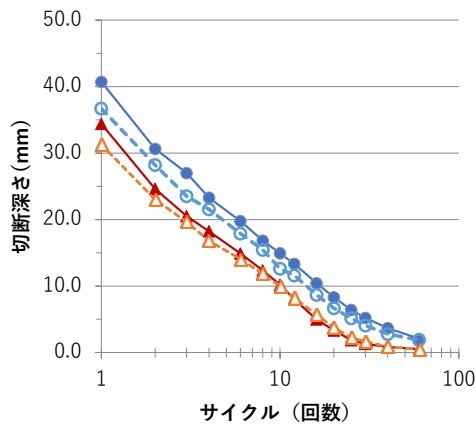
6.0 倍、速度が約 2.25 倍であることに加えて、シリカ粒子を含有する被削材を使用することから、優位に摩耗が進展するためである。なお、ISO 規格²⁾では、使用者が研ぎ直し可能な刃に対する試験回数は 60 回 (基準回数 60 回) と定められており、初回から 3 回目までの被削材の累積切断深さが初期切断性能、初回から 60 回までの累積切断深さが刃先耐久性として規定されている。

図2に切れ味試験の試験位置と試験長さ示す。切れ味試験を行う位置は刃物刃長の中心付近とした。具体的には、刃元 (顎) 位置から 50 mm 地点を起点とし、ISO 式では切っ先方向に約 50 mm の区間に対して試験を行った。岐阜県式では起点から約 20 mm (区間1)、未試験区間 10 mm を挟んで、更に約 20 mm (区間2) の2箇所に対して試験を行った。それぞれの試験方式で試験長さが異なるため、岐阜県式では区間1と区間2の値の平均をとり、ISO 式との切れ味試験の比較に使用した。また、切れ味試験による刃先の摩耗状況を把握するため、デジタルマイクロスコプ (株式会社キーエンス製、VHF-1000) により、刃先を観察した。

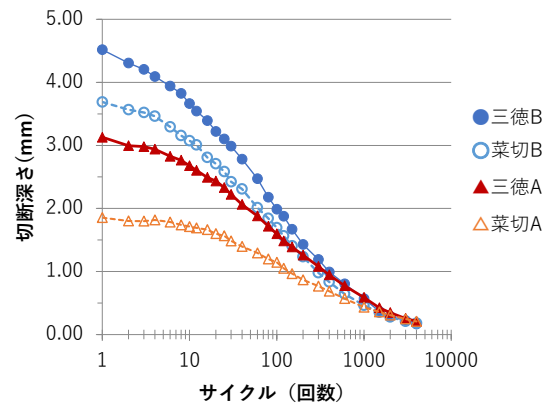
3 結果及び考察

3.1 切れ味試験結果の比較

図3にISO式と岐阜県式の切れ味試験結果を示す。切断深さは試験回数に対して指数関数的に減少するため、図では試験回数を対数軸で表している。図から分かるように、ISO 式試験における切断深さは、試験回数の増加に伴って線形に減少した。一方、岐阜県式試験における切断深さは、試験回数の増加に伴って逆 S 字状に減少しており、切断深さの変化は異なった。これは前報⁷⁾で報告したカッター刃の実験と同様であり、刃先摩耗の進展が異なることが示唆された。試験開始直後の切断深さは、2 方式のいずれにおいても大きい順に三徳 B、



(a) ISO 式



(b) 岐阜県式

図3 切れ味試験の結果

菜切B、三徳A、菜切Aとなった。この結果は、材料A,Bの合金元素量の違いに伴う硬度の違いと、三徳包丁の方が菜切包丁と比べて刃角度が鋭角であることが影響したものと考えられる。また、岐阜県式は、試験回数100回程未満において、4種類の切断深さの差がISO式と比較して顕著に大きい特徴を示した。

ISO式では試験回数が20回程度以上で、材料に依存した切断深さの変化を示した。一方、岐阜県式では試験回数300~1000回程度において、試験刃物の切れ味の優劣が逆転し、2000回程度以上では全ての刃物の切断深さが同等程度まで低下した。これは、刃先角度や小刃角など、刃先形状の影響と考えられる。これらの結果から、ISO式では材料の違いによる切れ味影響をより受け、岐阜県式では刃先形状の影響をより受けると考えられた。このため、ISO式は材料の違いによる切れ味評価に優れているのに対し、岐阜県式は刃先形状による切れ味評価に優れていることが示唆された。

図4に試験後の刃先磨耗の様子を示す。ISO式では、3回の切れ味試験において刃先の磨耗が認められ、60回では磨耗幅が広がっていることが確認できる。一方、岐阜県式では、4000回の切れ味試験後においてISO式のような顕著な磨耗は認められず、磨耗は刃先のごく先端部分に生じているものと予想された。

3.2 交互試験

前報でのカッター刃での実験と同様に、包丁においても同一の試験刃物に対する交互試験⁷⁾を行った。これはISO式で所定回数の試験を行った刃物に対して岐阜県式による試験を行うものであり、その時々のISO式の切断深さを岐阜県式の切断深さで表すことを目的としている。なお、岐阜県式による刃先磨耗の進行は、ISO式と比較して十分に小さいことから、ISO式の試験の結果に及ぼす影響はないものとして扱った。

図5に交互試験から求めたISO式の1~3回の切れ味

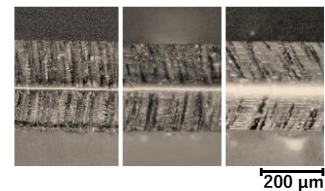
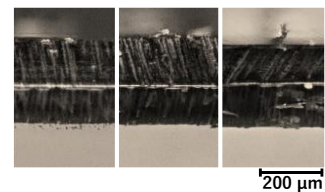
(a) 0回 (b) 3回 (c) 60回
ISO式(d) 0回 (e) 1000回 (f) 4000回
岐阜県式

図4 刃先磨耗の様子（三徳A）

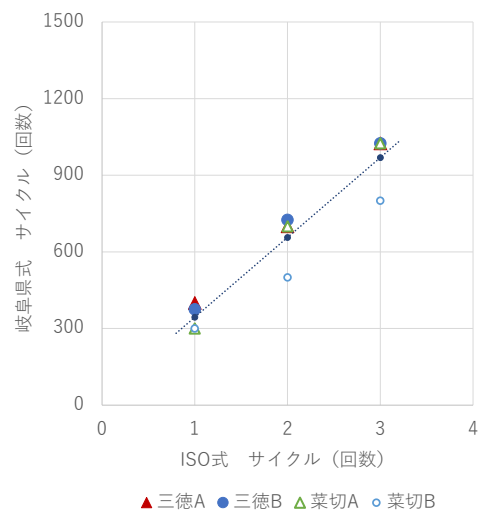


図5 交互試験の結果

試験回数に相当する岐阜県式の試験回数を算出した結果を示す。ISO 式における1回、2回、3回の試験が、岐阜県式に対して線形に変化すると仮定すると、岐阜県式回数として、それぞれおよそ350回、650回、1000回に相当すると考えられる。

3.3 累積値の比較

ISO 規格では、初回から3回目までの被削材の累積切断深さを初期切断性能と規定し、満たすべき基準値を定めている。そこで、切れ味試験の累積値における2方式の違いを検討した。評価には3.2 交互試験の結果を使用した。4種類の刃物の平均値は、ISO 式1回目、2回目、3回目においてそれぞれ41, 31, 27 mmであった。また、ISO 式による1回の試験に相当する岐阜県式の区間累積値は、1～350回目、351～650回目、651～1000回目までで、それぞれ506, 240, 203 mmであった。図6にISO 方式の1回目とこれに相当する岐阜県式の区間累積値を基準とした、切れ味の変化を示す。岐阜県式ではISO 式と比べ2区間目および3区間目において大きく減少していることが分かる。

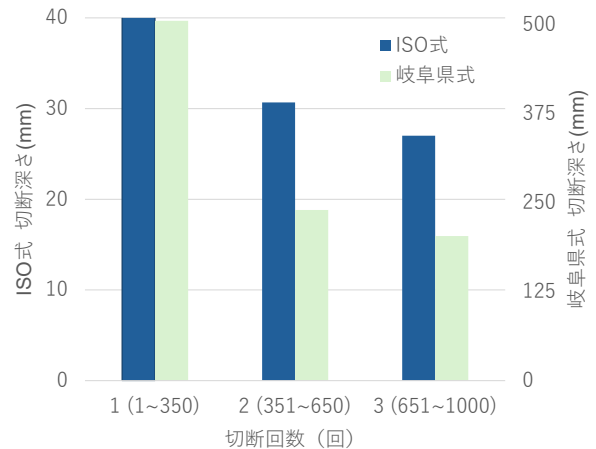


図6 累積値の比較

4 まとめ

刃先形状と材料が異なるステンレス鋼の包丁4種類に対して、ISO 式と岐阜県式による切れ味試験を行った。また、ISO 式と岐阜県式との交互試験を行い、これらの結果から以下の知見を得た。

- (1) 2方式の切れ味試験において、いずれも試験開始直後の切れ味の順位は同一であり、共通性が認められた。
- (2) 2方式の切断深さの減少傾向の違いは、一定程度の試験回数後に顕著になり、異なる特性を示した。
- (3) 交互試験の結果、本研究で扱った刃物においてISO 式の試験回数1回、2回、3回は、岐阜県式の試験回数350回、650回、1000回に相当した。また、この範囲内の切断深さの累積値は、2方式で大きく異なり、互換性は無かった。

2方式の切れ味試験を実務上で使用するにあたり、以下を補足する。切れ味試験の方式に関わらず、試験開始直後の切れ味の順位は同一であり、いずれの方式においても初期の切れ味の良否を判定することが可能であると考えられる。その上で、極めて初期の切れ味やかえりを含めた刃先先端の影響を評価したい場合においては岐阜県式が適当であり、刃体そのものの耐久性や耐用性を評価する場合においてはISO 式が適当である。なお、本研究において行った各種評価は、刃物用鋼材で作られた刃物を対象としている。刃物用鋼材と特性の異なる高硬度な材料を使用した刃物においては、刃先先端と耐久性・耐用性のバランスも含めた評価が重要であると予想され、このような刃物における試験適性の検討は今後の課題としたい。

【参考文献】

- 1) ISO 8442-1:1997, Materials and articles in contact with foodstuffs - Cutlery and table hollowware - Part 1: Requirements for cutlery for the preparation of food
- 2) ISO 8442-5:2004, Materials and articles in contact with foodstuffs - Cutlery and table hollowware - Part 5: Specification for sharpness and edge retention test of cutlery
- 3) 田中ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.3, pp1-4,2015
- 4) 田中ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4, pp3-8,2016
- 5) 田中ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.5, pp5-8,2017
- 6) 大津ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp11-13,2023
- 7) 大津ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp20-23,2024
- 8) JIS P 8111:1998 紙, 板紙及びパルプ—調湿及び試験のための標準状態

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1報）

— 鑄造シミュレーションを用いた鑄造欠陥予測 —
三原利之*

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

青銅鑄物製の水栓部品に発生した鑄造欠陥について、高解像度（0.5 mm格子）で鑄造シミュレーションを行ったところ、ガスの巻きこみに由来する鑄造欠陥（ガス欠陥）の予測箇所と実際にガス欠陥が発生した箇所がよく一致し、ガス欠陥の予測が大幅に改善した。これは、実際のガス欠陥の大きさに近い解像度で鑄造シミュレーションを行ったことで、ガス欠陥に影響する溶けた金属の流れをより正確に解析できたためと考えられる。このことから、高解像度での鑄造シミュレーションは、微小なガス欠陥の正確な予測に有用であり、今後、実際の鑄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

鑄物に求められる品質や精度が日々高まっている中、鑄物産業が抱える重要な課題の一つに、鑄造欠陥の高い発生率がある。生産現場では鑄物欠陥対策に膨大な時間と労力が費やされており、鑄物の高品質化・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、具体的な鑄造欠陥対策として、鑄造方案の改良や鑄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、鑄造欠陥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、同一の鑄造条件であっても鑄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⁾、微小な鑄造欠陥が局所的に発生することも考えられている²⁾。そのため、鑄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、青銅鑄物製の水栓部品の鑄造欠陥を低減するため、青銅鑄物製の水栓部品について高解像度での鑄造シミュレーションを行い、ガスの巻きこみに由来する鑄造欠陥（ガス欠陥）予測の精度向上について検討した。

2 実験

2.1 供試材

本研究に用いた青銅鑄物 CAC406 製の水栓部品は、一般家庭等で使用されるものであり、研究協力企業で鑄造され、その後の研磨工程で鑄物内部にあった鑄造欠陥が発見された水栓部品のうち、任意に抽出された3個の水栓部品の提供を受けた。

図1に本研究に用いた青銅鑄物 CAC406 製の水栓部品の鑄造欠陥発生箇所の例（左）と鑄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。この鑄造欠陥は球状

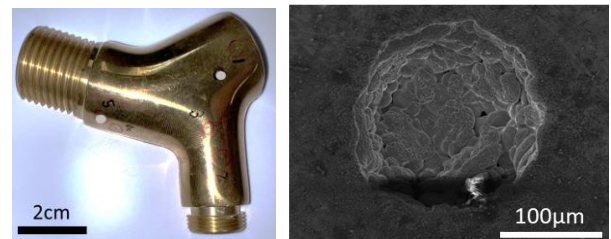


図1 水栓部品の鑄造欠陥発生箇所の例（左、●印）と鑄造欠陥部の電子顕微鏡のSEM像の例（右）

で、その内部にはデンドライトが生成しているため、これらの鑄造欠陥は注湯時のガスの巻きこみにより発生した欠陥と考えられる。いずれの水栓部品についても鑄造欠陥は水栓部品の一方の側の方に集中して発生しており、鑄造欠陥が発見された水栓部品1個あたりのガス欠陥数の平均は0.7個だった（ $n=3$ ）。通常、こうしたガス欠陥は、熔融した銅合金（溶湯）を鑄型へ流し込む（注湯）の際に巻き込まれた空気等が、熔融した金属が凝固する過程で鑄物内部にとどまることで発生し、ガスは銅合金よりも比重が軽いので、鑄物上部に多く見られる。

2.2 鑄造シミュレーション

鑄造シミュレーションは、鑄造シミュレーションソフト（クオリカ（株）製 JSCAST）を用いて、低解像度（1 mm格子）と高解像度（0.5 mm格子）の鑄造方案について行いガス欠陥を予測した。ガス欠陥は 0.0825 mm^3 以上の体積（0.5 mm格子の2/3に相当）のものを予測した。注湯時の溶湯の温度は注湯の平均温度である $1,160^\circ\text{C}$ とし、その他の鑄造条件は実際の鑄造時に近い条件に設定した。鑄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

ガス欠陥が発生した鑄造方案について、低解像度（1 mm格子）で鑄造シミュレーションを行った結果を図2に

* 技術支援部

示す。また、水栓部品部の拡大図を図 4(a)に示す。水栓部品部 1 個あたりの予測されたガス欠陥数は平均で 98.8 個だった。ガス欠陥は水栓部品部の上面に多く予測されたが、実際にガス欠陥の発生した水栓部品とは異なり、水栓部品部の下面にもガス欠陥は多く予測された。これは、低解像度での casting シミュレーションでは、空気等のガスの巻き込みに由来するガス欠陥の主要な要因である、溶湯の流動状態を十分に予測することができなかったためと考えられる。

次に、高解像度 (0.5 mm 格子) で casting シミュレーションを行った結果を図 3 に示す。また、水栓部品部の拡大図を図 4(b)に示す。水栓部品部 1 個あたりのガス欠陥数は平均で 10.5 個だった。ガス欠陥は水栓部品部の上面のみに集中して発生することが予測され、実際の水栓部品でのガス欠陥の発生箇所とよく一致していた。また、ガス欠陥数も低解像度での欠陥数より 89 % 減少した。これは、青銅鋳物に発生したガス欠陥は直径 0.5 mm 以下の微小な欠陥が多く、実際のガス欠陥の大きさに近い解像度で casting シミュレーションを行ったことで、ガス欠陥に影響する溶湯の流れをより正確に解析できたためと考えられる。このことは、高解像度での casting シミュレーションは、ガス巻きこみによる casting 欠陥の発生予測に有用であることを示している。実際の水栓部品でのガス欠陥のより正確な予測のためには高解像度での casting シミュレーションが必要であると考えられる。

4 まとめ

青銅鋳物製の水栓部品に発生した casting 時のガスの巻きこみに由来する casting 欠陥をより正確に予測するため、高解像度で casting シミュレーションを行いガス欠陥を予測したところ、ガス欠陥の発生箇所は実際のガス欠陥が発生した箇所とよく一致し、高解像度での casting シミュレーションによるガス欠陥の予測は有用であることが分かった。

casting 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いると考えられ、今後、さらに casting 欠陥が発生する要因について検討を進め、製造現場において casting シミュレーション技術を活かしたより実用性の高い casting 欠陥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.5, pp28-29, 2024

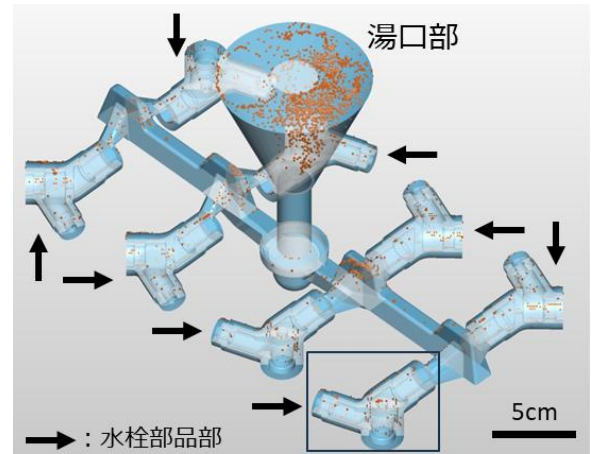


図 2 鋳造シミュレーションによるガス欠陥の予測箇所 (低解像度 (1.0 mm 格子))

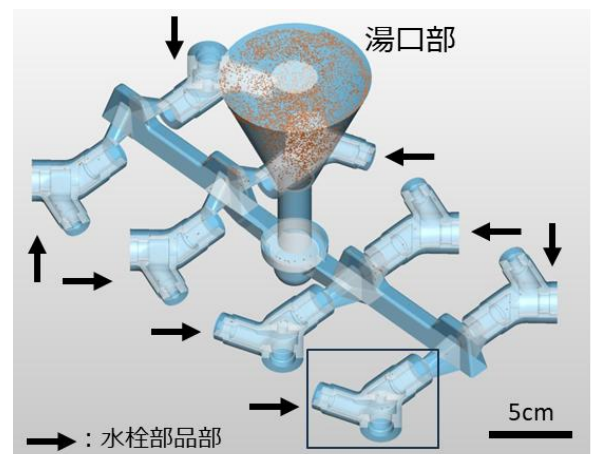


図 3 鋳造シミュレーションによるガス欠陥の予測箇所 (高解像度 (0.5 mm 格子))

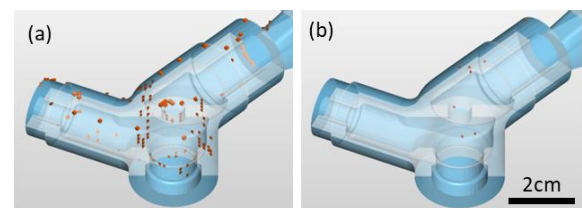


図 4 鋳造シミュレーションによるガス欠陥の予測箇所の拡大図 ((a) 低解像度 (図 2 の□部)、(b) 高解像度 (図 3 の□部))

高湿度環境における金属腐食の防止に関する研究（第1報）

山口貴嗣*

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

YAMAGUCHI Takashi*

高湿度環境における腐食の再現促進試験の検討を行った。昼間の時間のみ空調を使用した工場を模した室内での温湿度測定を実施し、実際の湿度変化の様子を観察した。

また、これらのデータ収集を基に腐食促進試験のパターンを検討し、実験を行った。本試験により比熱容量の大きな物体と接触している試験片については、室内の温度変化と異なる挙動が確認でき腐食されやすいことが確認された。

1 はじめに

県内企業の生産活動において、製品の保管時および部品輸送時の腐食による不良品の増加は、コスト増加に直結し、同種の製品における競争力低下の一因とされている。また、当研究所の技術相談においても、定期的このような問題が持ち込まれている。

保管時の腐食要因として、梅雨時や夏場の高湿度環境や段ボールから発生するガス類などが考えられるが、これらの事象に関する具体的な検証例はあまり見られない。

さらに、海外からの船便での部品輸送時には、密閉性の高いコンテナ内の温度上昇に伴い、製品等からの含有水分の蒸発、段ボール等からのガス成分の揮発、および若干の塩分の影響によって、腐食が促進される可能性が高いと考えられる。

本年度の研究では、工場内の高湿度環境における腐食条件を検討し、再現試験を実施することで腐食を防止できる条件を見出し、企業へのアドバイスを行うことで、不良品の減少と県内企業の競争力強化に貢献することを目的とした。

2 工場内での高湿度環境を再現した腐食試験

県内企業の工場の一例として、空調が入っているものの、搬入・搬出の関係で外と通じている建物が多く見られる。これらの建物はカーテンやシャッターで外と隔てられているため、湿度が外部の影響を受けやすい。

2.1 温湿度データの収集

このような背景から、実環境でのデータ取得方法として、9時から17時まで空調稼働させ、17時から翌9時までは無制御とした室内で、チトセ工業株式会社製 Logbee を使用して、天井付近と床から約1mの位置、および定盤上の温度・湿度データを5分間隔で取得した（図1）。

2.2 高湿度環境を再現した腐食試験

前項のように収集した温湿度データを基に、試験プログラムを作成し、QFOG社製 CRH600 を使用して、高湿度な工場環境を再現するサイクル試験を実施した。

3 結果及び考察

3.1 温湿度データの収集結果

夏季の昼間のみ空調稼働させている工場における、温湿度変化をいくつか測定し、その代表的な結果を図2に示す。

床から約1mの高さで測定した場合、空調稼働開始時に一時的に湿度が低下したが、その後すぐに約60%RHで安定した。また、天井付近の温湿度は工場内

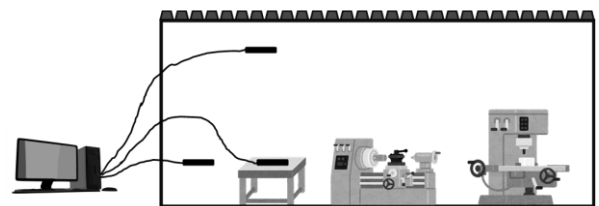


図1 温湿度データの収集のイメージ

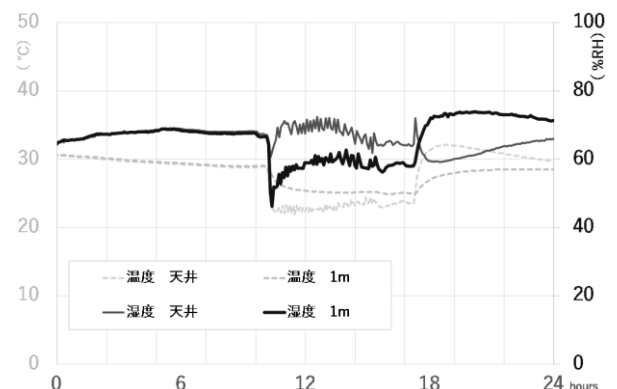


図2 夏季 空調稼働時の温湿度変化

* 技術支援部

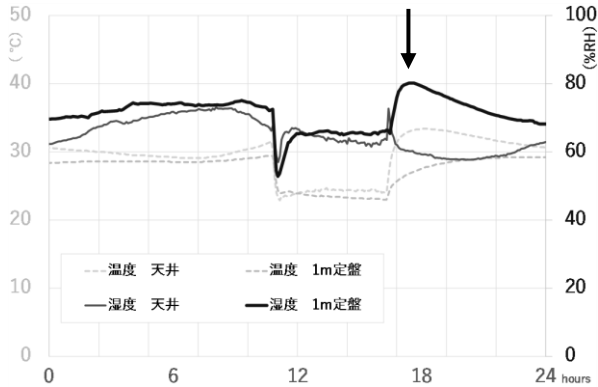


図3 夏季 空調稼働時の温湿度データ（定盤上）

の対流の影響を受けて、空調の設定とは異なる挙動が見られた。

また、同条件下での定盤上の温湿度変化の挙動を確認するために、測定したデータを図3に示す。

この測定データを見ると、空調を停止させた直後の湿度が非常に高くなり、おおよそ80%RHまで上昇していることが確認できた（矢印部分）。

このような状況において、物質表面では、水分の吸着量は雰囲気相対湿度が80%RH以上で急増し、腐食が進行しやすくなるとの報告がある¹⁾。

空調停止直後の図2における温度差は約5℃で、このときの湿度は約70%RHであった（図4点線）。これに対し、図3では温度差が約7℃、湿度が約80%RHとなり（図4実線）、結露する条件を満たしている。

この図は、温度と飽和水蒸気量および湿度の関係から作成できる図で、物質表面（製品等）と気温の温度差、および相対湿度によって結露が生じるかどうかを

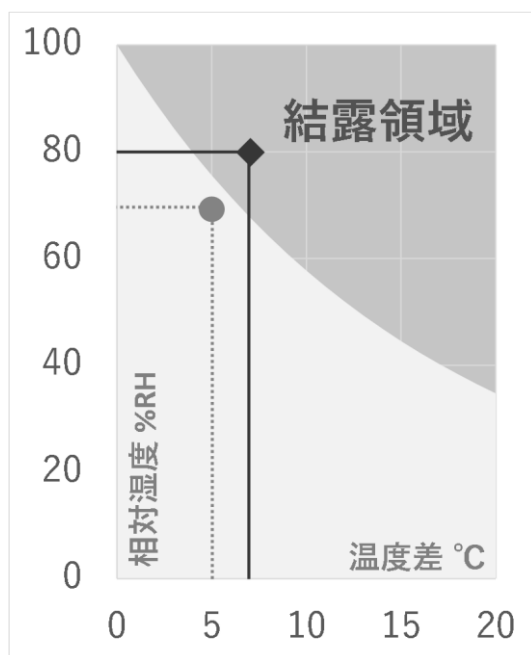


図4 相対湿度と温度差による結露条件

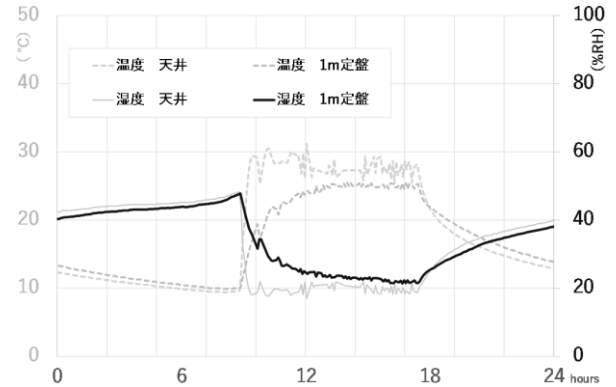


図5 冬季 空調稼働時の温湿度データ（定盤上）

判定できる²⁾。

このことから、室温の変化に追従しない比熱容量の大きな物質においては、結露が生じやすい条件であるとわかる。

次に、冬季における空調を使用した工場の温湿度変化の測定データを図5に示す。

冬季は、外気の湿度が低いため、空調を使用しても湿度上昇が少なく、結露しにくいことが確認できた。

3.2 複合サイクル試験の実施結果

図3の測定結果を基に、試験条件を作成した。

平日部分については、23℃ 60%RH と 35℃ 80%RH のサイクルを3.5時間として5日分、休日部分については30℃ 65%RH と 35℃ 70%RH のサイクルを3.25時間として2日分、合わせて24時間で1週間分を再現する試験プログラムとした（図6）。

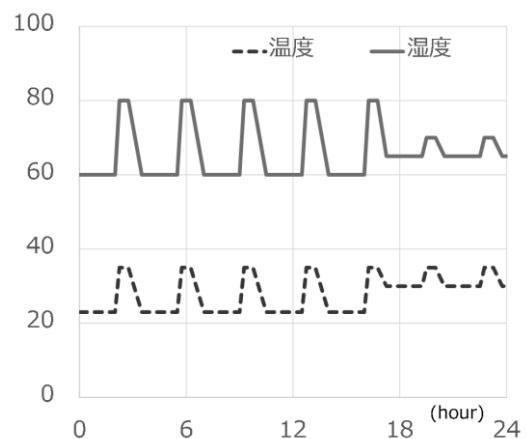


図6 複合サイクル試験のプログラム

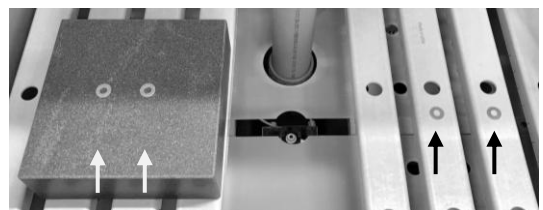


図7 複合サイクル試験槽内での試験片設置の様子

試験片は、実製品のサンプルとして SPCC 製のワッシャーを採用し、クロメート処理されているため片面研磨したものを使用した。

研磨については、腐食の状況が顕著に現れるように、少し粗めの SiC 耐水研磨紙 120 番を用いた。

また、図 7 のように試験槽内には比熱容量の大きい小型の石定盤を設置し、この上と樹脂製治具上のそれぞれで試験を実施した。

複合サイクル試験の結果を図 8 に示す。

比熱容量の大きな石定盤の上に置いた、試験片については、試験槽内で結露する温度差となり腐食が進んだと考えられる。

一方で樹脂上に置いた試験片についても、徐々に腐食が進行しているが、これについては試験片作成時に使用した耐水研磨紙が荒目であったため、研磨の溝部分で毛細管現象のような状態になり、通常よりも結露しやすくなったためであると考えられる。

この結果を踏まえると、今回作成した複合サイクルのプログラムは、高湿度環境における、比熱容量の大きな物質の腐食を良く再現していると考えられる。

4 まとめ

工場を模した室内で空調を使って温湿度のデータを取得し、再現用の複合サイクル試験プログラムを作成した。

このプログラムを用いることで、比熱容量の大きな物質の上に設置した試験片は、他の場所に設置した試験片に比べて腐食速度が増しており、高湿度環境における温度差による腐食を再現することができた。

【参考文献】

- 1) 石川ら,材料と環境,40, pp540-544,1991
- 2) 株式会社アピステ「制御盤熱対策ポータル」,
「湿気による結露／湿気による金属腐食」
<https://www.apiste.co.jp/contents/enc/control-panel-cooling/trouble/condensation-metalcorrosion/> (参照 2025/2/28)

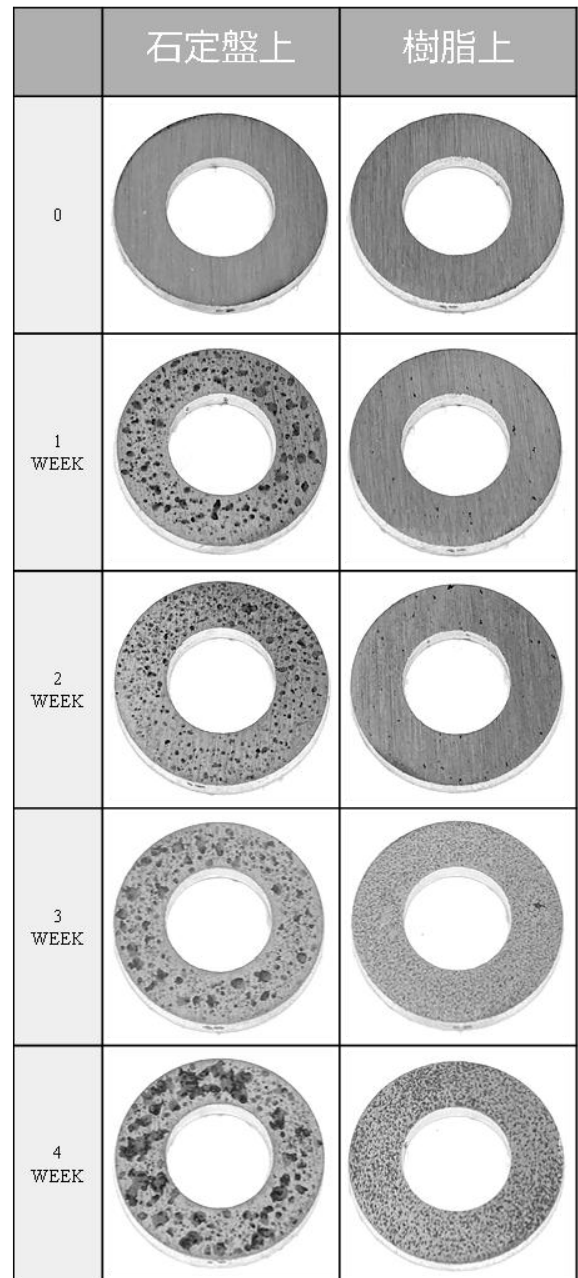


図 8 複合サイクル試験の結果

レーザー加飾技術の高度化に関する研究（第2報）

田中 等幸*、大津 崇*

Research on advanced color laser marking (II)

TANAKA Tomoyuki * and OTSU Takashi *

ステンレス鋼へのレーザー加飾は、レーザー照射領域を発色させる加飾技術であり、刃物など金属製品の装飾に利用できる。この技術を用いて写真などの多階調加飾を行う場合、レーザー照射条件の特定に膨大なテスト工数を要するため、当該技術の普及や適用場面の拡大を図るうえで課題となっている。本研究では、レーザー加飾パラメータから所望の色を予測するモデルの構築を目指しており、本報では、サポートベクター回帰を用いた予測モデルを構築した。構築したモデルを評価した結果、実測値と予測値の色差は 15.2 となり、応答曲面法を使用した前報の結果より予測精度が改善した。

1 はじめに

我々は、ステンレス鋼やチタン合金などの金属表面にレーザーを照射することで、鮮やかな装飾デザインを可能にするレーザー加飾技術を開発した¹⁾²⁾。この技術の特徴は、レーザー照射によって形成した金属表面の薄膜干渉効果と微細領域の混色効果によって多階調表現を実現できることにある。また、当該技術は、従来技術である陽極酸化や電解質コーティングと比較して、低コストで環境に優しく、耐摩耗性にも優れている。この技術の適用先として、刃物、眼鏡、宝飾品など幅広い分野の金属製品が挙げられ、製品の高付加価値化が期待できる。

通常、レーザー加飾によって所望の発色を得るためには、事前に加飾テストを繰り返し、適切なレーザー加飾条件と金属表面色との関係を把握する必要がある。このとき、ロゴマークのように使用する色数が少ない場合は、パラメータ探索に要する加飾テスト回数も少なく、工数の問題は発生しにくい。しかし、写真など階調数が多い場合は、金属表面色とパラメータセットの対応関係を探索するために膨大なテスト工数が必要となる。

レーザー加飾技術の普及や適用場面の拡大を図る上では、この課題を解決する必要がある。前報では応答曲面法³⁾を用いて、ステンレス鋼の表面色を予測する数理モデルを構築した⁴⁾。その結果、ステンレス鋼表面色とレーザー制御パラメータの間には非線形の関係があることが示唆されたものの、構築したモデルは実測値を高精度で推定するには至っていない。

そこで本報では、近年、非線形問題の解決に広く利用されている機械学習を活用し、レーザー加飾によって発色する表面色と加飾パラメータの関係を検討する。具体的には、機械学習の一手法であるサポートベクター回帰（以下、SVR）モデルを適用し、その予測精度について評価したので報告する。

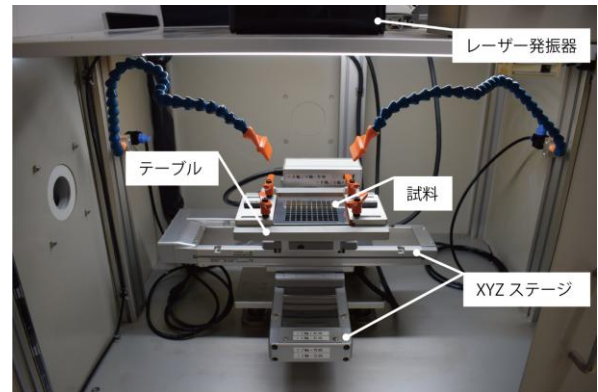


図1 実験環境

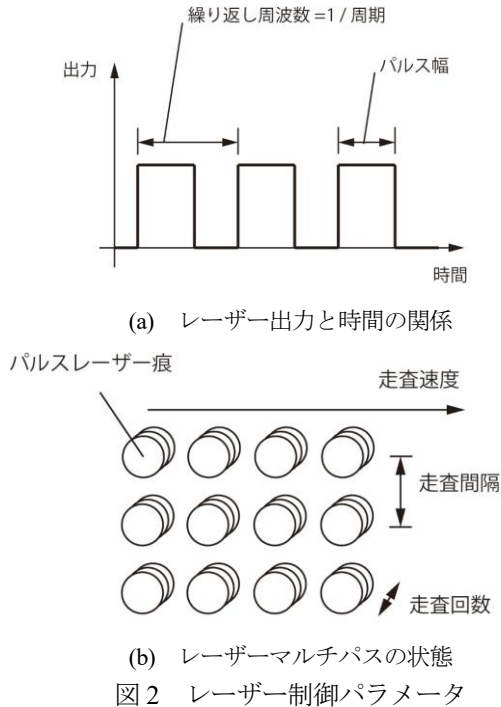
2 実験

2.1 レーザー加飾実験

レーザー加飾実験に供する試料には、ステンレス鋼（SUS304 材、縦 100 mm × 横 100 mm、厚さ 1 mm）を用いた。ステンレス鋼の表面を#400 耐水研磨紙で研磨し、エタノールで洗浄した後、常温乾燥させたものを使用した。

レーザー加飾実験は、図1に示す汎用 XYZ ステージとレーザー発振器により構成されるシステムを用いて行った。実験には、最大出力 20 W、繰り返し周波数 10 – 1000 kHz、レーザー波長 1064 nm のナノ秒パルスレーザー（㈱Keyence 製 MD-X2500）を用いた。図2にレーザー制御パラメータの説明図を示す。図2(a)はレーザー出力と時間の関係、図2(b)はパルスレーザーを走査した際のマルチパスの状態を示している。金属表面色は、レーザー出力、走査速度、繰り返し周波数、走査間隔、焦点距離、走査回数など、多くのパラメータが影響を及ぼすが、本研究ではステンレス鋼表面色への影響が大きい出力（10 W – 20 W）、走査速度（50 mm/s – 300 mm/s）、繰り返し周波数（5 kHz – 30 kHz）の3つのパラ

* 金属部



メータを制御対象とした。その他の制御パラメータについては、走査間隔 $40\ \mu\text{m}$ 、焦点距離 $0\ \text{mm}$ （ジャストフォーカス）、走査回数 1 回とした。レーザービームのスポット径は約 $50\ \mu\text{m}$ である。実験は、室温の気環境下で行い、試料上の $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ の矩形領域にレーザーを走査させ、モデル構築のための実験サンプルを作成した。レーザーの照射順序は、レーザー照射熱による影響を考慮し、実験サンプルごとに無作為に決定した。

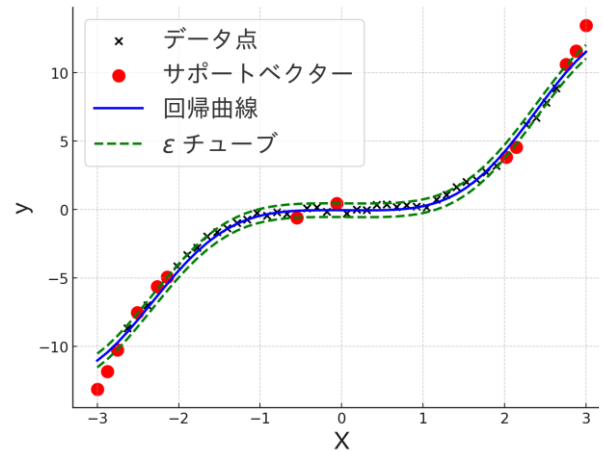
実験に使用する制御パラメータはそれぞれ 6 水準とし、これらの制御パラメータのすべてを組み合わせた 216 通りのモデル構築用実験データを取得した。また、構築したモデルの汎化性能を評価するため、各制御パラメータの範囲内で無作為に水準を設定した 32 通りの加飾実験を行い、評価用の実験データとした。

2.2 ステンレス鋼表面色の測定

ステンレス鋼表面色の測定には、分光測色計（Konica Minolta 株製 CM-M6）を使用した。この分光測色計は、実験サンプルに対し 45° 方向から照明を照射した拡散光が検出可能である。本研究では、予備実験において最も高い反射率が得られた -15° 方向の拡散反射を CIE LAB 表色系で評価することとした。測定は、実験サンプル上のレーザー走査によって形成された各色 $8\ \text{mm} \times 8\ \text{mm}$ の矩形領域内に対して行い、明度 L^* 値および色度 a^* 値（赤-緑色差）、 b^* 値（黄-青色差）を取得した。なお、CIE LAB は物体色を表す表色系として工業分野で広く使用されており、JIS Z 8781-4 として規格化されている。

2.3 モデルの構築

本研究では、制御パラメータとステンレス鋼表面色の相互作用をモデリングするため、 L^* 値、 a^* 値、 b^* 値ごと



にレーザー制御パラメータを対応付けたモデルを構築した。前報では、制御パラメータとステンレス鋼表面色との間には非線形の関係があること、また、少ない実験計画数では目標精度 ($R^2 \geq 0.9$ 、 $\sigma \leq 2.0$) に到達できず、実用的なモデル構築が困難であることを報告した⁴⁾。この結果を踏まえ、本報では機械学習の一手法である SVR を使用してモデル化を試みた。モデルは 2.1 節で作成した実験サンプルの制御パラメータを説明変数、ステンレス鋼表面色を目的変数とし、216 通りの実験データの組み合わせから Python の Scikit-learn ライブラリを使用して構築した。

一般に回帰モデルでは、実測値と予測値との誤差（損失関数）を最小にする回帰係数を求める。式 (1) は、回帰式 $f(x) = xw^T + b$ とした場合の SVR の損失関数 $E(w)$ である。

$$E(w) = C \sum_{i=0}^n \max\{0, |y_i - f(x_i) - \varepsilon|\} + \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (1)$$

ここで、 x をレーザー制御パラメータ、 $f(x)$ を色値と仮定する。 C および ε は SVR のハイパーパラメータであり、それぞれ正則化パラメータ、マージン幅の許容誤差を示している。 C の値が大きいほど過剰適合となり、 ε の値が大きいほど回帰曲線が単純化される。なお、 i は実験サンプルの番号、 w は回帰係数を表している。

図 3 は非線形データにおける SVR の一例を示している。この回帰曲線は、 $\pm \varepsilon$ 以内のデータを無視し、それ以外のデータ（サポートベクター）によって構築される。一般に、 ε マージンは誤差を許容するため、線形回帰で使用される残差平方和よりもノイズや外れ値に頑健であることが知られている⁵⁾。本研究では、複雑なパターンをモデル化する際に効果的な RBF（Radial Basis Function）カーネルを用いて非線形回帰モデルを構築した。式 (2) に RBF カーネルの定義式を示す。

$$k(x, x') = \exp(-\gamma \|x - x'\|^2) \quad (2)$$

表1 実験データの一部

No	Laser parameters			L*	a*	b*
	Laser Power (w)	Scanning speed (mm/s)	repetition frequency (kHz)			
1	100	50	5	55.99	13.97	37.82
2	100	50	10	44.72	25.29	29.91
3	100	50	15	57.91	23.18	43.43
4	100	50	20	44.62	20.47	36.91
5	100	50	25	80.45	7.82	31.06
6	100	50	30	81.4	5.68	28.66
7	90	50	5	61.59	15.79	51.85
8	90	50	10	50.19	32.14	39.75
9	90	50	15	53.79	20.19	44.33
10	90	50	20	69.48	15.53	49.87
207	60	300	15	117.08	-5.5	-8.86
208	60	300	20	90.9	-1.46	-8.44
209	60	300	25	77.36	2.35	1.62
210	60	300	30	74.42	3.82	11.14
211	50	300	5	78.24	7.79	22.93
212	50	300	10	88.02	4.78	4.17
213	50	300	15	86.06	5.26	11.84
214	50	300	20	76.38	6.32	17.32
215	50	300	25	73.47	4.07	14.56
216	50	300	30	79.5	-0.58	4.33

ここで、 $\|x - x'\|$ は2つのデータ間のユークリッド距離、 γ はカーネルの幅を制御するハイパーパラメータである。 γ が大きいほど局所的なデータを捉え、小さいほどデータの全体的な傾向を捉えやすい性質がある。直感的には、RBF カーネルは実験データ間の類似度を計算し、この値が高いデータをサポートベクターとして選択することで回帰モデルを構築すると説明できる。SVRの詳細な解説は、文献⁷⁾を参照されたい。

2.4 モデルの性能評価

構築した SVR モデルの汎化性能は、32 通りの実験データを使用して評価した。実験データを 5 分割し、1つのグループをハイパーパラメータ調整用データ、残りのグループをモデル評価用データとして使用した。この操作を 5 回繰り返して交差検証を行った。ハイパーパラメータは SVR モデルの性能に大きく影響を及ぼすため、本研究では Optuna⁶⁾を用いて最適化を実施した。探索空間を 0.01 - 100 の範囲に設定して 100 回試行し、最も性能が良かった時のハイパーパラメータを最適値とした。SVR モデルの性能評価には、 L^* 値、 a^* 値および、 b^* 値それぞれの決定係数 (R^2 スコア、式 (3)) と平方根平均二乗誤差 (RMSE、式 (4)) を用いた。最終的な発色の類似性は、実測値と予測値の色差 ΔE^* を式 (5) により求め判定した。

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (4)$$

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

ここで、 y_i は実測値、 y'_i は予測値、 n はデータ数、 ΔE^*

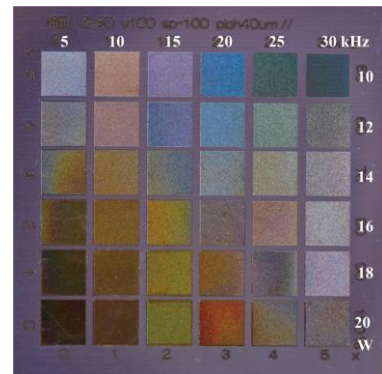


図4 実験サンプル例

(レーザー出力 10W-20W, 2 W 刻み、繰り返し周波数 5kHz-30kHz, 5 kHz 刻み、走査速度 100 mm/s)

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

3 結果と考察

表 1 は SVR モデルの構築に使用したレーザー制御パラメータと、分光測色計によって測定したステンレス鋼表面色の CIE LAB 値の一部である。図 4 は、レーザー出力 10 W - 20 W の範囲で 2 W 刻み、繰り返し周波数 5 kHz - 30 kHz の範囲で 5 kHz 刻み、走査速度 100 mm/s の条件で作成したステンレス鋼へのレーザー加飾例である。連続するレーザー制御パラメータであっても発色が連続的に変化していないことがわかる。図 5 は、実測値と予測値の回帰プロットであり、評価データ ($n = 32$) を分光測色計で測定した実測値と SVR モデルによる予測値の関係を示している。同図におけるハイパーパラメータの最適値 (C, ϵ, γ) は、 L^* : (24.0, 0.22, 4.18)、 a^* : (44.7, 0.02, 5.81)、 b^* : (37.4, 0.17, 9.40) であり、構築したモデルはデータに適合しやすい特性を持つが、わずかに汎化性能が低いモデルであることが示唆された。しかし、前報

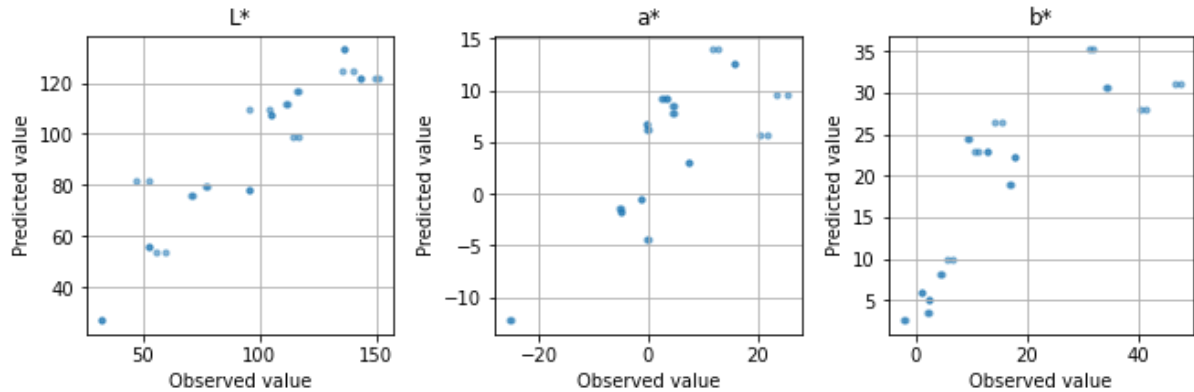


図5 実測値と予測値の回帰プロット

の回帰プロットと比較すると、SVRによって予測された $L^*a^*b^*$ 値は実測値に適合しており、データの分布に偏りがないことが確認できた。モデルの予測精度が前報より改善した理由として、SVRの使用に伴い、データ数を32通りから216通りに増やしたこと、またモデルの構築に使用する実験データに反射率の高い角度の反射光を用いたことが考えられる。表2にモデルの予測精度結果を示す。同表から決定係数 R^2 は、明度差 ΔL^* :

0.84、色度差 Δa^* : 0.56、色度差 Δb^* : 0.67であり、応答曲面法を用いてモデル化した前報の結果より予測精度が改善した。評価データから算出した色差 ΔE^* のRMSEは15.2となった。これまでの経験から実用的には $\Delta E^* < 12$ であることが望ましいため、今後さらなる予測精度の向上が必要である。モデルの予測精度をさらに向上する対策として、予測モデルの構築に使用する学習データ数の増加、あるいはニューラルネットワークなど非線形問題に効果的なモデル構築法の導入を検討する予定である。

図6は、実測値および予測値の $L^*a^*b^*$ 値をRGB値に変換し、コンピュータ上で再現した画像であり、評価データのうち、 ΔE^* が最も小さい画像と大きい画像を示している。図中の括弧の値は、256階調のRGB値である。同図から、 ΔE^* が3.36では、実測画像と予測画像の両者に色差はないと判断できるが、 ΔE^* が39.9と大きな画像では明らかな違いが認められた。

4 まとめ

レーザー加飾技術の利便性向上および普及拡大を目的として、本研究ではSVRを用いた非線形学習により、加飾パラメータとステンレス鋼表面色との関係をモデル化した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 学習データ($n=216$)を用いてSVR(RBFカーネル使用)を構築した結果、応答曲面法を用いた二次回帰モデルよりも予測精度が改善した。
- 2) 評価データ($n=32$)に対するSVRモデルの実測値と予測値の色差 ΔE^* は15.2となり、実用的なモデルとするためには、さらなる予測精度の向上が必要である。

表2 モデルの予測精度結果

	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
R^2	0.84	0.56	0.67	-
RMSE	14.3	7.51	8.37	15.2

ΔE^*	実測	予測
3.36	 (189, 190, 186)	 (199, 198, 190)
39.9	 (160, 95, 43)	 (231, 195, 147)

図6 画像比較

【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.1, pp25-26,2020
- 2) 田中ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp1-4,2018
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 村上ら,東京都立産業技術研究センターNo.11, pp36-39,2016
- 6) 柳瀬,Optuna で始めるハイパーパラメータ最適化,Vol.104,No.7,2021
- 7) 赤穂,カーネル多変量解析,岩波書店, pp99-121,2022

低融点金属による水栓製品欠陥補修技術の開発(第1報)

細野幸太*、林哲郎*

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

HOSONO Kota* and HAYASHI Tetsuro*

青銅製の水栓製品において、メッキ処理を施す前の研磨工程で発見される微小な鑄造欠陥は、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。この問題に対し、我々は低融点金属である亜鉛を補修材として活用する技術の開発を進めている。本研究では、曲面形状を持つ実際の青銅製水栓部品を対象に小型電気炉を用いた補修手法を試みた。その結果、混合ガス（窒素－水素）を流しながらの加熱処理により、曲面部分でも素材と亜鉛が密着し、素材より硬く、ボイドなどの欠陥がほとんどない銅－亜鉛化合物層を形成できることが分かった。さらに、電気炉を活用することで、多数の水栓製品を同時に補修できる可能性が示唆された。

1 はじめに

既報¹⁾では、メッキ処理を施す水栓製品に用いられる青銅（CAC406）の鑄造欠陥補修方法を検討するため、管状炉と CAC406 平板を用いた実験を行った。その結果、補修に使用した亜鉛（Zn）薄板中に素材中の銅（Cu）が拡散し、ほぼ欠陥のない約 350 μ m 厚の Cu-Zn 化合物層が形成され、青銅製品の補修方法として有効であることが示唆された。

そこで本研究では、管状炉と比較して広い均熱領域が確保できる小型電気炉を加熱装置として使用するとともに、試験片として曲面を有した実際の CAC406 製水栓製品を使用することで、補修技術の実用化を視野に入れた基礎的検討を行ったので報告する。

2 実験

2.1 試験片

曲面を有する試験片は、砂型鑄造で製造した CAC406 製水栓製品の一部を切断し作成した。同試験片は、メッキ処理前の研磨が施されており、エタノールで 5 分間超音波洗浄した後、鑄造欠陥の補修箇所を模擬した $\phi 3$ 、深さ約 0.25 mm の穴を切削加工により形成した（図 1）。補修材となる Zn 薄板（株式会社ニラコ製、純度 99.2 %）を穴形状に入るよう $\phi 3$ 程度に加工し、厚み 0.3 mm と 0.1 mm の順で、重なるように穴に設置した。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、 $\phi 3$ 程度で厚み 0.1 mm のスズ（Sn）箔（株式会社ニラコ製、純度 99.9%）を 0.1 mm 厚の Zn 薄板上に設置し、加熱処理前の試験片とした。

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

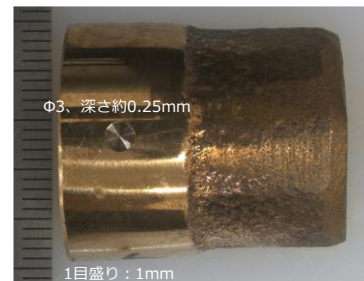


図 1 切削加工後の曲面を有する CAC406 試験片

の融点（約 419℃）以上である 495℃とし、1 時間保持し、約 220℃まで炉冷した後、試験片を取り出し、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 の密着状態及び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、SEM 装置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、切断面の硬度をマイクロビッカース硬さ試験機（株式会社フューチャテック製 FM-810）により測定した（各層 5 点）。

3 結果及び考察

加熱処理後のマクロ断面像を図 2 に示す。同図より平板と同様に曲面部においても Zn と CAC406 は接合していることが分かる。図 3 に加熱処理後の試験片表面を #800 及び #1200 の SiC 研磨紙で湿式研磨後、ダイヤモンド懸濁液を用いてバフ研磨した試験片を示す。研磨後の補修部は、Zn 等の補修材により充填されており、平滑

* 金属部

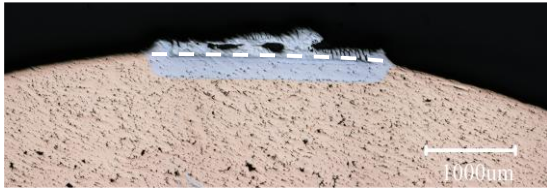


図2 加熱処理後のマクロ断面像（金属顕微鏡）

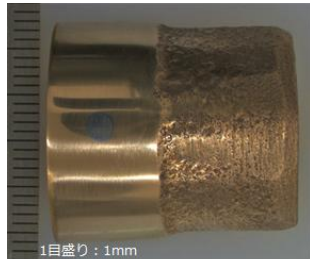


図3 バフ研磨後の補修試験片

な表面が得られている。また、研磨工程により研磨されたのは、図2の白い点線部であると考えられ、断面像からも研磨後の補修部分は充填されていることが確認できる。これらの結果から、小さな铸造欠陥部を切削加工後、Zn及びSnを設置し、混合ガス中で加熱することで曲面を有する欠陥部を補修できることが示唆された。

図4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155μm厚のCu-Zn化合物層が形成されていることが分かった。EDXによる簡易定量分析からCu-Zn化合物層中のCuは34.3at%、Znは64.42at%、Pbは0.66at%、Snは0.62at%であり、Cu₅Zn₈を形成していると考えられる。さらに、CAC406とZn界面にはPbやSnが多く拡散し、Sn箔中には、SnとZnの共晶が形成されることが分かった。また、Cu-Zn化合物層の硬さは、HV405となった。素材であるCAC406の硬さはHV76であることから、硬いCu-Zn化合物層が均質に形成されていることが分かった。

図5(a)に実際の製造現場で不良と見なされる0.3mm程度の铸造欠陥を有するメッキ前のCAC406製水栓製品を示す。同製品の铸造欠陥部にφ3、深さ約0.2mmの穴を切削加工した後、実験用試験片と同様の補修処理を施し、バフ研磨した水栓製品を図5(b)に示す。同図よりφ3の穴が補修材で充填されており、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製水栓製品の欠陥補修方法を検討した。穴加工を施したCAC406製水栓製品にZn薄板およびSn箔を設置した試験片を準備し、混合ガス

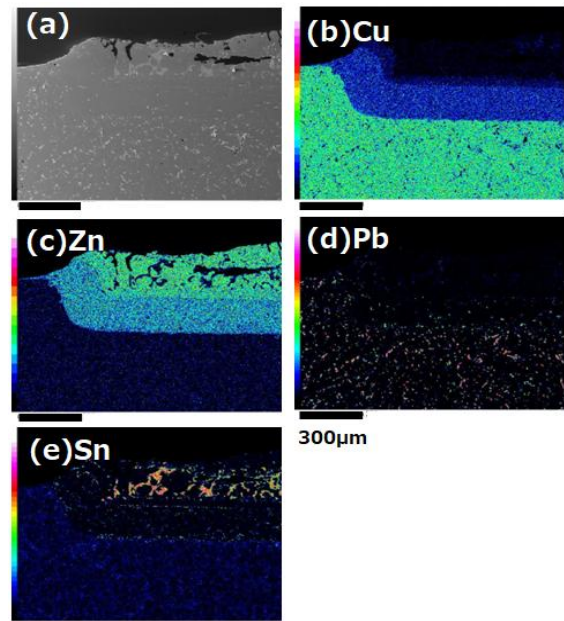


図4 Sn箔/Zn薄板/CAC406試験片加熱処理後の(a)SEM断面像及び各元素分布像(b)Cu、(c)Zn、(d)Pb及び(e)Sn

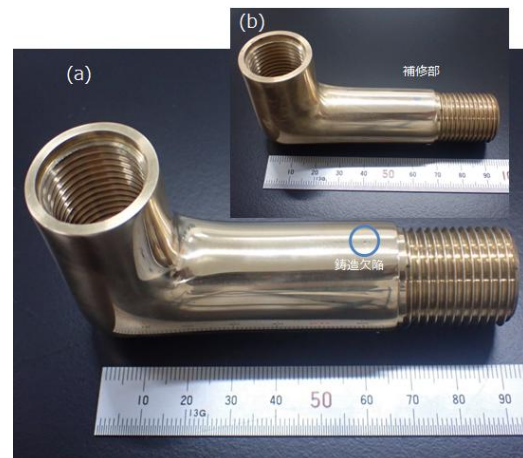


図5 (a)铸造欠陥を有する水栓製品、(b)バフ研磨後の補修水栓製品

を流した小型電気炉中で加熱する実験を行い、次の知見を得た。

- ・ CAC406曲面部とZnは密着し、約155μm厚のほぼ欠陥のないCu-Zn化合物層を形成した。
- ・ 形成されたCu-Zn化合物層のビッカース硬さは、HV405となり、素材の5倍以上であった。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、試料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.5, pp26-27,2024

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13報）

ー帯電防止プラスチックの開発(4)ー

今泉茂巳*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (XIII)

- Development of antistatic plastics (IV) -

IMAIZUMI Shigemi*

本研究では、着色可能で帯電防止性が湿度に依存せず長期間維持されるプラスチックの開発を行っている。本年度は、帯電防止剤のブリードアウトがない加工を目指して、融点が高い永久帯電防止剤の使用について検討した。ブロー成形用高密度ポリエチレン樹脂に永久帯電防止剤、相溶化剤として無水マレイン酸変性高密度ポリエチレンを添加して混練した後、140℃または180℃での熱プレスにより100 mm×100 mm×2 mmの平板に加工した。140℃でプレスすることにより帯電防止剤のブリードアウトがほとんどない平板を作製することができた。平板は若干茶色を呈したが、濃色の着色であれば問題とならない程度であった。平板の表面抵抗率は帯電防止剤添加量とともに低下し、添加量30 wt%で蓄電防止レベルである $10^9 \Omega/\text{sq.}$ オーダーの値が得られた。

1 はじめに

ブロー成形は、化粧品や洗剤などの容器類、飲料ボトル、ポリタンクなどの中空製品の成形に用いられる。ホコリの付着・混入を嫌う製品の容器類、静電気火災の危険性がある可燃性液体用のボトル等については帯電防止性が求められており、帯電防止ブロー成形製品はこれらの分野において大きな市場がある。

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いる。過去3年間の研究において、イオン液体や永久帯電防止剤をブロー成形用高密度ポリエチレン樹脂（以下、PE樹脂）に添加して帯電防止性の付与を試みた。イオン液体を添加した場合、5 wt%の添加により目標とする $10^9 \Omega/\text{sq.}$ の表面抵抗率が得られたが、イオン液体のブリードアウト、液体であるイオン液体を混練するハンドリングの難しさ、イオン液体のコスト等の問題から現実的な手法ではないと考えられた¹⁾²⁾。次に、比較的安価で、樹脂内部に留まりやすいため効果の持続性がある2種類の永久帯電防止剤（PAA-1、PAA-2）による帯電防止性付与を試みた。その結果、PAA-1を20 wt%添加することにより目標とする表面抵抗率に達した³⁾が、熱プレス時に帯電防止剤のブリードアウトが生じ、製品上大きな課題が残った。さらに、添加量20 wt%はコスト的に現実的ではなかった。

本年度は、目標の帯電防止性能（表面抵抗率）を維持しつつ帯電防止剤のブリードアウトのない加工を目指し、融点の高い永久帯電防止剤の使用について検討した。

2 実験

2.1 材料

市販の永久帯電防止剤（以下、PAA-3とする）を使用した。PAA-3の融点は163℃（カタログ値）で、昨年度使用したPAA-1（融点約92℃、カタログ値）よりも高いため、樹脂への添加時のブリードアウトを抑制できる可能性がある。PE樹脂はノバテックHD HB216R（日本ポリエチレン(株)）を使用した。相溶化剤は無水マレイン酸変性高密度ポリエチレン（Arkema S.A. 製、MAHグラフト率：0.1～0.3%）を使用した。

2.2 平板の作製

1つの条件について3回、混練と熱プレスを行った。

PAA-3添加量は5～30 wt%とした。相溶化剤を添加した作製では、PE樹脂：相溶化剤＝95：5（重量比）とした。PAA-3は80℃で4時間以上乾燥した後使用した。

これらの材料を総重量77gになるように秤量し、ラボプラストミル4C150（(株)東洋精機製作所）により混練した。ミキサーはR-100型（内容積100 mL）を使用し、混練温度190℃、ブレード回転速度30 rpm、混練時間10分とした。

混練物は、小型熱プレス機AH-2003C（アズワン(株)）により140℃または180℃で5分間プレスし、100 mm×100 mm×2 mmの平板を作製した。

2.3 表面抵抗率の測定

JIS K 6911に従い、平板の状態調節を温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $65 \pm 5\% \text{RH}$ で90時間行った。その後、ハイレスタ-UX MCP-HT800（日東精工アナリテック(株)）により表面抵抗率を測定した。プローブはUR-100を、ガード電極はレジテーブルUFLの金属面を使用した。電圧を印加して1分後の値を表面抵抗率とした。

* 化学部

2.4 破断面の観察

平板から幅 5 mmの短冊片を切り出し、液体窒素に浸して凍結破断した。得られた破断面を小型低真空電子顕微鏡 JSM-IT100（日本電子(株)）により観察した。

3 結果及び考察

3.1 平板の作製

はじめに PAA-3 の融点 163℃より高い 180℃で熱プレスしたところ、平板表面に白いものがブリードアウトした。そこで、熱プレス温度を徐々に下げた結果、140℃でブリードアウトはほぼなくなった。しかし、140℃は PE 樹脂の融点 130℃より 10℃しか高くないため、平板表面に若干の凹凸が残った。これは部分的に PE 樹脂の溶融不足が生じている可能性があり、温度制御を適正化する必要があると考えられる。

混練物および平板は若干茶色を呈した（図 1）。無色や薄色の製品では問題となる可能性があるが、濃色の着色であれば問題とならない程度であると考えられる。なお、PAA-3 自体が淡茶色であり、それが一因であると考えられる。

3.2 平板の表面抵抗率

平板の表面抵抗率を図 2 に示す。表面抵抗率の値は各条件で作製した 3 枚の平板の平均値である。180℃で熱プレスを行った平板については、表面の析出物を不織布ワイパーで拭き取ってから測定を行った。

PAA-3 無添加の平板については、測定上限 ($9.99 \times 10^{16} \Omega/\text{sq.}$) を超え、測定できなかった。また、PAA-3 添加量 5 wt% については、相溶化剤無し、熱プレス温度 140℃の平板は測定上限を超えたため測定できず、その他の 3 条件の平板についても 3 枚の平板で測定値が大き

くばらついた。

いずれの作製条件についても、PAA-3 添加量を増やすにつれて表面抵抗率が低下した。相溶化剤の添加による帯電防止性能の向上は見られず、相溶化剤は必要ないことが明らかになった。

PAA-3 添加量 30 wt% で目標である表面抵抗率 $10^9 \Omega/\text{sq.}$ に達した。しかし、これは前年度 PAA-1 を使用した場合に、ブリードアウトの問題があるものの添加量 20 wt% 以上で $10^9 \Omega/\text{sq.}$ に達した³⁾のと比べると、添加量が多く必要となる結果となった。

3.3 破断面の観察

平板（相溶化剤無添加）の凍結破断面の SEM 画像を図 3 に示す。PAA-3 添加量 5 wt%、熱プレス温度 140℃の平板 (a)-1) 以外の全ての平板において、以前の永久帯電防止剤 PAA-1、PAA-2 と同様、スポンジ様の構造がみられた。140℃熱プレス平板の方が全体的に目が細かく、PAA-3 添加量 20 wt% 以上でかなり目の内部が詰まっている様子が確認された。一方、180℃熱プレス平板では目が粗く、PAA-3 添加量 20 wt% でいくらか内部が詰まり、添加量 30 wt% になるとかなり目の内部が詰まっていた。この内部に詰まっているものが PAA-3 であれば帯電防止性に大きく関係していると考えられるが、現時点では明らかになっておらず、今後詳細な分析を行っていく予定である。

なお、この結果はあくまでも熱プレス平板によるものであり、ブロー成形では異なる可能性があるため、最終的にはブロー成形試作品で観察する必要がある。

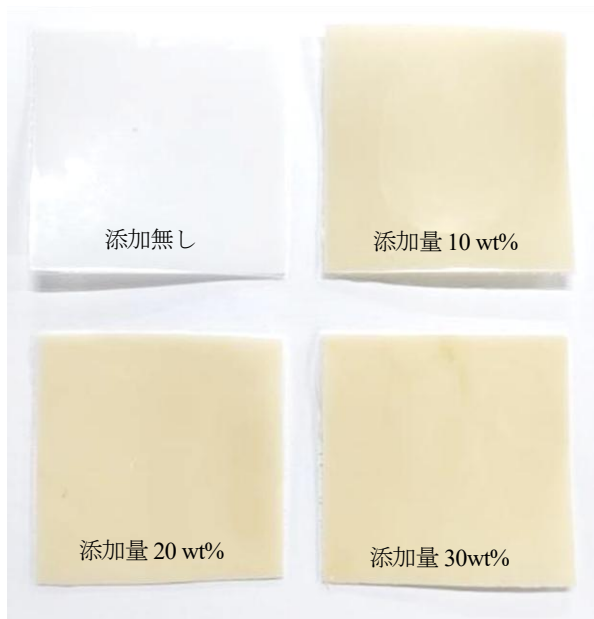


図 1 試作した平板

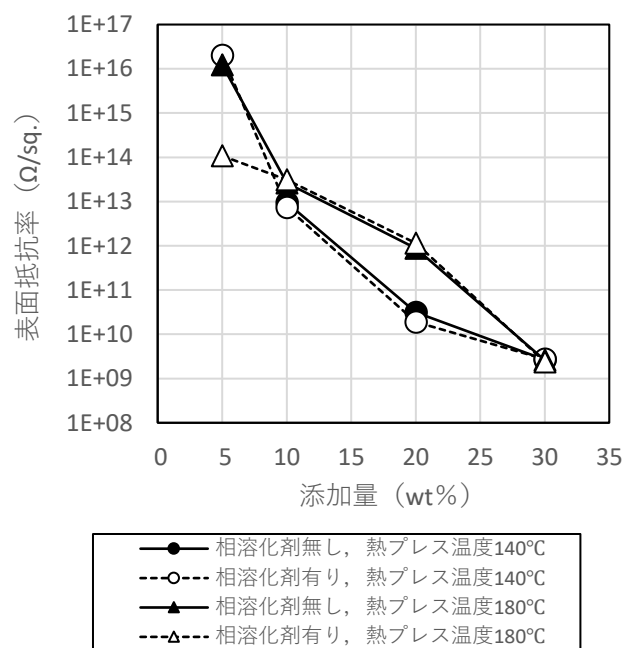
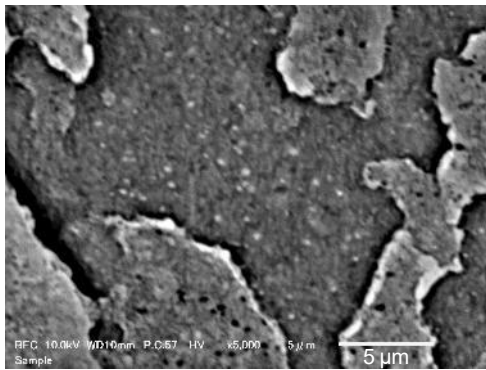
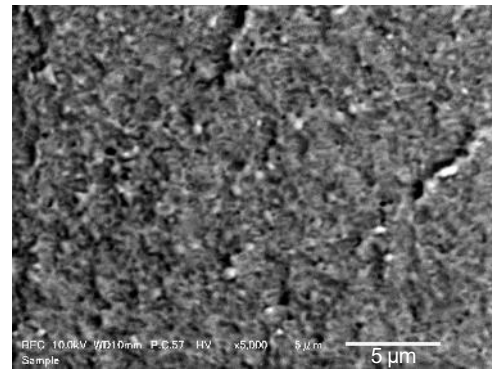


図 2 平板の表面抵抗率

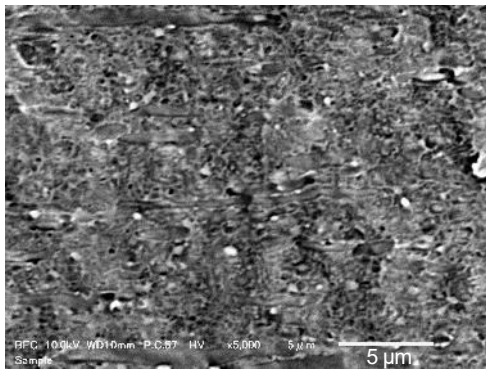
a) 熱プレス温度 140℃



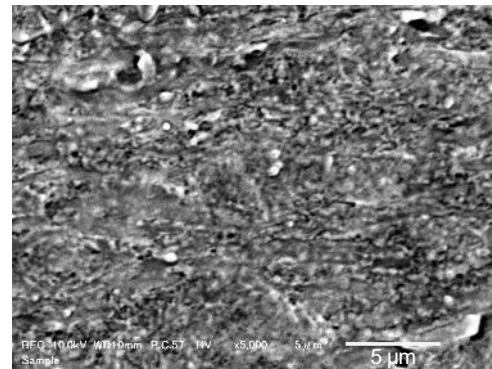
a)-1 添加量 5 wt%



a)-2 添加量 10 wt%

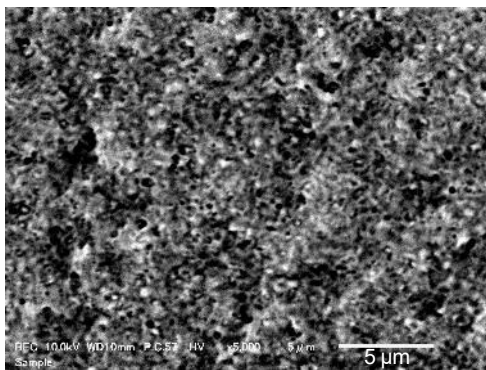


a)-3 添加量 20 wt%

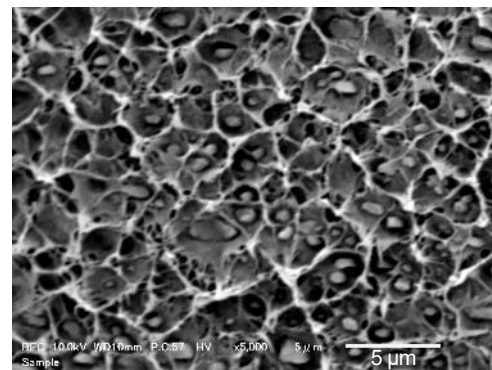


a)-4 添加量 30 wt%

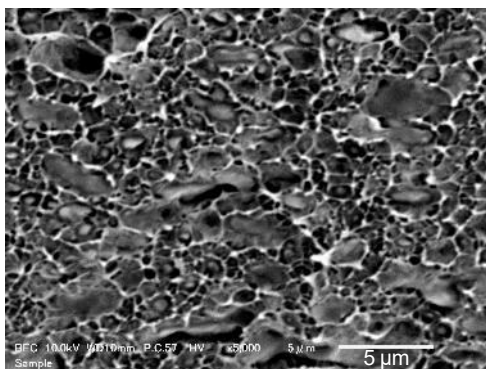
b) 熱プレス温度 180℃



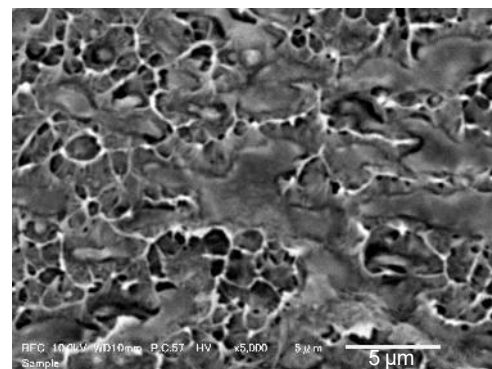
b)-1 添加量 5 wt%



b)-2 添加量 10 wt%



b)-3 添加量 20 wt%



b)-4 添加量 30 wt%

図3 破断面のSEM観察像

4 まとめ

帯電防止剤のブリードアウトがない加工を目指し、融点の高い永久帯電防止剤 PAA-3 を添加したブロー成形用ポリエチレンの平板を作製し、表面抵抗率による帯電防止性の評価を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- 1) 試作された平板は若干茶色を呈したが、濃色で着色すれば問題とならない程度であると考えられた。
- 2) 平板の凍結破断面を SEM 観察したところ、ほとんどの平板でスポンジ様の構造が確認され、PAA-3 添加量の増加とともに目の内部が詰まっていく状態が観察された。
- 3) 帯電防止性については、PAA-3 を 30 wt% 添加し、140℃で熱プレスすることにより、帯電防止剤のブリードアウトがなく、蓄電防止レベルである $10^9 \Omega/\text{sq.}$ の表面抵抗率を得ることができた。しかし、添加量 30 wt% はやはりコスト的に現実的ではなく、低コストな加工のためには、今後、多層ブロー等により表層のみ帯電防止剤が存在する構造にする等の工夫を検討していく必要がある。

【参考文献】

- 1) 今泉,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.3, pp37-40,2022
- 2) 今泉,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp27-30,2023
- 3) 今泉,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp37-40,2024

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14報）

－難燃性プラスチック複合材料の開発(4)－

丹羽厚*

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

- Development of the fire-retardant plastic composites (IV) -

NIWA Atsunori*

本研究では、ベーマイトの各種形状と難燃性及び、難燃助剤併用時の難燃性を評価した。立方体状、針状及び鱗片状ベーマイトの難燃性を評価したところ、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。次に、難燃助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。また、難燃助剤としてホウ酸亜鉛を用いた。ホウ酸亜鉛未添加のベーマイトだけを難燃剤に使用したものと比べてLOIの顕著な増加はみられなかった。ホウ酸亜鉛のサイズや分散状態が影響していると考えられる。

1 はじめに

プラスチックは、長所である「軽い」「着色が容易」「量産性が良い」という特性により身の回りの多くの製品に使用され、我々の生活において必要不可欠な材料となっているが、「燃えやすい」という欠点がある。この欠点を補うため、難燃性のプラスチック素材や、プラスチックに添加する難燃剤の開発が行われている。

これまでの研究^{1,2)}では、安価なホウ素系難燃剤の調製方法及び特性把握を行った。まず、ホウ素系難燃剤の担持体として木粉を使用したときの複合条件を検討し、ホウ素含有量等の評価を行った。その結果、ホウ素系難燃剤の調製方法として凍結乾燥を行うことでホウ素含有量を増やすことができた。次に、凍結乾燥ホウ素系難燃剤とPPを複合化して燃焼特性を評価したところ、若干の難燃性を付与できたが、難燃剤として使用するには不十分であると考えられた。

次に、ベーマイトの難燃剤としての効果を確認した³⁾。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。

そこで本研究では、前年度に引き続き、ベーマイトの使用による難燃性の向上を検討した。まず、ベーマイトの形状とLOIの関係を評価した。次に、難燃助剤としてPTFE系加工助剤及びホウ酸亜鉛を使用し、難燃性を評価した。

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、中心粒子径2.9 μm（レーザー回折法より）の立方体状ベーマイト（以下、「cBoe」と略

す）、平均粒子径3.4 μm（SEM像より）の針状ベーマイト（以下、「nBoe」と略す）または、中心粒子径2.9 μm（レーザー回折法より）の鱗片状ベーマイト（以下、「sBoe」と略す）（すべて河合石灰工業（株）製）を用いた。また、難燃助剤は、PTFE系加工助剤のメタブレン A-3800（以下、「フッ素樹脂」と略す）（三菱ケミカル（株）製）または、ホウ酸亜鉛（関東化学（株）、鹿1級）を用いた。

2.2 試料作製

PP、ベーマイト、難燃助剤の複合化には、バッチ式の混練機であるラボプラストミル（（株）東洋精機製作所製、4C150・R100H）を使用した。PP、ベーマイト及び難燃助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、熱プレス器（（株）アズワン製、AH-2003C）を使用し170℃で平板に成形した。

2.3 各種測定

熱重量測定は、示差走査熱量/熱重量同時測定装置（TA Instrument社製、SDT Q600）を使用し、窒素雰囲気、室温～800℃、10℃/minの条件で測定した。

電子顕微鏡（以下、「SEM」と略す）観察は、低真空電子顕微鏡（日本電子（株）製、JSM-IT 100）を使用した。試料は、液体窒素で冷却した試験片を破断し、破断面を観察に使用した。

LOI測定は、燃焼性試験器（スガ試験機（株）製、ON-1）を使用した。なお測定はJIS K 6269を参考に、測定温度は室温で行った。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JIS K 7161-1を参考に行い、万能材料試験機（インストロン社製、5985型）を用い、引張速度20 mm/min、つかみ具間距離60 mmにて行った。伸びは、ク

* 化学部

ロスヘッドの移動距離から算出した。なお、試験片は、2.2の平板（厚さ0.3 mm）からJIS K 6251 3号型で打ち抜き作製し、引張試験に供した。

3 結果及び考察

3.1 ベーマイトの形状と難燃性

ベーマイトの形状と難燃性の関係性を評価した（図1）。ベーマイトの配合量はすべて50 wt%とした。その結果、PP+sBoeで21.1、PP+nBoeで24.6であった。既報³⁾のPP+cBoeの23.9と比較すると、nBoeはやや高く、sBoeは低くなった。PP+nBoe（図2）、PP+sBoe（図3）、PP（図4）の熱重量特性を示すが、PPの分解開始温度の372℃におけるPP+nBoeの重量減少量が2.5%に対し、PP+sBoeは0.85%であった。つまり、PP分解開始前にベーマイト内に含む結晶水の放出量に違いがあるため、LOIに差が生じたと考える。

前述のPP+ベーマイト混練時の混練トルクを図5に示す。試料投入時及び回転数増速時を除く700秒から1,200秒を示しているが、PP+cBoe約9 N・m、PP+sBoe約13 N・mに対し、PP+nBoeは約28 N・mと高い混練トルクを示した。

ベーマイトの分散性を評価するためSEM観察を行い（図6）、PP+sBoe、PP+nBoeともに分散は良好であることを確認した。

nBoeの難燃性は、cBoeよりやや高いため難燃剤としての効果は高いが、熔融粘度（混練トルク）の増加が大きいことから、用途に応じて配合や成形条件の検討が必要である。

3.2 フッ素樹脂添加時の難燃性及び強度

PP+ベーマイトのさらなる難燃性向上のため、難燃剤としてフッ素樹脂の使用を検討した。なお、配合は表1に示す。

図7に、PP+cBoe+フッ素樹脂におけるフッ素樹脂添加量を変化させたときのLOIを示す。その結果、フッ素樹脂を0.5wt%添加したときに25.0となり、最も高い値を示した。

次に、フッ素樹脂添加による強度の変化を調べるため、PPのみ、PP+cBoe、配合F2の引張試験を行った。図8に引張強さ、図9に引張伸び、図10に引張弾性率の結果を示す。引張強さは、cBoe添加によりPPの56%に低下したが、フッ素樹脂添加により62%に微増した。引張伸びは、cBoe添加とPPは同程度であったが、フッ素樹脂添加によりPPの50%に低下した。引張弾性率は、cBoe添加により、220%に増加し、フッ素樹脂添加によりPPの240%に増加した。フッ素樹脂は、混練時のせん断力によりフィブリル化するため⁴⁾、樹脂中に繊維状で分散することで、硬くもろい方向に寄与したと考える。SEMにより断面観察を行ったが（図11）、フッ素樹脂の凝集や繊維形状は確認できなかったことから、ある程度分散しているものと推察してい

る。

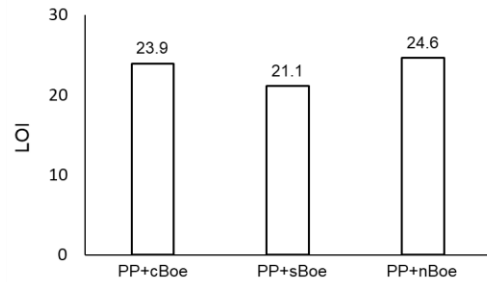


図1 ベーマイトの形状とLOI

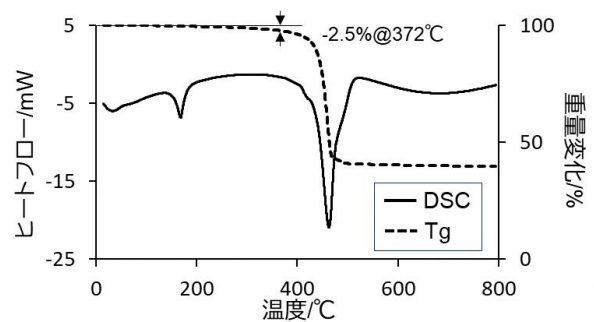


図2 PP+nBoeの熱重量特性

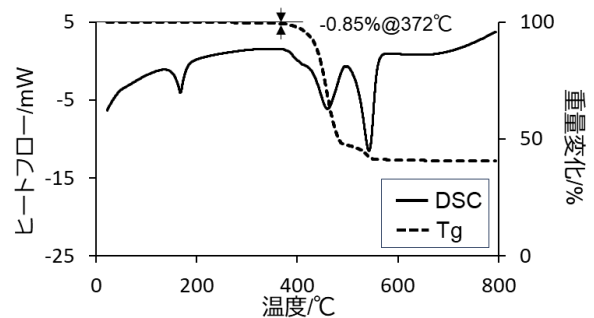


図3 PP+sBoeの熱重量特性

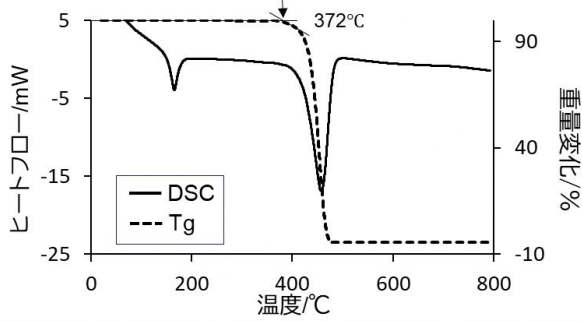


図4 PPの熱重量特性

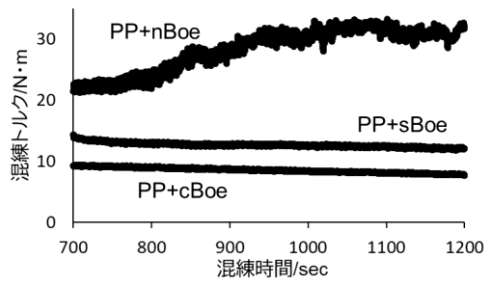


図5 ベーマイトの形状と混練トルク

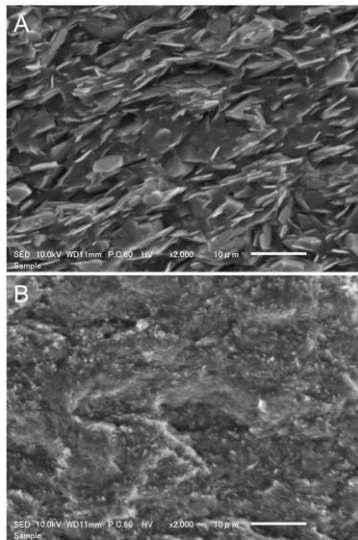


図6 PP+ベーマイトのSEM像。

A : PP+sBoe、B : PP+nBoe

表1 PP+cBoe+フッ素樹脂の配合表

	PP	cBoe	フッ素樹脂	wt%
F1	49.75	50	0.25	
F2	49.5	50	0.5	
F3	49	50	1	
F4	45	50	5	

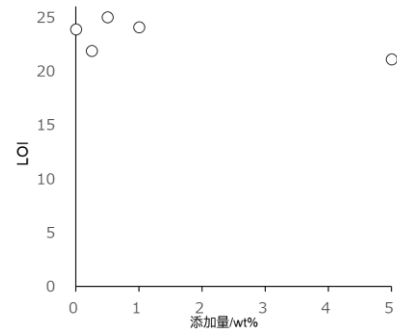


図7 PP+cBoe+フッ素樹脂のフッ素樹脂添加量とLOI

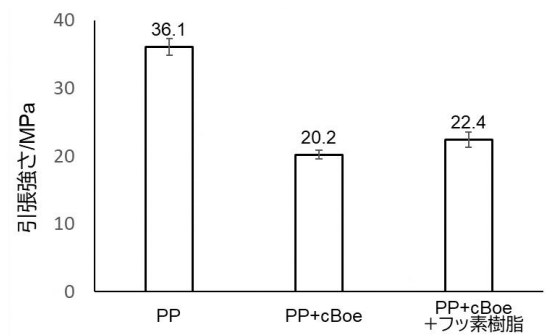


図8 cBoe及びフッ素樹脂添加の有無と引張強さ

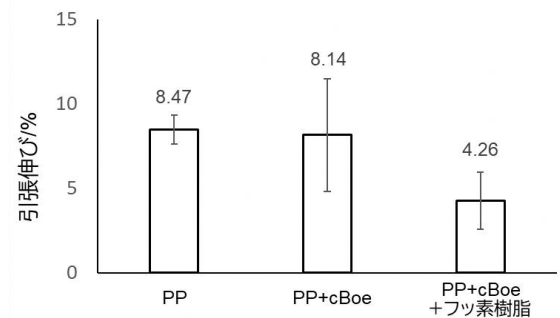


図9 cBoe及びフッ素樹脂添加の有無と引張伸び

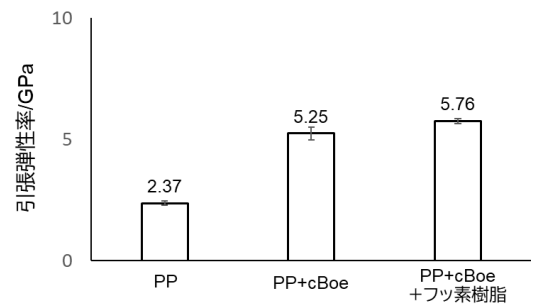


図10 cBoe及びフッ素樹脂添加の有無と引張弾性率

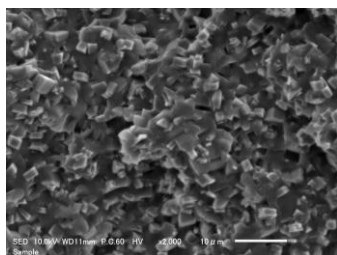


図 11 PP+cBoe+フッ素樹脂の SEM 像。
図中スケールバーは 10 μ m

3.3 ホウ酸亜鉛添加時の難燃性

難燃剤として、水酸化アルミニウムの難燃剤として使用されているホウ酸亜鉛を検討した。なお、配合は表 2 に示す。

図 12 に PP+cBoe+ホウ酸亜鉛と LOI の関係を示す。その結果、ホウ酸亜鉛の量が増えると若干 LOI は上昇したが、PP+cBoe の 95% であった。ホウ酸亜鉛は、ベーマイトと同様の気相における難燃化機構（脱水吸熱反応）のほかチャー（炭化）層とガラス層の複合酸素遮断層の生成による難燃効果があると考えられている⁵⁾。

今回の結果では、ベーマイトへホウ酸亜鉛を添加した相乗効果は見られなかったが、ホウ酸亜鉛は水酸化アルミニウムや水酸化マグネシウムなどの無機水酸化物系難燃剤との併用の効果が知られているためもう少し検討が必要である。

表 2 PP+cBoe+ホウ酸亜鉛の配合表

	PP	cBoe	ホウ酸亜鉛	wt%
Z1	50	40	10	
Z2	50	30	20	

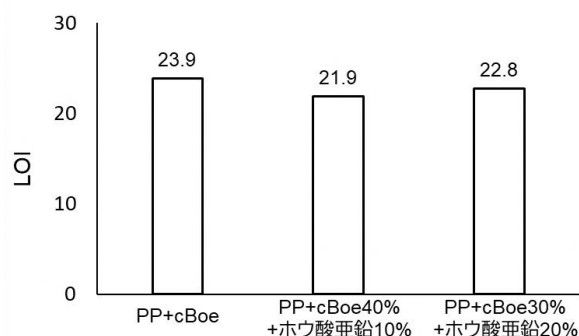


図 12 ホウ酸亜鉛添加量と LOI

4 まとめ

ベーマイトの形状と難燃性及び、難燃剤併用時の難燃性を評価した。針状ベーマイトと鱗片状ベーマイトを評価したところ、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。次に、難燃剤としてフッ素樹脂を用いたところ、添加しない場合に比べて、LOI が最大で 25 まで増加した。樹脂への難燃剤の添加は熔融粘度や機械的強度など樹脂の特性に影響を与えるため、量産実用化にあたっては、用途に合った配合や成形条件の選定が求められる。

最後に、無機水酸化物系難燃剤の難燃剤として知られるホウ酸亜鉛を用いたが、今回の検討の範囲ではベーマイトとの併用の効果は確認できなかった。ホウ酸亜鉛のサイズや分散状態など追加の検討が必要であると考えられる。

ベーマイトをはじめとする無機水酸化物系難燃剤は、リン系難燃剤や臭素系難燃剤に比べ環境や人体に優しい難燃剤であるが、リン系難燃剤や臭素系難燃剤に比べ難燃効果が低い。最適なベーマイトのサイズや形状の選定、難燃剤の併用等により難燃性を向上させ、低添加量で難燃効果が高く、現場生産性も兼ね備えた高機能プラスチックの開発を、引き続き行っていく。

【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】

- 1) 丹羽, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.3, pp41-44, 2022
- 2) 丹羽, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp31-34, 2023
- 3) 丹羽, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp41-44, 2024
- 4) 三菱ケミカルグループ (株) ホームページ, https://www.m-chemical.co.jp/products/departments/mcc/metablen/product/1202132_7202.html (参照 2025/2/28)
- 5) 西澤, 難燃剤・難燃材料の活用技術, (株) シーエムシー出版, 2010

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15報）

—軽量化・複合化によるマルチマテリアル製品の開発(4)—

岩田 泰我*、西垣 康広*、栗田 貴明*、山田 孝弘*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (XV)

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

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 と表記）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。熱可塑性 CFRP（以下、CFRTP と表記）を用いたインサート成形では、複雑形状のマルチマテリアル製品を一体成形できるため、剛性に優れた連続繊維 CFRP をインサート材とすることで、より軽量で機械的特性に優れたマルチマテリアル製品の製造が期待できる。

本研究ではマルチマテリアル製品の軽量化および機械的特性の向上を目的として、CFRTP と連続繊維 CFRP のインサート成形技術の開発を行った。本年度は、母材が異なる 3 種類の連続繊維 CFRP インサート材を用いて試験片を作製し、接合強度評価と試験片観察を行った。

その結果、インサート材ごとの接合強度やブラスト処理による接合強度向上のメカニズムが明らかとなった。

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いる。このような背景から比強度、比剛性に優れた CFRP の使用が検討されており、なかでも、金属等の重量部材の一部を CFRP に置き換え、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^{1)~4)}。

また、CFRP は強化形態や母材の種類により特性が変化する。近年では、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 の利用が求められている。

当センターでは、これまでに CFRTP のマルチマテリアル化に向けて、プレス成形と超音波接合による CFRTP の同種材接合や異種材接合を行い、接合技術を確立してきた^{5)~12)}。また、昨年度の研究報告（以降、前報と表記）では、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 (INJ) と表記）を射出成形と同時にインサート材に接合するインサート成形を行い、炭素鋼をインサート材とした場合の成形条件と接合強度の関係を明らかにした¹³⁾。インサート成形は短時間で複雑形状の一体成形が可能なおことから、マルチマテリアル製品を低コスト化できる。また、剛性に優れる一方で複雑形状の成形が困難な連続繊維 CFRP に CF/PA6 (INJ) をインサート成形することで、軽量で機械的特性に優れ、複雑形状を一体成形したマルチマテリアル製品の製造が期待できる。

本研究ではマルチマテリアル製品の軽量化および機械的特性の向上を目的として、CFRTP と連続繊維 CFRP の

インサート成形技術の開発を行った。本年度は、母材が異なる 3 種類の連続繊維 CFRP に、CF/PA6 (INJ) をインサート成形し、引張せん断試験により接合強度を評価した。また、CFRTP と連続繊維 CFRP のインサート成形における接合強度向上のメカニズムを明らかにするため、インサート材接合面観察と接合界面観察を実施したので報告する。

2 実験

2.1 試験片作製

2.1.1 材料

インサート成形の射出樹脂として、CF/PA6 (INJ) ペレット (LANXESS 製 Durethan TP737-201) を用いた。CF/PA6 (INJ) の繊維体積含有率は 25 %、母材の融点は 220 °C である。CF/PA6 (INJ) は 80 °C のドライエアーで 24 時間、予備乾燥して使用した。また、インサート材として強化繊維が織物の炭素繊維、母材が PA6、熱可塑性ポリウレタン (TPU)、エポキシ (EP) の連続繊維 CFRP を用いた。インサート材の厚みは 2 mm とし、100 mm×25 mm に切断して使用した。

2.1.2 ブラスト処理

前報では、CFRTP と S45C のインサート成形において、S45C 接合面をブラスト処理すると、接合強度が向上することを報告した¹³⁾。そこで本稿においても、ブラスト処理の効果について検討した。ブラスト処理は、ブラスト処理装置（(株) ストレート製 ブラストキャビネット）内でガーネットサンド（(#)80~140 混合品）を、インサート材の端部から長手方向 12.5 mm の領域に吹き付けた。吹付条件は、吹付圧力 0.6 MPa、吹付距離 100 mm、吹付時間 30 秒とした。

* 次世代技術部

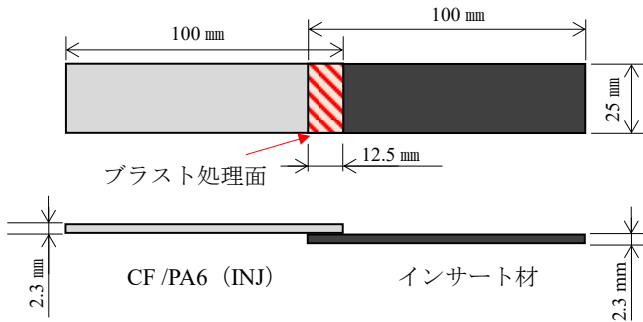


図1 試験片形状の概略図

2.1.3 インサート成形

インサート成形は型射出成形機（（株）ソディック製 TR75VRE）を用いて行った。試験片形状を図1に示す。試験片は100 mm×25 mmの長方形を端部から12.5 mm重ね合わせた形状とし、インサート材接合面上に溶解したCF/PA6 (INJ)を射出して成形した。成形条件は、金型温度100℃、インサート材温度100℃、成形温度（CF/PA6 (INJ)の温度）280℃、保圧35 MPaとした。試験片はインサート材3種類とブラスト処理の有無の組合せで6種類とした。以降、試験片はインサート材（CF/PA6、CF/TPU、CF/EP）とブラスト処理の有無（BT、non）の組合せで表記する。

2.2 評価方法

2.2.1 引張せん断試験

試験片の接合強度を評価するため、万能試験機（（株）島津製作所製 AG-IS 100kN）を用いて引張せん断試験を行った。前報では、JIS K 6850に準拠した引張せん断試験を実施したが、引張荷重の軸と接合面が試験中にずれることで曲げ変形が発生し、射出樹脂側で母材破壊する現象が見られた。このため、ISO 19095の試験規格を参考にして図2に示すような治具を作製し、引張せん断試験を行った。試験片の射出樹脂側を治具の凸部に固定し、インサート材側に引張荷重を負荷することで試験を行った。試験速度は1 mm/minとした。

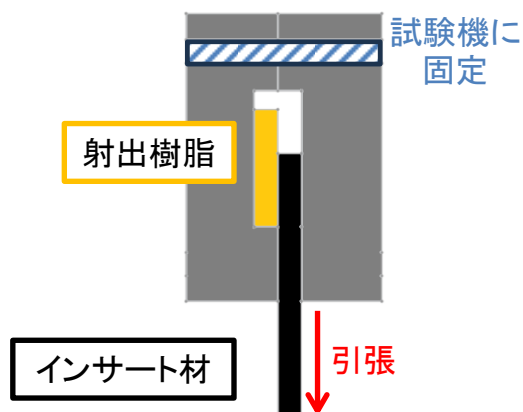


図2 引張せん断試験治具を用いた試験方法

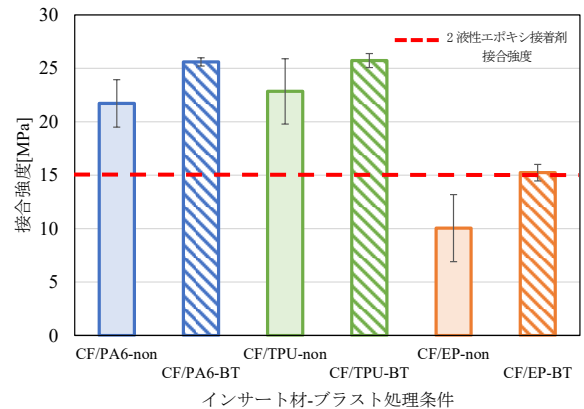


図3 各試験片の接合強度

2.2.2 試験片観察

接合強度向上のメカニズムを明らかにするため、成形前のインサート材接合面を共焦点顕微鏡（レーザーテック（株）製 OPTICS HYBRID L3/405 nm レーザー+RGB）で観察し、表面粗さを評価した。

また、試験片の接合界面を小型低真空電子顕微鏡（日本電子（株）製 JSM-IT100）でSEM観察した。

3 結果および考察

3.1 接合強度評価

引張せん断試験により得られた各試験片の接合強度を図3に示す。

図3より、インサート材の母材がCF/PA6 (INJ)と同様であるCF/PA6-nonの接合強度は、約22 MPaであった。ここで工業用に用いられる二液性エポキシ接着剤の接着強度を測定すると約15 MPaであり、CF/PA6-nonの接合強度はその値を上回った。CF/PA6-nonはインサート材の母材がPA6であり、融点が約220℃と成形温度よりも低いため、インサート成形時に接合界面が溶解することで接合強度が発現したと考えられる。またCF/PA6-BTの接合強度は約26 MPaであり、前報と同様にブラスト処理によって接合強度が向上した。この傾向はブラスト処理により接合面に生成された凹凸とCF/PA6 (INJ)とのアンカー効果によるものであると考えられる。

CF/TPU-nonの接合強度は約22 MPaであり、CF/PA6-nonと同程度の接着強度であった。これはCF/PA6-nonと同様、成形時にインサート材接合界面が溶解することで接合強度が発現したと考えられる。CF/TPU-BTの接合強度は約26 MPaであり、CF/PA6-BTと同様の傾向を示した。

CF/EP-nonの接合強度は約10 MPaであり、CF/PA6-nonに比べて低い接合強度であった。前述のとおり、CF/PA6-nonは、接合界面の溶解により接合強度が発現したが、CF/EP-nonは母材が熱硬化性樹脂であるため接合界面が溶解せず、CF/PA6-nonに比べて接合強度が低くなったと考えられる。一方、CF/EP-BTの接合強度は

約 15 MPa であり、二液性エポキシ接着剤の接着強度と同程度であった。このため、ブラスト処理は熱硬化性 CFRP をインサート材とする場合でも、接着強度を向上させる手法として有用であると考えられる。

3.2 試験片観察

3.2.1 インサート材接合面観察

接合強度向上のメカニズムを明らかにするため、試験片観察を行った。共焦点顕微鏡で観察した CF/EP-non と CF/EP-BT の成形前のインサート材接合面を図 4(a)、(b) にそれぞれ示す。

図 4(a)より、CF/EP-non インサート材接合面は、全体的に微細な傷が存在するものの、単位面積あたりの算術平均粗さ S_a が $1.9 \mu\text{m}$ と、平滑な状態であった。

一方、図 4(b)より、CF/EP-BT インサート材接合面の左側と右下には白線が縦方向に揃った領域が見られ、右上には白線が横方向に揃った領域が見られた。これらは織物構造の炭素繊維束領域であると考えられる。また、その繊維束領域間には黒色の領域が見られた。これらは母材の樹脂領域であると考えられる。 S_a は $10.2 \mu\text{m}$ であり、CF/EP-non の約 5 倍であった。

繊維束領域と繊維束間の樹脂領域の位置関係を明らかにするため、図 4(b)の観察範囲と同じ縦 3 mm ×横 3 mm で、高さ $80 \mu\text{m}$ の範囲を三次元粗さ解析した。CF/EP-BT の三次元解析画像を図 5 に示す。図 5 より、CF/EP-BT インサート材接合面における繊維束領域の高さが、樹脂領域

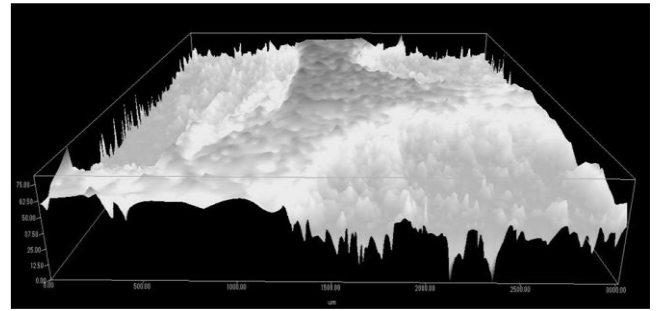
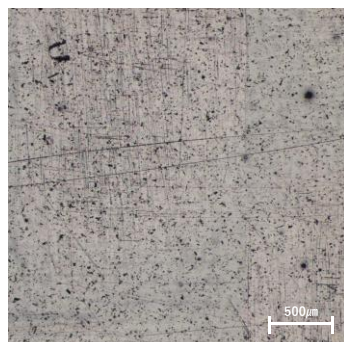


図 5 CF/EP-BT インサート材接合面の三次元解析画像
(縦 3 mm ×横 3 mm ×高さ $80 \mu\text{m}$)

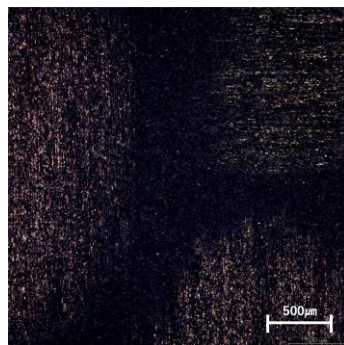
よりも約 $20 \mu\text{m}$ 低いことが観察された。また繊維束領域と樹脂領域のそれぞれに微細な凹凸が観察され、CF/EP-BT インサート材接合面は、領域間の大きな凹凸とブラスト処理による微細な凹凸が複合化した表面であることが分かった。CF/EP-BT の接合強度は、大小の凹凸が複合化したインサート材接合面と CF/PA6 (INJ) とのアンカー効果により、CF/EP-non と比較して約 1.5 倍高くなったと考えられる。また、この傾向はインサート材として織物の連続繊維 CFRP を用いる場合に発現すると考えられる。

3.2.2 試験片接合界面観察

CF/EP-non と CF/EP-BT の試験片側面の SEM 像を図 6(a)、(b)にそれぞれ示す。図中の左側の領域が CF/PA6 (INJ)、右側がインサート材である。

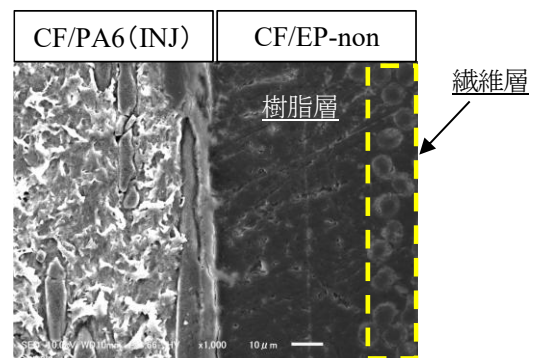


(a) CF/EP-non

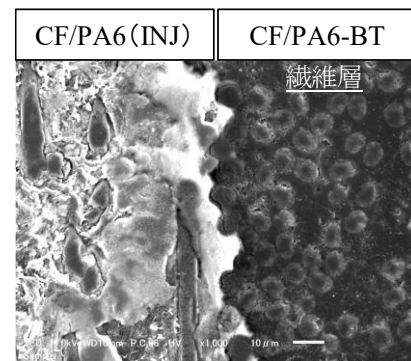


(b) CF/EP-BT

図 4 インサート材接合面画像 (3 mm × 3 mm)



(a) CF/EP-non



(b) CF/EP-BT

図 6 試験片側面の SEM 像

図 6(a)より、CF/EP-non インサート材の接合面には母材の樹脂層があり、接合面から約 40 μm 離れた点線で囲う領域に炭素繊維の繊維層が見られた。CF/EP-non において、CF/PA6 (INJ) は平滑なインサート材樹脂層と接合していた。

一方、図 6(b)より、CF/EP-BT インサート材の接合面には繊維層が見られた。CF/EP-BT において、CF/PA6 (INJ) はブラスト処理により露出したインサート材繊維層と接合していた。ブラスト処理したインサート材を用いたインサート成形品の接合界面は、上記のような接合状態であるため、アンカー効果により接合強度が向上したと考えられる。

4 まとめ

本研究ではマルチマテリアル製品の軽量化および機械的特性の向上を目的として、CFRTP と連続繊維 CFRP のインサート成形技術の開発を行った。本年度は、母材が異なる 3 種類の連続繊維 CFRP インサート材に CF/PA6 (INJ) をインサート成形し、接合強度評価と試験片観察を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) インサート材の母材に熱可塑性樹脂である PA6、TPU を用いた試験片は、接合界面が熔融することで高い接合強度を示した。
- (2) インサート成形時に接合面が熔融しない EP でもブラスト処理により接合強度が向上した。
- (3) ブラスト処理による接合強度向上は、①繊維束領域-樹脂領域間の大きな凹凸とブラスト処理による微細な凹凸が複合化した表面のアンカー効果と、②ブラスト処理により部分的に露出したインサート材繊維層と CF/PA6 (INJ) の接合によるものと考えられる。また、この傾向はインサート材に繊維物の連続繊維 CFRP を用いる場合に発現すると考えられる。

【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, 2023

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16報）

ーリサイクルプラスチックの物性向上技術の開発(4)ー 廣瀬威仁*

Development of advanced feature plastics to improve productivity (XVI) - Development of technology for improving properties of recycled plastics (IV) - HIROSE Takehito*

一般家庭から回収された容器包装プラスチックは、主に PP や PE などから構成され、両者は相分離するため弱く脆いという欠点がある。そこで、PP/PE モデル系を作製し、材料設計指針を検討した。また、ポリマーブレンド法を利用した軟質材料（ゴム）配合による破壊ひずみの向上を目指した。その結果、EPDM、EBR を配合することにより数 μm 程度のゴム粒子を観察し、PP/PE モデル系および回収容器包装プラスチック系にて約 2～3 倍の破壊ひずみが向上した。

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。一般家庭で使用済となった容器包装プラスチックを回収し、再度ペレット化した材料（RP）は複数の高分子材料〔例えば、ポリエチレン（PE）、ポリプロピレン（PP）など〕で構成される。加えて、RP は高分子材料の分子量や材料グレードが異なるため成形（流動）性が悪く、オレフィン系ではあるが非相溶系高分子のため弱く脆いという欠点が挙げられる。そのため、洗浄剤の選定、加工性を向上させる配合剤、相容化（剤）材の添加が不可欠となる。よって、RP を単一材料としてそのまま使用するのは困難である。単一材料であり汎用的に使用されている PP を例として、耐衝撃性を高めたグレードが存在する。これは、PP 中に PE 相が分散し、エチレン-プロピレンゴム（EPR）相が存在することにより耐衝撃性を改質している。しかし、この技術は合成段階で付与するために RP のようなペレット化した材料かつ構成材料が複数成分存在する材料には適用できない。そこで複数の高分子をブレンドし、単一成分では現れない特性付与や改質を目的としたポリマーブレンド法が有効である。

これまでの研究において、滑剤の一種であるステアリン酸亜鉛を配合し、キャピラリーレオメーターを用いた熔融粘度の低下と実金型を用いた検証としてスパイラルフローによる流動長の改善を確認した¹⁾²⁾。熔融粘度低下による易加工性も重要な因子になるが、RP の利用用途拡大のためには力学物性（例えば、引張応力、ひず

み、耐衝撃性など）の把握は非常に重要な因子となる。

本研究では、RP の熱挙動と含有フィラーの観察、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）の配合による材料設計指針を検討した。これを基に RP の力学物性（破壊ひずみ）の向上を目的とした。

2 実験

2.1 材料

RP は市場回収品の容器包装リサイクル材（ペレット状）を使用した。PP は日本ポリプロ（株）製 MA3、PE は日本ポリエチレン製（株）HJ360 を使用した。各ゴムはエチレン-1-ブテン共重合体（EBR）或いはエチレン-プロピレン-ジエン共重合体（EPDM）を使用した。EBR は三井化学（株）製タフマー DF605、DF740、DF940 を使用し、EPDM は（株）ENEOS マテリアル製 EP57C を使用した。架橋剤は、シグマアルドリッチ過酸化ジクミル（DCP）を全体に対して 1.0 重量部（phr）添加した。各系における組成比は、樹脂/ゴム＝80vol%/20vol%にて固定した。また、PP/PE モデル系では樹脂を占める 80vol%を PP/PE＝40vol%/40vol%とした。

2.2 試料作製

東洋精機製作所（株）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。図 1 に代表的な平均トルクと混練温度を示す。始めに 200℃、10rpm に制御された混練機内に樹脂を投入し、トルクが安定した後にゴムを投入し回転数を 100rpm に上げた。架橋剤使用系は、ゴム投入後に再度トルクが安定した後に DCP を投入した。得られたブレンド物は、まず熱盤プレス機を用いて加圧なし、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 200℃から水冷にて 40℃まで降温した。そして、得られたシート状成

* 化学部

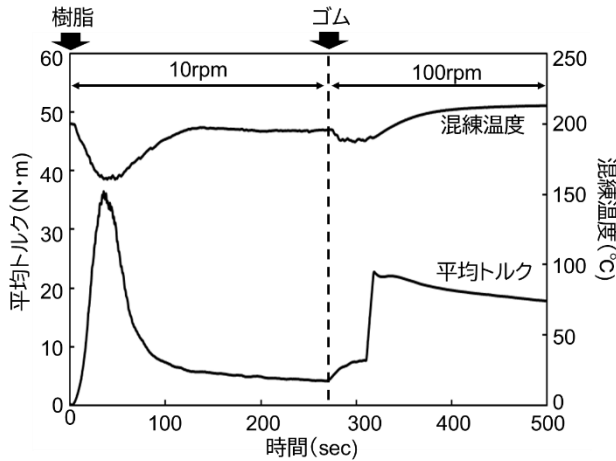


図1 代表的な平均トルクと混練温度

形体（厚さ約 0.3 mm）で各種物性評価を行った。

2.3 評価方法

RP の熱分解挙動および無機物の含有率を調べるために TA Instruments 製 SDT Q600 を使用して、熱重量測定を行った。白金パンに約 5mg の試料片を入れ、測定温度範囲 40°C~600°C、昇温速度 10°C/min、空気雰囲気下の条件とした。RP の灰分の分析はるつぽに少量の RP を入れ、アズワン（株）製ガス置換電気炉 HPM-2G を使用して 600°C、空気雰囲気下、15 分間の条件で有機物（特に PP、PE 等の高分子材料）を除去した。その後、灰分を取り出し白金蒸着処理を経て SEM 観察に供した。

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, 加速電圧：5kV）を使用した。また、SEM による代表的なブレンド体の破壊断面を観察した。ここで、シート状成形体より短冊状（幅約 5 mm）に切り出した試験片を液体窒素で十分に冷却し破断させることにより、厚さ方向に凍結破面を作製した。つぎに、カーボン系固定剤を塗布した真鍮台座に固定した後、観察面に対して白金蒸着処理を行った。元素分析は、FIB-SEM 付属のエネルギー分散型 X 線吸収スペクトル（EDX）分析を行った。

示差走査熱量分析（DSC）は、TA Instruments 製 DSC 2500 を使用した。シート状の成形体よりサンプリングした約 10mg の試験片をアルミニウムパンに入れ、窒素雰囲気下、測定温度は 40°C から 200°C まで昇温させ、5 分間保持し、200°C から 40°C まで降温し 5 分間保持した。その後、再度 40°C から 200°C まで昇温した。昇（降）温速度は 10°C/min とし、リファレンスは空のアルミニウムパンを用いた。

引張試験はインストロン製 5985 型万能材料試験機を使用して測定を行った。試験片は、シート状成形体から JIS K6251 に従う 3 号ダンベル状試験片を打抜き作製した。試験条件は、室温（23°C）、引張速度 100 mm/min、初期チャック間 60 mm で試験片が破断した時点で

終了とした。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。

3 結果および考察

3.1 RP の特性

図 2 に PP、PE、RP の熱重量曲線を示す。PP 系は約 320°C 付近から緩やかな分解挙動が見られ、PE 系は約 450°C 付近から PP に比べて急激な熱分解挙動が見られた。一方 RP 系では、重量減少が開始した温度は PP 系と同様の曲線となったが重量減少が終了する温度は PE 系とほとんど同じとなった。また、RP 系は完全熱分解（つまり重量減少率が 100%）せず、4%が灰分として残った。図 3 に電気炉で燃焼後における無機物の SEM 像を示す。数 μm の板状の粒子と 1 μm 以下の細かい粒子を観察した。続いて、図 4 に図 3 の画像に対する EDX スペクトルを示す。EDX スペクトルより汎用樹脂に使用される一般的な補強材、添加剤に由来する元素（特に Ti、Ca、Mg、Si）を確認した。Ti は酸化チタン（ TiO_2 ）、Ca は炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）、Mg や Si はタルク（ $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ）由来と考えられ、板状粒子は $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 、細かい粒子は TiO_2 であると考えら

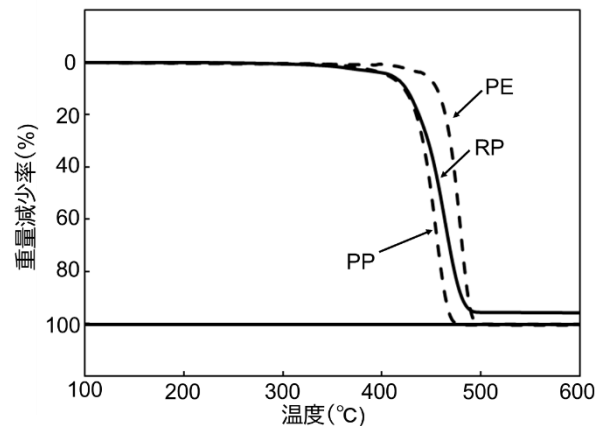


図2 各材料における熱重量減少率曲線

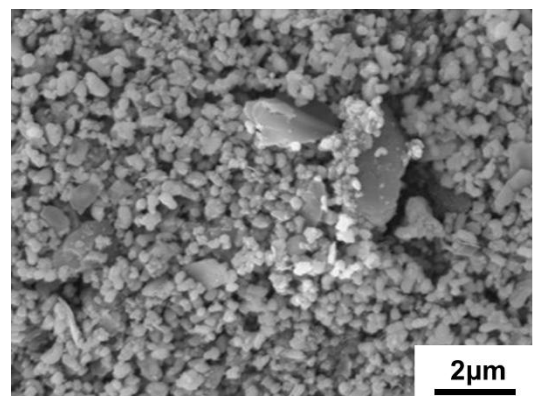


図3 RP に含有される無機物の SEM 像（600°C、15 分間燃焼後）

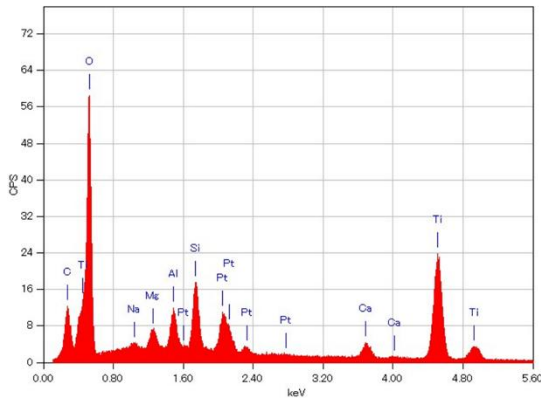


図4 図3におけるSEM像のEDXスペクトル

れる。

図5にRPのDSC曲線を示す。図中の温度は融点或いは結晶化温度である。加熱(1st Heat)と再加熱(2nd Heat)における融点の大きな変化は見られなかった。ここで、低温側(125℃)と高温側(158℃)における融点はそれぞれPEとPPと推定される。降温(Cool)挙動では2つのピークを確認し、それぞれが相分離構造であると推察される。RPは一般家庭から回収されるゴミが対象であるために、包装容器に添加される様々な無機物が存在した。

3.2 PP/PE/ゴムモデル配合系の特性

図6に引張試験の結果を示す。PP系は他の系に比べて高い破壊引張応力となり、PE系では高い破壊ひずみとなり、それぞれの材料特性が顕著であった。一方でPP/PEブレンド系は破壊引張応力がPPとPEの間となったが破壊ひずみがPP以下の値となり著しい物性低下となった。これは、PPとPEが相分離型ブレンド系のためである。JoseらはPPとHDPEのポリマーブレンド系においてPPとPEの比率による相構造と物性に着目し、PPとPEが同一の重量比では共連続相を形成することを報告している³⁾。EPDM配合系は未架橋と架橋ともにEBR(940)に比べて2倍近い破壊ひずみとなった。

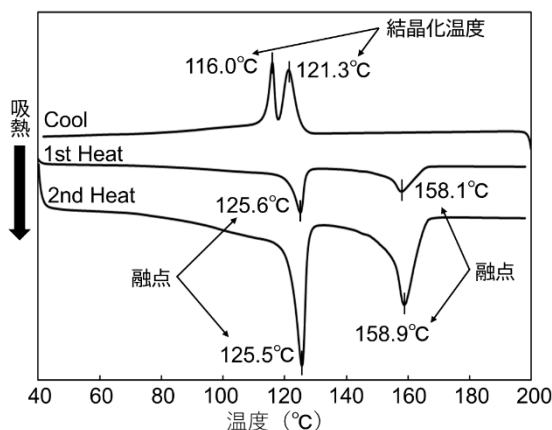


図5 RPのDSC曲線

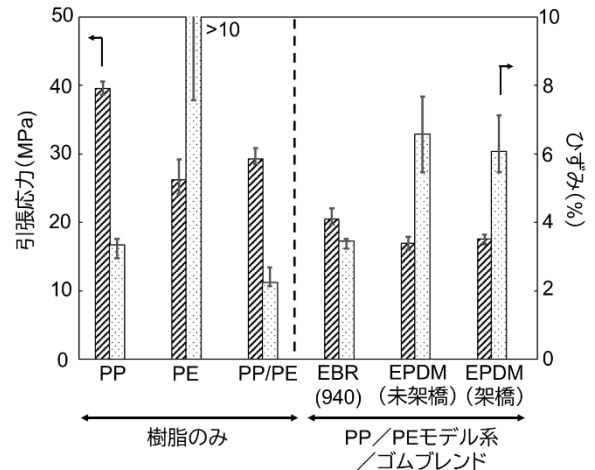


図6 PP/PEブレンド系における引張物性

た。図7にPP/PE/EBR(940)のSEM像を示す。数 μm 程度のゴム粒子を観察し、ゴム粒子の形状は球状であると推定された。また、PPとPEの相分離状態については観察できなかった。

3.3 RP/ゴムブレンド系の特性

図8に引張試験の結果を示す。RP系はモデル系に比べて引張応力とひずみが低い値となった。これは、主に熱履歴(市場回収後の加工および本研究における混練)の影響が要因の一つであると考えられる。各種ゴム配合系は、EBR(605)配合系が最も高い破壊ひずみとなりRP単独と比較して約3倍となった。一方で、モデル配合系で有効であったEPDM系はゴム配合系の中で最も低い破壊引張応力と破壊ひずみとなったが、RP単独系と比較して破壊ひずみは約2倍となった。図9(a)RP単独、(b)にRP/EBR(605)ブレンドのSEM像を示す。RPは市場における包装容器リサイクル材に由来してオレフィン系材料(PP、HDPE、LDPEほか)で構成される。また、PPとPEともに電子密度が近くそれぞれを判断するのは難しい。EBR(605)では、モデル配合系と同様に数 μm のゴム粒子を観察した。

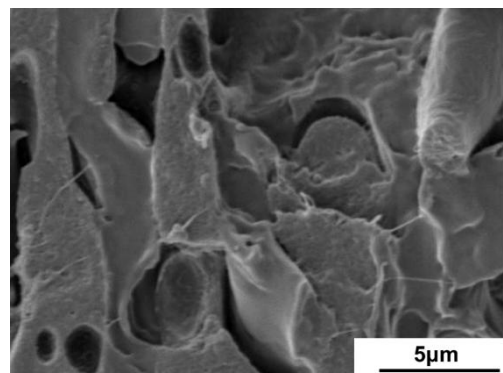


図7 PP/PE/EBR(940)の凍結破面におけるSEM像

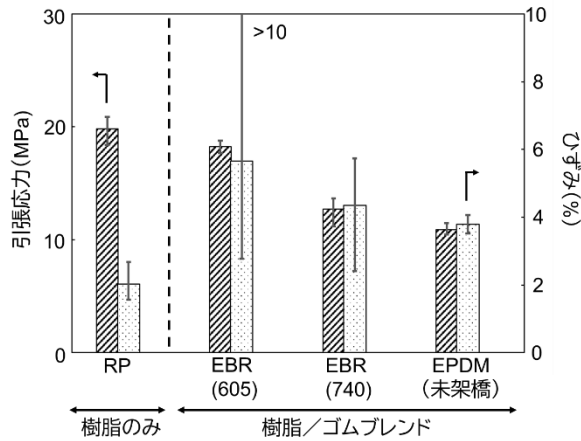
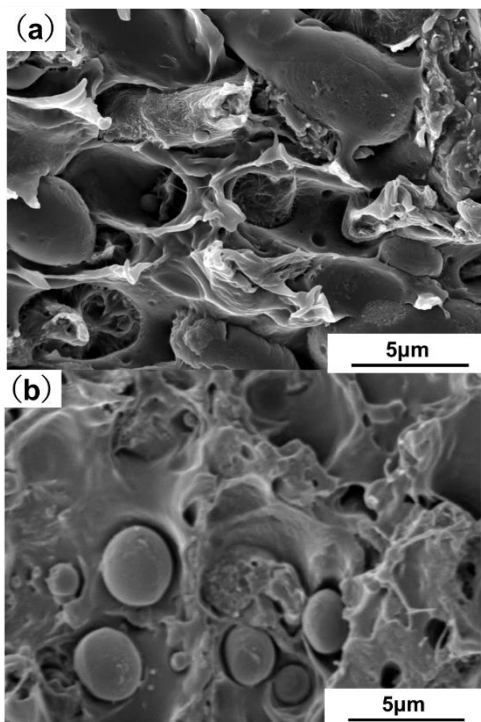


図8 RP系における引張特性

図9 RP系の凍結破面におけるSEM像
(a)RP, (b)RP/EBR (605) ブレンド系

4 まとめ

本研究は、力学物性と相構造に着目した。RPに対する詳細な解析、RPの組成に基づくPP/PE/ゴムブレンド系、RP/ゴムブレンド系について以下の知見を得た。

- 1) RPを構成する高分子材料はPPとPEからなり、それぞれの高分子材料に配合される補強材、添加材由来の無機物を確認した。
- 2) PP/PE/ゴムブレンド系では、PP/PEのモデルブレンド系に比べて未架橋のEPDM配合系が最も高い破壊ひずみを得た。
- 3) RP/ゴムブレンド系では、EBR配合系にて若干の引張応力低下が見られたが、破壊ひずみはRP単体に比べて2倍以上となった。

最後に今後の方針として、ゴム配合に伴う系全体の弾性率低下を抑えるために、無機フィラーの配合やゴム中に有機系金属塩と過酸化物の併用による重合反応に伴う、ナノ粒子形成に基づく系全体の弾性率向上が必要である。

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり、材料を提供していただきました株式会社タイボー様に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 足立,岐阜県産業技術総合センター研究報告書 No.4, pp39-42,2023
- 2) 足立,岐阜県産業技術総合センター研究報告書 No.5, pp49-52,2024
- 3) S.Jose *et al* , European Polymer Journal 40, pp2105-2115,2004

有機被膜によるめっき微細欠陥の被覆に関する研究（第3報）

大川香織*

Study on covering of microdefects in plating by organic coating (III)

OKAWA Kaori*

金属製品や樹脂製品の表面に耐食性と装飾性を向上させるためにめっきを施すことがあるが、めっき表面には凹状欠陥とよばれる孔（ピンホール）があり、めっきのふくれや素材の腐食といった二次的な不良・欠陥の原因となる。本研究は、クロムめっき表面を強固で緻密な有機化合物で被覆して、めっき製品の品質向上を目指す。本年度は、プラズマ処理装置を使用してめっき表面を清浄化することで、めっき表面に緻密な重合開始基を固定化し、均一で強固な有機被膜の形成を試みた。

1 はじめに

めっきとは、金属や樹脂などの表面に金属薄膜を成膜させる表面処理で、機能性の付与・耐食性の付与・装飾性の付与の3つの大きな目的がある。光沢感や高級感が得られるだけでなく、耐腐食性・耐摩耗性・耐熱性・耐薬品性など多種多様な機能が付与できるが、めっき不良は、材料や製品の品質や特性に大きな影響を及ぼす。代表的なめっき不良の一つに、孔（ピンホール）がある。めっきの表面には目に見えない微細なピンホールが存在しており、製品の使用環境次第ではピンホールに水分が入りこみ、めっきのふくれや素材が錆びる問題がある。これまでに、ARGET ATRP を応用した表面開始重合（Surface-initiated Polymerization, SIP）による、クロムめっき表面への機能性有機被膜の薄膜形成について検討した。その結果、親水性および疎水性ポリマーを室温で重合することができたが、めっき表面への均一被膜加工には課題が残った^{1,2)}。そこで、本研究は、プラズマ処理装置を使用してクロムめっき表面を清浄化後に重合開始基を固定化し、SIP による有機被膜の形成を試みた。プラズマ処理により、表面の汚染層が除去され、クロムの酸化膜が露出することで開始基を緻密に固定化できることから、均一で強固な有機被膜の形成が期待できる。

2 実験

2.1 基板および試薬

基板として、真鍮にクロムめっきを施した市販の化粧キャップ（Φ 10 ～ 15 mm）を使用した。11-(2-Bromoisobutyrate)-undecyl-1-phosphonic acid (11-BUPA)（Sigma-Aldrich）、メタノール（Sigma-Aldrich）、二臭化銅（CuBr₂）（Sigma-Aldrich）、Tris[2-(dimethylamino)ethyl]amine (Me6TREN)（TCI）、4,4'-

Bipyridyl（Sigma-Aldrich）、アスコルビン酸（TCI）はそのまま使用した。モノマーはヒドロキシエチルメタクリレート（HEMA）（純正化学株式会社）をそのまま使用した。

2.2 めっき表面への開始基の固定および表面開始重合

2.2.1 めっき表面への開始基の固定化

固定化の前にプラズマ処理装置(PIB-20、㈱真空デバイス)を用いて、めっき表面の洗浄を行った（40mA、1.0min）。1.0mM 11-BUPA メタノール溶液を調整し、めっき基板を所定の時間、室温（25℃）、大気雰囲気下で浸漬し重合開始基を固定化した。反応後、乾燥炉で100℃、1時間加熱処理をした後、メタノール中で超音波洗浄して未反応の11-BUPAを除去し、乾燥後実験に供した。これを11-BUPA基板とする。

2.2.2 ARGET ATRP 法によるめっきへの SIP 処理³⁾

HEMA モノマー（0.679g）、Milli-Q 水（30 ml）CuBr₂（13.4 mg）、Me6TREN（160 μl）、アスコルビン酸（52.9 mg）を攪拌して反応溶液を調整した。次に、反応容器に11-BUPA基板を入れ、調整した溶液を注いで全体を浸漬し、室温（25℃）で種々の時間重合した。基板を取り出してメタノール、Milli-Q 水で超音波洗浄し、未反応のモノマー等を除去して乾燥炉（100℃）で乾燥し、実験に供した。

2.3 SIP 処理基板表面の評価

2.3.1 プラズマ処理の効果、検証

X 線光電子分光分析（X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS）による表面分析

X 線光電子分光分析装置（アルバック・ファイ株式会社製、PHI 5000 Versa Probe II）を使用し、処理基板および未処理基板の表面に存在する元素の同定を行い、プラズマ処理による清浄効果について評価した。入射角度45°、励起X線源はAlKα（hν=1486.6eV）、分析エリア100 μm（25W、15kV）で分析した。

* 化学部

接触角測定による表面の評価

ステンレス針を取り付けたマイクロシリンジを使用し、室温 23℃ で基板上に純水を 1μl 滴下し、接触角計（協和界面科学株式会社製、DMS-200）を用いて接触角を測定した。5 回の平均値を接触角とした。

2.3.2 有機被膜の状態、評価

高感度反射測定法（IRRAS 法）による表面分析

フーリエ変換赤外分光光度計（日本分光株式会社製、FT/IR-6700）および高感度反射測定装置（RAS PRO 410）を使用し、IR 測定を行った。条件は分解能 4cm⁻¹、積算回数 1000 回とした。

X 線光電子分光分析（X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS）による表面および深さ方向分析

X 線光電子分光分析装置（アルバック・ファイ株式会社製、PHI 5000 Versa Probe II）を使用し、処理基板の表面に存在する有機被膜に由来する元素の同定、化学状態分析およびガスクラスターイオン銃（GCIB）による深さ方向分析を行った。スパッタレートは 98.71 nm/min（SiO₂ 換算）、イオン銃の照射条件は 20kV MAX（2 mm x 2 mm）とした。

2.3.3 有機被膜の耐久性評価

SIP 処理した基板を温水（70℃）に 20 時間浸漬し、表面のポリマーの耐久性を評価した。

3 結果及び考察

3.1 プラズマ処理の効果、検証

プラズマ処理前後のクロムめっき表面を XPS ワイドスペクトルと接触角測定の結果を図 1 に示す。プラズマ照射前の基板は、クロム（Cr2p1、Cr2p3）由来のピークは小さく、汚染由来と考えられる炭素（C1s）が強く出ているが、プラズマ照射後にはクロム（Cr2p1、Cr2p3）に由来するピークが強くなり、炭素（C1s）のピークは小さくなった。接触角も 102° から 8.8° になり、表面の汚染層が除去されていることが確認できた。

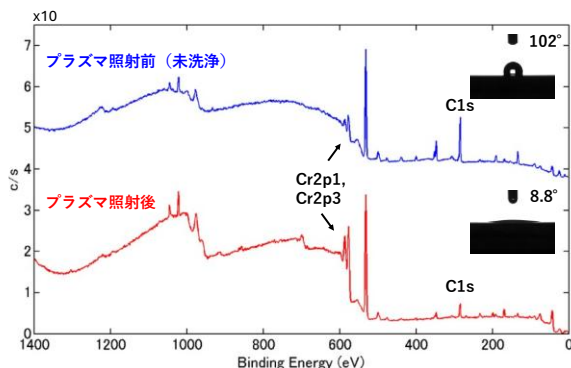


図 1 プラズマ処理前後のクロムめっき表面の XPS ワイドスペクトルと接触角

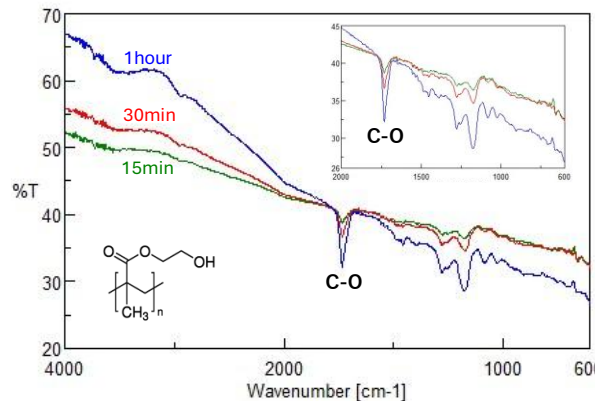


図 2 HEMA を種々の時間 SIP 処理したクロムめっき表面の IRRAS スペクトル

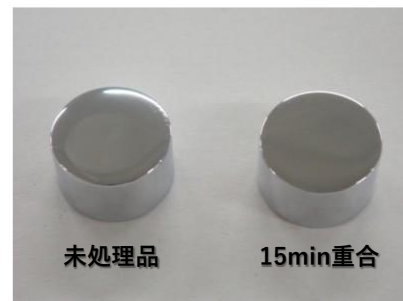


図 3 未処理品および SIP 処理 15min のクロムめっき品写真

3.2 有機被膜の状態、評価

プラズマ洗浄後の表面が清浄化されている基板を用いて開始基を固定化し、種々の時間 SIP 処理を行った。図 2 に IRRAS 法による表面分析の結果を示す。1700cm⁻¹ 付近に PHEMA の C=O に由来するピークが認められ、さらに PHEMA の標準スペクトルとよく一致した。30 分以上 SIP 処理をした基板は、表面にポリマーが目視できる程度に重合されたが、15 分だと目視で確認できない被膜が形成された（図 3）。さらにこの基板の XPS ワイドスペクトル(a)と C1s ナROWSPEクトル(b)を図 4 に示す。未処理基板にはクロム（Cr2p1、Cr2p3）に由来するピークが確認されるが、PHEMA SIP 処理基板ではクロム（Cr2p1、Cr2p3）のピークが消失する一方、PHEMA の炭素に由来する C1s ピークが強くなった(a)。XPS の分析深さは表面から約 10 nm 程度であることから、表面の被膜の厚みはそれ以上であると推定される。加えて、C1s ナROWSPEクトル(b)からは PHEMA のカルボニル基（C=O）に由来する 286eV およびエステル基（O-C=O）に由来する 289 eV 付近のピークが認められた。以上の結果から、めっき表面に PHEMA 薄膜が均一に形成されていることが示唆された。

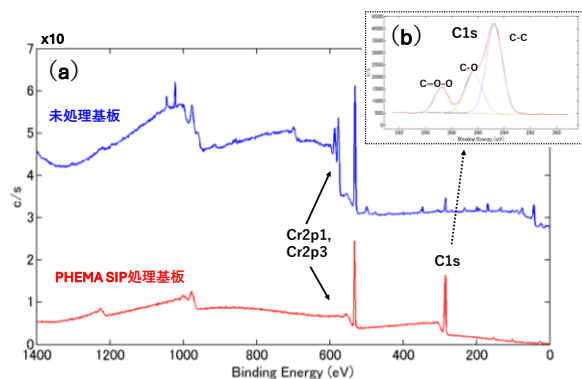


図4 未処理および PHEMA SIP 処理基板の表面の XPS ワイドスペクトル(a)と C1s ナロースペクトル(b)

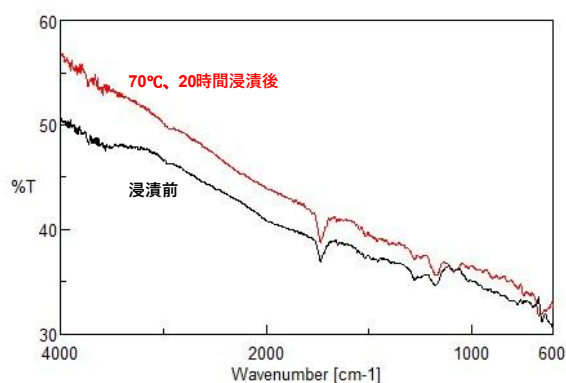


図6 PHEMA SIP 処理基板 (15min) を 70°C、20 時間浸漬後と浸漬前のめっき表面の IRRAS スペクトル

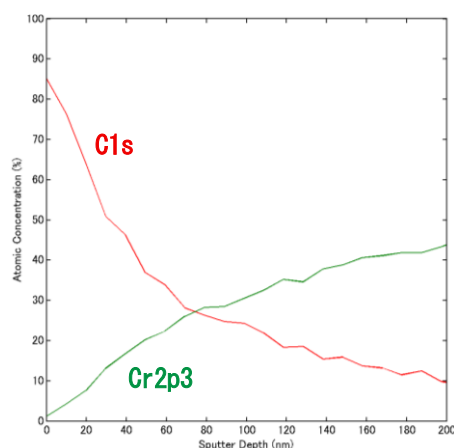


図5 PHEMA SIP 処理基板 (30min) の 深さ方向分析

次に XPS による深さ方向分析により、被膜の膜厚を評価した結果を図5に示す。酸素には PHEMA 由来とクロム由来が含まれるため、評価には PHEMA 由来の炭素とめっき由来のクロムを用いた。膜厚は光電子強度が 1/2 になる深さを膜厚として算出するのが一般的である。今回の結果からは、PHEMA の厚みは SiO₂ 換算で 60nm 程度と推定された。

3.3 有機被膜の耐久性評価

最後に、SIP 処理した基板を温水 (70 °C) に 20 時間浸漬し、表面のポリマーの耐久性を評価した。浸漬試験後の IR スペクトルを図6に示す。浸漬前と後の IR スペクトルを比較すると、よく一致しており、これらの結果から、めっき表面のポリマーは剥離せず、強固な化学結合で被覆されていることが証明された。

4 まとめ

プラズマ処理装置を活用した表面開始重合法によるクロムめっき表面へのポリマーの薄膜形成における室温加工について検討した。その結果、めっき上へ化学結合により親水性有機被膜を均一に重合することができた。また、60 nm程度 (SiO₂ 換算) までの成膜厚さであれば、外観に影響を与えないことがわかった。膜厚はモノマーや開始剤濃度等を増減させることで制御可能である。また、基板の清浄化に真空プラズマを用いたが、大気圧プラズマなど、大気圧で処理できる装置を使用すれば、洗浄から成膜までを連続的に処理することができるため、製造工程への組み込みも可能である。

【謝 辞】

本研究は、一般財団法人 越山科学技術振興財団より研究助成を受けました。

【参考文献】

- 1) 大川,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp23-24,2023
- 2) 大川,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp55-57,2024
- 3) Matsukawa K. etc, Chem. Commun., 52, pp11064-11067,2016

繊維・紙

美濃楮の安定生産と品質評価に関する研究（第3報）

－楮の品質評価－

浅野良直*、仙石倫章*、立川英治*

Research on stable production and quality evaluation of Mino Kozo (Ⅲ)

- Quality evaluation of Kozo -

ASANO Yoshinao*, SENGOKU Tomoaki* and TACHIKAWA Eiji*

楮は美濃手すき和紙の主原料であるが、国内生産量は減少しており、楮の安定生産に向けた栽培技術の確立と品質向上が課題となっている。そこで、岐阜県森林研究所が楮の栽培技術を担当し、当センターが楮の品質評価を担当して研究を行った。昨年度、手漉きした楮和紙の製品加工を行ったところ、製品表面に多くの毛羽立ちが生じた。本年度は、毛羽立ちを抑えるために楮を叩解処理して繊維のフィブリル化を図り、和紙の強度向上を目指す検討と栽培した楮の特徴を把握するための抄紙性評価、加工性評価、物性試験などを実施した。楮の叩解処理により引張強さの増加と製品表面の毛羽立ちを抑えられる可能性が確認できた。

1 はじめに

楮は主に茨城県、高知県、新潟県で栽培されているが、国内生産量は減少しており、安定供給が課題となっている。美濃市周辺地域においても楮は栽培されているが、将来的な生産体制と品質管理が不可欠である。そこで、美濃市周辺地域で栽培する楮の量と質を充実させるため、岐阜県森林研究所と共同で取り組んでいる^{1)~9)}。

昨年度、手漉きした楮和紙を原紙とした製品加工（ランプシェード）を行ったところ、製品表面に多くの毛羽立ちが生じ、地合いが低下する課題が生じた。本年度は和紙の強度向上を図るため、楮を叩解処理して、繊維のフィブリル化を図り、手すき和紙職人による抄紙性評価、和紙加工職人による加工性評価、抄紙した和紙の物性試験、楮の繊維幅測定などにより楮の品質や特徴の把握を目指した。

2 実験

2.1 原料

従来から美濃市内で栽培を行っている穴洞圃場の美濃楮、美濃手すき和紙の原料として戦前に使用していたと思われる関市の津保川流域の楮（以下、津保川流域楮）及び比較対象として本美濃紙の原料である茨城県の大子那須楮を原料とした。なお、美濃楮は津保川流域楮株を移植栽培したものである。

2.2 抄紙性評価

美濃手すき和紙協同組合の手すき和紙職人に、原料加工及び抄紙を以下の条件で委託し、アンケート調査を行った。原料名は先入観をなくすため、伏せて提供した。

【原料加工、抄紙条件】

・原料処理：ソーダ灰（ Na_2CO_3 ）を用い2時間以上平釜で煮熟を行い、洗浄、除塵作業を行う。

・抄紙条件：美濃楮と津保川流域楮は木槌を使用した手打ちでの叩解処理を実施し、二三判（約600mm×900mm）で約35g/m²（約5匁）の紙を抄く。

・以上の作業を5名以上の職人で行う。

【評価方法】

・原料評価（原料の質、異物・スジの混入）及び抄紙評価（漉きやすさ、和紙の外観）を5段階で評価

・各原料に対する意見

2.3 加工性評価

美濃手すき和紙を原紙として提灯を製作している和紙加工職人に製品の製作と墨入の評価を委託した。先入観をなくすため、手漉き和紙の原料名は伏せて提供した。

2.3.1 加工評価

評価対象の原紙を使用したランプシェード（図1）を製作し、以下の評価を行った。

・加工性（切り出し、水や糊等の吸水性及び形状保持性）、作業性、製品評価（照明を点けた時の明るさ、印象等）を5段階で評価

・各原紙に対する意見、総評

2.3.2 墨入評価

評価対象の原紙を使用したランプシェードに墨入加工（図1）を行い、以下の評価を行った。なお、墨入にはアクリル絵具を使用した。



加工評価



墨入評価（イメージ図）

図1 ランプシェード

* 繊維・紙業部

- ・運筆性、にじみ、作業性を5段階で評価
- ・各原紙に対する意見、総評

2.4 物性試験

和紙の物性試験として以下の2項目の試験を実施した。なお、引張強さはサンプルの坪量 $[g/m^2]$ 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 $[N \cdot m/g]$ 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：定速伸張法（JIS P8113）
- ・柔軟度試験：紙及び板紙—荷重曲げによるこわさ試験方法 —ガーレー法—（JAPAN TAPPI No.40）

2.5 繊維幅測定

測定した楮繊維は2.2抄紙性評価の際に抽出し、繊維長分布測定機（L&W製 FiberTester912）で約20,000本測定した平均値を繊維幅とした。なお、繊維長分布測定機の測定範囲は0.2～7.5mmのため、楮繊維を2mm程度に切断し、約0.3gを水5lに分散させた試料で測定を実施した。

3 結果及び考察

3.1 抄紙性評価

各楮の原料品質及び抄紙品質の結果を図2に示す。

原料品質は平均評点で3以上となったが、津保川流域楮は「全体的に赤みがかった」、「赤スジのひどいのがあった」、「あくが多い」などの意見があり、他の楮に比べて低い評価になったと考えられる。

抄紙品質の漉きやすさは、美濃楮、津保川流域楮ともに平均評点4以上となり、「繊維が細かい印象で漉きやすかった」、「驚くほどなめらかで、分散性も良かった」などの意見もあったが、美濃楮は「叩解のスジがたくさん残っていた」、「分散されていない繊維があった」などの意見が含まれていた。そのため、美濃楮は和紙の外観において平均評点4以下となったが、評価した3人中の2人は評点4、5をつけており、美濃楮も高い評価は得られている。

一方、津保川流域楮の和紙は本年度も含めて毎年「ツヤのある紙」、「生成りが濃い」などの意見があり、これらが津保川流域楮の特徴と考えられる。

3.2 加工性評価

3.2.1 加工評価

抄紙した和紙の加工評価の結果を図3に示す。

美濃楮和紙と津保川流域楮和紙の作業性及び加工性の評点に差はないが、美濃楮和紙は作業性において「繊維が硬いように思える」、「カッターの刃が悪くなるのがやや早いと感じる」、「繊維が残っているのが気になる」などの意見があった。抄紙評価の漉きやすさの「叩解のスジがたくさん残っていた」、「分散されていない繊維があった」の意見と一致しており、それらが影響したと考えられる。

製品評価において、美濃楮和紙は「繊維のスジが目立つ」、「繊維が少々粗い」などの意見があり、津保川流域楮和紙より低い評点となったと考えられる。一方、津保川流域楮和紙は太子那須楮和紙より低い評点となったが、「十分キレイ」、「津保川流域楮和紙と太子那須楮の違いはあまりない」などの意見があった。

製品表面の毛羽立ちについて、前年度に製作した叩解処理がされていない製品と比較すると、叩解処理した和紙の方が若干毛羽立ちの量が少なく、地合いのムラも少ないと感じられた。叩解処理により繊維がフィブリル化

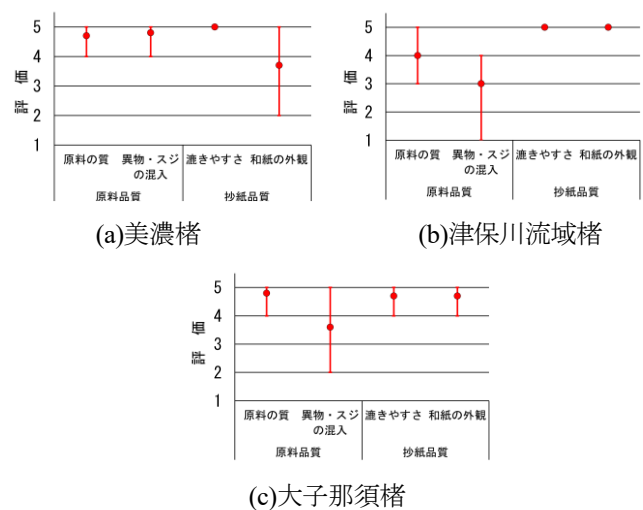


図2 抄紙性評価

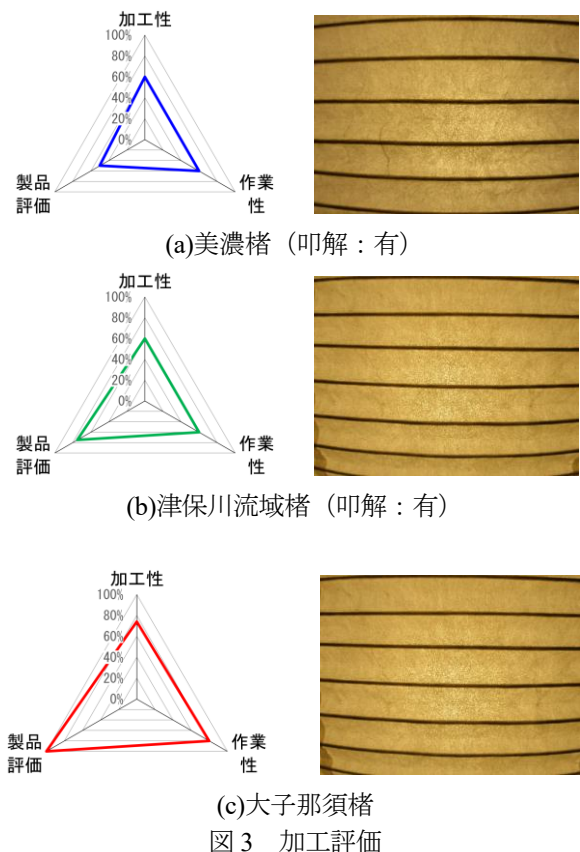


図3 加工評価

し、繊維間の絡みが増えて、繊維間の水素結合量が増加したことで、和紙の物性強度と併せて表面強度も上がり、刷毛による成型作業において和紙に霧吹きで水分を与えても繊維のほぐれが少なかったと考えられる。

3.2.2 墨入評価

墨入評価の結果を図4に示す。

美濃楮和紙は「繊維の粗さの影響を気にしたがキレイに描けた」との意見があり、繊維のスジなどの影響は少ないと考えられる。津保川流域楮和紙は濃い色の描画は良好な結果だったが、薄めた墨はにじみが広がったことから全体の評点が低い結果となった。

大子那須楮和紙は「筆の滑りは良かったが墨の吸い込みが早い」との意見があり運筆性及び作業性の評点が低い結果となった。そこで、クレム法による吸水度試験(JIS P8141)を実施した。なお、クレム吸水度は試験片の下端を鉛直に水に浸漬させ、毛細管現象によって、10分間に水が上昇した高さを示している。津保川流域楮和紙の縦方向のクレム吸水度は美濃楮和紙よりも約20mm高い結果となった(図5)。そのため、津保川流域楮和紙は水で薄めた墨のにじみが広がったと考えられる。

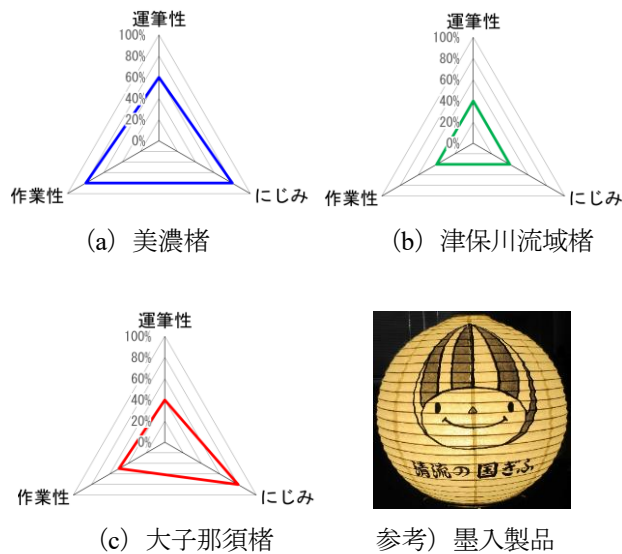


図4 墨入評価

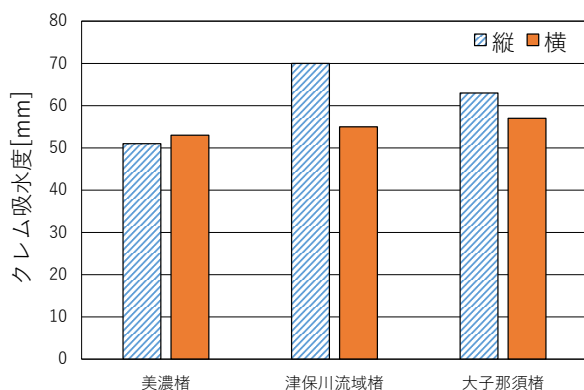


図5 吸水度(クレム法)

3.3 物性試験

3.3.1 引張強さ試験

破断伸び(図6)は、美濃楮和紙と大子那須楮和紙の差は最大で0.2%となった。また、叩解処理をしていない昨年度までの平均値と比較しても最大で0.3%の差となり、破断伸びについては楮の種類や叩解処理による影響は低いと考えられる。

比引張強さの結果を図7に示す。美濃手すき和紙の抄紙は縦揺りと横揺りを繰り返すため、繊維は多方向となるので、縦方向と横方向と併せて縦横方向の平均値についても比較を行った。

例年、美濃楮和紙と津保川流域楮和紙は大子那須楮和紙と比べて、縦方向と横方向ともに約10~20%低い結果となっていたが、本年度の差は5%以下となった。

美濃楮和紙と津保川流域楮和紙における各楮の昨年度までの平均値と比較すると、横方向が約10~20%高い結果となった。叩解処理によって繊維がフィブリル化すると、抄紙した際に繊維間の絡まりが増えることで水素結合が増加するため、和紙の強度が増加したと考えられる。また、美濃楮和紙と津保川流域楮和紙における縦方向と横方向の平均値の差は、昨年度までの平均値と比較して2.2%となり、美濃楮和紙と津保川流域楮和紙は同程度の引張強さを有していたと考えられる。

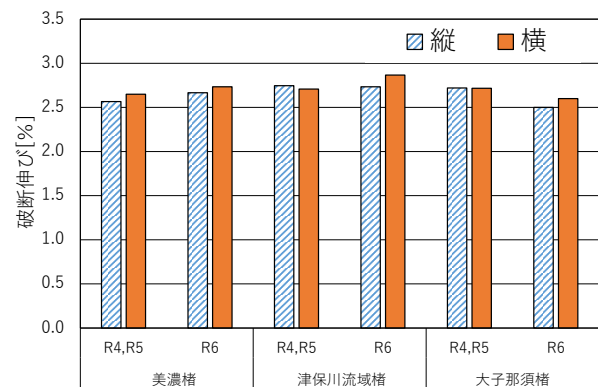


図6 引張強さ試験(破断伸び)

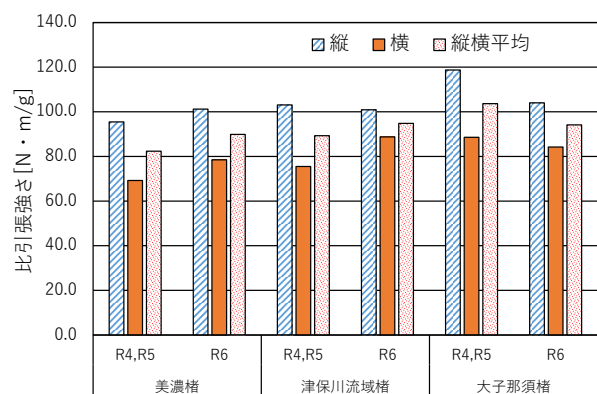


図7 引張強さ試験(比引張強さ)

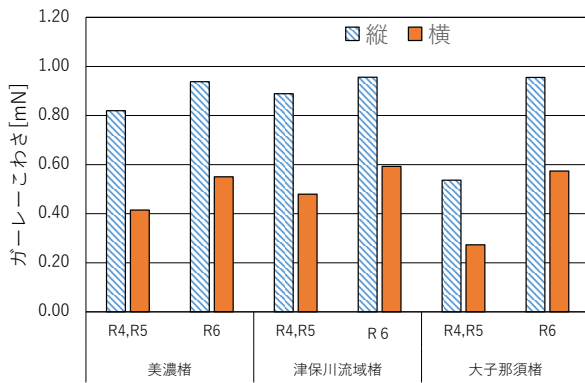


図8 柔軟度

3.3.2 柔軟度試験

柔軟度試験の結果を図8に示す。昨年度までの平均値と比較すると、叩解処理した美濃楮は縦方向で約13%、横方向で約25%増加し、津保川流域楮は縦方向で約7%、横方向で約20%増加した。叩解処理によって紙の強度が増加したことで、紙質が硬くなったと考えられる。また、本年度の美濃楮と津保川流域楮の差は縦方向で約2%、横方向で約7%となり、同程度の柔軟度を有している。

3.4 繊維幅測定

平均繊維幅測定の結果を図9に示す。

美濃楮と津保川流域楮の叩解前後の平均繊維幅を測定したところ、叩解後の繊維は約4~6%細くなったことが確認できた。繊維はフィブリル化することで繊維幅は広くなると予想されるが、使用した測定機の解像度ではフィブリル化した微細繊維の検出が難しいため、見掛け上、繊維幅は細くなったと考えられる。

叩解前の美濃楮と津保川流域楮を比較すると、美濃楮の方が2.4%太い結果となった。例年、美濃楮は津保川流域楮に比べて数%太い結果となっており、本年度も同様の結果になったことから、美濃楮の繊維幅は津保川流域楮よりも太い特徴を有していると考えられる。また、大子那須楮と比較すると美濃楮が10.4%、津保川流域楮が6.6%太い結果であった。例年も約5~10%太い結果と

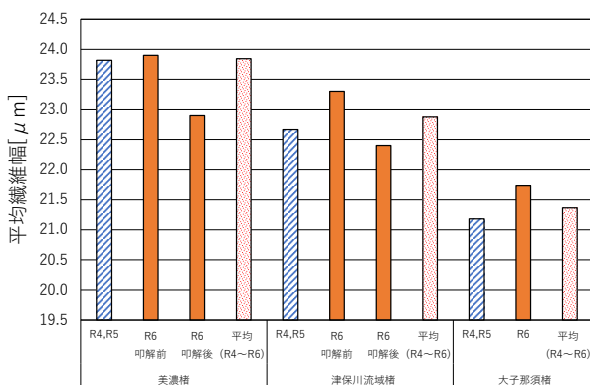


図9 平均繊維幅

なっていることから、美濃楮と津保川流域楮は大子那須楮よりも繊維幅が太い特徴を有していると考えられる。なお、叩解後の大子那須楮との差は3~5%となった。

同じ坪量で同じ繊維長と仮定した場合、繊維幅が細いことで和紙に含まれる繊維の本数は多くなり、表面積が増えて、繊維同士の水素結合が増加し、和紙の強度が増加すると考えられる。

4. まとめ

美濃楮と津保川流域楮の特徴を把握するため、手すき和紙職人による抄紙性評価、和紙加工職人による加工性評価、和紙の物性試験、楮の繊維幅測定を実施した。

美濃楮と津保川流域楮の和紙について、色味は異なるが、引張強さ試験及び柔軟度試験では同程度の測定値が得られた。また、叩解処理により和紙の比引張強さが増加したと考えられる。

本研究では美濃手すき和紙の原料となる楮について各種評価を実施したことにより、同じ楮株で栽培しても栽培条件等によって楮繊維に違いが生じ、抄紙性、加工性、物性値に影響することが確認でき、多くの知見を得ることができた。楮は年度によって栽培環境が変わるため品質が変化する可能性はあるが、今後は得られた知見を活用して技術支援を行う予定である。

【謝 辞】

本研究を実施するにあたり、ご協力頂いた大子那須楮保存会、美濃市こうぞ生産組合、美濃手すき和紙協同組合、美濃市産業課及び美濃和紙推進課の皆様には感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 浅野ら, 岐阜県産業技術センター研究報告 No10, pp61-60,2016
- 2) 浅野ら, 岐阜県産業技術センター研究報告 No11, pp53-55,2017
- 3) 浅野ら, 岐阜県産業技術センター研究報告 No12, pp53-56,2018
- 4) 浅野ら, 岐阜県産業技術センター研究報告 No13, pp53-56,2019
- 5) 浅野ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No1, pp61-64,2020
- 6) 浅野ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No2, pp67-70,2021
- 7) 浅野ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No3, pp63-66,2022
- 8) 浅野ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No4, pp45-48,2023
- 9) 浅野ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No5, pp59-62,2024

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1報）

— 端材を原料とした吸音材の開発(1) —
中島孝康*、立川英治*、林浩司*

Development of resource-recycling materials through recycling fiber scraps (I) - Development of sound absorbing materials using fiber scraps(1) - NAKASHIMA Takayasu*, TACHIKAWA Eiji* and HAYASHI Koji*

不織布で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分解片を挟んだ構造の不織布について、端材層の均一性を高めることにより吸音性の向上を試みたが、実験した範囲では均一性の程度によって吸音性に大きな変化はなく、バージン繊維のみの不織布と比較して、目付・厚さが同程度では端材分解片の混合により吸音性が低下した。

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ついての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ある。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。そこで昨年度、繊維同士が熱で融着したボード状製品についてリサイクル手法を検討することとし、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」）の不織布を試作した。吸音材への活用を想定して吸音性を評価したが、バージン繊維のみの不織布と比較して、目付・厚さが同程度では端材の混合により吸音性が低下した¹⁾。昨年度試作品は分解片の粒径が粗く端材層の均一性が低かったため、本年度は均一性の改良による吸音性向上を検討した。

2 実験

2.1 シミュレーション

端材サンドウィッチ構造不織布の吸音性の可能性を検討するため、試作に先立ち、数理モデルによるシミュレーションを実施した。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)製 STRATI-ARTZ）で KATO モデルを使用した。KATO モデルでは、不織布について、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できる。嵩密度は厚さと目付から、繊維径は繊維度と密度から計算可能である。以下3種の不織布について実施した。

- ① サンドウィッチ構造品：同目付の繊維層2層の間に端材粉砕片の層を重量割合50%で挟む。
- ② 繊維4層品：端材の代わりに同重量の繊維（2層分）を入れ、全部で繊維層を4層重ねる。

③ 繊維2層品：端材の部分はなしにして繊維層を2層だけ重ねる（目付は①、②の半分）。

①の端材層については構成繊維（本報告では非公開）が均一に混合された不織布としてモデルを適用した。シミュレーションの主な条件を表1に示す。

2.2 試作

ボード状製品（厚さ3mm、目付700g/m²程度）の端材を粉砕機（(株)ホーライ製 UGO₃-280）により粉砕した。端材層の均一性の影響を検討するために粉砕粒径の違うものを作ることにし、排出スクリーン径4、8、12、20mmの4種類で粉砕を実施した。繊維層の繊維は表1記載の構成とした。繊維長は51mm、バインダー繊維には芯鞘型で軟化温度110℃のものを利用した。まず、端材層の上下に配置する繊維層（1層分）をカード機で目付215g/m²前後で作製した。端材層と繊維層の境界面の凹凸をなるべく少なくしたいと考え、端材積層前に繊維層形状をある程度固定するために、高さ10mmのステンレス枠中で上下面を金網で挟んで150℃で5分間加熱した。その後、全体の目付860g/m²、端材重量50%の想定で、繊維層1層の上に端材粉砕片430g/m²を散布し、さらに繊維層1層を重ねた。最後に、端材層と繊維層を融着させるため、高さ20mmのステンレス枠中で上下面を金網で挟んで150℃で5分間加熱した。スクリーン径4mm粉砕品については再現性確認のため2個、その他は1個ずつのサンドウィッチ構造品を試作した。比較品としてシミュレーション時と同様、バージン繊維のみで繊維4層品、2層品を試作した。

2.3 試作品の評価

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）で吸音率を測定した。径100mm、29mmの音響管を利用し背後空気層なしで50～6,300Hzの範囲で測定した。

3 結果及び考察

3.1 シミュレーション

シミュレーションの結果を図1に示す。サンドウィッ

* 繊維・紙業部

表1 シミュレーションの主な条件

厚さ	全体 20 mm *サンドウィッチ構造品の場合 繊維層各 8 mm、端材層 4 mm
目付	・サンドウィッチ構造品 800 g/m ² (繊維層各 200 g/m ² 、端材層 400 g/m ²) ・繊維4層品 800 g/m ² ・繊維2層品 400 g/m ²
繊維層構成	ポリエステル(密度 1.38g/cm ³ とした) ・2.2dtex : 80%、 ・4.4dtex (バインダー繊維想定) : 20%

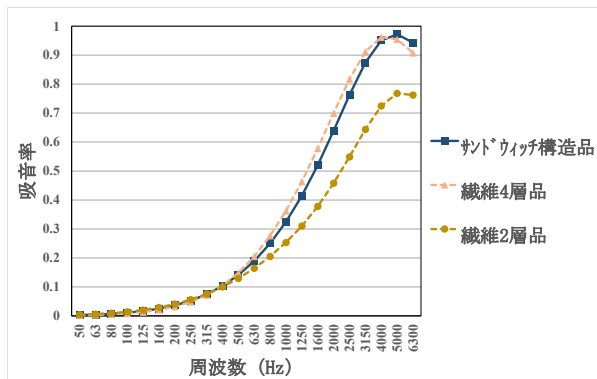


図1 シミュレーション結果

チ構造品は、繊維4層品と同程度の吸音率であった。端材層を不織布とみなしたシミュレーションであるので、端材層を不織布のようになるべく均一な状態にできれば、昨年度実験結果とは違い、端材を混合しても同目付・厚さのバージン繊維のみの場合と同レベルの吸音性を実現できる可能性があると考えられた。

3.2 試作品の吸音性

サンドウィッチ構造品作製の際、端材粉砕片を積層した時点での写真を図2に示す。粉砕スクリーン径が小さいほど端材層の均一性は高くなったと言える。目付はサンドウィッチ構造品、繊維4層品は、860～885 g/m²とある程度揃えることができた。繊維2層品は437 g/m²で想定どおり他の約半分であった。試作品は柔らかく厚さの荷重による変化が大きい、吸音率測定時、装置のサンプルホルダーの所定の位置に試料面が合うように測定厚さを調整し、23～25 mmの範囲で揃った。垂直入射吸音率の結果を図3に示す。サンドウィッチ構造品はグラフ中の実線で、いずれの粉砕スクリーン径の結果もほぼ重なっており、少なくとも実験範囲内では端材層の均一性は吸音性に大きな影響がないことが分かった。また、シミュレーション結果とは違い、サンドウィッチ構造品は繊維4層品に比べて吸音性が低かった。バージン繊維のみの繊維4層品、2層品の結果については、試作品の実際の目付と厚さから改めてシミュレーションするとよく一致しており、繊維層部分には KATO モデルは有効と思われた。端材層でモデルが有効でなく、通常の不織布

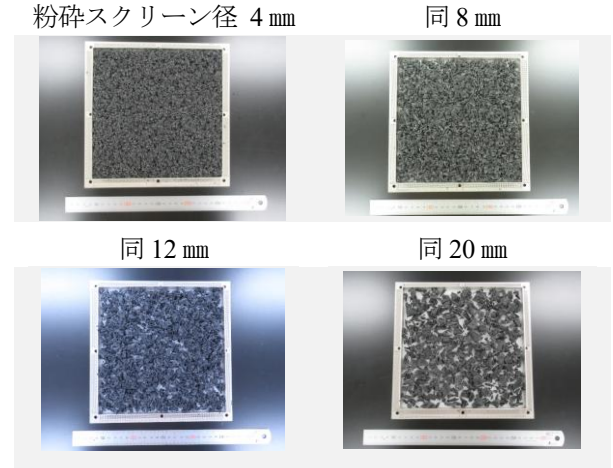


図2 端材粉砕片を積層した時の様子

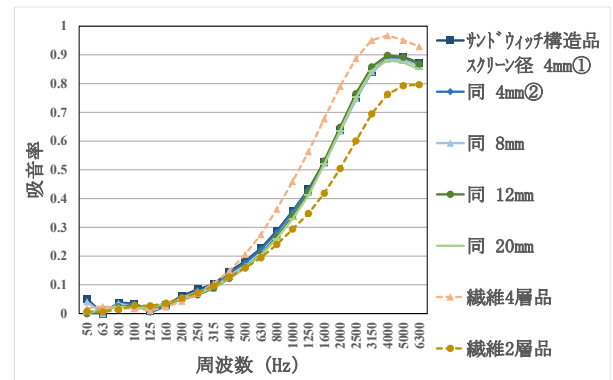


図3 試作品の垂直入射吸音率

の挙動が期待できないと考えられた。理由として、細かく粉砕したとはいえ粗密の差が大きい、粉砕で繊維長が短くなっている、繊維の溶融・融着の程度が大きいなどが考えられた。昨年度同様、サンドウィッチ構造品は繊維2層品よりは吸音性が良かったので、環境配慮という点も鑑み、端材利用のメリットはあり得ると考えられる。

4 まとめ

端材を挟んだ不織布において端材層の均一性を高めることで吸音性向上を期待したが、均一性の差による吸音性の変化はほとんどなかった。今回は熱で繊維を融着させる方式で不織布を作製したが、今後はニードルパンチ方式等でも検討していきたいと考えている。

【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

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2報）

－異種ポリマーブレンド物の熔融紡糸技術の開発(1)－

林浩司*、立川英治*、中島孝康*

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

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

HAYASHI Koji*, TACHIKAWA Eiji* and NAKASHIMA Takayasu*

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。ポリエステル（以下「PET」）樹脂の基材に接着用のナイロン（以下「接着性 PA」）樹脂が使われる繊維製品を想定し、まずはバージン材でこれらの樹脂の混合物から繊維を作製する検討を行った。PET 樹脂と接着性 PA 樹脂は相溶性が低く、繊維を作製するには相溶化剤を添加する必要があった。PET 樹脂／接着性 PA 樹脂／相溶化剤＝88.6／9.1／2.3 の割合で、繊維度 6.8dtex、強度 2.8cN/dtex、伸度 34.7%の繊維を得ることができた。

1 はじめに

SDGs の重要性が広く認識されるようになり、繊維のリサイクル技術の開発、及びその技術による製品開発の要望が強い。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、自動車内装材などのフェルト、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、繊維同士が熱等で融着していると反毛することが難しく、焼却処分されているものも多い。

PET ボトルは、再繊維化すること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。しかしながら、繊維製品のリサイクルでは、異種の繊維や、接着のためのバインダー樹脂など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混ざらないため再繊維化は難しい。

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、従来は難しい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。繊維製品の中で、織物や不織布などで別の生地などに接着させるために樹脂を付着させるものがある。本年度は、基材の素材として PET 樹脂、接着用樹脂として接着性 PA 樹脂を想定し、実際の端材での検討の前に、まずはバージン材でこれらの樹脂の混合物から繊維を作製する検討を行った。

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。接着性 PA 樹脂は、エムスケミー・ジャパン（株）の共重合ポリアミド樹脂であるグリルテックス D1701AG（融点 120～130℃）を使用した。相溶化剤には、無水カルボン酸で変性したポリプロピレン樹脂の、三洋化成工業（株）ユーメックス 1001 を使用した。PET 樹脂は 105℃、接着性 PA 樹脂は 60℃、相溶化剤は

105℃で 12 時間以上乾燥してから試験に使用した。

2.2 二軸混練ペレットの作製

使用した熔融紡糸機は単軸であるため混練効果に乏しく、相溶性の低い異種ポリマーをドライブレンドしただけでは、繊維化は困難であると思われた。そこで、熔融紡糸に先立ち、二軸混練ペレットを作製することとした。材料をドライブレンドした後、Thermo Fisher Scientific 社の二軸押出し機 HAAKE Process11（スクリュ径 11 mm、L/D40、同方向回転）を使用してスクリュ回転速度 400 rpm で熔融混練してストランドを作製した。水冷後、（株）テクノベル製ストランドカットペレタイザ SCP-153-2MT を使用して二軸混練ペレットを作製した。

2.3 熔融紡糸による繊維の作製

中部マシン（株）製小型熔融紡糸機ポリマーマイト V（単軸、スクリュ径 25 mm、L/D28）を使用した。熔融した二軸混練ペレットを、36 孔、各孔径 0.35 mm、L/D2 の口金から 0.56 g/（min・fil）で吐出し、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 5.0 倍で延伸して延伸繊維とした。繊維度は、繊維の直径と密度から算出した。密度は、PET 樹脂、接着性 PA 樹脂、相溶化剤の各密度から計算して求めた。

2.4 繊維の強伸度

（株）島津製作所のオートグラフ AGS-J を使用し、JIS L 1015 : 2010 を準用して繊維の引張強さ及び伸び率を測定した。

3 結果と考察

3.1 二軸混練ペレットの作製

PET 樹脂、接着性 PA 樹脂、相溶化剤のブレンド比を変えて二軸混練ペレットが安定して作製できる条件を調査した。接着性 PA 樹脂は、押出し機の樹脂投入部で熱融着が認められたため、設定温度を投入部から口金に向けて、130-190-263-263-263-263-263℃とした。結果を表 1 に示す。相溶化剤を加えないとストランドの突出が不安定でペレットを作製することができなかったが

* 繊維・紙業部

表1 二軸混練ペレットの作製

No.	ブレンド比			結果
	PET樹脂	接着性PA樹脂	相溶化剤	
1	60	40	—	×
2	60	40	2	×
3	60	40	10	○

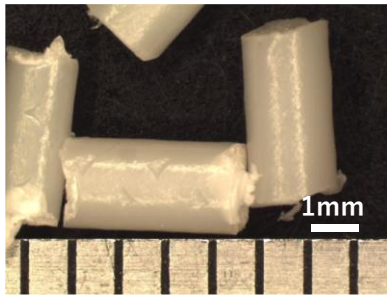


図1 作製した二軸混練ペレット

(No.1)、PET 樹脂／接着性 PA 樹脂／相溶化剤＝60／40／10 のブレンド比とすることで、二軸混練ペレットを安定して作製できるようになった (No.3)。図1に作製した二軸混練ペレットを示す。

3.2 熔融紡糸による繊維の作製

3.1 節で作製した、PET 樹脂／接着性 PA 樹脂／相溶化剤＝60／40／10 の二軸混練ペレットを使用して繊維化の検討を行った。予備試験を行ったところ、二軸混練ペレットだけでは、繊維化が困難であったため、二軸混練ペレットに PET 樹脂をドライブレンドして繊維化の検討を行った。結果を表2に示す。その結果、二軸混練ペレットの割合を増していった、PET 樹脂／二軸混練ペレット＝70／30 (各成分の割合としては、PET 樹脂／接着性 PA 樹脂／相溶化剤＝86.4／10.9／2.7) になると、繊維巻取りの際に糸切れが発生し安定して繊維を作製することができなくなった。PET 樹脂と接着性 PA 樹脂の相溶性が悪く、その結果、紡糸性が低下したと思われる。

次に、作製した No.1～No.3 の未延伸繊維を延伸した。結果を表3に示す。接着性 PA 樹脂の割合が増加するに従い強度は低下するが、割合が最も高いもの (PET 樹脂／接着性 PA 樹脂／相溶化剤＝88.6／9.1／2.3) で、繊維度 6.8 dtex、強度 2.8 cN/dtex、伸度 34.7%の繊維を得ることができた。今後実際の製品の端材で検討する予定であるが、この比率を念頭に検討を進める。

4 まとめ

従来は難しいとされている、異種の熱可塑性材料が混在する端材から熔融紡糸で繊維を再生する技術の開発を目指して検討を行っている。今年度は、異種材料として PET 樹脂と接着性 PA 樹脂を想定してそれらの混合物を

表2 未延伸繊維の作製

No.	ブレンド比		繊維中の樹脂の割合			巻取りの可否
	PET	二軸混練ペレット	PET	接着性 PA	相溶化剤	
1	90	10	95.5	3.6	0.9	○
2	80	20	90.9	7.3	1.8	○
3	75	25	88.6	9.1	2.3	○
4	70	30	86.4	10.9	2.7	×

表3 延伸繊維の物性

使用した未延伸繊維	物性		
	繊維度 (dtex)	強度 (cN/dtex)	伸度 (%)
No.1	6.7	4.0	42.8
No.2	6.1	3.5	37.2
No.3	6.8	2.8	34.7

再繊維化する技術の開発を行った。

PET 樹脂と接着性 PA 樹脂は相溶性が低く、二軸熔融ペレットの作製には、相溶化剤を添加する必要があった。PET 樹脂／接着性 PA 樹脂／相溶化剤＝88.6／9.1／2.3 で、繊維度 6.8 dtex、強度 2.8 cN/dtex、伸度 34.7%の物性の繊維を得ることができた。実際の製品端材からの繊維化では、この比率を念頭に検討を進める。

【参考文献】

- 1) 島上,繊維と工業 Vol64,No.7,2008

機能性を有する繊維の開発 (第3報)

亀山遼一*、林浩司*、中島孝康*

Development of functional fibers (Ⅲ)

KAMEYAMA Ryoichi*, HAYASHI Koji* and NAKASHIMA Takayasu*

シクロデキストリン(以下「CD」)による物質の包接現象を活用して繊維を高機能化することを考え、繊維にCDを固定化する加工技術の検討を行った。フェノールフタレイン分子がCDに包接されると、フェノールフタレインが赤紫色から無色に変化することを利用して、生地固定化された γ -CDの量を推定した。その結果、多価カルボン酸であるクエン酸を用いることで、1%o.w.f程度の γ -CDが綿布に固定化できることが分かった。 γ -CDを固定化した綿布にはアンモニアに対する消臭性が認められた。靴下に対する γ -CD加工の結果から、素材やアイテムに適した加工条件を検討する必要があるが、布だけでなく製品にも加工できる可能性があることが分かった。

1 はじめに

近年、消臭性や抗菌性などの付加価値のある繊維製品の需要が増えており、機能性繊維が多く開発されている。機能性を付与する一つの方法として、精油の利用が考えられる。精油は、香り以外にも消臭や抗菌などの有益な機能を有する一方、揮発性が高いという特徴がある。そこで、揮発性を抑制し、機能の持続性を高める方法として、包接と徐放の性質があるCDを繊維に加工することを考えた。昨年度は、多価カルボン酸であるクエン酸を用いることで、綿布に γ -CDを固定化できること、固定化した γ -CDは洗濯処理後も生地に残っていること、 γ -CDを固定化した布に精油を包接させることで、精油の香りが持続する可能性があることを明らかにした¹⁾。

本年度は、①繊維に固定化した γ -CD量の測定、② γ -CD加工布による消臭性の評価、③ γ -CD加工による物性への影響について検討を行った。また、製品への γ -CD加工を試みた。

2 実験方法

2.1 加工方法

綿添付白布(JIS L0803:2011 カナキン 3号)に既報¹⁾と同様の方法で、 γ -CD(関東化学(株))の固定加工を行った。加工後、生地を手洗いして未反応の γ -CDとクエン酸を除去した。以降、 γ -CDを加工していない布を未加工布、 γ -CDを加工した布を γ -CD加工布と記載する。

2.2 γ -CD加工綿布のCD定量

フェノールフタレインはCDに包接されることで、赤紫色から無色になることが知られている²⁾。CD溶液の色の変化にともない吸光度が低下するため、既知濃度CD溶液の吸光度を複数測定することで検量線を作成することが可能である。下記の近似式(1)を用いて、作成

した検量線と未知濃度のCD溶液の吸光度からCDの量を求めることができる。

$$[CD][PP]/\Delta A = \{1/\epsilon L\}[CD] + \{1/K\epsilon L\} \quad \cdots (1)$$

[CD]:シクロデキストリン濃度

[PP]:フェノールフタレイン濃度

 ΔA :吸光度差、 ϵ :モル吸光係数、L:光路長、K:平衡定数

フェノールフタレイン(関東化学(株)製) 2.81×10^{-5} mol/L、炭酸ナトリウム(純正化学(株)製) 0.225 mol/L、炭酸水素ナトリウム(富士フィルム(株)製) 0.025 mol/Lで γ -CD溶液の濃度を変えた複数の水溶液の吸光度を測定して、検量線を作成した。この呈色反応はアルカリ性条件下でおこるため、溶液がアルカリ性であることを確認した。紫外可視近赤外分光光度計(日本分光(株)製 V-670)を使用し、石英セルを用いて554nmにおける吸光度を測定した。

シャーレに上記の濃度の水溶液(γ -CD水溶液は除く)と未加工布または γ -CD加工布をおよそ1.0g入れ、浸漬させて静置する。シャーレ内の溶液を石英セルに入れ、吸光度を測定し、検量線を用いて γ -CD濃度を算出した。水溶液の体積を乗じて γ -CD量とし、この値を加工布に固定化されている量とした。

2.3 消臭試験

未加工布と γ -CD加工布について、アンモニアとノネナールの消臭試験を行った。アンモニアは汗臭や加齢臭の臭気成分、ノネナールは加齢臭の臭気成分として知られている。消臭性は、SEK((一社)繊維評価技術協議会)マークの繊維製品認証基準で定める方法により評価した。

* 繊維・紙業部

2.4 引張強さ試験

γ -CD 加工による物性面への影響を調べるため、未加工布、 γ -CD 加工布の引張強さを評価した。JIS L1096:2010 A 法(カットストリップ法)を準用し、引張速度 100 mm/min、つかみ間隔 100 mm、試験片幅 25 mm で $n=3$ で試験した。

2.5 靴下への加工

ほぼ同じ織度の綿糸、マニラ麻を原料とした紙糸から作られた靴下に γ -CD 加工を行った。 γ -CD15 %水溶液、クエン酸 15 %水溶液に浸漬させ、パディングマングル試験機(内外特殊エンジ(株)製 P-A0)を使用して絞りが約 100 %になるように加工した。その後、ベーキング試験機((株)大栄科学精器製作所製 DX-1M)を使用して 105 °C で 10 分間乾燥し、160 °C で 10 分間キュアリングした。洗濯機((株)大栄科学精器製作所製 AWS-30)を使用して JIS L1930:2014 方法 No.C4M を準用し、洗い加工を 1 回行い、未反応の γ -CD とクエン酸を除去した。洗濯洗剤は未使用とし、負荷布I型を使用して洗い加工後は平干し乾燥を行った。恒温恒湿室(20 °C、65 %)で 1 日以上静置し、加工前後の重量を計測して脱落量を調査した。

3 結果と考察

3.1 γ -CD 固定量

既知濃度 CD 溶液の吸光度を複数測定して作成した検量線を図 1 に示す。グラフは直線になっており、検量線として妥当であることが確認できた。図 2 にフェノールフタレイン溶液に浸漬した未加工布と γ -CD 加工布を示す。未加工布は赤紫色を示したが、 γ -CD 加工布は赤紫色がかなり薄くなっており、フェノールフタレイン分子が生地に固定された γ -CD に包接されていることが分かる。溶液の吸光度および検量線から綿布に固定化した γ -CD 量を求めた。結果を表 1 に示す。 γ -CD 量は検量線から算出した値であり、綿布がフェノールフタレインを吸着し、吸光度が低下したため未加工布にも γ -CD があるように見えるが、CD 加工は行っていない。フェノールフタレインが綿布に吸着されていると考えられるため、吸光度の変化から綿布に吸着されたフェノールフタレインの濃度を算出し、吸光度差は未加工布を基準として、式 (1) から CD の濃度を補正した値も併せて表 1 に記載した。この結果から、 γ -CD は γ -CD 加工布上に 1.2 %o.w.f 固定化されていることが分かった(o.w.f とは、加工前の生地に対する付着量 on the weight of fiber の略)。加工後の重量から溶液中の γ -CD がすべて固定化されたと想定すると、 γ -CD は 4.5 %o.w.f 固定化されるはずである。しかし、実際は想定よりも少ない重量であったことから手洗いによる脱落、包接に関与していない γ -CD も存在すると思われる。

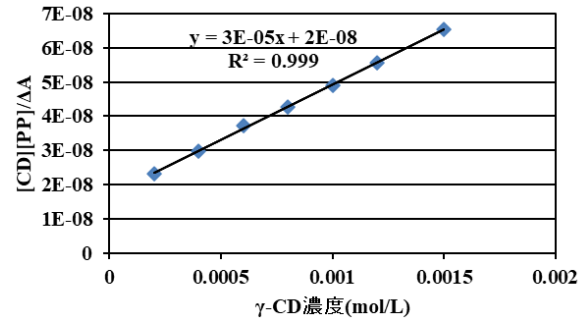


図 1 検量線結果

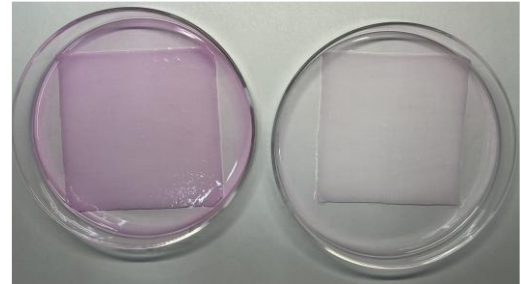


図 2 フェノールフタレイン試験
(左:未加工布、右: γ -CD 加工布)

表 1 吸光度および γ -CD 固定量算出結果

	未加工布	γ -CD加工布 (補正值)
吸光度(A)	0.83	0.31
吸光度差(ΔA)	0.062	0.58 (0.52)
CD濃度(mol/L)	4.1×10^{-5}	1.0×10^{-3} (0.93×10^{-3})
固定量(%o.w.f)	5.2×10^{-2}	1.3 (1.2)

3.2 機能性および物性試験

3.2.1 消臭試験

未加工布、 γ -CD 加工布の消臭試験の結果を表 2 に示す。未加工布におけるアンモニアの減少率は 29 %であったが、 γ -CD 加工布は 99 %以上と基準値以上であった。一般的に親水性であるアンモニアは CD に包接されにくいと考えられることから、消臭性はクエン酸によるものであると推察する。ノネナールに対しては未加工布、 γ -CD 加工布ともに SEK の基準を満たさなかった。ノネナール分子の大きさが γ -CD の包接分子サイズから外れていたことが考えられ、ノネナールの消臭性に関与しないことが確認された。

表 2 消臭試験結果

臭気成分	未加工布 減少率(%)	γ -CD加工布 減少率(%)	SEKマーク 基準値(%)
アンモニア	29	99以上	80以上
ノネナール	47	35	90以上

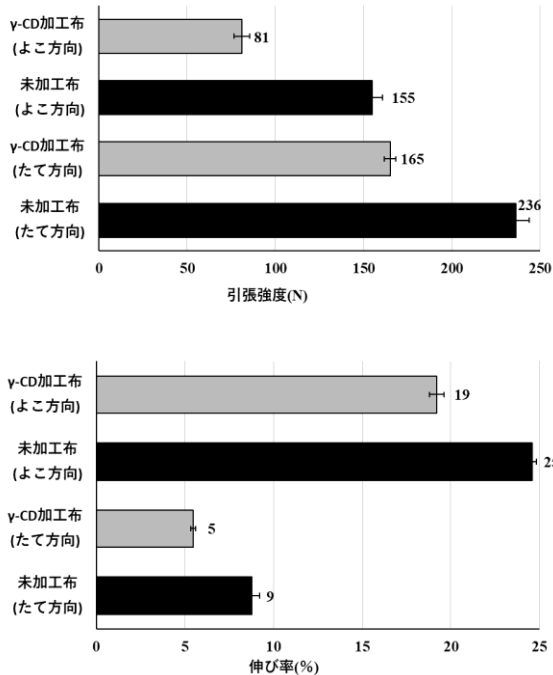


図3 未加工布と γ -CD加工布における引張強さ及び伸び率(上:引張強さ、下:伸び率)

3.2.2 引張強さ試験

引張強さと伸び率の結果を図3に示す。 γ -CD加工を行うことで引張強さ、伸び率ともに未加工布よりも低下した。架橋剤は、セルロース分子と結合し、セルロース分子の動きを拘束するため、力を繊維全体に分散することができず、繊維の一部だけで力を受け止めることになり、強度が低下するとされている³⁾。クエン酸により、綿布のセルロースと架橋が進行し、分子間の動きが拘束され、強度および伸び率が低下したと考えられる。

3.3 靴下への γ -CD加工

製品に対する γ -CD加工性を評価した。図4に γ -CD加工後の靴下を示す。つま先やかかとなど比較的厚みのある部分が薄く黄変した。厚みのある部分は、マングルで加工液を絞り切ることができず、他の部位よりも加工液が多く残ってしまったこと、靴下は添付白布よりも乾燥しにくく、キュアリングの時間を布よりも長くしたため、熱により黄変したと考えられる。

次に洗濯処理を行った。図5に加工前の重量を基準とした加工後および洗濯後の重量変化率を示す。綿糸靴下、紙糸靴下ともに γ -CD加工後の重量変化率にほとんど差はないが、洗濯を行うことで紙糸靴下の方が重量変化率は大きかった。紙糸は綿糸と比較して繊維間に空隙が少なく、糸の毛羽も少ない。そのため、洗濯により γ -CDの脱落が多かったと考えられる。製品に加工するには、素材やアイテムに適した加工条件を検討する必要がある。



図4 γ -CD加工後靴下(左:紙糸、右:綿糸)

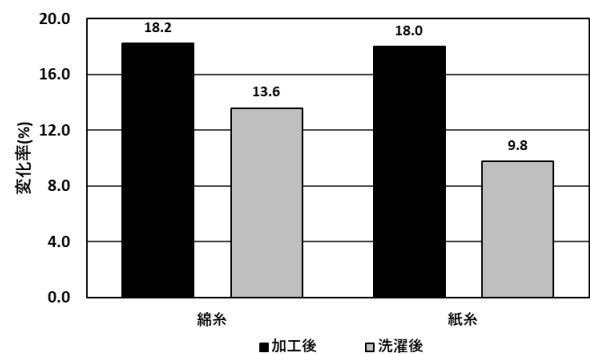


図5 加工後および洗濯後の重量変化率

4 まとめ

綿布への γ -CD固定量をフェノールフタレインを用いて調べた。その結果、綿布に1.2 %o.w.fの γ -CDが固定化されていることが分かった。また、クエン酸を用いて γ -CDを固定化することで汗臭等の臭気成分であるアンモニアに対して、未加工布より大幅に高い消臭性が認められた。靴下に γ -CD加工を行ったところ、素材やアイテムに適した加工条件を検討する必要があるものの製品にも加工できる可能性があることが分かった。

【参考文献】

- 1) 亀山ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp68-70, 2024
- 2) 高橋ら, 日本繊維製品消費科学会 Vol.64, No.10, pp623-632, 2023
- 3) 日比, 繊維学会 Vol.50, No.10, pp553-558, 1994

ウールブレンド紙糸製品の開発（第2報）

林浩司*、山内寿美*

Development of paper yarn textiles containing wool fiber (II)

HAYASHI Koji* and YAMANOUCHI Hisami*

紙糸用原紙作製時にウール繊維をマニラ麻繊維に配合抄紙（混合）することで、ウール繊維の特性を併せ持つ紙糸繊維製品の開発を行っている。今年度、ウール繊維を混合した紙糸は、水分率が高くなり、アンモニア消臭機能を示すことが確認でき、この紙糸から作製した紙布は、従来の紙布に比較して、柔らかく、保温性が向上することが分かった。また、ウール繊維を30%混合した紙糸を使用して、靴下、カットソーを試作したが、問題は認められなかった。

1 はじめに

紙糸は独特な風合いがあり、また天然素材を原料としたサステナブルな素材であるため、繊維関連企業や消費者の関心が高く、靴下、マスク、タオルなど様々な紙糸繊維製品が販売されている。岐阜県内には、美濃和紙を使用した紙糸繊維製品の製造販売に取り組んでいる企業が多い。一方、羽島市を中心とした県南部地域は、毛織物の製造が古くから盛んで関連企業が多く立地している。

本研究開発ではこの点に着目し、紙糸用原紙作製時にマニラ麻繊維にウール繊維を混合することでウール繊維の特性を併せ持つ紙糸繊維製品の開発を行っている^{1)~6)}。最終年度である本年度は、ウール混紙糸が適する製品アイテム群を把握するため、この紙糸の水分率、消臭性、丸編みニット生地（以下「ニット生地」）の風合いなどを評価し、最後に繊維製品を試作した。

2 実験

2.1 ウール混紙糸の特性

JIS L 1095:2010 を準用し、ウール繊維を含んでいない紙糸（大福製紙（株）製、毛番手で22番単糸、以下「対照紙糸」）、ウール20%混紙糸（同30番単糸）⁵⁾⁶⁾、ウール30%混紙糸（同19番単糸）⁴⁾、及びウール40%混紙糸（同16番単糸）^{5)~6)}の20℃65%RH、30℃90%RHにおける水分率を評価した。糸に付着している油剤を精練除去した後、消臭性と抗菌性を評価した。消臭性は、SEK（（一社）繊維評価技術協議会）マークの繊維製品認証基準で定める方法により、アンモニア、酢酸、イソ吉草酸、及びノネナールに対する消臭率を評価した。アンモニア、酢酸は検知管、イソ吉草酸、ノネナールはガスクロマトグラフ（以下「GC」）で評価した。抗菌性は、JIS L 1902:2015 に準拠して、菌液吸収法により黄色ぶどう球菌に対する抗菌性を評価し、抗菌防臭効果の有無を確認した。

2.2 ウール混紙糸ニット生地の特性

2.2.1 ウール混紙糸ニット生地の作製

2.1 節記載のウール30%混紙糸をS600/mで双糸にした後、直径30インチ、7ゲージの丸編み機で天竺組織のニット生地を作製した（以下「ウール30%混生地」）。比較のため、2.1 節記載の対照紙糸を2本引き揃え、同じ条件で生地を作製した（以下「対照生地」）。生地作製後、ソーピング・シタンプラー乾燥を行った。

2.2.2 ウール混ニット生地の特性

JIS L 1096:2010 を準用し、標準状態における単位面積当たりの質量（以下「目付」）と度目を測定した。カトーテック（株）製 KES 風合い特性試験機（KES-FB2、KES-G5）を使用して曲げ特性と圧縮特性を評価し、サーモラボ（KES-F7）を使用して保温性、定常熱伝導率、及び最大熱流束（接触冷感）を評価した。

3 結果及び考察

3.1 ウール混紙糸の特性

図1にウール混紙糸の水分率を示す。ウール繊維の混合率が増えるに従い、20℃65%RH、30℃90%RH両条件とも水分率が上昇した。紙糸にウール繊維を混合することで、水分率の高い紙糸が得られることが分かった。

表1に消臭性と抗菌性評価の結果を示す。消臭性の評価基準（合格基準）は、アンモニア80%以上、酢酸70%以上、イソ吉草酸95%以上、ノネナール90%以上であるが、この値に達しなくても、アンモニア70%以上、イソ吉草酸85%以上、ノネナール75%以上の消臭性があれば官能試験を行い、これに合格すればよいとされている（ただし今回の試験では、検知管、GCの結果のみから、評価基準に達しているか否かを判断した）。その結果、アンモニアに関しては、ウール繊維を混合することで消臭性が向上し、20%混合することで評価基準を満たすことが分かった。酢酸に関しては全てのサンプルで評価基準に達していたが、イソ吉草酸、ノネナールに関しては一部サンプルを除いて基準に達しなかった。抗菌

* 繊維・紙業部

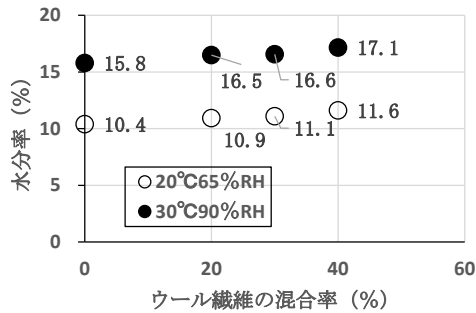


図1 ウール混紙糸の水分率

表1 ウール混紙糸の消臭性と抗菌防臭効果

	対照紙糸	ウール20%混	ウール30%混	ウール40%混
アンモニア	× (49%)	○ (86%)	○ (80%)	○ (91%)
酢酸	○ (96%)	○ (96%)	○ (≥98%)	○ (91%)
イソ吉草酸	× (93%)	× (90%)	○ (97%)	× (91%)
ノネナール	× (36%)	× (38%)	× (80%)	× (45%)
抗菌防臭効果	× (1.1)	× (0.1)	× (0.2)	× (-0.2)

○：評価基準以上、×：評価基準以下。
括弧内の数値は、消臭率または抗菌活性値。

性については、抗菌活性値 2.2 以上で抗菌防臭効果があるとされている⁷⁾。どの紙糸もこの基準を満たさなかった。

3.2 ウール混紙糸を使用したニット生地作製

ウール 30%混生地は、生地作製時にわずかに糸切れが認められた。表2に紙糸（単糸）の強伸度を示す。ウール 30%混紙糸は、対照紙糸に比較して、伸び率は高いものの、単位繊維当たりの引張強さが 50%ほどしかないため、糸切れが発生したと思われる。これまでの検討で、ウール繊維の混合率が高いほど引張強さは低下することが分かっており、生地作製に当たっては、ウール繊維の混合率を下げることや、他の繊維との交編等を考える必要がある。

3.3 ウール 30%混生地の特性

表3に生地の目付と度目、図2に生地をウェル方向に曲げた時の曲げ剛性を示す。その結果、目付、度目に大きな差が無いに関わらず、ウール 30%混生地の曲げ剛性は対照生地の約半分の値を示し、柔らかい風合いを示すことが分かった。コース方向に曲げた場合も同様の傾向を示した。また、曲げ剛性という物性値だけでなく、触った感じも柔らかいと感じ取ることができた。一方で、紙布特有のシャリ感も有していた。一般的に、生地の作製条件が同じであれば、細繊維の糸を使用した方が生地は柔らかくなり、また、同繊維の糸で作製した生

表2 紙糸の強伸度

	引張強さ (N)	引張強さ (cN/dtex)	伸び率 (%)
ウール30%混紙糸	2.5	0.47	10.7
対照紙糸	4.3	0.95	4.9

表3 生地の目付と度目

	目付(g/m ²)	度目
ウール30%混生地	244	7.1
対照生地	248	7.4

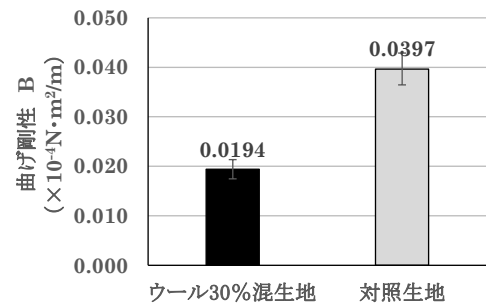


図2 生地の曲げ剛性

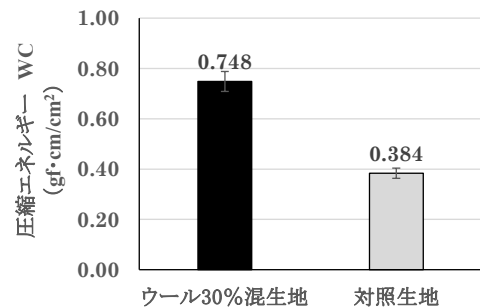


図3 生地の圧縮エネルギー

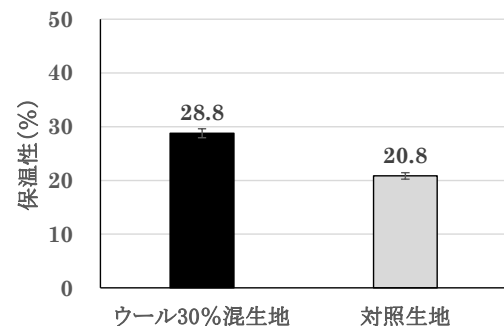


図4 生地の保温性

地であれば、糸は撚糸するより引き揃えて使用した方が柔らかくなる。ウール 30%混紙糸は対照紙糸に比較してやや太く、また、撚糸して使用しているにもかかわらず曲げ剛性が低い。ウール繊維を紙糸に混合することで、柔らかい風合いの生地が得られたと考えられる。



図5 ウール30%混紙糸で試作した靴下



図6 ウール30%混生地で試作したカットソー

図3に生地圧縮エネルギーを示す。ウール繊維を紙糸に混合することで、圧縮エネルギーが大きくなり、生地が圧縮されやすくなることが分かった。また、圧縮に対する回復性も向上した。

図4に生地の保温性を示す。ウール30%混生地は対照生地と比較して保温性が向上している。また、定常熱伝導率、最大熱流束はともに低下した。これらは、狙い通り、ウール繊維の特性が紙糸に付与された結果と考えられる。

3.4 製品試作

図5にウール30%混紙糸で試作した靴下、図6にウール30%混生地で作成したカットソーを示す。それぞれ、酸性染料で先染めした糸を使用した。靴下の編成、カットソー作製に際し大きな問題は認められなかった。

4 まとめ

ウール繊維を混合した紙糸の水分率、消臭性、及び抗菌性を評価した。ウール繊維の混合率が増加するに従い、20℃65%RH、30℃90%RHの両条件とも水分率は上昇した。アンモニアに対する消臭性は SEK 評価基準を満足するようになった反面、イソ吉草酸、ノネナールに対しては基準を満たさなかった。抗菌防臭効果は認められなかった。

ウール繊維を30%混合した紙糸を使用してニット生

地を作製しその特性を評価した。その結果、紙布特有のシャリ感を有する一方で、柔らかく、圧縮されやすく、また、圧縮回復性が優れた紙布を得られることが分かった。保温性は向上し、定常熱伝導率、最大熱流束は低下した。これらはウール繊維の持つ特性が紙糸に付与された結果と考えられる。靴下、カットソーを試作した結果、試作段階で大きな問題は認められなかった。

【謝 辞】

サンプルの試作などご協力いただきましたカワボウ繊維株式会社様、大福製紙株式会社様、株式会社東洋繊維様に深く感謝いたします。

【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.1, pp45-48,2020
- 2) 林ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.2, pp57-60,2021
- 3) 林ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.3, pp51-54,2022
- 4) 林ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp49-52,2023
- 5) 林ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp65-67,2024
- 6) 林,(一財)越山科学技術振興財団研究助成金 R6 年研究成果報告書,未公開
- 7) 日本繊維機械学会誌,染色仕上研究部会機関誌「染色」,Vol61,No.8, p29,1998

複合材料

E V 向け軽量化部材の開発（第3報）

鈴木貴行*、浅倉秀一*

Development of lightweight composite materials for Electric Vehicles（Ⅲ）

SUZUKI Takayuki* and ASAKURA Shuichi*

本研究では、炭素繊維熱可塑性樹脂（CFRTP）を用いたハニカム試験片を射出成形により作製し、その特性を評価した。流動解析と位相コントラスト X 線 CT 測定の結果、CFRTP を一定方向に均一に射出することで、ウェルドラインがなく、炭素繊維がリブ方向に強く配向したハニカム試験片が成形できることが確認された。また、樹脂単体でハニカムコア部を成形した場合には収縮が生じるが、CFRTP を用いることで収縮を抑制できることが明らかとなった。さらに、4 点曲げ試験により、CFRTP 板単体と比較して、ハニカム試験片の見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率が向上することが示された。加えて、CFRTP 板の異方性による影響をハニカムコア部が軽減することが分かった。

1 はじめに

環境意識の高まりに伴い、電気自動車（EV）への移行が注目されている。EV では航続距離を延ばすためにバッテリー容量を増やすと、バッテリーの総重量が増加し、それに伴い消費電力も増加してしまう。そのため、バッテリー容量を増やしても、必ずしも航続距離の延長にはつながらない。この課題を解決するために、EV では車体を軽量化し、バッテリー重量の増加分を軽減することが求められている。具体策の一つとして、金属製部品を軽量かつ高強度な炭素繊維複合材料に置き換える手法がある。一方、自動車産業においては大量生産が求められるため、射出成形が適している。以上のことから、射出成形が可能な炭素繊維強化熱可塑性樹脂（CFRTP）の利用が注目されている。CFRTP を射出成形する場合、炭素繊維の配向方向が強度や収縮に影響を与えるため、繊維配向の制御や評価が重要となる¹⁾。

また、軽量化と高強度化を両立させるためには、材料の選定に加え、構造設計も不可欠である。ハニカム構造部材は隙間なく正六角形を集積させることで、高い曲げ強度と曲げ弾性率を有している。しかし、一般的なハニカム構造部材の成形では、板材とハニカムコア部の接着工程を必要とし、接着剤の硬化不良のリスクがある。CFRTP の射出成形では、熔融した CFRTP が固化する際に板材と一体化するため、接着剤を使用せずに成形が可能である。CFRTP を板材に対して垂直に射出してハニカムコア部を成形した場合、ウェルドラインの形成に加え、不均一な流動により炭素繊維の配向制御が困難となる。そこで、第2報²⁾では、板材に対して平行な方向に CFRTP を射出する方法でハニカム構造部材を成形することを検討した。この方法により、炭素繊維が曲げ荷重に対して最適な配向方向となるため、高強度なハニカム構造

部材の成形が可能である。

本報では、CFRTP を用いたハニカム構造部材の成形および構造特性の評価を目的とした。そのために、流動解析を実施し、位相コントラスト X 線 CT により炭素繊維の配向を評価した。さらに、作製したハニカム試験片の4点曲げ試験を実施したので、その結果を報告する。

2 実験

2.1 ハニカム試験片の成形

ハニカム試験片は、CFRTP 板に対し、ハニカムコア部が平行となる方向に CFRTP を射出成形して作製した。

CFRTP 板には、3K 綾織クロス材とナイロン 6 樹脂（PA6）を複合化した厚さ 2 mm の CFRTP 板（Bond-Laminate 製 TEPEX202）を使用した。この CFRTP 板を 275℃で 7 分間加熱後、ダイヤフラム成形機（Ring Maschinenbau GmbH 製 MEMBRA6）を用い、0.5MPa で成型型に 50 秒間加圧することで、コの字型に成形した。

ハニカムコア部の成形は、堅型射出成形機（楢ソディック製 TR75VRE）を使用し、材料には PEEK と、炭素繊維を 30 wt.%複合化した PEEK+CF30（住友化学(株)製 スミプロイ CK4600）、PA6 と、炭素繊維を 30 wt.%複合化した PA6+CF30（LANXESS AG 製 Durethan B CF30H2.0EF）を用いた。コの字型に成形した CFRTP 板を金型に設置し、ハニカムコア部の厚さが 3 mm および 8 mm となるように射出成形を行った。また、ウォータージェット加工機（Flow International Corporation 製 Flow Mach3 1313b-XD）を用い、図1に示すパターンで穴を

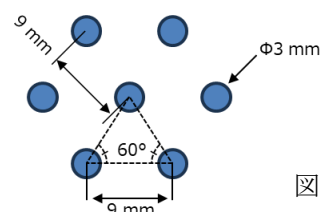


図1 穴形状とパターン

* 次世代技術部

開けた CF RTP 板を、同様の手順でコの字型に成形後、金型に設置してハニカムコア部の厚さが 3 mm および 8 mm となるように射出成形を行った。

ハニカムコア部（厚さ 8 mm）では、コの字型に成形した CF RTP 板を使用せず、図 2 に示す CF RTP 板のプレス成形と射出成形を同時に行うハイブリッド成形によるハニカム構造部材の作製も実施した。CF RTP 板を 275℃ で 3 分間加熱後、堅型射出成形機の型締め力によるプレス成形を行うと同時に、ハニカムコア部を射出成形した。また、CF RTP 板の異方性による影響を評価するために、PA6+CF30 を用いて CF RTP 板の方向が射出方向に対して、0°、30°、45°、60° となるハイブリッド成形も実施した。ハニカム試験片は、ハニカムコア部の射出成形後に試験片を 100×60 mm に切り出したものとした。

2.2 樹脂流動解析

流動解析ソフト（Autodesk, Inc. 製 Moldflow Insight Premium）を使用し、ハニカムコア部の射出成形時のシミュレーションを実施した。想定材料には PEEK および PEEK+CF30 を用いた。収縮の予測は変位量を用い、炭素繊維の配向予測は繊維配向テンソルを用いて評価した。

2.3 位相コントラスト X 線 CT 測定

位相コントラスト X 線 CT システム（株式会社島津製作所製 Xctal 5000）を使用して、PEEK+CF30 で成形したハニカムコア部（厚さ 3 mm）のハニカム試験片を測定した。測定条件は管電圧 70kV、管電流 714 μ A とした。

2.4 4 点曲げ試験

2.1 で作製したハニカム試験片の見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率を評価するため、万能試験機（Instron Corporation 製 万能試験機 5985 型）を使用し、4 点曲げ試験を行った。ここで、見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率としたのは、ハニカム試験片で利用した CF RTP 板の厚みと幅から算出した断面積を用いており、ハニカム部の断面積や断面二次モーメントを考慮していないためである。4 点曲げ試験治具は、外側支点間距離は 81 mm、内側圧子間距離を 27 mm とした。また、支持治具および圧子の先端半径は 5 mm とし、CF RTP 板が上面になるように荷重をかけた。試験環境は標準状態（温度 23℃、湿度 50%）とし、試験速度は、2 mm/min とした。試験片は 80℃ で 8 時間乾燥後、標準状態で一晩静置したものを用い、試験結果は n=5 の平均値とした。

3 結果及び考察

3.1 樹脂流動解析

厚さ 3 mm のハニカムコア部を CF RTP 板に対して平行に射出成形した場合のウェルドサーフェイスに関する予測結果を図 3(a) に示す。分岐した樹脂が合流する箇所でウェルドサーフェイスが形成される。しかし、射出方向に対して平行な辺を持つように六角形のグリッド構造を配置したハニカムコアでは、樹脂を一定方向に均一に射出することで、図 3(b) に示すようにウェルドサーフェ

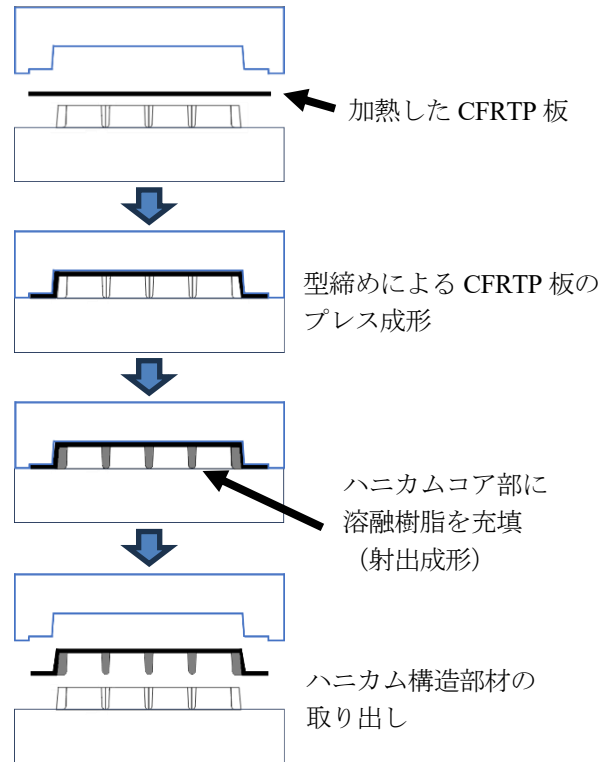


図 2 ハイブリッド成形の手順

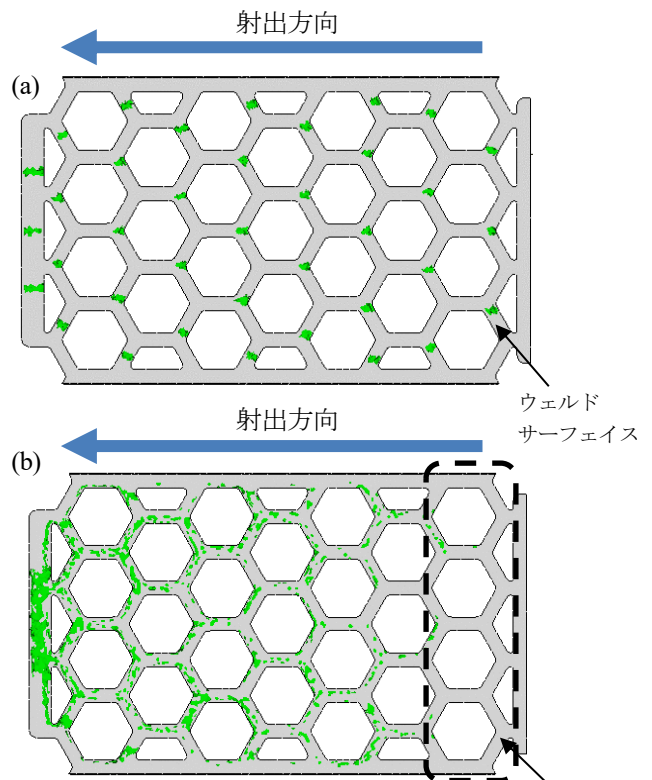


図 3 ウェルドサーフェイスの予測結果

- (a) ウェルドサーフェイス形成予測位置
(b) ウェルドサーフェイスの移動予測結果

ウェルド
サーフェイス
の消失

スがある場合にとどまらない。そのため、図 3(b) の点線部で囲んだ箇所のように、樹脂の合流点で形成されたウェルドサーフェイスが移動し、最終的に消失することが予測された。したがって、図 3 のような金型設計により、

ウェルドラインが無いハニカムコア部が成形できるため、ハニカムコア部の高強度化が可能であると考えられる。

また、ハニカムコア部（厚さ8mm）におけるPEEK および PEEK+CF30 の収縮による変位量の予測結果を図4に示す。カラーバーは元の形状からの変位量を示している。図4(a)より PEEK 樹脂のみの場合、元の形状から1mm以上の収縮が予測された。実際に樹脂単体であるPA6およびPEEKを用いてハニカム試験片を成形すると、図5のようにハニカムコア部がCFRTP板から剥離するハニカム試験片が確認された。また、穴を開けたCFRTP板材を使用した場合や、ハイブリッド成形によるハニカム試験片では、ハニカムコア部がCFRTP板から剥離せず、図6に示すような反りが発生した。したがって、ハニカムコア部を樹脂のみで射出成形すると、流動解析の予測結果と同様の収縮が発生していると推察される。

一方、図4(b)より PEEK+CF30 の場合、ハニカムコア部の収縮が発生しない予測結果となった。さらに、炭素繊維の配向予測結果を図7に示す。カラースケールバーは炭素繊維の配向度を示しており、数値が大きいほど強く配向していることを表す。樹脂を一定方向に均一に射出することで、ハニカムコア部のリブで炭素繊維が強く配向することが分かった。また、図7の点線で囲った樹脂が分岐する箇所では、炭素繊維の配向度が低下することが予測された。炭素繊維がリブ方向に強く配向したことで、第1報で報告したように収縮を抑制する予測になったと推察される。実際にPA6+CF30 および PEEK+CF30 を用いて射出成形したハニカム試験片において、試験片の反りは確認されなかった。CFRTP板に対し、ハニカムコア部が平行となる方向に樹脂を射出成形する場合、繊維強化樹脂を用いることで収縮を抑制し、反りのないハニカム試験片が成形できることが分かった。

3.2 位相コントラストX線CT測定

PEEK+CF30を用いてハニカムコア部（厚さ3mm）で作製したハニカム試験片を位相コントラストX線CTで測定した結果を図8に示す。第2報で報告したとおり、位相コントラストX線CT測定では、X線の位相差を利用するため、炭素繊維の配向を広範囲で評価することが可能である。炭素繊維の配向方向は色で表示され、カラーサークルと同じ方向に炭素繊維が配向していることを示す。また、色が明るいほど配向が強いことを意味する。

図8(a)よりウェルドラインのないハニカムコア部が成形されていることが確認できた。さらに、図8(b)に図8(a)の点線部の拡大図を示す。ハニカムコア部のリブ方向とカラーサークルの色が、点線の矢印方向で一致している。つまり、ハニカムコア部のリブ方向に炭素繊維が強く配向していることが分かった。また、樹脂の分岐地点では色が暗くなっていることから、樹脂流動解析の結果と同様に配向度が低くなっていることが確認された。したがって、流動解析で予測したとおり、ウェルドラインが無く、リブ方向に炭素繊維が強く配向したハニカム

コア部が射出成形できていることが分かった。

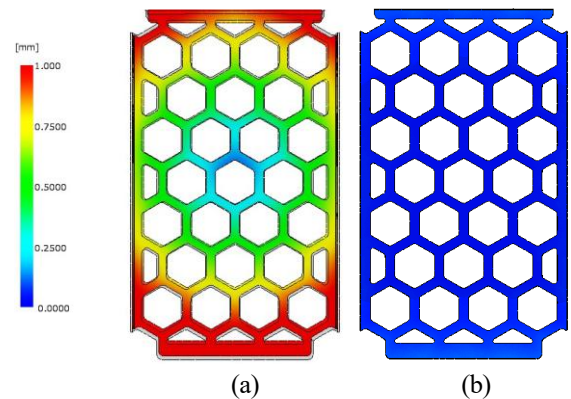


図4 ハニカムコア部の収縮予測結果
(a) PEEK (b) PEEK+CF30



図5 ハニカムコアの剥がれ



図6 ハニカム試験片の反り

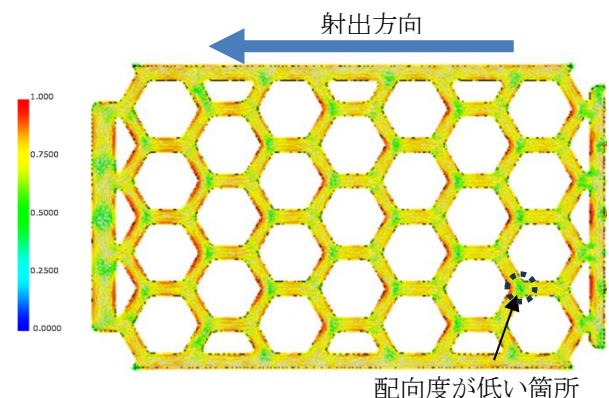


図7 繊維配向予測結果

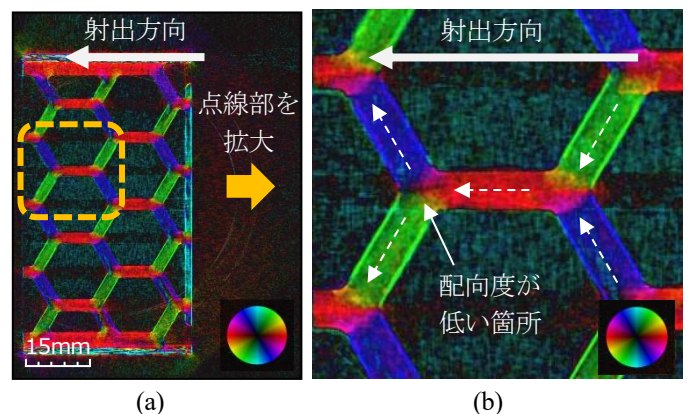


図8 位相コントラストX線CTの測定結果
(a) 位相コントラストX線CTの測定結果
(b) 点線部の拡大図

3.3 4点曲げ試験

3.3.1 ハニカムコア部のみ

ハニカムコア部のみの4点曲げ試験における最大荷重を図9に示す。PA6+CF30 および PEEK+CF30 ではハニカムコア部が破壊したが、PA6 および PEEK ではハニカムコア部が破壊せずに変形したのみであったため、降伏点を最大荷重とした。ハニカムコア部の厚さを3mmから8mmに増やすことで耐荷重が向上し、PA6 よりも PEEK を使用した方が高い耐荷重を示した。さらに、樹脂単体の PA6 および PEEK よりも、炭素繊維を複合化した PA6+CF30 および PEEK+CF30 の方が高い耐荷重を示した。0° 方向の CFRTP 板の耐荷重は約 1.9 kN であり、耐荷重が最も高かった PEEK+CF30 のハニカムコア部(厚さ8mm)と比較すると約1.5倍であった。

3.3.2 CFRTP 板で作製したハニカム試験片

コの字型に成形した CFRTP 板を用い、射出成形によりハニカムコア部を作製したハニカム試験片の4点曲げ試験における見かけの曲げ強度の結果を図10に、見かけの曲げ弾性率の結果を図11に示す。

見かけの曲げ強度は、PEEK を用いたハニカムコア部(厚さ8mm)が最も高く、1118MPaであった。ハニカムコア部の厚さが3mmの場合、ハニカムコア部の耐荷重が低いため、見かけの曲げ強度の向上は限定的であった。一方、ハニカムコア部の厚さが8mmの場合、見かけの曲げ強度の向上が確認された。また、樹脂単体の PA6 および PEEK の方が、炭素繊維を複合化した PA6+CF30 および PEEK+CF30 よりも見かけの曲げ強度が高い結果となった。PA6 および PEEK では、ハニカムコアの厚さが3mmと8mmのいずれの場合でも、CFRTP 板が破断したのに対し、PA6+CF30 および PEEK+CF30 では、CFRTP 板の破断ではなく、ハニカムコア部が破壊した。PA6+CF30 および PEEK+CF30 では、ハニカムコア部の破壊が先に起こるため、樹脂単体である PA6 および PEEK のように、CFRTP 板が破断するまで荷重を支えることができず、結果として見かけの曲げ強度が向上しなかったと推察される。

穴を開けた CFRTP 板をコの字型に成形し、射出成形によりハニカムコア部を作製したハニカム試験片の見かけの曲げ強度は、穴を開けていない CFRTP 板を用いて作製したハニカム試験片よりも低い値を示した。これは、穴を開けたことにより CFRTP 板自体の強度が低下したためと推察される。ハニカムコア部(厚さ8mm)の試験片では、穴を開けていない CFRTP 板を用いて作製したハニカム試験片と同様に、樹脂単体の PA6 および PEEK の方が、PA6+CF30 および PEEK+CF30 よりも見かけの曲げ強度が高い結果となった。また、ハニカムコア部(厚さ3mm)の試験片では、すべての材料で CFRTP 板が破断したのに対し、ハニカムコア部(厚さ8mm)の試験片では、PA6 および PEEK を用いた場合は CFRTP 板

が破断し、PA6+CF30 および PEEK+CF30 を用いた場合は CFRTP 板ではなく、ハニカムコア部が破壊した。

見かけの曲げ弾性率は、樹脂単体の PA6 および PEEK よりも炭素繊維を複合化した PA6+CF30 および PEEK+CF30 の方が向上した。PA6+CF30 および PEEK+CF30 においては、穴を開けた CFRTP 板を用いて作製した試験片の方が、穴を開けていない CFRTP 板を用いて作製した試験片よりも高い見かけの曲げ弾性率となった。穴を開けた CFRTP 板を使用することで、開けた穴に射出した樹脂が流れ込み、アンカー効果によりハニカムコア部が CFRTP 板と一体化したためと推察される。

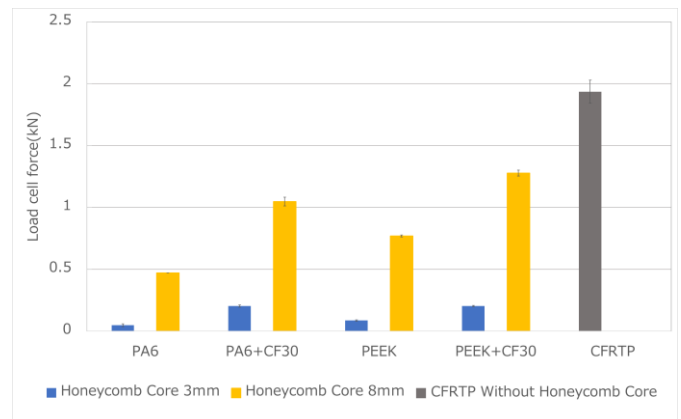


図9 ハニカムコアのみの4点曲げ試験結果

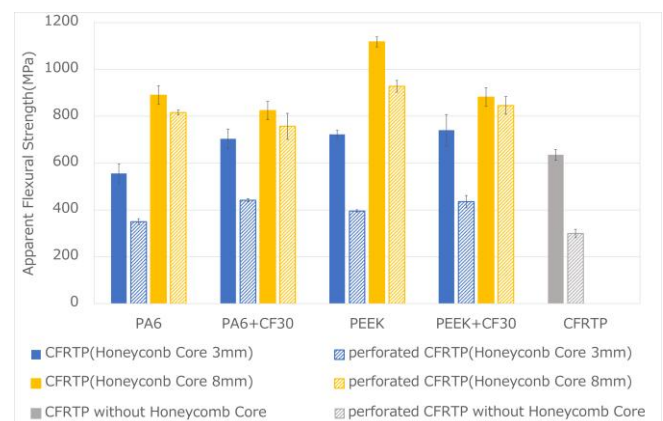


図10 ハニカム試験片の4点曲げ試験結果
(コの字型 CFRTP における見かけの強度)

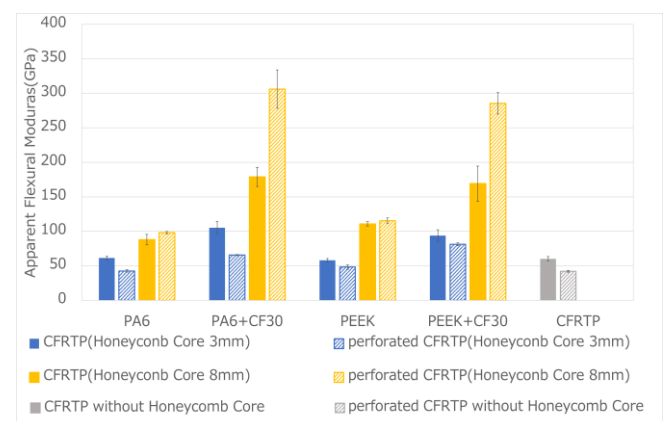


図11 ハニカム試験片の4点曲げ試験結果
(コの字型 CFRTP における見かけの弾性率)

3.3.3 ハイブリッド成形で作製したハニカム試験片

ハイブリッド成形により作製したハニカムコア部（厚さ 8 mm）のハニカム試験片を用いた 4 点曲げ試験における見かけの曲げ強度の結果を図 12、見かけの曲げ弾性率の結果を図 13 に示す。樹脂単体の PA6 および PEEK における見かけの曲げ強度では、ハイブリッド成形により作製したハニカム試験片よりも、図 10 に示すコの字型に成形した CFRTP 板を用いて作製したハニカム試験片の方が高い結果となった。また、穴を開けた CFRTP 板材を用いてハイブリッド成形により作製した試験片の見かけの曲げ強度には、穴を開けていない CFRTP 板を用いてハイブリッド成形したハニカム試験片と比較すると、樹脂単体の PA6 では見かけの曲げ強度が低下し、PEEK では向上していた。炭素繊維を複合化した PA6+CF30 および PEEK+CF30 では、同程度の見かけの曲げ強度であった。PA6、PA6+CF30 および PEEK+CF30 ではハニカムコア部が破壊したのに対し、PEEK ではハニカムコア部の部分延伸(ネッキング)が確認された。

一方、見かけの曲げ弾性率においては、PA6+CF30 および PEEK+CF30 を用いてハイブリッド成形により作製したハニカム試験片は、コの字型に成形した CFRTP 板を用いたハニカム試験片よりも高い結果とな

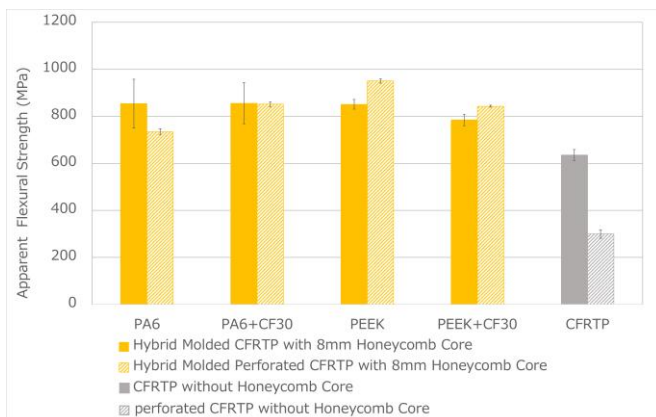


図 12 ハニカム試験片の 4 点曲げ試験結果
(ハイブリッド成形における見かけの強度)

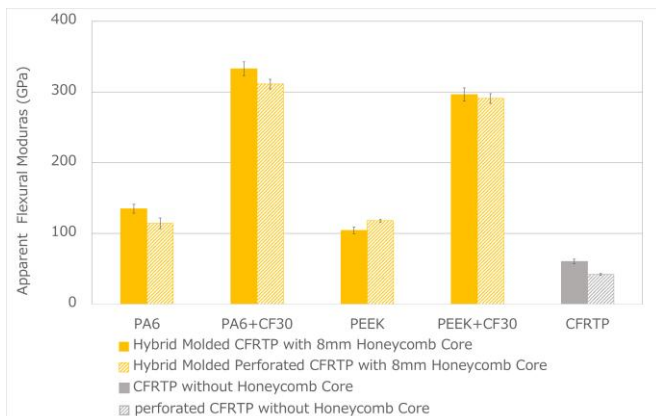


図 13 ハニカム試験片の 4 点曲げ試験結果
(穴あき CFRTP を用いてハイブリッド成形で作製したハニカム試験片)

り、PA6+CF30 を用いてハイブリッド成形により作製したハニカム試験片が最も高く、333GPa であった。

樹脂単体の PA6 および PEEK を用いてハイブリッド成形により作製したハニカム試験片の見かけの強度が、コの字型に成形した CFRTP 板を用いて作製した試験片のように向上しなかったのは、CFRTP 板とハニカムコア部が一体化したことで、ハニカムコア部の変形が集中したためと考えられる。コの字型に成形した CFRTP を用いたハニカム試験片では、ハニカムコア部の剥離が発生したため、図 14 に示すように CFRTP 板とハニカムコア部の一体化が不十分な箇所があると推察される。このような状態の試験片を曲げた場合、ハニカムコア部の樹脂が変形を広い範囲に分散させるため、曲げ荷重を分散して支えることが可能となり、見かけの曲げ強度が向上したと考えられる。

一方、ハイブリッド成形したハニカム試験片では、CFRTP 板とハニカムコア部が強固に一体化していると考えられる。この状態の試験片を曲げた場合、図 15 に示すように、ハニカムコア部の変形が局所的に集中する。その結果、曲げ荷重を分散させることができないため、PA6 で成形したハニカム試験片では、樹脂単体であるにも関わらず、ハニカムコア部が破壊したと考えられる。また、穴を開けた CFRTP 板と PEEK を用いてハイブリッド成形により作製したハニカム試験片では、CFRTP 板に穴を開けたことで強度が低下し、PEEK の部分延伸(ネッキング)が発生する条件となったことで、荷重の一部を分散させることができたと考えられる。そのため、穴を開けた CFRTP 板と PEEK を用いてハイブリッド成形により作製した試験片が穴を開けていない CFRTP 板と PEEK を用いてハイブリッド成形により作製した試験片よりも見かけの曲げ強度が向上したと推察される。

したがって、ハイブリッド成形で作製したハニカム試験片は CFRTP 板とハニカムコア部が一体化したことで、PA6+CF30 および PEEK+CF30 では見かけの曲げ弾性率が向上し、樹脂単体である PA6 および PEEK におい



図 14 コの字型 CFRTP を用いたハニカム試験片のイメージ

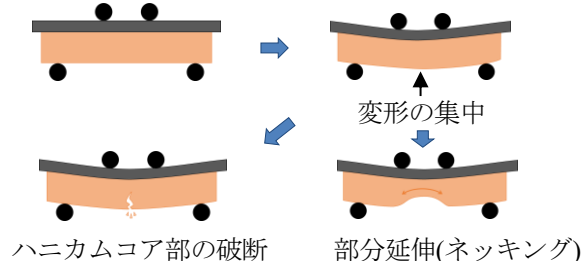


図 15 ハイブリッド成形したハニカム試験片のイメージ

てはコの字型に成形した CFRTP 板を用いて作製したハニカム試験片と異なり、見かけの曲げ強度が向上しなかったと推察される。

3.3.4 異方向の CFRTP 板におけるハニカム試験片

CFRTP 板の異方性による見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率の影響を評価するため、図 16 に示すように、CFRTP 板の方向が射出方向に対して 0° 、 30° 、 45° 、 60° となるハニカム試験片を作製した。ハニカム試験片はハイブリッド成形により作製し、ハニカムコア部は PA6+CF30 を用い、厚さは 8 mm とした。

作製したハニカム試験片の 4 点曲げ試験結果を図 17 に示す。CFRTP 板単体およびハニカム試験片(8 mm)のいずれにおいても、 0° 方向が最も高い見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率を示し、 45° 方向で最も低い値を示した。 0° 方向と 45° 方向の見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率を比較すると、CFRTP 板単体の場合、見かけの曲げ強度は 636MPa から 425MPa に約 3 分の 2 に低下し、見かけの曲げ弾性率は 60GPa から 29GPa に約 50% 低下した。一方、ハイブリッド成形したハニカム試験片(厚さ 8 mm)では、見かけの曲げ強度が 856MPa から 752MPa へと約 12% 低下し、見かけの曲げ弾性率は 332GPa から 260GPa へと約 22% 低下した。

以上より、ハニカムコア部が CFRTP 板の異方性を補助することで、異方性による強度の低下を 12% に、弾性率の低下を 22% に抑えることができた。また、CFRTP 板単体では、曲げ荷重により急激な破断が発生するが、ハニカム試験片ではハニカムコア部が先に破壊するため、CFRTP 板の破断が抑制された。このため、ハニカム構造部材とすることで、荷重がかかった際の破壊形態において、安全性の向上が期待できる。

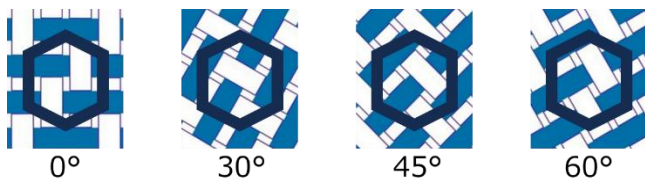


図 16 CFRTP 板方向とハニカムコア方向のイメージ

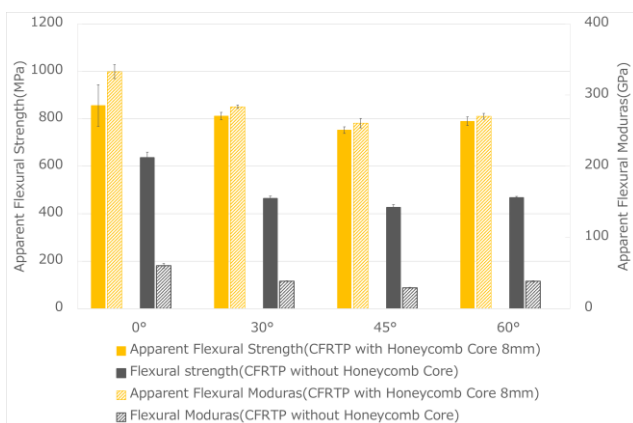


図 17 ハニカム試験片の 4 曲げ試験結果 (CFRTP の方向違い)

4 まとめ

本研究では、ハニカム試験片における流動解析結果と成形した試験片の位相コントラスト X 線 CT 測定の比較、および 4 点曲げ試験から、以下の知見が得られた。

1. 金型を設計および CFRTP の射出条件を最適化することで、ウェルドラインがなく、リブ方向に炭素繊維が強く配向したハニカムコア部を成形できることが分かった。
2. CFRTP ではハニカムコア部のリブ方向に炭素繊維を強く配向させることで成形後の収縮を低減し、剥離や反りを抑制できることが分かった。
3. 今回検討したハニカム試験片においては、見かけの曲げ強度は、CFRTP 板をダイヤフラム成形し、PEEK を用いてハニカムコア部の厚さを 8 mm で作製した試験片が最も高く、1118MPa であった。また、見かけの曲げ弾性率は、PA6+CF30 を用いてハイブリッド成形により作製した試験片が最も高く、333GPa であった。ハニカム試験片では CFRTP 板とハニカムコア部の一体化の有無に加え、それぞれの厚さおよび物性が重要な要素であることが分かった。
4. CFRTP 板の異方性による影響をハニカムコア部が補助し、全体の機械的特性を向上させる効果があった。また、 0° 方向で曲げ荷重をかけた場合の破壊形態において、CFRTP 板では激しく破断するのに対し、ハニカム試験片ではハニカムコア部が先に破壊し、CFRTP 板の破断が起こらないため、安全性が高いことが分かった。

ハニカムコア部で破壊したハニカム試験片を観察すると、多くの試験片が六角形の頂点で破壊していた。六角形の頂点で荷重が集中することに加え、流動解析の結果で示されたように炭素繊維の配向が弱くなっているためと考えられる。したがって、六角形の頂点部の形状を改良することで、ハニカム試験片のさらなる高強度化が可能であると考えられる。また、CFRTP 板単体では、曲げ荷重により破断すると、使用不能となり廃棄するしかないが、ハニカムコア部と一体化させることで、CFRTP 板よりも先にハニカムコア部が破壊することが分かったため、ハニカムコア部を交換することで CFRTP 板を再利用する活用方法も検討できる可能性がある。

【謝 辞】

本研究の一部は、株式会社島津製作所のご協力のもと実施いたしました。ここに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 鈴木ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp61-64,2023
- 2) 鈴木ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp75-78,2024

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1報）

—持続可能なセルロース繊維を用いたPP複合材料の機能強化—

浅倉秀一*、鈴木貴行*

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

- Enhancement of PP composites using sustainable cellulose fibers -

ASAKURA Shuichi* and SUZUKI Takayuki*

本研究では、再生プラスチックの物性低下という課題に対し、低コストかつ環境負荷の少ないトイレットペーパー由来セルロース（TPF）をポリプロピレン（PP）の補強材として活用する手法を検討した。PPに1～5 wt%のTPFを添加し、混練条件および無水マレイン酸変性PP（MAPP）による界面改質の影響を評価した。その結果、TPF 1～3 wt%の添加により、PPの引張強度は最大36%、曲げ強度は27%向上し、荷重たわみ温度は約20℃上昇した。一方で、シャルピー衝撃強度は低下傾向を示したが、MAPP添加による界面強度向上がこれを一定程度抑制した。本研究の成果は、再生プラスチックの機能改善を実現し、資源循環型社会の構築に貢献する可能性を示すものである。

1 はじめに

ポリプロピレン（PP）は、その優れた耐久性、加工性、低コストといった特性から、自動車、建築用資材、エレクトロニクス分野など幅広い産業で欠かせない素材である。しかし、その広範な利用に伴い、廃プラスチックの増加が深刻な課題となっている。特に、海洋汚染や埋立地の逼迫などの環境問題が世界的に懸念されており、再生プラスチックの利用義務化が進むと考えられる。

リサイクルされたPPは、バージン材料と比較して機械的強度や耐久性が低下する傾向があるため、リサイクル素材としての用途が制限される。このような性能低下を補完し機能性を回復させるためには、新たな強化手法の導入が必要不可欠である。また、再生工程における製造コストの低減も重要な課題である。これらの問題に取り組むことは、廃プラスチック削減に寄与するのみならず、石油由来素材への依存を低減し、持続可能な循環型経済への移行を促進する上でも意義がある。

このような背景から、バイオ由来の素材をポリマー複合材の強化材として活用する取り組みが注目されている。その中でも、セルロース繊維、特にセルロースナノファイバー（CNF）は、高い比強度、軽量性、生分解性などの特性を有し、有望な候補とされる¹⁾。これらの繊維は、リサイクルPPの機械的および熱的特性を向上させる持続可能な代替手段を提供するとともに、環境負荷の低減にも寄与する。CNFは水に分散した状態で安定に存在しているため、水に不溶なPPとは直接混ざらない。そのため、水分を含まないセルロース繊維を用いた複合化が求められている。

本研究では、これまでセラミックスや石灰の成形体の補強材として報告してきた環境負荷の少ないCNFやパルプ繊維を応用し、トイレットペーパー由来のセルロー

ス材料に着目した^{2)~3)}。この素材は身近でありながら、文献での報告例がほとんどなかった。そのため、本材料をPPの補強材として利用可能かどうかを検討し、機械的強度や耐熱性などの向上効果を評価した。

2 実験方法

2.1 材料

本研究では、PPとしてサンアロマー製のホモポリマーPM900Aを使用した。補強材として、以下のトイレットペーパー由来セルロース繊維（Toilet paper fiber; TPF）と3種類の比較対象のセルロースを用いた。

- ・トイレットペーパー（美濃製紙製）
- ・日本製紙製の粉末セルロース（KCブロック）
- ・CNFメーカーA社製のPP/CNF 30 wt%マスターバッチ
- ・CNFメーカーB社製のセルロースパウダー

2.2 混練プロセス

PPを200℃に保持した混練機（ブランベンダー社製PLASTI-CORDER PL-2000）で熔融させた後、セルロースを少量ずつ添加した。添加量はPPに対してセルロースが30 wt%となるよう調整した。すべてのセルロース添加後、混練機の回転数を60 rpmに設定し、混練時間を5分～60分の条件で実施した。この過程で得られたPP/セルロース複合混練物を、4 mmメッシュを用いて連続式ミル（IKA MF10 ベーシック）で粉末状に加工することで、30 wt%のPP/セルロースマスターバッチを得た。

2.3 ペレット化と成形

粉末状のマスターバッチをPPペレットとドライブレンドすることで、セルロース含有率を1～5 wt%に調整した。その後、卓上二軸スクリュエエクストルuder（Thermo Scientific™ Process11）を用いて複合ペレットを製造し、射出成形機（日精樹脂工業NPX7-1F）でJIS規格に準拠したダンベル型および短冊型の試験片に成形した。

* 次世代技術部

2.4 物性評価

引張試験および曲げ試験は、万能試験機（島津製作所オートグラフ AG20-KNGMI）を用いて実施した。試験速度は 2 mm/min とし、引張強度および引張弾性率はダンベル型試験片、曲げ強度および曲げ弾性率は、短冊型試験片を用いて測定した。

シャルピー衝撃強度の測定は、衝撃試験機（ZWICK 社）を用い、短冊型試験片に対してフラットワイズ方向（ノッチ無し）で行った。

荷重たわみ温度（HDT）は、HDT 試験装置（東洋精機製作所 3M-2 型）を使用し、短冊試験片に対して曲げ荷重 0.45 MPa、昇温速度 120 °C/h の条件下で測定した。

複合成形品中のセルロースの分散状態および繊維形態は、三次元粗さ解析電子顕微鏡（エリオニクス製 ERA-600G）を用いて観察した。

3 結果および考察

3.1 TPF の混練特性および分散性

図 1 に、前報で報告した石灰との混合が可能であったドライパルプシートおよびペーパーシュレッターダストを熔融 PP に投入した結果を示す。石灰との混合では、原料として加える水の存在により、混合の段階で均一に離解・分散が可能であった。しかしながら、熔融 PP 中ではパルプシートは全く離解せず、シュレッターダストも 60 分混練しても大部分が離解されなかった。そこで本研究では、石灰と水との混合がシュレッターダストやパルプシートよりもさらに容易であった TPF を使用した。TPF は、普通紙と異なり紙力増強剤を含まず、水溶性のでん粉がセルロース繊維のバインダーとして機能しているため、水と混合した際に容易にばらばらとなり分散する。混練機内で熔融した PP 中に TPF を投入した場合でも、PP のせん断力により迅速にばらばらとなり、均一な混合が確認された。一方、TPF は容積が大きいいため、PP に対して 30 wt% 含む複合材料を作製する際の投入工程には手間がかかるという課題があった。



図 1 ドライパルプシート(a)、ペーパーシュレッターダスト(b)、ドライパルプシートと PP の混練物(c)、ペーパーシュレッターダストと PP の混練物(d)の画像

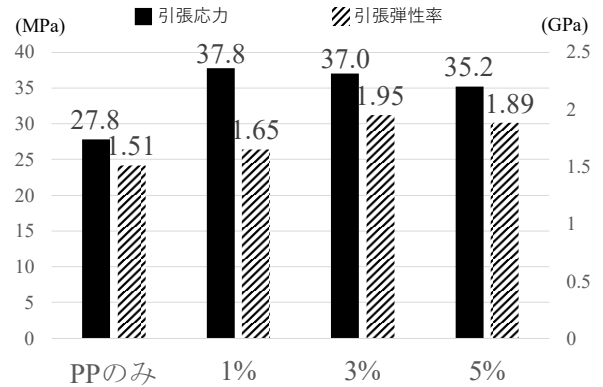


図 2 PP/TPF 複合試験片の引張特性

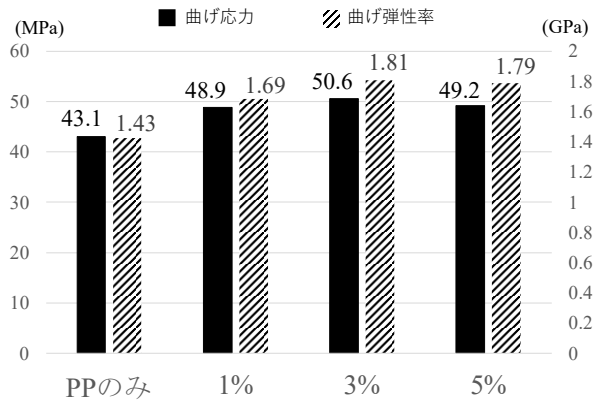


図 3 PP/TPF 複合試験片の曲げ特性

3.2 機械的特性の評価

図 2 および図 3 に示す引張試験および曲げ試験の結果から、以下の傾向が得られた。

・引張特性

PP 単体の引張応力は 27.8 MPa であったが、TPF 1 wt% の添加により 37.8 MPa へと 36% 向上した。また、引張弾性率は、TPF 3 wt% の添加により最も高くなり、PP 単体比で 29% 向上した。

・曲げ特性

TPF を 3 wt% 添加した試験片で最大値を示し、曲げ応力および曲げ弾性率がそれぞれ PP 単体と比較して 17% および 27% 向上した。

なお、従来、20～30 wt% 程度のセルロース添加が報告される中、本研究では 1～3 wt% という少量で 30% 前後の強度向上が達成された点は、材料コスト低減および加工性の観点から有意義であると考えられる。

3.3 熱特性の評価

荷重たわみ温度（HDT）の測定結果では、TPF の添加量が増加するにつれて上昇し、5 wt% 添加では 105 °C となり PP 単体（86 °C）より約 20 °C 向上した。CNF は低温から 200 °C 近くまで弾性率が安定しているという性質の

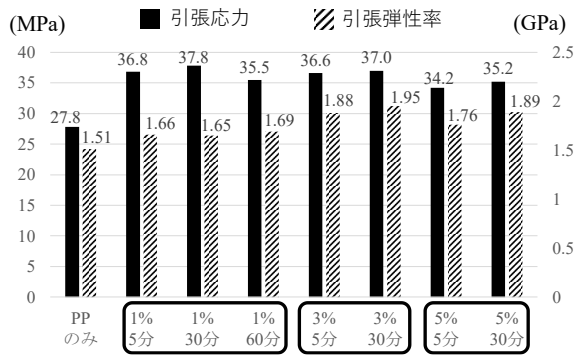


図4 TPF 濃度および混練時間が引張特性に与える影響

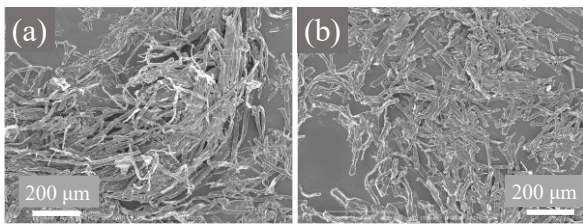


図5 PP 中の TPF の SEM 像 (混練時間 : 5 分(a)、30 分(b))

ため、本研究でのセルロース繊維でもその剛性により HDT 向上に寄与したと考えられる。以上により PP のような高温で軟化する樹脂に TPF 由来のセルロースを複合化することで、変形抵抗が向上し、耐熱性が付与された。

3.4 混練時間の影響

図4に TPF 添加量 1 wt%では5分、30分、60分、TPF 添加量 3 および 5 wt%では5分および30分の混練時間で作製した試験片で評価した結果を示す。どの TPF 添加量の割合でも、5分より30分の混練で強度が向上した。一方、60分の混練では、混練物の粘度が大きく下がり、セルロースもさらに変色しており、引張応力も低下した。したがって、過度な混練は避け、30分程度の混練が適切であると考えられる。図5の SEM 像では、混練時間が短い場合(5分)は繊維の長さが長いものの凝集が見られ、30分混練の場合は、繊維は短くなるものの凝集がほぼ解消されていることが分かる。これらの結果から、強度向上には単に繊維の長さだけでなく、セルロース繊維の分散性がより重要であることが明らかとなった。また、60分の混練では、分子量の低下に起因すると思われる PP の粘度低下や、セルロースの熱劣化・変色が進行する可能性があるため、過度な混練は逆効果になり、適切な混練時間の選定が必要である。

3.5 界面強度の改善効果

セルロース添加量が増加しても引張・曲げ強度がそれほど向上しなかった背景として、PP 中へのセルロース分散性や PP とセルロース繊維との界面強度が影響して

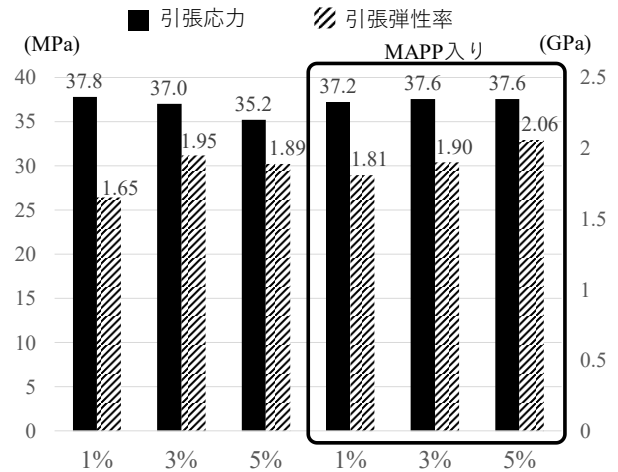


図6 MAPP 添加の有無が引張特性に与える影響

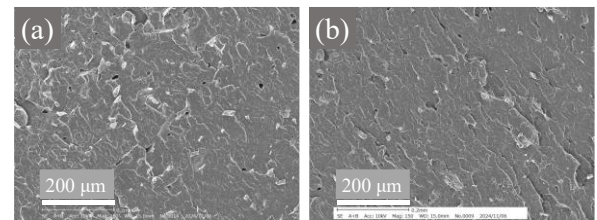


図7 PP/TPF 複合材料の断面 SEM 像 (MAPP 無し(a)、MAPP 有り(b))

いると考えられる。これらの問題に対処するため、無水マレイン酸変性PP (MAPP) を初期混練時にセルロースに対して 5 wt%の割合で添加した⁴⁾。

図6は、MAPPの有無による TPF 添加量 1、3、5 wt% 試験片の引張試験結果を示しており、MAPPを添加すると、TPFを増量しても引張応力の低下が抑制され、弾性率が向上した。図7の SEM 観察結果から、MAPP 添加試験片ではセルロース繊維の引き抜きが減少していることが確認された。これは、MAPPの添加により PP とセルロース繊維の界面強度が向上し、繊維の分散も改善された可能性がある。この結果を踏まえ、MAPPはPPとセルロース繊維の親和性を高め、複合材料の機械的特性を向上させる効果があると考えられる。

HDT 測定による耐熱性に関しても、セルロース繊維と PP 間の界面強度が高いと、高温領域でも繊維の高い剛性が効果的に伝達され、さらに均一に繊維が分散されている方が局所的な応力集中が避けられるため、全体として高い剛性を維持できると考えられる。今回の MAPP の添加では、セルロースの添加量が 1、3 wt%では HDT はほぼ変わらず、5 wt%では 1℃高くなっただけであった。したがって、今後は MAPP の添加量や他の界面改質剤との併用効果についても検討する必要がある。

3.6 衝撃特性の評価と各種セルロースとの比較

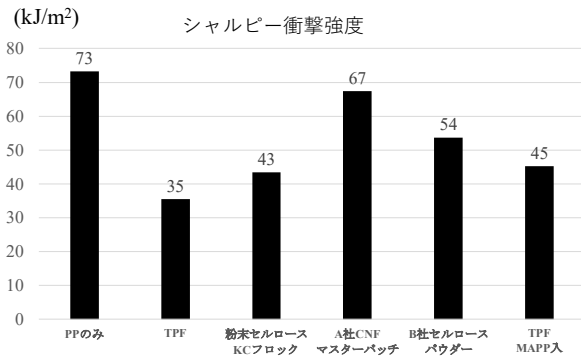


図 8 PP に添加するセルロースの種類がシャルピー衝撃強度に与える影響

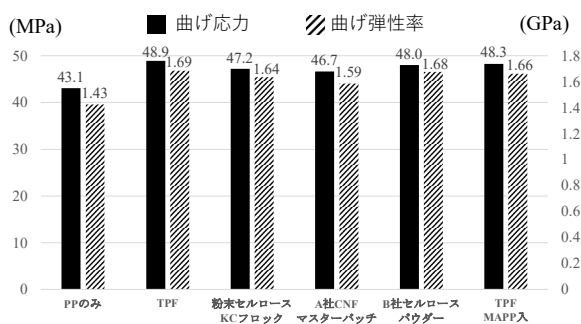


図 9 セルロースの種類が曲げ応力および曲げ弾性率に与える影響

シャルピー衝撃試験の結果、PP 単体の衝撃強度は 73 kJ/m²であったが、TPF を添加すると強度が半減する傾向が確認された。MAPP 添加により衝撃強度の低下は抑制されたが、PP 単体を超えることはなかった。また、図 8 では、TPF および各セルロース材料（KC フロック、A 社製 PP/CNF マスターバッチ、B 社製セルロースパウダー）をそれぞれ PP に対してセルロース分が 1 wt%になるように添加した場合の衝撃強度を比較した。A 社マスターバッチ由来のセルロースを用いた試験片は、PP 単体を上回る衝撃強度は示さなかったものの、比較的高い値を示した。

一方、図 9 に示す各セルロース材料の曲げ試験結果では、いずれのセルロースも PP 単体と比較して曲げ応力および曲げ弾性率が向上した。特に、TPF は低コストながら他のセルロースと同等の強度向上を示した。さらに、図 10 の SEM 像では、KC フロックや B 社のセルロースパウダーは繊維幅が 20～30 μm であるのに対し、TPF 表面にはフィブリル化した CNF に類似する細い繊維が形成されていることが確認された。これは、TPF が再生紙由来であり、叩解工程で繊維表面が毛羽立った状態がその後の製造工程でも保持された結果と考えられる。実際、ピュアパルプ由来の TPF と比較すると、再生紙由来の TPF はフィブリル化が顕著であった。

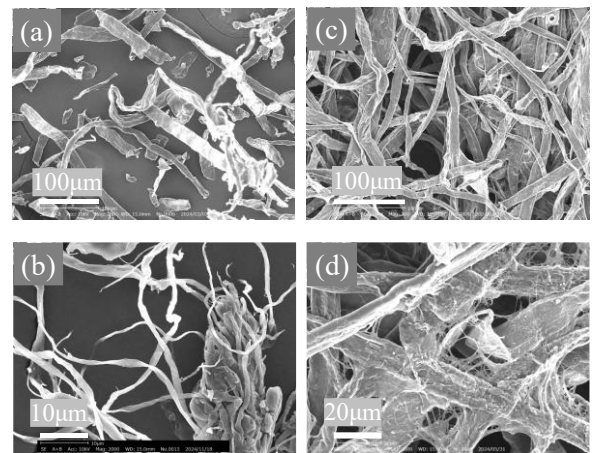


図 10 SEM 画像：KC フロック(a)、B 社セルロースパウダー(b)、TPF(c、d)

以上の結果から、TPF は他のセルロース材料と比較して、太く長い繊維とフィブリル化した細い繊維を含むことが確認された。これにより、少量添加でも引張および曲げ強度が向上した。強度向上の要因は、太い繊維が補強材として機能し、細い繊維がマトリックス樹脂と良好に相互作用するためと考えられる。一方、衝撃強度の低下は依然として課題であり、今後は MAPP などによる界面強化や、ゴム成分の添加、セルロースの表面改質による衝撃吸収効果の向上など、さらなる対策を講じることで改善を試みる予定である。

4 結言

本研究では、トイレットペーパー由来セルロース繊維（TPF）を低コストかつ環境負荷の少ない PP 補強材として活用する手法を検討した。TPF を 1～3 wt%添加することで PP の引張および曲げ強度が向上し、5 wt%添加時には荷重たわみ温度が約 20℃上昇するなど、機械的・熱的特性の改善が確認された。また、PP と TPF の混練時間の最適化や MAPP による PP と TPF 間の界面改質により、セルロースの分散性と PP との結合が向上し、さらなる性能向上が示された。一方、衝撃強度は PP 単独より低下するため、今後は界面改質剤やゴム添加による補強が課題となる。本研究の成果は、再生プラスチックの性能低下を補う有望な手法を示し、資源循環型社会への貢献が期待される。今後は条件最適化と衝撃特性の改善を進め、実用化に向けた材料開発を継続する。

【参考文献】

- 1) Y. Igarashi, et.al., Cellulose Vol.29, pp2985-2998, 2022
- 2) 浅倉ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp71-74, 2024
- 3) 浅倉, 成形加工 Vol.30, No.6, pp243-245, 2018
- 4) 青木, オレオサイエンス, Vol.24, No.5, pp205-210, 2024

二液型接着剤の少量塗布時における混合比を安定化するデバイスの開発 (第3報)

西村太志*、栗田貴明*

Development of a device to mix two component adhesive completely even in a small amount (III)

NISHIMURA Futoshi* and KURITA Takaaki*

二液型接着剤は主剤と硬化剤を塗布前に定められた比率で均一に混合する必要がある。少量ずつ混合・塗布することもできるが、スタティックミキサーを利用すると誰でも均一に、しかも連続して混合・塗布することが可能となる。しかし、ミキサー中に残った接着剤は利用できず廃棄される。本研究は均一に混合でき、同時に内部に残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を目的としている。本報では混合不足の接着剤に対する接着強度への影響を調べた。また、試作したスタティックミキサーで混合した二液型エポキシ接着剤により接着強度を調査した。

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⁾。ボディ底面の骨格構造にウェルドボンドと言われる構造用接着剤とスポット溶接を併用する技術²⁾を用いると、重量増加を抑えながら高剛性化できる。また、EV化によるバッテリー重量増加対策のため、車両構造部材のマルチマテリアル化が進んでいる。鋼材とアルミニウム部材、鋼材とCFRPなどのプラスチック部材を構造用接着剤で接着接合している³⁾。このように接着剤による組立・接合は重要な要素技術となっている。

構造用接着剤の代表であるエポキシ樹脂接着剤は、接着後に加熱（120℃または180℃）すると硬化する一液型接着剤が多く使われてきた。しかし近年ではカーボンニュートラル実現のため、加熱エネルギーの削減が求められている⁴⁾。そのため常温硬化する二液型接着剤が注目されるようになってきた。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る。また、混合直後から次第に硬化が始まるので可使用時間が接着剤ごとに定められており、時間内に接着作業を終わらせる必要がある。このような扱いにくさがあるため、現場での二液型接着剤の使用は少なかったと思われる。しかしスタティックミキサーを利用すれば、誰でも均一に接着剤を混合でき、そして直ちに塗布できる。従来の市販スタティックミキサーはパイプ内に右旋回と左旋回のエレメントを多数つなぎ合わせた構造のものが多い⁵⁾。最近では矩形パイプ内を隔壁で複雑に仕切った構造のスタティックミキサーが登場している⁶⁾。これらのスタティックミキサーで十分な混合を得るにはエレメントの数を多くす

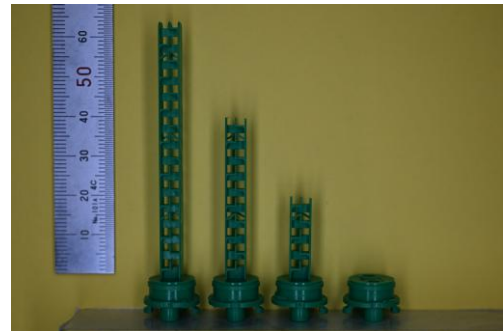


図1 ノズルエレメント短縮

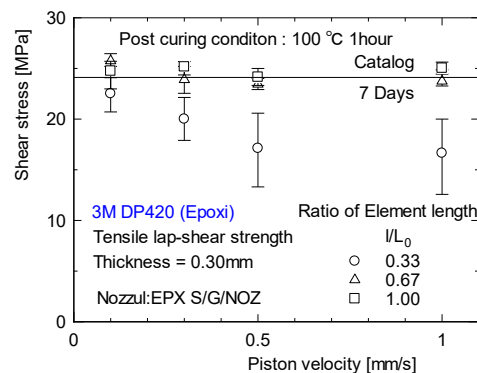


図2 引張せん断接着強さ結果

る必要があるが、ここに残った接着剤は利用できない。また、これらのスタティックミキサーは射出成形による製造を前提としており、抜きこう配やアンダーカットを配慮する必要がある。製造方法による制約が緩和できれば、少ない容積でありながら混合に最適な形状のスタティックミキサーを設計できる可能性がある。

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

* 次世代技術部

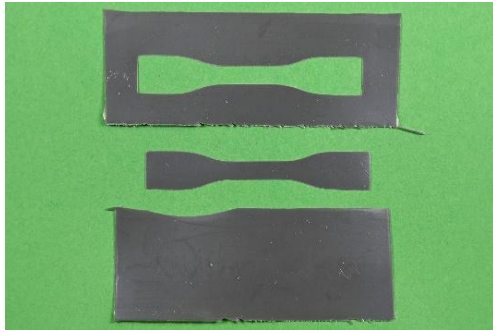


図3 バルク材とダンベル試験片

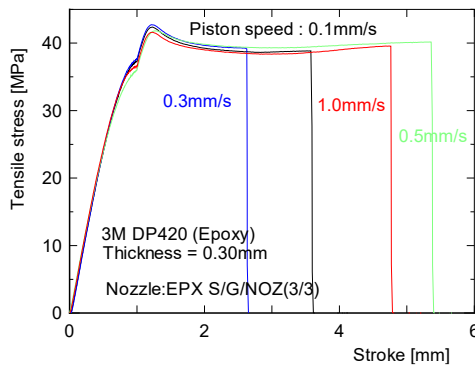


図4 バルク材の引張試験結果

では混合不足を評価するため、市販のスタティックのエレメントを改造して接着試験を行う。また、製造上の制約を少なくするため、光造形方式の3Dプリンターでスタティックミキサーを試作する。

2 実験

本報で使用する接着剤は二液型エポキシ接着剤（Scotch-Weld DP-420）である。接着剤はカートリッジに入っており、主剤と硬化剤の押し出しには自作の電動ディスペンサーを用いる⁷⁾。この電動ディスペンサーにより任意の速度（0.1～1.0 mm/s）で押し出すことができる。

引張試験はインストロン製万能試験機 5985 型で行う。試験に用いる試験片は JIS⁸⁾に定められた寸法に組み立てる⁹⁾。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。接着剤に直径 300 μm のガラスビーズ（ユニチカ製ユニビーズ SPL-300）を混ぜ、接着層の厚さを 0.3 mm としている。

硬化中または硬化後の接着剤を示差走査熱量計（ティー・エイ・インスツルメント製 DSC2500）で 35℃ から 250℃ まで 10℃/min で加熱し、接着剤の吸発熱を測定する。

スタティックミキサーの試作には Formlabs 製光造形方式 3D プリンター Form4L を用いる。積層ピッチは 50 μm 、XY 軸解像度は 25 μm 、使用する樹脂は Formlabs 製 Clear Resin V4.1 である。

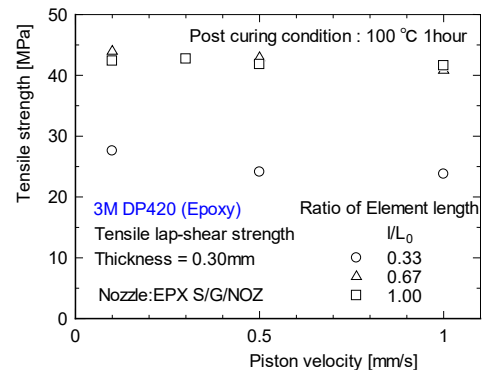


図5 バルク材の引張強さ

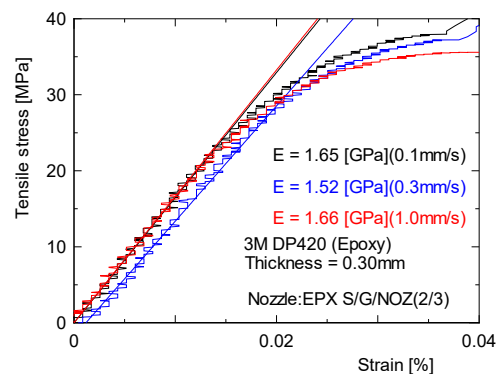


図6 バルク材の応力ひずみ線図

3 結果および考察

3.1 スタティックミキサーのエレメント長短縮の影響

本研究の目的は可能な限り小さい容積で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が、不均一な混合となった場合の接着力への影響はこれまで明らかになっていない。そこで市販のスタティックミキサー（3M 製 EPX S/G/NOZ）を分解し、図1のように内部のエレメントを一部切断して改造スタティックミキサーを作製する。切断していないエレメント長を標準長（ L_0 ）とする。切断後のエレメント長(l)は標準長の 2/3, 1/3, 0/3 とする。この改造スタティックミキサーで接着剤を混合し、引張せん断試験片とシート状の硬化物を作製する。このとき、電動ディスペンサーで押出速度を 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 mm/s と変える。

図2にこれらの試験片の引張せん断接着強さを示す。縦軸は引張せん断接着強さ、横軸は押出速度である。ここでの試験速度は 1 mm/min である。エレメント長が標準長($l/L_0=1.00$)のときと三分の二($l/L_0=0.67$)のときは押出速度によらず引張せん断接着強さは一定である。なお、図中の直線はカタログに掲載された引張せん断接着強さである。エレメント長が三分の一($l/L_0=0.33$)では押出速度が速くなると引張せん断接着強さが小さくなり、ばらつきも大きくなる。

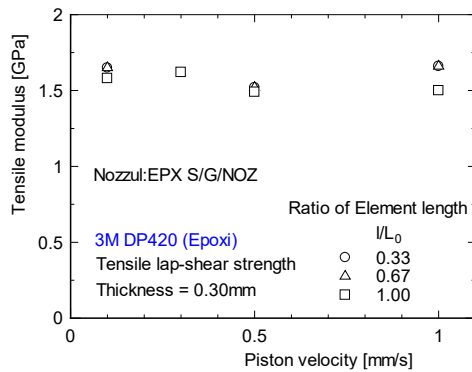


図7 バルク材の弾性率

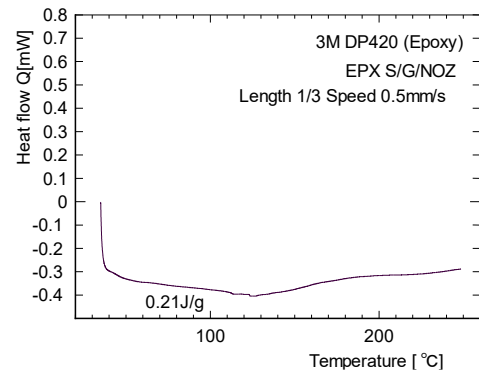


図9 DSC 測定結果（硬化物）

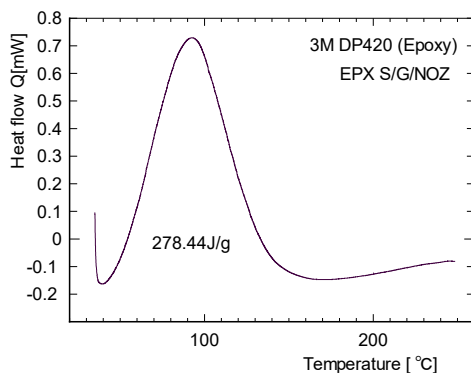


図8 DSC 測定結果（硬化前）

接着剤の硬化物の性質を調べるため、図3のように接着剤をシート状に硬化させたもの（以下、バルク材という）をカッターで打ち抜き、ダンベル試験片⁹⁾（8号試験片）を作製する。これを引張速度 1 mm/min で万能試験機で引張試験を行う。エレメントが標準長($l/L_0=1.00$)で押出速度が異なる試験片の引張試験結果を図4に示す。縦軸は応力、横軸はクロスヘッドの移動量である。どの押出速度の試験片でも移動量 2.5 mm まではほぼ同じ挙動となる。

それぞれの実験条件での引張強さを図5に示す。縦軸は引張強さ、横軸は押出速度である。エレメントが標準長($l/L_0=1.00$)のときと三分の二($l/L_0=0.67$)のときは押出速度によらず引張強さは一定（およそ 42 MPa）である。エレメント長が三分の一($l/L_0=0.33$)では押出速度が 0.1 mm/s のとき引張強さは 28 MPa であるが、押出速度が速くなると 25 MPa に低下する。

図6はバルク材の応力ひずみ線図であり、エレメント長が三分の二($l/L_0=0.67$)のときの結果を示す。標線間距離の変化を動画撮影し、自作のソフトウェア（第2報）でひずみを計算する。図中の直線の傾きから弾性率を求める。

図7にエレメント長を変えた改造スタティックミキサーで混合したバルク材の弾性率を示す。縦軸が弾性率、横軸は押出速度である。全ての条件で弾性率はほぼ一定

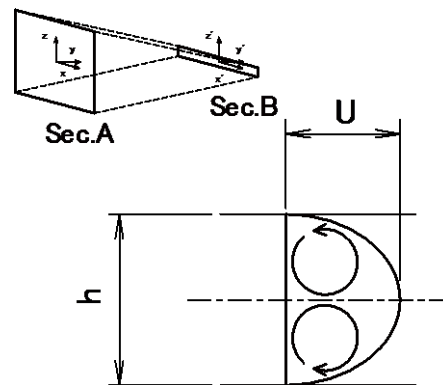


図10 平行平板間の流れ

となり、エレメント長、押出速度の影響は見られない。

図8は混合直後の未硬化接着剤の DSC 曲線である。温度 92°C が最大となるピーク部を積分すると接着剤が硬化するときのエンタルピーが得られ、278.44 J/g であることがわかる。

図9にはエレメント長が三分の一($l/L_0=0.33$)で混合してできた硬化物の DSC 曲線を示す。温度 92°C 前後を積分して得られたエンタルピーは 0.21 J/g である。これよりエレメント長が三分の一のスタティックミキサーで混合した接着剤では、反応できる主剤と硬化剤は全て反応していると考えられる。

3.2 スタティックミキサー試作

市販スタティックミキサーの断面は正方形（図10左上A断面）である。同図B断面のように間隔を狭く絞ると、 $x'=0$ 近傍では同図下のように無限の奥行きをもつ平行平板間を流れる粘性流体と見なせる。図中の曲線は流路内の速度分布である。このような流れでは図中に示すような一對の渦ができています。これは以下のように渦度（流れの回転ベクトルに対応）からも確認できる。平行平板間の速度分布が次式の放物分布¹⁰⁾で表されるとする。

$$u(y) = a \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h} \right) \quad (1)$$

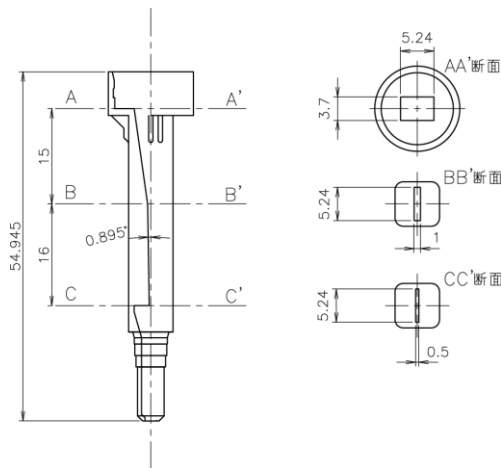


図 11 試作スタティックミキサー図面



図 12 試作品（上）と市販品（下）

ここで、 a は定数、 h は平行平板の間隔、 y は平板からの距離である。紙面に対して垂直軸周りの渦度は次式で定義されるので、

$$\begin{aligned}\omega_z &= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \\ &= \frac{a}{h} \left(\frac{2y}{h} - 1 \right) \begin{cases} < 0 & (0 \leq y < h/2) \\ = 0 & (y = h/2) \\ > 0 & (h/2 < y \leq h) \end{cases} \quad (2)\end{aligned}$$

となる。渦度が大きいほど回転運動が強くなるので、接着剤の混合が促進されると予想される。式(2)より、接着剤の流量が一定であれば、平板間隔を縮め、流速を増すほど渦度が大きくなる。

図 11 に試作スタティックミキサーの設計図面を、図 12 に試作品と市販品の写真を示す。この試作スタティックミキサーの特徴は、混合機構として作動させるため流路間隔を 5.24 mm から 0.5 mm に絞っていることである。この絞り部により流路内の渦度を大きくできる。試作スタティックミキサーで混合した接着剤で引張せん断強さ試験片を作製する。使用後にスタティックミキサー内部に残留する接着剤は市販品 (1.9g) に対し試作品

(0.9g) では半分となる。また使用後の試作スタティックミキサーを観察したところ、破損や接着剤の漏れ出しは無い。光造形方式の 3D プリンター製スタティックミ

キサーは、十分な強度を持つことがわかる。また、組み立てた引張せん断試験片で試験を行ったところ、カタログに掲載された引張せん断接着強さには及ばなかった。本試作スタティックミキサーでは混合機構となる絞り部が一つだけのため、混合が不足すると考えられる。

4 まとめ

本研究のまとめを示す。

(1) 二液型エポキシ接着剤 (DP-420) をスタティックミキサーで混合する場合、エレメント長が標準の三分の一と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。しかし弾性率はエレメント長 ($l/L_0 = 1.0, 0.67$) と変わらない。

(2) 本報で提案する光造形方式の 3D プリンターによるスタティックミキサーは破損や接着剤の漏れがなかったため、十分な強度がある。

【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, 自動車の走行性能と構造 開発車が語るチューニングの基礎, グランプリ出版, 2021
- 2) 松永, 接着の技術, Vol.44, No.2, pp6-9, 2024
- 3) 松木, 接着の技術, Vol.44, No.2, pp10-17, 2024
- 4) 長堀, 接着の技術 Vol.44, No.2, pp18-24, 2024
- 5) 西村ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, PP82-84, 2024
- 6) 株式会社グラスプ, スタティックミキサー, 特許第 7028478 号, 2022-02-21
- 7) 西村ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, PP67-68, 2023
- 8) JIS K6850:1999 接着剤—剛性被着材の引張せん断接着強さ試験方法
- 9) JIS K6251:2017 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—引張特性の求め方
- 10) 日野, 流体力学, 朝倉書店, 1992

CFRP の賦形加工技術に関する研究（第1報）

栗田貴明*、西垣康広*、山田孝弘*

Study on the shaping and forming process of CFRP (I)

KURITA Takaaki*, NISHIGAKI Yasuhiro* and YAMADA Takahiro*

熱可塑性炭素繊維強化複合材料（以下、CFRTP と記す）は、軽量、高強度、高剛性といったメリットを有する一方で、高コストがデメリットとなっている。その解決策の一つとして注目されている CFRTP を用いたサンドイッチ材の成形では、コア材の賦形も合わせて行うことが必要であり、立体成形が困難となっている。そこで本研究では、コア材に熱可塑性繊維と炭素繊維を混合し抄紙したシート（以下、混抄シートと記す）を複数枚積層し熱プレス成形した CFRTP 板を用いて、スプリングバックを利用した立体成形手法の確立を目指す。本稿では、CFRTP サンドイッチ材の立体成形を行ったので報告する。

1 はじめに

CFRTP は、航空機産業や自動車産業をはじめとして様々な分野で使用されており、今後も使用量が増えると予想されている。軽量、高強度、高剛性といったメリットを有する一方で、高コストがデメリットであり、解決策の一つとしてサンドイッチ材の利用がある。

CFRTP サンドイッチ材は、コア材に樹脂の発泡体やハニカム構造体を使用することで、軽量化と低コスト化を両立できるメリットがある。しかし、CFRTP サンドイッチ材の立体成形は、剛性の異なるスキン材とコア材を同時に成形するとコア材がつぶれるという課題があり、成形手法が確立されていない。過去の研究において、CFRTP サンドイッチ材の立体成形を試み、箱型形状の成形に成功した¹⁾。しかし、コア材の膨張力不足により表面に凹凸がある形状の賦形は不向きであると推測された。

このため、本研究では複雑形状を持つ CFRTP サンドイッチ材の立体成形手法の確立を目指す。コア材に CFRTP 板を使用し、CFRTP 板のスプリングバック力を利用してスキン材を任意の形状に賦形する成形手法を検討する。スプリングバックとは、ランダムな炭素繊維をシート化し、それを複数枚重ね、熱プレスにより作製した CFRTP 板のような炭素繊維を含む材料において、炭素繊維の残留応力が解放されることで板厚が膨張する現象であり、材料に熱をかけることで発現する。武部らは、スプリングバック力が 2 MPa 以上の高い圧力となることを報告²⁾しており、CFRTP サンドイッチ材を凹凸形状に賦形する十分な値であると期待できる。

2 実験

2.1 材料

CFRTP サンドイッチ材のスキン材には炭素繊維（CF）

のクロス材とポリプロピレン（PP）の複合材料である熱可塑性 CFRTP（Bond-Laminates 製 TEPEX dynalite 204、以下クロス材 CF/PP と記す）の板材を使用した。板の厚みは、0.5 mm である。コア材には、スプリングバックを発現させるために成形した CFRTP 板（詳細については 2.2 で述べる）を使用した。

2.2 コア材の作製

本研究では、コア材として、神山らが検討した手法³⁾を参考に作製した CFRTP 板を使用した。

2.2.1 タッピ抄紙を用いた混抄シートの作製

混抄シートの材料として、熱可塑性短繊維（オレフィン系芯鞘タイプ）と炭素繊維（東レ（株）製 トレカ）を使用した。両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。炭素繊維長は 3 mm、6 mm、12 mm の 3 種類を用いて炭素繊維長の異なる 3 種類の混抄シートを作製した。混抄シートの坪量は、200 g/m² で統一した。作製した混抄シートの外観を図 1 に示す。混抄シートの厚みは約 2 mm であった。

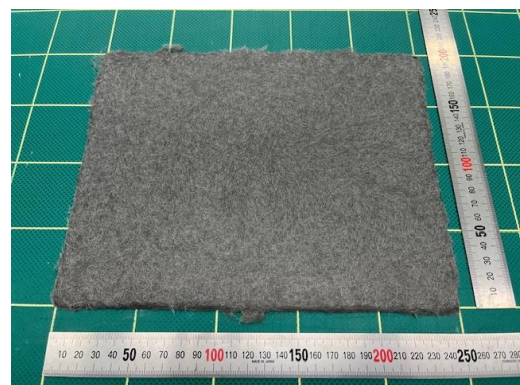


図1 作製した混抄シート

* 次世代技術部

2.2.2 CF RTP 板の作製

2.2.1 で作製した炭素繊維長の異なる 3 種類の混抄シートをそれぞれ複数枚積層し、熱プレス成形することで CF RTP 板を作製した。成形条件は、成形温度 170 °C、プレス圧力 20 MPa とし、厚み 2 mm のスペーサーを用いることで、板厚が 2 mm となるように調整した。作製した CF RTP 板の写真を図 2 に示す。

2.3 コア材のスプリングバック率評価

炭素繊維長の異なる 3 種類の CF RTP 板を 170 °C に昇温した乾燥炉にて 10 分間加熱し、加熱前後の板厚を測定してスプリングバック率を求めた。

2.4 CF RTP サンドイッチ材の成形

スキン材にクロス材 CF/PP、コア材に炭素繊維長の異なる 3 種類の CF RTP 板を使用して、3 種類の CF RTP サンドイッチ材を成形した。成形条件を以下に示す。

- ・スキン材：上下面それぞれ 1ply (0.5 mm)
- ・コア材：板厚 2 mm
- ・成形温度：170 °C
- ・成形時間：10 min

成形時の概略図を図 3 に示す。スペーサーはコア材のスプリングバック率を考慮して厚さ 7 mm のものを使用した。成形後の写真を図 4 に示す。すべてのコア材は、厚みが 2 mm から 6 mm に膨張しており、目的とする厚さ 7 mm の CF RTP サンドイッチ材が得られた。

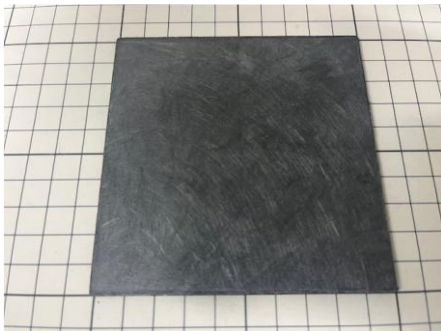


図 2 作製した CF RTP 板

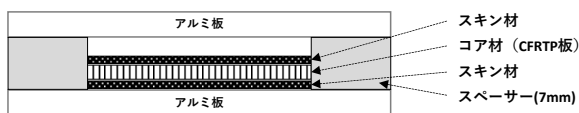


図 3 CF RTP サンドイッチ材成形時の概略図

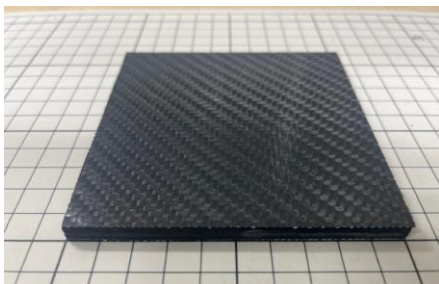


図 4 成形後の CF RTP サンドイッチ材

2.5 X 線 CT による界面状態観察

成形した CF RTP サンドイッチ材のスキン材とコア材の界面を観察するため、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) を使用した。

2.6 3 点曲げ試験

スプリングバック前後の炭素繊維長の異なる 3 種類の CF RTP 板と、成形した 3 種類 (コア材に使用した炭素繊維長が 3 mm、6 mm、12 mm の 3 種類) の CF RTP サンドイッチ材を 100 mm × 15 mm に切り出した後、万能試験機 (Instron 製、5985 型) を使用して 3 点曲げ試験を行った。曲げ試験に使用した支持具および圧子の半径はいずれも 5 mm、支点間距離は 80 mm、試験速度は 4 mm/min とし、試験片が破壊するまでの荷重と変位を測定した。試験片数は n=5 とした。

2.7 CF RTP サンドイッチ材の立体成形

CF RTP サンドイッチ材を図 5 に示すお盆形状に成形した。縁部分を成形するために凸形状の金型、ドリンクホルダーを模した形状を成形するために円錐台の金型を用いた。凸形状金型の凸部分の厚みと、円錐台金型の厚みはどちらも 2 mm とした。図 6 に立体成形時の概略図を示す。スキン材とコア材を積層したものに金型を載せるだけのシンプルな構造である。熱プレス機を用いて CF RTP サンドイッチ材を立体成形した。成形条件は、成形温度 170 °C、プレス圧力はサンドイッチ材がつぶれてしまう可能性があるためゼロとした。

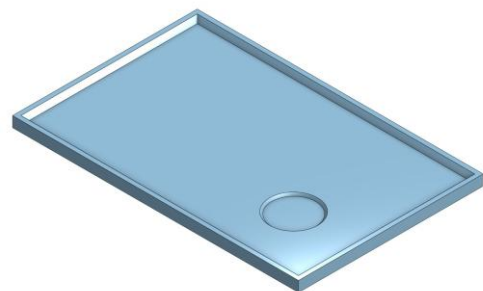


図 5 立体成形品形状モデル

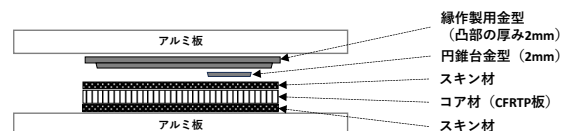


図 6 CF RTP サンドイッチ材立体成形時の概略図

3 結果及び考察

3.1 コア材のスプリングバック率評価

加熱前後のコア材の厚さとスプリングバック率を表 1 に示す。炭素繊維長が 3 mm、6 mm、12 mm のコア材のスプリングバック率はそれぞれ 269 %、275 %、280 %であり、顕著な差は見られなかった。

スプリングバック前後の CFRTP 板を図 7 に示す。スプリングバックは炭素繊維の変形によって発現することから、炭素繊維長を長くすることで変形量も増加しスプリングバック率も増加することが期待されたが、スプリングバック率の増加にはつながらなかった。原因として、炭素繊維長に対して混抄シートの厚み (2 mm) が十分ではなく、炭素繊維が変形するスペースが確保できていない可能性が考えられる。坪量を増加させることで CFRTP シートの厚みを増やすことは可能であるが、坪量の増加により混抄シートの均一性が損なわれる懸念があるため、タッピ抄紙という手法では坪量を増加させるには限界がある。坪量 1000 g/m² の混抄シートの作製を試みたが、表面の凹凸がひどく、平滑な混抄シートを作製することはできなかった。

3.2 界面観察

炭素繊維長 3 mm を使用した CFRTP サンドイッチ材の X 線 CT によるスキン材とコア材の界面観察結果を図 8

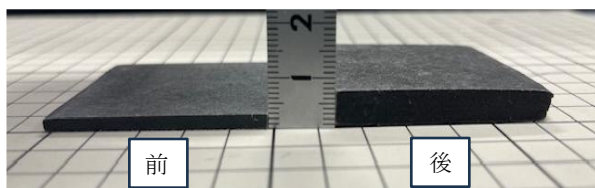


図 7 スプリングバック前後の CFRTP 板

表 1 加熱前後のコア材の厚さとスプリングバック率評価結果

CF 繊維長	加熱前(mm)	加熱後(mm)	スプリングバック率
3mm	2.6	7.0	269%
6mm	2.4	6.6	275%
12mm	2.5	7.0	280%

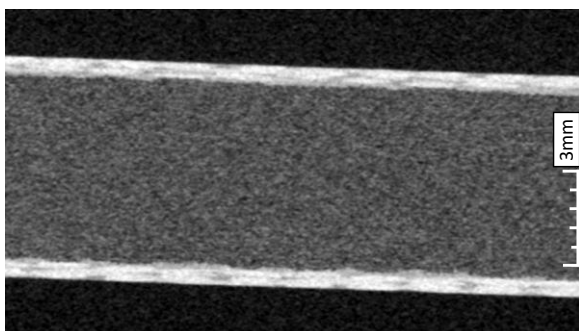


図 8 X 線 CT による界面観察結果
(炭素繊維長 3 mm)

に示す。界面にボイドは確認されず、スキン材とコア材が良好に接着していることが分かった。また、炭素繊維長 6 mm、12 mm を使用した CFRTP サンドイッチ材においても同様の結果であった。

3.3 3点曲げ試験結果

スプリングバック前後の CFRTP 板および CFRTP サンドイッチ材の 3 点曲げ試験の結果を表 2 および図 9 に示す。炭素繊維長 6 mm を使用した CFRTP 板の曲げ応力が最も大きくなることが確認された。炭素繊維長 12 mm を使用した CFRTP 板の曲げ応力は、炭素繊維長 6 mm のものと比べて約 10 % 低くなった。これは、タッピ抄紙する際の炭素繊維の分散性が影響していることが原因と考えられる。炭素繊維長 12 mm を使用して作製した混抄シートにおいては炭素繊維が凝集している部分が存在した。

スプリングバック後の CFRTP 板および CFRTP サンドイッチ材においては、炭素繊維長に関係なく曲げ応力がほぼ一定の値となった。これは、スプリングバックが起きることで内部に空隙が生じ、炭素繊維への力の伝達がうまく行えず、空隙部分から破壊が進んでしまうためだと考えられ、コア材に用いる炭素繊維の繊維長は強度に影響を及ぼさないと推測される。

3.4 立体成形品

立体成形品の写真を図 10 に示す。ドリンクホルダー形状の部分はエッジ部分まで形状賦形が良好であるが、お盆形状の縁部分はエッジ部分の形状賦形が良好ではなく、部分的に白色に変色した箇所が存在した。これは、

表 2 3点曲げ試験結果

	曲げ応力 (MPa)		
	3mm	6mm	12mm
CFRTP板 (スプリングバック前)	51.1	65.8	60.2
CFRTP板 (スプリングバック後)	13.1	14	15
CFRPサンドイッチ材	27	25.6	25.8

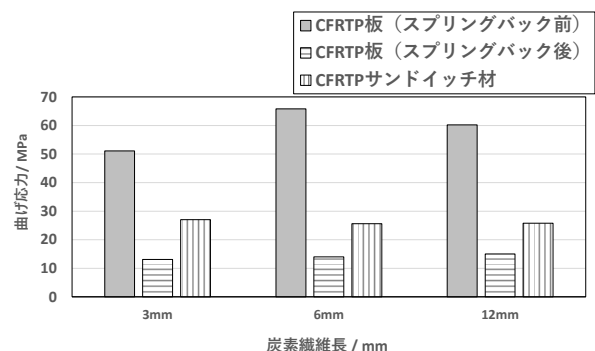


図 9 3点曲げ試験結果

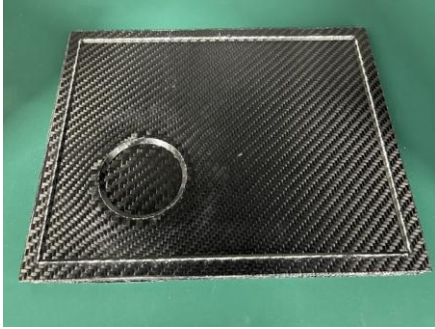


図 10 立体成形品

コア材の膨張が縁のエッジ部分まで達していないことが原因であると考えられるため、コア材のスプリングバック率を増加させることで改善が期待できる。平面部分は、スプリングバックによる膨張圧が均一にかかっており平滑な面となっていることが確認された。これらの結果から、コア材の膨張率に対して賦形したい立体形状の厚みが薄いほど良好な賦形が可能であると考えられるため、品質の良い成形品を作成するためには、成形品の厚みを十分に考慮する必要があることが示唆された。

4 まとめ

CFRTP サンドイッチ材の新たな立体成形手法の開発を目指し、炭素繊維のスプリングバックを利用した成形手法を検討した。タッピ抄紙を用いて混抄シートを作製した後、熱プレス成形した CFRTP 板（コア材）のスプリングバック率は約 270 %となり、コア材として十分な膨張率があることを確認した。この CFRTP 板をコア材として CFRTP サンドイッチ材の立体成形を行ったところ、お盆形状の成形に成功した。コア材の膨張不足により賦形が良好でない箇所が確認されたが、コア材の膨張量を考慮して成形品の厚みを設定することで良好な賦形が可能であると考えられる。

【謝 辞】

本研究の一部は、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) 栗田ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp79-81,2024
- 2) 武部ら,Journal of the Society of Materials Science, Vol.65,No.8, pp550-560,Aug.2016
- 3) 神山ら,岐阜県産業技術センター研究報告 No.10, pp50-53,2016

情報

協働ロボットによる作業者補助を実現する操作システムの開発（第4報）

—ToF カメラを活用したオブジェクト認識技術の開発—
坂東直行*、安部貴大*、渡辺博己**

Development of support system for the operators using collaborative robots (IV)
- Development of object recognition technology utilizing ToF camera -
BANDO Naoyuki*, ABE Takahiro* and WATANABE Hiroki**

本研究では、オブジェクトを3次元で認識するため ToF カメラを採用することで、深度イメージから 3D 点群情報を取得し、オブジェクト認識によってワークの位置・姿勢を推定できることを示した。その結果、ToF カメラから取得する深度イメージ画像から空間的にゆがみの少ない 3D 点群情報を取得できること、点群情報を使ったオブジェクト認識により、ワークの位置・姿勢を推定でき、対象シーン点群を絞ることで高精度に姿勢を推定できること、本技術はピンピッキングに活用できることを確認した。

1 はじめに

協働ロボットは、PC 等の外部制御装置（以下、外部コントローラ）で動作させることができる。これは、基本的に動作中は外部コントローラからの操作を受け付けない産業用ロボットに対する協働ロボットの優れた特徴で、これにより画一的な動作しかできない産業用ロボットに対し、協働ロボットは高い柔軟性をもった動作ができる。この特徴を活かせば、ロボットの新しい活用方法を検討できるようになる。

例えば、ロボット周辺の環境情報をセンシングし、そこからロボット動作に必要な情報を抽出して、動作プランニングに反映させる機能を外部コントローラが備えれば、産業用ロボットと比較して環境変化に強靱なロボットシステムを実現できる。

そこで本研究ではこれまでに、作業エリア上部に固定した Web カメラを使い、ワークの画像をリアルタイムに確認しながら、GUI 操作でティーチングするシステムを構築した¹⁾。しかし対象を真上から見下ろした 2D 画像を用いるため、ワークの高さ情報が予め既知であることを前提としていること、画面の端になるほど位置の歪みが大きくなることが課題として残った。

これらの課題解決のため、複数の視点からカメラで撮影したイメージ画像をもとに、SfM (Structure from Motion) 技術を用いてワークの 3D 点群情報を取得し、点群処理技術によってワークの位置・姿勢を推定する技術を開発した²⁾。これにより、高さ情報・位置の歪みの問題は解決したが、ワークが存在するシーンの点群情報を取得するのに数十秒程度の時間が必要で、リアルタイム性に乏しいという課題が残された。

そこで本研究では、シーンの点群情報取得に後述する ToF カメラを採用することで課題解決を試みたので報告する。

2 ToF センサを用いたロボットシステム

図1に本研究で提案するロボットシステムの処理過程を示す。

本システムでは、2 台の協働ロボットと ToF カメラによって構成される。ToF カメラはロボットアームのエンドエフェクタに取り付けられ、ワークの状態に応じて撮影位置・姿勢を変更できる。ロボットの作業対象は ToF カメラにより深度画像として取得され、3D 点群情報に変換される。この点群と予め用意してあるワーク点群をマッチングすることでオブジェクト（ワーク）が認識され、同時にワークの位置・姿勢が推定される。これによりワークの基本情報（隅、辺、重心等）の座標が求まる。これら基本情報をもとにロボットを動作させることで、ワークの状態に応じたロボット動作が可能になる。

本報では、本システムにおいて主要部となる ToF カメラ情報を用いたオブジェクト認識技術について述べる。

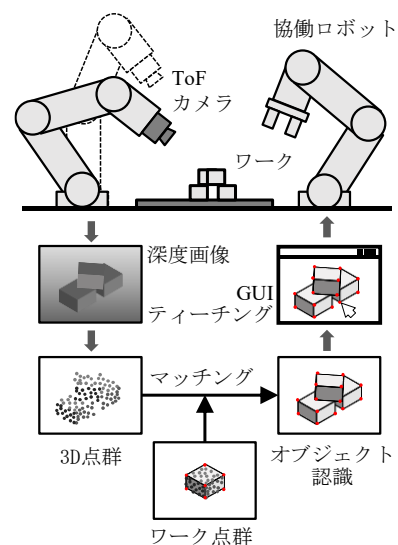


図1 提案するロボットシステム

* 生産システム部

** 情報技術部

3 ToF カメラデータの処理

3.1 ToF カメラ

本研究では、オブジェクトを含むロボット周辺の 3D データを取得するのに、Analog Devices 社の EVAL-ADTF3175D を用いた。これは、PC と接続することで、動作を PC で制御することができる ToF カメラである。外観図を図 2 に、諸元を表 1 に示す。ToF とは Time of Flight の略称で、光を照射してから返ってくるまでの時間を計測し、光の速さと往復にかかった時間から奥行きを求める計測手法である。なお、奥行き情報を取得するセンサには、この他にステレオカメラ方式がある。これは 2 つの光学系における視差から奥行きを計算するものだが、光の反射が理想的であることを前提にしているため、金属部品の計測が難しく、一方のカメラで死角になる領域はデータが得られず、測定データのゆらぎ・ノイズが大きいなど、不都合な点が多い。そこで、それらの問題に対し比較的優れている ToF カメラを本研究では採用した。

3.2 データの校正

ToF カメラで図 3 および図 4 に示すシーンを撮影した結果を図 5 に示す。このように ToF カメラでは深度情報をイメージ画像として取得でき、各画素の値は被写体までの距離を表す。これを 3D 点群情報に置き換えてプロットしたものを図 6 に示す。

ここから、イメージ情報を 3D 点群としてプロットすると、イメージ画像の中心から端に向かうほど空間的な歪みが大きくなることが分かる。そこでピンホールカメラモデルを用いて、深度情報および上下左右方向の距離情報を校正した。結果を図 7 に示す。ここから、適切に



図 2 ToF カメラ外観

表 1 ToF カメラ諸元

項目	値
型式	Analog Devices EVAL-ADTF3175
サイズ	66mm×68mm×59mm
解像度	1024×1024 pixel
画角	75° ×75°
精度	±5mm
フレームレート	10fps (1024×1024pix)

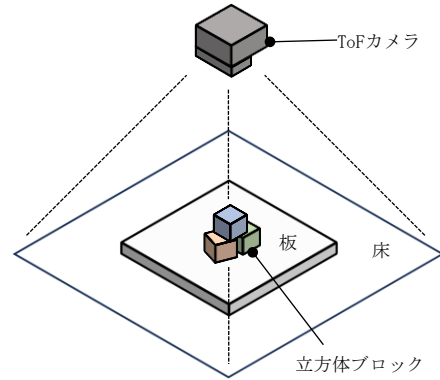


図 3 立方体ブロックの撮影

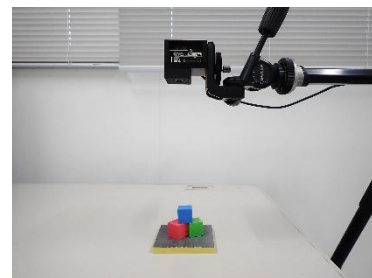


図 4 撮影風景

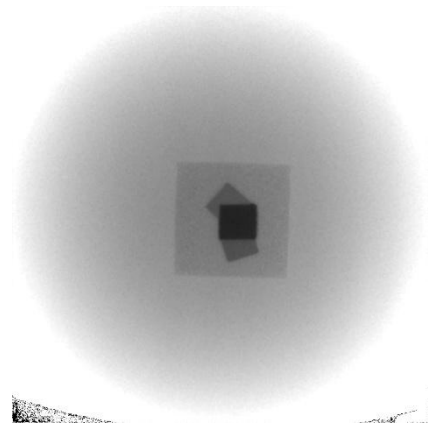


図 5 撮影結果

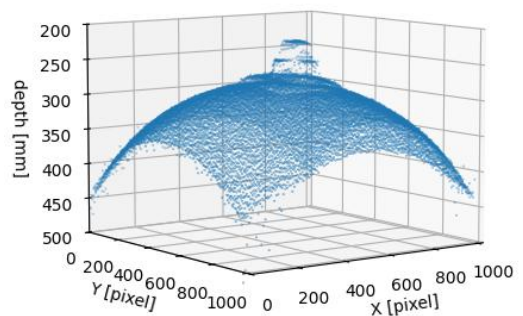


図 6 3D プロット結果

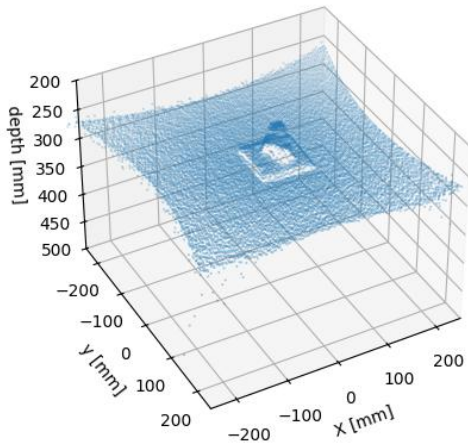


図7 校正した点群の3Dプロット結果

校正することで深度イメージ画像から空間的に歪みの少ない3D点群情報を取得できることが分かる。

なお、校正済みシーン点群を取得するのに要した時間はIntel Corei7 (2.90GHz) において1024×1024pixelの深度イメージ画像に対し14ミリ秒であり、SfMと比較し短い処理時間でシーン点群が得られた。

4 3D シーン点群からのオブジェクト認識

次に、3D シーン点群からオブジェクト認識を行った。

ここでは、図7に示すシーン点群から、一辺25mmの立方体オブジェクトの認識を試みた。

まず、立方体オブジェクトのCADデータを作成し、そこからオブジェクト表面の点群データを生成した。

次に、立方体オブジェクト点群および3D シーン点群に対し、ダウンサンプリングを行い、特徴点検出を行った。その後、特徴点毎に特徴量を求め、2つの点群から得た特徴量のノルムを計算して最も小さい特徴点のペアを求める対応点検索を行った。そしてRANSAC

(Random Sample Consensus) によって、立方体オブジェクト点群を3D シーン点群にマッチングさせる位置・姿勢変換行列を推定した。なお、これらの点群処理にはOpen3Dを用いた³⁾。

こうして得られた姿勢変換行列によって、立方体オブジェクト点群をシーン点群に位置合わせした結果を図8に示す。この結果から分かるように、シーン点群全体を対象にオブジェクト認識を行った場合、位置・姿勢変換行列の推定精度が十分ではなかった。そこで、シーン点群において注目領域 (ROI : Region Of Interest) を立方体オブジェクトが存在する範囲に設定し、ROI内の点群を使ってオブジェクト認識した結果を図9に示す。ROIを設定した場合、オブジェクト認識によって位置・姿勢がほぼ推定できている。ここから、点群情報を使ったオブジェクト認識において、対象シーン点群を絞ることで

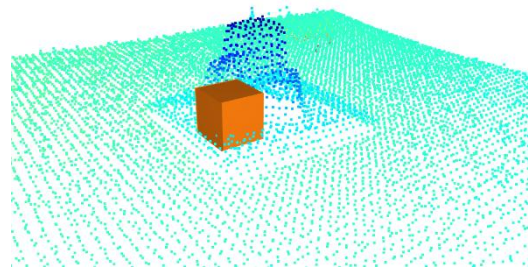


図8 シーン点群全体に位置合わせした結果

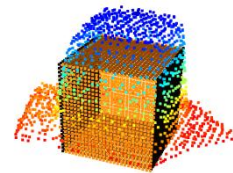


図9 ROI内のシーン点群に位置合わせした結果

ワークの位置・姿勢を推定できることがわかる。

5 ビンピッキング実験

本研究で開発したシステムを活用して実際にロボットによるバラ積みピッキング (ビンピッキング) 実験を行った。

実験では、一辺25mmの立方体をワークに見立て、複数のワークが無造作に山積みされた状況において、ワークを認識してピッキングすることを試みた。

なお、本システムにおいて、協働ロボットおよびToFカメラは各々独自の座標系を持つ。ToFカメラで取得するデータは、ToFカメラに設定された座標系における値であるため、静止した物体を撮影した場合であっても、ロボットの動作によりToFカメラ位置が変われば値が変わる。そこでToFカメラを取り付けたロボットの座標系を基準 (以下、基準座標系) とし、ロボットのエンドエフェクタの位置姿勢情報を用いてToFカメラの座標系を基準座標系に一致させた。また、他方のロボットの座標系も、基準座標系と一致するようにキャリブレーションを行った。これにより、協働ロボットおよびToFカメラを同一の座標系で扱うことができる。

システムは以下のように動作させた

1. ToFカメラをワーク上部に移動させワークを撮影する。
2. 取得した深度イメージを3Dシーン点群に変換する。

3. 基準座標系における X、Y 値（床面の幅と奥行きに相当）が予め設定した範囲内にある点群を抽出する。これによりワークが存在しないエリアの点群が除かれる。
 4. 基準座標系における Z 値（高さに相当）が予め設定した閾値以上のデータを抽出する。これにより背景情報である床の点群が除かれる。
 5. シーン点群の中から、基準座標系の Z 値（高さに相当）の最大値を求め、そこから既定の距離の深さまでの点群を抽出する。ここで既定の距離はオブジェクトに応じて設定するパラメータであり、ここでは立方体の対角距離（立方体の一辺の長さを a としたとき、 $\sqrt{3}a$ ）を設定した。これによりシーン点群はほぼワークに相当するものだけが残る。
 6. シーン点群に対してオブジェクト認識を行い、ワークの位置・姿勢を推定する。
 7. 推定したワークの位置から、ワーク中心を原点とし、ワークの傾きと連動するワーク座標系を設定する。
 8. 基準座標系の Z 軸となす角が最も小さくなるワーク座標系の軸を求め、その軸がワーク座標系の Z 軸となるように姿勢変換する。
 9. ワーク座標系の原点から Z 軸方向に既定の距離（ここでは 5 cm）離れた場所に、ワーク座標系の姿勢にあわせてロボットのグリッパーを移動する。この位置・姿勢を P とする。
 10. ロボットのグリッパー先端をワーク座標系原点の位置まで移動し、ワークをピックアップする。
 11. グリッパーを P に移動する。
- 以上により、ビンピッキングが可能になる。
結果を図 10 に示す。

この結果から、本システムはビンピッキングに対して有効であることを確認した。

なお、ワークの位置・姿勢を推定する点群処理においては、ダウンサンプリングサイズ、特徴量の計算範囲等、処理パラメータが存在し、これを対象に応じて調整する必要があり、本実験では試行錯誤で調整した。誤差を抑えつつ安定的に姿勢を推定するためのパラメータチューニング方法については検討が必要である。

また、今回の実験では、ワーク同士が密着すると、オブジェクト認識の精度が下がることも確認した。ビンピッキングの完遂確度を高めるには、ワーク同士に密着が認められた場合、ワークを適度に散らす動きをロボットに組み込むなど、更なる改良が必要である。

6 まとめ

本研究では、オブジェクトを 3 次元で認識するため ToF カメラを採用することで、深度イメージから 3D 点群情報を取得し、オブジェクト認識によってワークの位

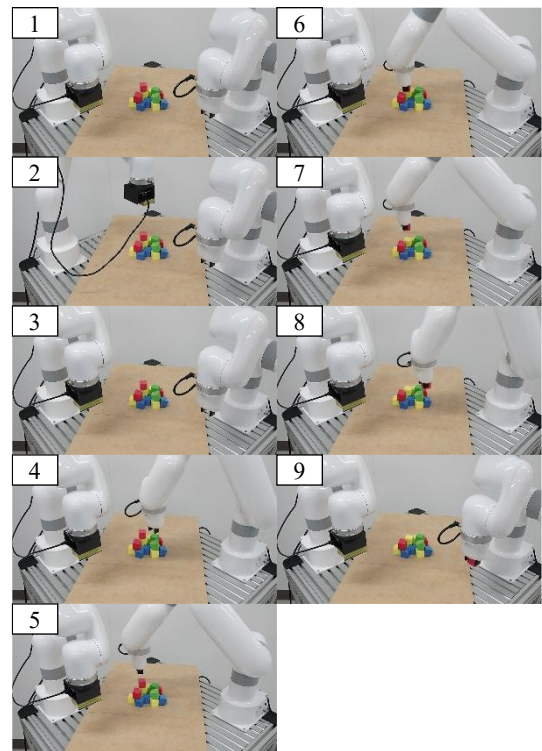


図 10 ビンピッキング実験結果

置・姿勢を推定できることを示した。結果を以下に示す。

- ・ ToF カメラから取得する深度イメージ画像から空間的に歪みの少ない 3D 点群情報を取得できる。
- ・ 点群情報を使ったオブジェクト認識により、ワークの位置・姿勢を推定でき、対象シーン点群を絞ることで高精度に姿勢を推定できる。
- ・ 本技術はビンピッキングに活用できる。一方でビンピッキングの完遂確度を高めるためには更なる工夫が必要である。

【参考文献】

- 1) 坂東ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.3, pp7-8,2022
- 2) 坂東ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp85-88,2023
- 3) 金崎ら,詳解 3 次元点群処理,講談社,2022

協働ロボットと AI による作業連動システムの開発（第3報）

渡辺博己*、内野義友輝*、坂東直行**

Development of a cooperative system using collaborative robots with artificial intelligence（Ⅲ）

WATANABE Hiroki*, UCHINO Yoshiyuki* and BANDO Naoyuki**

本研究では、DXの推進によるものづくりの高度化を実現するために、協働ロボットとAI技術を組み合わせることで、人の作業状況に合わせてロボットが動作する作業連動システムの技術開発に取り組んでいる。今年度は、昨年度開発した作業連動搬送システムにおけるロボットとエンドエフェクタについて、より高い把持力を持つ機種に変更することで、複数種の部品の供給が可能なシステムに改良した。また、改良したシステムの動作検証により、昨年度と同様に、作業者のピックアップ動作に応じて、ベルトコンベアが自動的に搬送を開始するとともに、ロボットが自動的にピッキング動作を開始することを確認した。

1 はじめに

AI（人工知能）やIoT（モノのインターネット）を含むデジタル技術の進展により、様々な業界でDX（デジタル変革）の実現に向けた取り組みが行われている。こうした中、ものづくりの現場でも、新たなビジネスモデルの創出や競争優位性の確立を目指し、製造プロセスの自動化や生産システムの連携、製品データの高度な分析等が求められている。

生産工程の自動化技術においては、従来の産業用ロボットに加えて、人間と同じ空間で作業可能な協働ロボットにも注目が集まっている。安全性や柔軟性に優れた協働ロボットの活用により、単純な繰り返し作業だけでなく、人の動きや生産ラインの変化に合わせた複雑な作業の自動化技術の開発が期待されている。

そこで、本研究では、協働ロボットとAI技術を組み合わせることで、人の作業状況に合わせてロボットが動作する作業連動システムの技術開発に取り組んでおり、昨年度は、組立作業を想定し、作業者が部品をピックアップする動作に合わせて、ロボットがベルトコンベアを介して次の部品を供給する作業連動搬送システム（以下、「旧システム」）を開発した¹⁾。本年度は、異なる種類のロボットとエンドエフェクタを用いて、複数種の部品を供給する作業連動搬送システム（以下、「新システム」）を開発し、対応可能な部品種の拡張を試みたので、その内容について報告する。

2 システム構成

旧システムでは、ロボットとエンドエフェクタに DOBOT Magician と付属の吸引カップを使用していたが、吸着箇所穴の空いた部品や吸着箇所が吸盤径より小さい部品等に対して把持力や形状適応性に課題があっ

た。そこで、新システムでは、より高い把持力を持つ DOBOT CR3 と ASPINA ARH350A（3爪ハンド）を採用し、多様な部品に対応できるようにした。図1に新システムの外観を示す。ロボットは、作業エリアの前に、ベルトコンベアを挟んで配置した。

カメラは、旧システムと同様に1つのUSBカメラと2つのRealSense（D455、D435）を使用し、USBカメラで新システムの動作確認画像を、作業エリア上部に設置したD455カメラで作業者の手や部品、部品トレイ上部に設置したD435カメラで部品の検出処理のための画像を取得した。なお、D435カメラとロボットの位置関係については、旧システムと同様に、事前にキャリブレーションを行った。

また、対象部品は、ボルトとナットの2種類とし、ボルトは頭部高さ：8mm、ネジ部長さ：35mm、ナットは高さ10mmで、どちらも二面幅：19mm、ネジ径：M12、材質：PVCである。新システムでは、図2に示すそれぞれの部品トレイに、頭部の姿勢を揃えて配置した。な

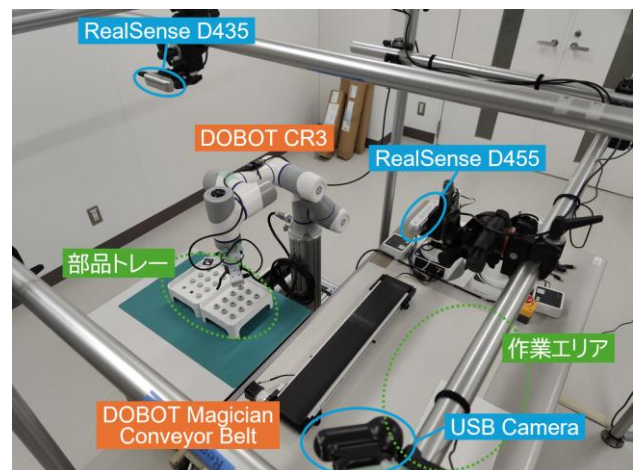


図1 システムの外観

* 情報技術部

** 生産システム部



図2 対象部品と部品トレー

お、想定する組立作業では、1つのボルトに2つのナットを取り付けることとし、新システムでは、ボルト→ナット→ナットの順に、作業者に3つの部品を個別に搬送する動作を繰り返す仕様とした。

3 手・部品検出処理

ロボットやベルトコンベアの動作については、図3に示す手や部品の検出処理画像例の作業検出領域、ロボット稼働領域、部品検出領域(1)~(3)内で検出した手、部

品の状況により、旧システムと同様の処理フローで制御した。なお、手検出処理では MediaPipe Hands²⁾を、部品検出処理では Mask R-CNN³⁾を使用して、旧システムと同様にそれぞれの画像上の位置を推定し、各領域内に存在するかどうかを判定した。

4 ロボット制御処理

ロボット制御処理では、旧システムと同様に、部品検出領域(2)で部品が検出されず、部品検出領域(3)で対象部品が検出された場合にピッキング動作を開始させた。図4にピッキング動作時の移動例を示す。

ピッキング動作では、待機位置（図4(a)）を開始点とし、以下の順に移動させた。

- ① 部品取得位置上空（図4(b)）
- ② 部品取得位置（図4(c)）
- ③ 部品取得位置上空（図4(d)）
- ④ 待機位置（中継点）
- ⑤ 部品配置位置上空（図4(e)）
- ⑥ 部品配置位置（図4(f)）
- ⑦ 部品配置位置上空（図4(g)）
- ⑧ 待機位置（図4(h)）

②の部品取得位置は、D435 カメラで取得したカメラ座標系の3次元座標を変数として取得し、キャリブレーションにより求めた変換行列を用いて、ロボット座標系

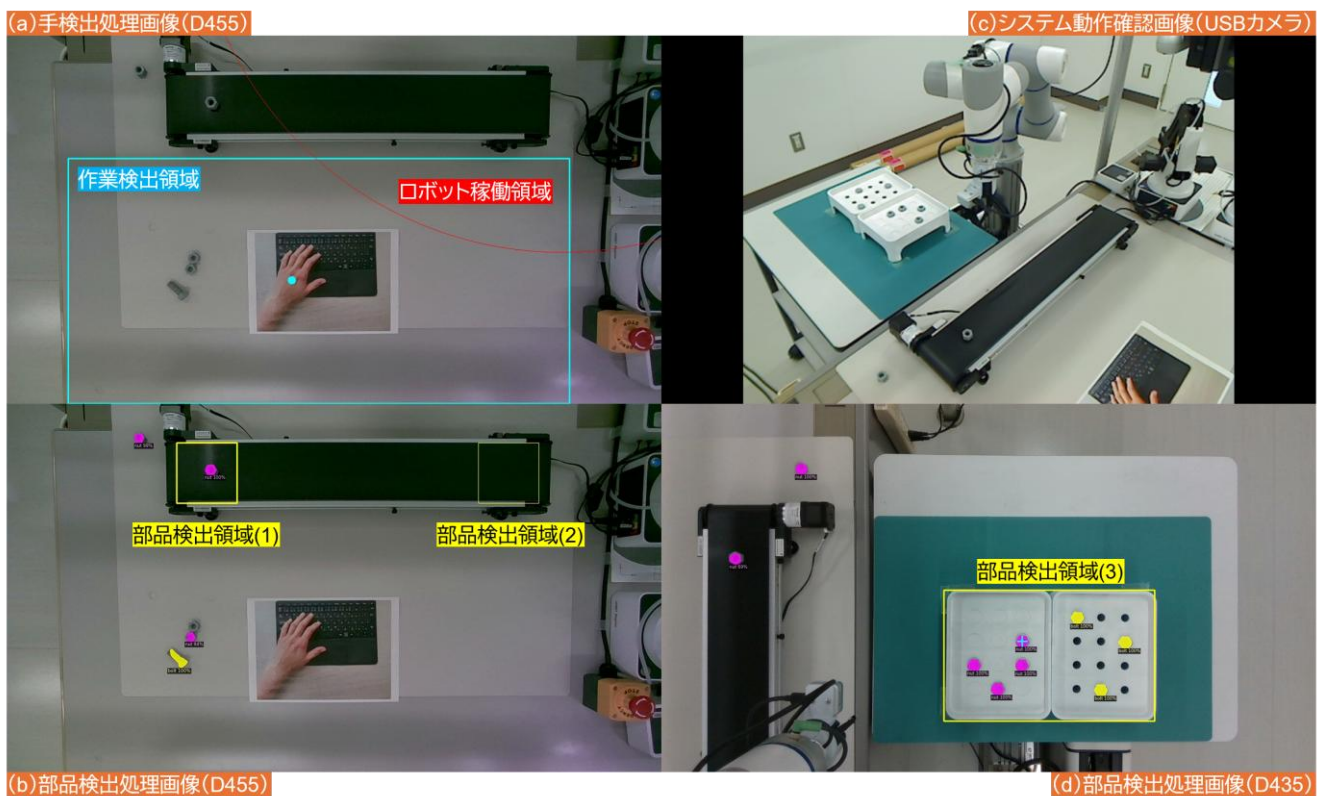
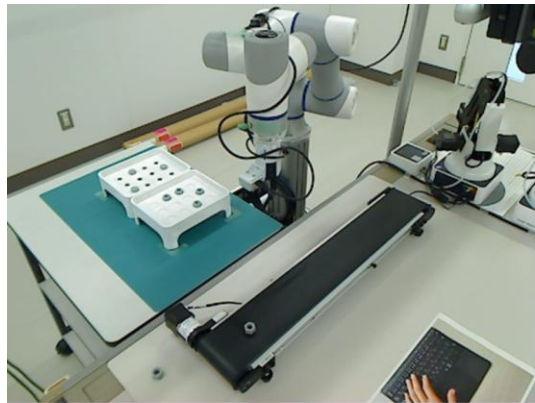


図3 手や部品の検出処理画像例

※ここでは手を検出するために、手の写真を作業者の手の代用として作業検出領域内に置いている。



(a)待機位置



(b)部品取得位置上空



(c)部品取得位置



(d)部品取得位置上空



(e)部品配置位置上空



(f)部品配置位置



(g)部品配置位置上空



(h)待機位置

図4 ピッキング動作時の移動例（対象部品がナットの場合）

※ここではシステムの動作を検証するために、手の写真を作業者の手の代用として作業検出領域内に置いている。

の3次元座標に変換した。ただし、 z 座標については、作業台の高さを0 mmとしたロボット座標系を基準とし、部品トレイ、及び部品の高さが既知であることから、定数として設定した。

⑥の部品配置位置の x 、 y 座標は、部品検出領域(2)内となるように定数を設定し、 z 座標は、ベルトコンベアの高さ、部品の高さ、及び把持時の高さが既知であるため、対象部品の種類ごとに定数を設定した。

②の部品取得位置で部品を把持する際は、部品をあらかじめ決められた姿勢に固定しているため、ロボットの姿勢をそれに合わせ、エンドエフェクタの爪を閉じて把持させた。

③の部品取得位置上空から⑤の部品配置位置上空へ移動する際は、④の待機位置を中継点として経由させた。これは、PTP (Point-to-Point) モードで直線移動するとロボットの可動域外を通過する経路となるのを回避するためである。

5 まとめ

本研究では、協働ロボットとAIを活用した作業連動システムの開発を行い、より高い把持力を持つロボットとエンドエフェクタを用いることで、より多様な部品への対応を実現した。

新システムの動作を検証したところ、旧システムと同様に、作業者の部品検出領域(1)からの部品のピックアップ動作に応じて、ベルトコンベアが自動的に搬送を開始すること、ベルトコンベアの搬送開始により部品検出領域(2)が空になると、ロボットが自動的にピッキング動作を開始し、対象部品が供給されることを確認した。

今後は、バラ積みされた部品にも対応できるよう、高精度な部品識別を実現するために、3D形状認識の導入やAIモデルの学習データの増強を検討する。また、力覚センサを用いたフィードバック制御を組み合わせることで、ピッキング動作の精度向上を図る予定である。

【参考文献】

- 1) 渡辺ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp102-105,2024
- 2) F. Zhang, et al., arXiv: 2006.10214,2020
- 3) K. He, et al., arXiv: 1703.06870,2017

精密深絞り加工の安定生産に関する研究（第3報）

西嶋隆*、松原早苗**、岩田英司†、奥田智裕†、林達彦†

Study on stable production method of precision deep drawing（Ⅲ）

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

県では令和4年度から県内製造業のDX支援技術開発プロジェクト事業を開始し、県内企業のデジタル技術を活用したスマートファクトリー化の推進を支援している。本研究はその一環として、金属プレスによる自動車部品の精密深絞り加工を主に行う企業と連携し、昨年度までにプレス製品の中間工程ワークの各種寸法を機上計測するデータ収集システムを開発した。本年度は、開発したデータ収集システムのデータサーバに集約される計測データを用いてマハラノビス距離の評価により異常検知を行うプログラムを開発した。本報では、本年度までに開発した機上計測のデータ収集システムの概要と異常検知プログラムの開発について報告する。

1 はじめに

近年、産業界のデジタルトランスフォーメーション関連施策が経済産業省の主導のもとに推進され¹⁾、生産性や売上高の向上が期待されている。

このような中、県では県内製造業の生産性向上支援のため、令和4年度より「県内製造業のDX支援技術開発プロジェクト事業」を実施している。本研究はその一環として、自動車部品の金属プレス製品を主に生産する企業と連携し、IoT技術を活用した品質管理の高度化に取り組んだ。

令和5年度までは、精密深絞り加工の複数工程におけるワークの各種寸法を機上計測するデータ収集システムの開発に取り組んだ。本報では、令和6年度までに開発したデータ収集システムの概要と計測データを用いたワーク寸法の異常検知システムの開発について報告する。

2 データ収集システムの概要

図1にプレス工程とデータ収集システムの全体像を示す。同図に示すように、プレス工程は前工程と後工程用の2台のトランスファープレス加工機で構成し、前後の工程間はワーク搬送用のコンベアで連結している。プレス加工機に投入された素材は多段の深絞り工程を経て成形され、コンテナに収納される。

データ収集システムにおいては、ワークの表面性状に強く影響すると考えられる項目を選定し²⁾、これらをデータ化する4つの計測装置³⁾（①ブランク材厚さ、②金型温度、③直径、④全長+完成品の所定位置厚さの計測装置）を用いてワーク全数を機上計測する。

データ収集システムには、これらの4つの計測装置をクライアントとするデータサーバを設け、計測データの

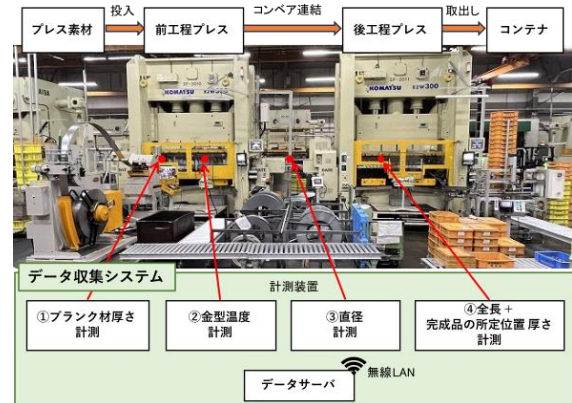


図1 プレス工程とデータ収集システムの全体像

収集、整理、保存を行う。各計測装置の計算機にはRaspberry Pi 4 ModelBを用い、データサーバにはRaspberry Pi 5を用いた。

2.1 ワークと計測データの紐付け

プレス加工機に流れるワークは大量生産品であることから、個々にシリアル番号は採番されていない。このため、各ワークに対して、別々の計測装置で得られた測定データを紐付ける仕組みが必要となる。

これに対し、本データ収集システムでは4つの計測装置の計測カウントをネットワーク経由で同時にリセットする機能を設けた。これにより、各計測装置は計測開始時に計測カウントをリセットし、かつ計測カウント数から各計測装置の工程番号（プレス先頭工程からのワークの並び順）の数を減算（オフセット）した値をワーク番号とし、ワーク番号、計測項目、計測値の3点をセットで計測データを記録する。これにより各ワークに対して全ての計測項目のデータが紐付けできる。

2.2 データサーバにおけるデータ整理

各計測装置は、一測定毎に計測データをデータサーバに送信する。送信データは前述のワーク番号、計測項

* 技術支援部

** 情報技術部

† 株式会社加藤製作所

目、計測値の3点をセットとしている。

データサーバでは、各ワーク番号をプライマリーキーとしてデータ整理を行い、各計測項目をフィールドとしたレコードを生成する。また、後述する異常検知システムでのデータ利用のため、測定ワークの一つひとつについて、全ての計測項目の計測データを記録した1行のcsv形式のデータファイルを出力する。

3 異常検知プログラムの開発

本研究で扱うプレス加工機による生産では、不良品の発生頻度は非常に少ないため、不良時の大量データの取得は困難である。そのため、今回は正常データのみ機械学習し、異常度をマハラノビス距離の2乗値により評価するホテリングのT2法による異常検知を採用した。

本異常検知プログラムは、中間工程ワークの寸法に基づいた異常検知であるため、その利用方法としては、例えば途中工程の成形異常を直ちに検知し、金型の消耗等を確認することなどが考えられるが、本取り組みでは、主にプレス工程の後工程にある洗浄工程後に稀に見つかるワークの表面性状の不具合との関連を調査していくことを想定している。

開発した異常検知プログラムは単独のソフトウェアとしての利用も可能であるが、データ収集システムと連携して使う場合、データサーバ上またはネットワーク上の他のシングルボードコンピュータ等で動作させる。

本異常検知プログラムは、生産現場での利便性を考慮して作成しており、データサーバから出力されたデータファイルを受け取るための受信用フォルダを設定することで実装できる。

3.1 学習データの蓄積と機械学習の流れ

本異常検知プログラムに用いられる学習データは、データサーバから送信されたワーク毎の計測データファイルが、異常検知プログラムで設定したデータ受信用フォルダに書き込まれるイベントによって、学習データフォルダに蓄積される。

機械学習の計算は、学習データを十分に蓄積した後、任意のタイミングでGUI上の学習計算ボタンを押すことで実行する。

図2は実行時のGUIの一例（本例の計測項目「特徴量」は11項目）であり、左側に特徴量の相関行列、右側に学習データのマハラノビス距離の2乗値のヒストグラムを表示する。ヒストグラムにはカイ2乗分布を破線で表示する。これにより学習データの目視確認ができる。

加えて学習計算の実行時には、特徴量間の相関プロット（対角成分はヒストグラム、非対角成分は2特徴量間の相関図）、ならびに各学習データのマハラノビス距離のグラフ）の画像ファイルを生成する機能を設けた。それぞれの一例を図3、図4に示す。前者では、特徴量の度数分布の単峰性や特徴量間の相関による学習データの

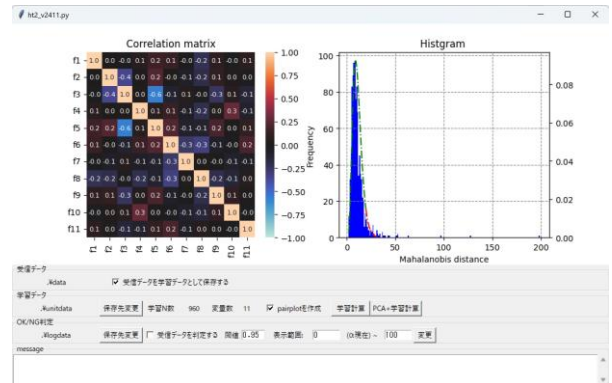


図2 学習実行時のGUIの一例

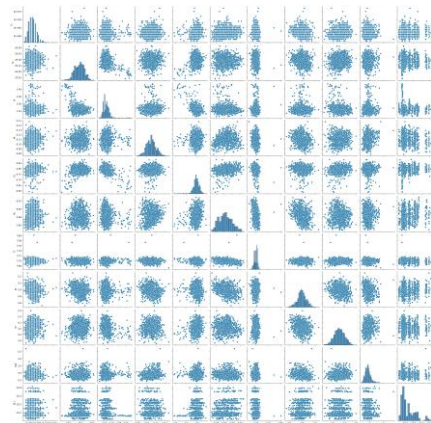
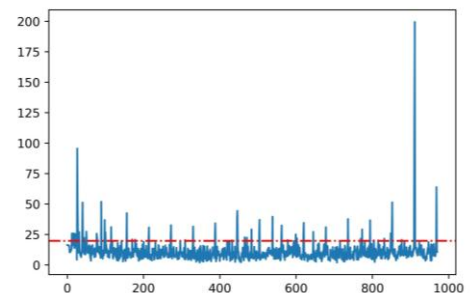


図3 特徴量の相関プロットの一例



（縦軸：マハラノビス距離の2乗値、横軸：ワーク番号）

図4 学習データのマハラノビス距離のグラフの一例

適切性の目視確認、後者では、外れ値などの目視確認を行う。

3.2 異常検知の流れ

学習計算後においては、データ受信用フォルダに書き込まれた計測データは、学習データに基づいた異常度の判定が行われる。

異常検知の閾値は、マハラノビス距離の2乗値の分布が特徴量数を自由度とするカイ2乗分布に従うことを利用する。例えば、正常データのうち99.7%を正常と判定するには、確率密度関数の下側累積確率を0.997と設定する。設定値はGUIから適宜変更できるが、実用的な

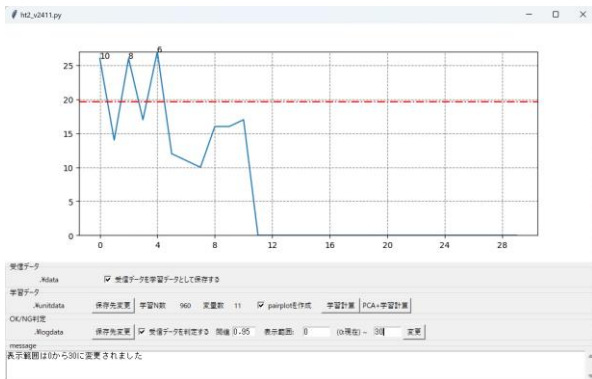


図5 異常検知時の GUI の一例

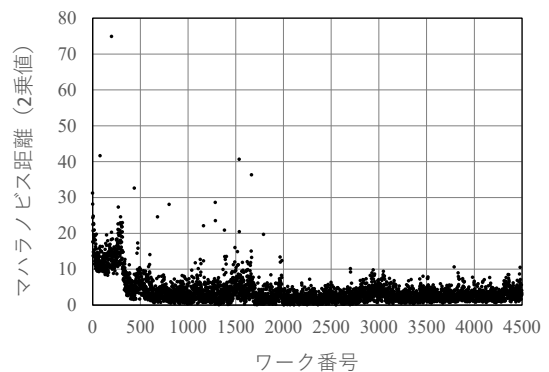


図7 測定データのマハラノビス距離 (2乗値)

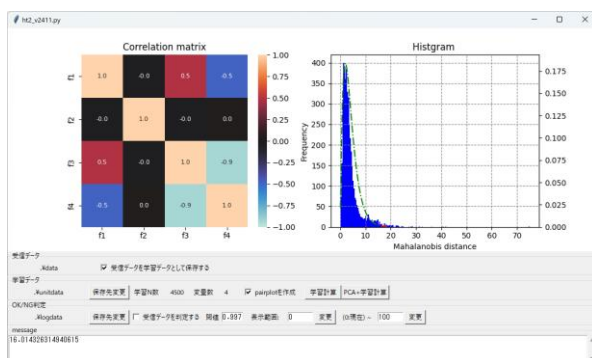


図6 計測データによる機械学習の実行画面

閾値の設定については、運用上、その都度検討する必要がある。

図5に異常検知時のGUIの一例を示す。横軸はワーク数、縦軸にマハラノビス距離の2乗値がプロットされる。また、破線で閾値ラインが表示され、異常検知された場合は、ワーク番号がグラフ上に表示される(図5では、ワーク番号10, 8, 6が異常として判定されている)。また、ログデータとして、ワーク番号、異常判定結果、マハラノビス距離、閾値、実行時刻が記されたファイルが保存される。

4 計測実験

プレス生産時の機上計測で得られたデータを用い、機械学習を行った。解析に用いたデータ数は約4500点であり、計測項目は blanks材の厚さ、中間工程品の直径、中間工程品の全長、完成品の所定位置厚さの4項目である。金型温度は本解析には適さないと判断し除外した。

なお、データ収集システムで収集した計測データにおいて、電磁ノイズやネットワーク負荷等によると考えられる欠損が認められたため、これらデータについては除外して解析を行った。

4.1 計測データの機械学習

計測データによる機械学習の実行画面を図6に、学習データのマハラノビス距離(2乗値)を図7に示す。

マハラノビス距離は、サンプル番号の小さいプレス加工の初期段階においては大きく、サンプル番号が増えるに従い減少する傾向となり、生産開始期に計測寸法が不安定であることがわかる。なお、本学習データから異常判定する場合、特徴量数が4であるため、自由度4のカイ2乗分布を利用することとなる。

5 課題と今後の展望

トランスファープレスの中間工程品の各種寸法を機上計測するデータ収集システムを開発し、中間工程品の寸法異常検知プログラムを開発した。

プレス生産時の計測実験を行い、収集した学習データによる異常検知プログラムの動作を確認した。

今後は、データ収集システムのデータ欠損などの対策とともに、完成品の成形異常や表面性状異常の発生時の計測データに基づいた本異常検知プログラムの実用検証を行いたい。

【参考文献】

- (独) 情報処理推進機構, DX 動向 2024
<https://www.ipa.go.jp/digital/chousa/dx-trend/dx-trend-2024.html> (参照 2025/2/1)
- 西嶋ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp79-80, 2023
- 西嶋ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp99-101, 2024

加工機モータの回転を利用した情報伝達手法の開発

横山哲也*、加賀忠士*、亀井誠二†、山口裕之†

Method for transmitting information using rotation of processing machine motor

YOKOYAMA Tetsuya*, KAGA Tadashi*, KAMEI Seiji† and YAMAGUCHI Hiroyuki†

製造業の人手不足などの解決策の一つとして、DXの導入による業務の自動化がある。切削加工の現場においても、人が関わる作業をなくす、または機械に置き換えることで業務の自動化が可能となり、省人化や生産性の向上が期待できる。本研究では切削加工の業務の自動化を目的とし、加工機のモータ回転から外部装置に情報を伝達する手法を提案する。今年度は試作したタップ加工の異常検知プログラムに提案手法を組み込み、タップ加工で試行を行った。その結果、情報を伝達できることを確認した。

1 はじめに

製造業の人手不足などの解決策の一つとして、DXの導入がある。DXの導入は3つの段階(データのデジタル化、個別プロセスのデジタル化、全体プロセスのデジタル化)に分けられ、企業の現状に応じて取り組むべき内容を選定し、推進していくことになる。

切削加工の現場においても、IoTを活用して加工データの収集やデータの可視化など、データのデジタル化に取り組んでいる。その取り組みの次の段階は、収集データを活用した業務の自動化やプロセスのデジタル化である。切削加工の現場で作業者が関わる作業をなくす、または機械に置き換えることで業務を自動化できれば、省人化や生産性向上が期待できる。このため本研究では切削加工業務の自動化に取り組んでいる。

工場には新旧の加工機が併設されており、加工機によって備わっている機能が異なる。最新機であれば通信機能やモニタリング機能が備わっており自動化に支障はないが、機能が十分でない加工機に関して自動化を進める場合は、加工機にPLCやパソコンなどの外部装置を取付け、外部装置でプログラムを実行する必要がある。その際、通信機能を備えていない加工機では、外部装置との情報のやりとりに支障が生じる。例えば、タップ加工の異常検知を行う場合、外部装置に加工の計測データを集め、プログラムで閾値判定を実行することになる。タップにかかる負荷はタップ径に応じて変化するため、閾値をタップ径毎に用意し、タップ径の変更に応じて作業者が閾値を切り替える必要がある。この切り替え作業は加工担当者に負担を強いることになり、異常検知技術の実用化における課題の一つとなっている。

そこで我々は、通信機能を有していない加工機を対象に、加工機のNCプログラムに、加工には直接関係ない

スピンドルモータの回転(以下、情報伝達回転)を意図的に追加することで、モータ電流経路で外部装置に情報を伝達する手法を提案する。具体的には情報伝達回転を予め決めたルールで変化させることで、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仕組みを構築する。これにより、通信機能を備えていない加工機を用いた切削加工業務の自動化を推し進めることができると考える。

本稿では、はじめにモータ電流からのモータ回転数の推定手法を述べ、次にモータ回転数から情報を伝達する提案手法を説明する。最後に、試作したタップ加工の異常検知プログラムに提案手法を組み込み、工場の加工業務に試行した内容を報告する。

2 モータ電流からのモータ回転数の推定

2.1 電流計測方法

加工機に搭載のスピンドルモータは交流モータであり、交流モータの回転速度はモータに流れる交流電流の周波数に依存する。本研究ではモータに流れる交流電流を計測し、計測データから周波数を推定することでモータの回転数を推定した。

図1に計測構成を示す。電流計測にはクランプセンサを用いた。スピンドルモータとサーボアンプ間の3相配線の1つにクランプセンサを取付け、クランプセンサの出力を電子回路経由でマイコンのAD入力に接続した。なお、クランプセンサは非接触センサであり後付けが容易であることから、システムを安価に構築できる。

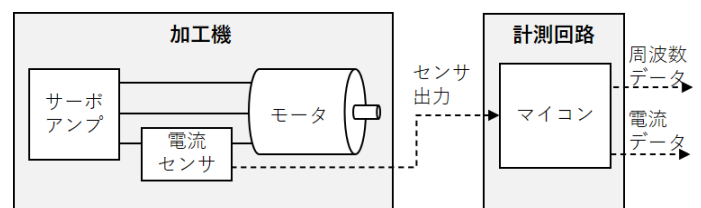


図1 計測構成

* 機械部

† 株式会社イマオコーポレーション

2.2 モータ回転数の推定

計測した電流データからモータ回転数を推定するため、図1に示す計測回路のマイコンを用いて電流の周波数 f を算出する。

スピンドルモータに流れる交流電流をクランプセンサで計測すると、センサ出力の波形(イメージ)は図2に示すようにオフセット電圧を基準に±に振動する周期波形となる。この周期波形の周期の逆数が周波数 f である。なお、実際のモータ電流にはノイズが含まれていることから、ローパスフィルターを用いてノイズを除去した。

ノイズを除去した波形に対して、オフセット電圧を交差(負から正へ、または正から負)する回数 cnt を計測周期 T 毎にカウントする。このときの周波数 f は式(1)で算出できる。

$$f = \frac{cnt}{2T} \quad (1)$$

周波数 f からモータの回転数 $N(\text{rpm})$ は、式(2)から算出できる。

$$N = \frac{120f}{p} \quad (2)$$

ここで p はモータの極数である。

3 提案手法

3.1 モータ回転による情報伝達

切削加工機のスピンドルモータは、工具または被削材を把持し回転させるモータであり、モータ駆動にはフィードバック制御ができるサーボアンプが使用されている。NC プログラムで記述したスピンドル回転数がサー

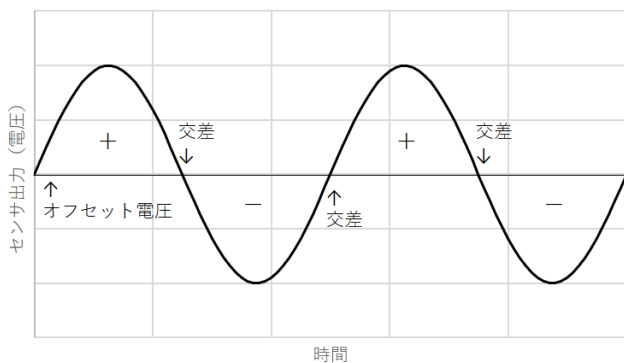


図2 電流センサの出力波形 (イメージ)

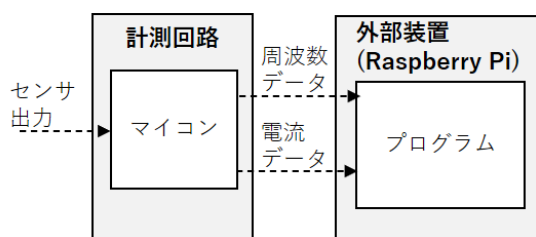


図3 計測回路と外部装置

ボアンプの指令値となり、その値に従いスピンドルモータは回転することとなる。

提案手法は、制御できるスピンドルモータの回転(アナログ)を用いて、伝えたい情報を符号(デジタル)に変換して伝える。具体的には、情報を伝達するための加工には直接関係ない情報伝達回転をサーボアンプに指令し、モータを回転させる。この情報伝達回転は、外部装置(図3)に伝達したい情報を次節に記述する方法で回転数に変換したものである。また、情報伝達回転の回転数を、電流センサの計測データから復元することで、加工機から外部装置に情報を伝達することになる。

3.2 モータ回転のパターン

回転数を受け取る外部装置では、受け取った回転数データが、情報伝達回転の回転数なのか、被削材切削時の回転数なのかかわからない。外部装置が両者を区別するために、情報伝達回転の一部を予め決めたパターンで回転させることで、材料切削時の回転と区別を行う。

図4に情報伝達回転のパターンを示す。情報伝達回転の構成には前半と後半があり、前半は外部装置に対してこの回転が情報伝達回転であることを通知するためのパターンとなる。後半の回転は外部装置に伝達する情報が含まれている。

本研究では10進数2桁の数値(0~99)を外部装置に伝達することとした。以下に情報伝達回転の手順を示す。

(前半)

- a-1) T_s 秒間、モータを N_1 で回転
- a-2) T_s 秒間、モータを N_2 で回転
- a-3) T_s 秒間、モータを N_1 で回転

(後半)

- b-1) T_s 秒間、モータを N_A で回転
- b-2) T_s 秒間、モータを N_B で回転

N_1 と N_2 は互いに異なる回転数で、外部装置がこの回転数(周波数)パターンを読み取った際、情報伝達回転であることを判断する。伝えたい数値を α とした場合、 N_A と N_B は以下の計算式で求めることになる。

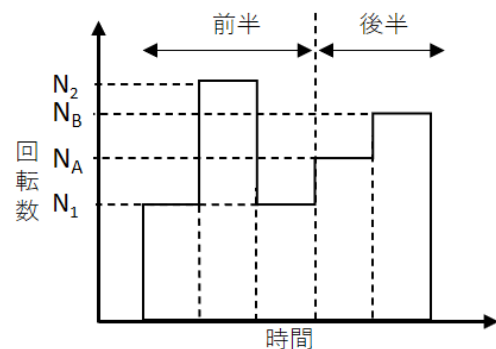


図4 情報伝達回転のパターン

$$N_A = N_0 + N_s A \quad (3a)$$

$$A = \alpha/10 \quad (3b)$$

$$N_B = N_0 + N_s B \quad (4a)$$

$$B = \alpha\%10 \quad (4b)$$

ここで N_s は回転数の刻み幅、 N_0 は A または B が 0 のときの回転数である。式(3b)の A には商のみを代入し、式(4b)の B は余りのみを代入する。

マイコンから周波数データを受け取った外部装置は、受け取ったデータの中から情報伝達回転の前半パターンが存在するか確認を行う。存在する場合は、それ以降の後半データから、式(3)(4)を用いて 2 桁の数値 α を復元することになる。

4 タップ加工での試行

試作したタップ加工の異常検知プログラムに提案手法を組み込み、実際の加工業務で情報伝達の動作確認を行った。

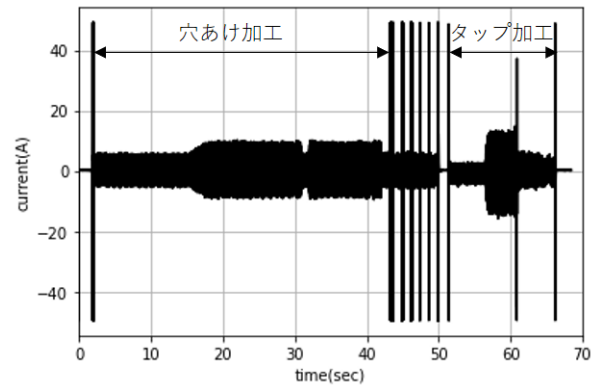
対象とするタップ加工(M12)は、ドリルで開けた下穴に対してねじ山を成形する加工であり、対象とする工具は切削タップ(スパイラルタップ)である。タップ加工を行う加工機は複合加工機で、タレットでタップを把持し、スピンドルモータで被削材をチャックし回転させて加工を行う。

異常検知プログラムが動作する外部装置(Raspberry Pi)には計測データ(電流値、周波数)が蓄積されるが、その計測データが示す加工内容(加工の種類、加工条件など)は分らない。そこで本研究では外部装置に伝達する情報 α に、タップ加工の内容を識別できる数値、タップ加工時のモータ電流の周波数 f_{tap} を与えることとした。これにより、異常検知プログラムでは、情報伝達回転で受け取った α をもとに、計測データの周波数から f_{tap} を見つけ、タップ加工の時間帯を特定する。また、 f_{tap} に紐づけられた閾値を用いることで、異常検知の閾値判定を実行する。なお、異常検知プログラムは昨年度の報告²⁾をもとに試作したプログラムであり、タップ加工時の電流の大きさの変化などを閾値判定で検知する。

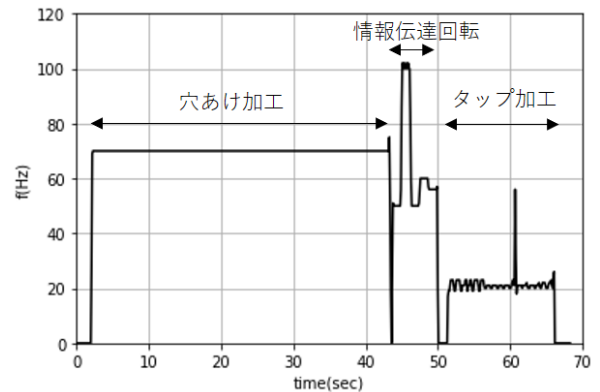
作業者は 3.2 節の処理手順に従い、情報伝達回転を実現する NC プログラムを作成した。該当タップ加工の回転数は 212rpm、スピンドルモータの極数 $p=12$ 、式(2)より伝えたい情報 α のタップ加工時周波数は $f_{tap}=21\text{Hz}$ である。このときの情報伝達回転の回転数及び回転数から

表 1 情報伝達回転時の回転数と周波数

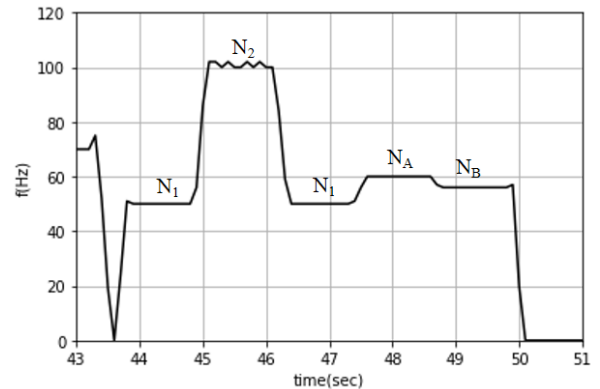
	回転数 rpm	周波数 Hz
N_1	500	50
N_2	1,000	100
N_A	600	60
N_B	550	55



(a) モータ電流



(b) モータ電流の周波数推定結果



(c) モータ電流の周波数推定結果
(情報伝達回転時の時間帯)

図 5 計測データと周波数推定結果

求まる周波数を表 1 に記す。なお、 N_A 、 N_B は $N_0=N_1$ 、 $N_s=50$ として求めた。

図 5(a)に穴あけ加工とタップ加工(M12)時のスピンドルモータの計測電流を、図 5(b)に電流データから推定した周波数結果を示す。図中の約 44 秒から 50 秒の回転が、情報伝達回転に該当し、図 5(c)にその時間帯の周波数推定結果及び該当する情報伝達回転の回転数(記号)を示す。図 5(c)より、推定した周波数は表 1 記載の周波数と概ね一致しており、推定した N_A と N_B から α を算出できることを確認した。また α をもとにタップ加工(正

転)の時間帯を特定することができ、その時間帯の電流データに対して異常検知プログラムの閾値判定が実行されることも確認できた。ただし、上記結果はタップ加工 M12 のケースであり、異なるタップ径での検証が少ないため、さらなる検証が必要である。

5 まとめ

本研究では、通信機能を有していない加工機を対象に、加工機の NC プログラムに、加工には直接関係ないスピンドルモータの回転を意図的に追加することで、モータ電流経由で外部装置に情報を伝達する手法を提案した。また、試作したタップ加工の異常検知プログラムに提案手法を組み込み、タップ加工で試行を行った。その結果、スピンドルモータの情報伝達回転から情報を読み取り、その情報に基づいて、外部装置のプログラムが動作することを確認できた。ただし、事例が少ないため、さらなる検証が必要である。

本研究では制御できる物理量(アナログ)を用いて、伝えたい情報を符号(デジタル)に変換して伝えることを目的としている。本稿では伝達した情報を2桁の数値としたが、手順を変更することで桁数の増加や文字データも伝えることが可能と考えている。そのため、今後は手順の見直しを含め、改良を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 経済産業省, DX レポート2 中間取りまとめ(概要)
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/dgs5/pdf/005_s03_00.pdf(参照 2025/3/6)
- 2) 横山ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5,
pp95-98,2024

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1報）

— 熟練・非熟練作業者の視線と手の動作の比較 —

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 (I)

- Comparison of eye and hand movements of skilled and unskilled workers -

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

製造現場の作業者の動作を AI で分析し、作業を支援する技術の開発を行っている。その一環として、シロッコファンの組立工程における熟練作業者と非熟練作業者の作業特性を明確にするため、ウェアラブルアイトラッカーを用いて視線データや映像データを取得し、視線と手の動作を比較した。その結果、熟練作業者は視線や手を効率的に移動させ作業を進めているのに対し、非熟練作業者は視線の移動範囲が広く、手の動きに無駄が多い傾向が見られた。また、作業特性の把握や熟練度の違いを明確にするには、視線と手のデータを同時に取得し、統合して評価することが有効であることがわかった。

1 はじめに

近年、製造業の現場では、熟練作業者の高齢化や人材不足が深刻化しており、高度な技能の効率的な継承が重要な課題となっている¹⁾。これらの技能は、経験や直感に基づく暗黙知であり、明確な手順として言語化し、体系的に共有することが難しい。そのため、熟練作業者の持つ優れた技能を具体的なデータとして記録し、それを分かりやすく後継者に伝えるシステムの開発が必要とされている²⁾。このような背景から、熟練作業者の技能を客観的に分析する方法として視線計測技術³⁾が活用されており、視線の動きを分析する研究⁴⁾⁵⁾や、視線と手の動作の関係性を分析する研究⁶⁾が進められている。

本研究では、製造現場における作業者の動作を、AI を活用して分析し、作業を支援する技術の開発を目指している。その一環として、本稿では、手で組み立てる作業の技能継承の効率化を目的に、熟練作業者と非熟練作業者の視線と手の動作を計測し、比較分析を行った。

具体的には、ウェアラブルアイトラッカーを用いて熟練作業者・非熟練作業者の視線データを取得し、シーンカメラ映像を基に視線と手の動作パターンを観察することで、両者の違いを評価した。

2 対象作業

2.1 対象作業の概要

本稿の対象は、シロッコファン組立工程である。シロッコファンは円筒状に配置した羽根板で構成され、空調機器や換気システムに広く用いられる。組立工程は、まず、材料置き場から羽根板を取り出し、専用の機械で成形する。次に、作業者が成形した羽根板を両



図1 対象作業の様子

手で持ち、円筒状に丸める。丸めた羽根板を上下の円形フレームに手作業ではめ込む。その後、組み立てた部品を機械で加締め、最後に目視検査を行い、完成品を梱包する。本稿では、特に熟練度が問われる「羽根板のフレームへのはめ込み作業」を評価対象とした。対象作業の様子を図1に示す。

2.2 被験者および対象作業の動作と順序

被験者は、対象作業を常時担当している熟練作業者1名と、通常は他工程を担当し、対象作業経験が限られる非熟練作業者1名の計2名とした。対象作業を構成する動作とその順序は以下のとおりである。

- (1) 円筒状に丸めた羽根板のつなぎ目を作業台に置かれた上フレームにはめ込む
- (2) 羽根板全体を上フレームに軽くはめる
- (3) 作業者自身と羽根板のつなぎ目を結んだ軸を中心に羽根板を上下に回転させる
- (4) 羽根板全体を作業台に置かれた下フレームに軽くはめる
- (5) 羽根板のつなぎ目を下フレームにはめ込む

動作(2)では、作業者が羽根板を円筒状に丸める際のわずかなズレや、羽根板の形状の個体差が影響し、円形のフレームにはめ込む際に収まりにくいことがある。

^{*} 情報技術部

[†] 東プレ株式会社岐阜事業所

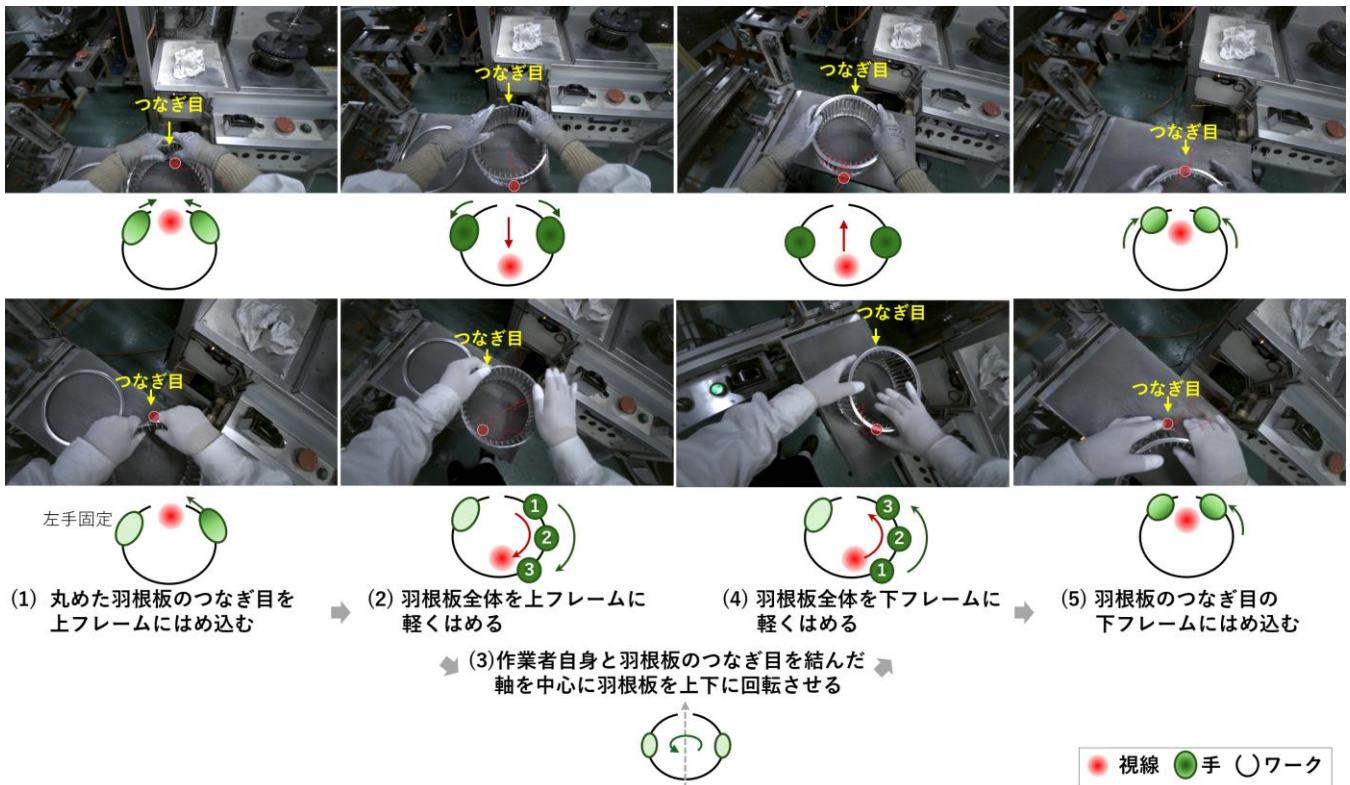


図2 手と視線の動きの比較結果（上段：熟練作業、下段：非熟練作業）

そのため、羽根板の形状に応じてフレームへの調整が必要になる場合がある。

3 データの取得

データの取得には、眼鏡型アイトラッカー(Tobii 社製 Pro Glasses 3)を使用した。この装置では、作業者の視線方向や注視点等の視線データや、シーンカメラ映像データを取得することができる。なお、視線データは 100Hz のサンプリングレートで、シーンカメラ映像データは解像度 1920×1080 ピクセル、25Hz で記録した。

データは、実際のシロッコファン組立工程の現場で取得した。

4 熟練作業者と非熟練作業者の作業比較

4.1 動作の比較結果

熟練作業者と非熟練作業者の作業特性を比較するため、視線位置を赤丸で重ねたシーンカメラ映像を用いて比較評価を行った。まず、2.2 節で示した動作(1)から(5)に手動で分割し、各動作における手の動きの目的や左右の手の協調性、手と視線の動きの関係について観察した。その結果を図2に示す。本節では、動作(2)は、羽根板の形状調整が不要な場合に対して比較した。調整が必要な場合は調整方法が作業毎に異なり、一貫した比較が難しいためである。

動作(1)では、熟練作業者は丸めた羽根板のつなぎ目を両手で同時に上フレームにはめ込んだ。一方、非熟

練作業者は、まず左手で羽根板の左端を上フレームにはめ込み、次に右手で右端をはめ込んでつなぎ目を調整した。どちらの作業者も、はめ込む箇所を注視していた。

動作(2)では、熟練作業者は両手をつなぎ目から羽根板の左右に移動させ、両手で1～2回押し、上フレームへはめた。一方、非熟練作業者は左手でつなぎ目を固定し、右手をつなぎ目から反対側に向かって時計回りに動かしながら、3～4箇所まで押し、はめた。視線の動きについて、熟練作業者は手の移動と同時につなぎ目から反対側へまっすぐ視線を移し、はめ終わるまで留めていた。これに対し、非熟練作業者は視線をつなぎ目から反対側へフレームに沿いながら右手を先導するように動いていた。

動作(3)では、どちらの作業者も自身と羽根板のつなぎ目を結んだ軸を中心に回転させ、上下面を反転させた後、下フレームに位置を合わせて配置した。視線は、どちらの作業者も下フレームの手前を注視し、羽根板の位置を調整していた。

動作(4)では、熟練作業者は両手を羽根板の左右に移動させ、両手で押しながら、下フレームにはめた。一方、非熟練作業者は左手で羽根板の左を固定し、右手をつなぎ目の反対側からつなぎ目まで反時計回りに動かしながら、3～4箇所順に押し、はめた。視線の動きについて、熟練作業者は下フレームの手前をはめ終わるまで注視し、その後つなぎ目へまっすぐに移動さ

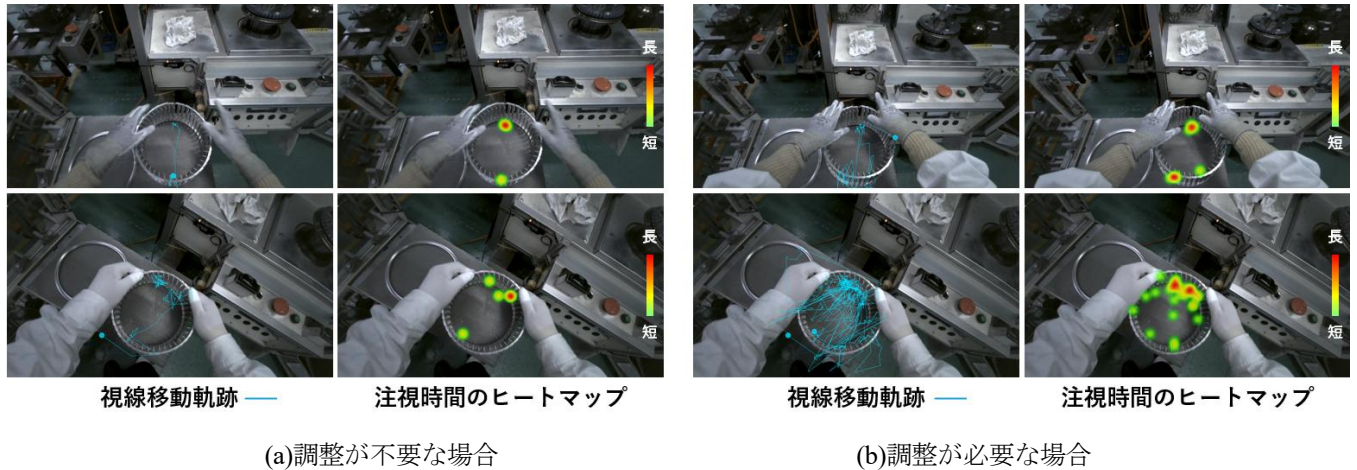


図3 視線データの比較結果 (上段：熟練作業、下段：非熟練作業)

せた。これに対し、非熟練作業者は視線をつなぎ目の反対側からつなぎ目までフレームに沿いながら右手を先導するように動いていた。

動作(5)では、熟練作業者も非熟練作業者もつなぎ目付近に両手を動かし、同時に下フレームにはめ込んだ。視線は、どちらの作業者もはめ込む部位を注視していた。

全体として、熟練作業者はほぼすべての動作において両手を左右対称に同時に使用し、効率的に作業を進めていた。一方、非熟練作業者は左手でワークを固定し、右手を用いてフレームに沿って作業を行っていた。視線の動きについては、次節で詳しく述べる。

4.2 視線データの比較結果

視線データの評価の目的は、作業者の視線がどのような経路をたどり、どの部位に注目しているのかを明らかにすることで、熟練作業者と非熟練作業者の視線の動き方を比較するためである。そこで、シーンカメラ画像に視線移動軌跡を重ねることで、作業中の視線の流れを評価した。また、特定の部位への注視時間をヒートマップとして表現し、作業者が特に注目した箇所を評価した。

動作(2)では、作業者が羽根板を円筒状に丸める際のわずかなズレや、羽根板の個体差が影響し、丸めた羽根板の形状にばらつきが生じる。そのため、羽根板の形状をフレームに合わせる調整が必要な場合と不要な場合がある。これらの違いについて視線データを用いて比較した結果を図3に示す。

調整が不要な場合、図3(a)右の注視時間のヒートマップを見ると、熟練作業者の視線はつなぎ目とその反対側の2箇所集中している。一方、非熟練作業者の視線はつなぎ目を中心に、つなぎ目から時計回りに2箇所、つなぎ目の反対側の計4箇所に広がっている。また、図3(a)左の視線移動軌跡を見ると、熟練作業者はつなぎ目から直線的に反対側へ視線を移動させてい

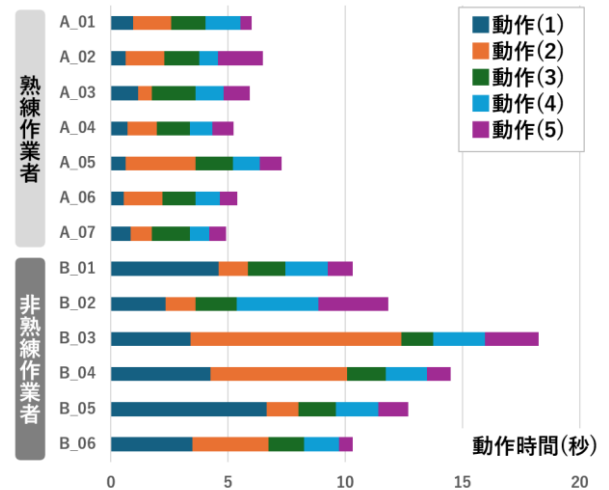


図4 動作時間の比較結果

るが、非熟練作業者はつなぎ目から時計回りに視線を移動させた後、つなぎ目の反対側へと移動している。

非熟練作業者は左手でつなぎ目を固定し、右手を時計回りに動かしながら作業を進めるため、視線もそれに伴い複数の箇所を移動していると推測される。

調整が必要な場合、図3(b)右のヒートマップを見ると、熟練作業者の視線は調整が不要な場合と同様に、つなぎ目とその反対側の3箇所に集中している。一方、非熟練作業者の視線はつなぎ目を中心に、フレーム全体に広がっている。また、図3(b)左の視線移動軌跡では、熟練作業者はつなぎ目とその反対側を直線的に行き来しているが、非熟練作業者はつなぎ目を起点にフレーム全体を広い範囲に視線が移動していることがわかる。

4.3 動作時間の比較結果

対象作業のシーンカメラ映像を動作(1)から(5)に手動で分割し、各動作の所要時間を算出した。このデータを用いて、熟練作業者と非熟練作業者の作業の時間を

比較し、その違いを評価した。

対象とした作業映像は、熟練作業員 7 件、非熟練作業員 6 件であり、それぞれの動作時間を算出した結果を図 4 に示す。比較の結果、熟練作業員は非熟練作業員より全体の作業時間が短く、ばらつきも小さいことが確認された。

また、動作(2)においては、熟練作業員・非熟練作業員ともに他の動作と比べて時間のばらつきが大きかった。

4.4 考察

比較の結果、熟練作業員と非熟練作業員の動作や視線の違いが確認された。

熟練作業員は、両手を左右対称に同時に動かすことで、作業の効率を高めていると推測される。一方、非熟練作業員は左手でつなぎ目を固定し、右手で順にはめるため、作業効率が低下すると考えられる。

視線に関して、熟練作業員の視線は、両手を左右対称に動かして羽根板をはめることで、調整が必要な箇所がつなぎ目の反対側に発生しやすくなり、効率的に特定できている可能性がある。一方、非熟練作業員は調整箇所の特定が難しく、フレーム全体を広範囲に探索する必要があるため、結果として移動量が多くなると考えられる。

また、動作(2)においては、熟練作業員・非熟練作業員ともに他の動作と比べて時間のばらつきが大きかった。この要因として、丸めた羽根板の形状にばらつきがあり、フレームにはめ込む際にスムーズに収まらないことが考えられる。特に、非熟練作業員は調整に時間を要する傾向があり、作業時間の増加につながっていると考えられる。

これらの視線と手の動きの違いは、作業時間や作業品質に大きな影響を与える要因であると考えられる。特に、熟練作業員の動作パターンを明確にし、それを非熟練作業員に共有することで、作業の効率化や精度向上が期待できる。

5 まとめ

本稿では、シロッコファンの組立工程において、熟練作業員と非熟練作業員の作業特性を比較し、その違いを明らかにした。視線データはウェアラブルアイトラッカーを用いて取得し、作業映像を動作ごとに分割して分析した。その結果、動作時間や視線、手の使い方にも明確な違いが見られた。

比較の結果、熟練作業員はほぼすべての動作で両手を左右対称に同時に使い、効率的に作業を進めていた。一方、非熟練作業員は左手でワークを固定し、右手でフレームに沿って作業を進めるため、動作の効率が低下していた。また、熟練作業員は視線を素早く移動させ、調整が必要な部位を即座に特定していたのに対し、非熟練作業員は手と視線の移動範囲が広くなり、調整

箇所を探す時間が長くなる傾向があった。

本稿で得られた知見から、作業特性の把握や熟練度の違いを明確にするには、視線と手のデータを同時に取得し、統合的に評価することが有効であることがわかった。

今後は、被験者を増やして本研究で得られた結果をさらに検証し、多様な作業環境や異なる作業内容における視線と手の動作の分析を進める予定である。

【参考文献】

- 1) 経済産業省,2024 年版ものづくり白書,2024
- 2) 中山,人工知能学会誌 Vol.22,No.4, pp467-471,2007
- 3) 大野,日本認知科学会誌 Vol.9,No.4, pp565-579,2002
- 4) 武雄,職業能力開発報文誌 No.26, pp1-8,2014
- 5) 屋代ら,土木学会論文集 F4 (建設マネジメント) Vol.77,No.2, pp1-15,2021
- 6) 川瀬ら,精密工学会誌 Vol.87,No.2, pp221-225,2021

構造最適化を活用した創造的設計技術に関する研究（第1報）

坂東直行*、久富茂樹*、曾賀野健一*

Research on creative design techniques utilizing structural optimization (I)

BANDO Naoyuki*, KUDOMI Shigeki* and SOGANO Kenichi*

本報告では、トポロジー最適化によりコンプライアントメカニズムを導出することを通じて、構造物の形態設計を自動で行う方法を示した。その中で、トポロジー最適化技術を活用することで、構造物の具体的な形を数値解析によって導くことができること、最適化計算における目的関数は複数設定できるので構造を剛にする目的関数と、柔にする目的関数の間で互いにバランスをとるように重み係数を設定することで、コンプライアントメカニズムを導出できること、導出されたコンプライアントメカニズムの形状および特性は、トポロジー最適化における目的関数によって変化することを示した。

1 はじめに

近年、装置や製品の開発においては、高機能化、軽量化、低コスト化など複数の条件を高度なレベルで満たすことが求められている。

多くの場合、設計は設計者の経験と勘に基づいて行われるが、条件の数が増えるにつれて各条件が複雑に絡み合い、それらを満たすように設計するには多くの時間と手間を要する。

このような課題の解決を支援する技術に構造最適化技術がある。構造最適化とは、あらかじめ決められた設計・境界条件から所望の性能を最大限得られる構造・形状を求める方法論である¹⁾。構造最適化は、寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化の3つに大別できるが、このうちトポロジー最適化は構造物の形態を変更することができ、他の構造最適化技術と比較して高い自由度を持つため、性能の大幅な改善が期待できる方法である。一方で、トポロジー最適化で得られる構造・形状は自由度が高く、機械加工や塑性加工では造形が困難な場合が多い。

そこで当センターではトポロジー最適化を3Dプリンターや鋳造のように、形状の自由度が高い造形方法の価値を高める設計手法として着目し、トポロジー最適化で得られた形状の造形方法について、製造の面から検討してきた²⁾。

本報では設計の面からトポロジー最適化技術の活用方法について検討した結果について報告する。

2 トポロジー最適化を活用した設計

トポロジー最適化技術を含む構造最適化技術は、有限要素解析技術に数理最適化技術を組み合わせて構築された技術である。そのため、数理最適化技術における制約

条件と目的関数をトポロジー最適化においても設定する。実際の設計において、与えられた複数の条件を同時に満たす設計解を得る場合、それらを定式化したのち、重み係数を乗じてひとつの目的関数とする。これにより、それらの条件を同時に満たす設計解をトポロジー最適化によって得ることができる。

複数の条件を同時に満たす必要のある設計対象に機構（メカニズム）がある。メカニズムの設計では、意図したとおりに動作する構造であることと、構造体として十分な剛性を持つことを同時に満たすよう進める必要がある。

一般に、メカニズムは部品を組み立てて実現するが、近年は新しいメカニズムとしてコンプライアントメカニズムが提案されている。コンプライアントメカニズムは、ジョイントとなる部分の部材に柔軟性を持たせることで、メカニズムとしての機能性を実現するもので³⁾、一体物として実現できるため、低コストで製造できる利点がある。

そこで本研究では、コンプライアントメカニズムの設計を対象に、トポロジー最適化の活用について検討を行った。

3 コンプライアントメカニズムの設計

3.1 解析課題

本研究で設定した解析課題を図1に示す。

解析空間は2次元で、解析対象は100mm×100mmの矩形において右側中央に切り欠きがある形状である。この形状において、左上隅、左下隅を固定し、左中央部に水平に外力を加えたとき、右側開口部が開く構造をトポロジー最適化によって導いた。

* 生産システム部

3.2 解析モデル

有限要素モデルを図2に示す。

本研究では、有限要素モデル作成に Femap v10.2.0 (SIEMENS 製) を用いた。

設計対象は、中心線を境に対称構造となるため、1/2モデルで有限要素モデルを作成した。有限要素は1mm四方の四角形で作成し、材料プロパティは等方性の弾性体とした。トポロジー最適化における非設計領域は、有限要素モデルの左上隅、左下隅、右側の切り欠き部の隅に設定し、その他の領域は設計領域とした。

3.3 解析ケース

この有限要素モデルにおいて、解析ケースは2つ設定した。

設定した解析ケースを図3に示す。

一つは、左上隅、左下隅を完全固定し、右側の切り欠き部の隅から開口部を広げる方向に外力を加えるもの（以降、解析ケース1）である。これは構造全体の剛性を評価することを目的に設定した。

もう一つは、右上隅を完全固定し、左下隅から水平に強制変位を加えるもの（以降、解析ケース2）である。これは、これから導出しようとするメカニズムが外部から操作を受けたときに設計意図どおりに動作する量と、動作のしやすさを評価することを目的に設定した。

3.4 制約関数・目的関数

トポロジー最適化における制約関数と目的関数は次のように設定した。

トポロジー最適化では解析領域から不要な部分を抜き取ることで形状を得る。そこで制約関数は解析領域全体の体積を対象にし、ここでは初期状態と比較し15%以下になるよう設定した。

目的関数は4つ設定した。

一つ目として、構造全体のコンプライアンスの最小化（以降、目的関数1）を設定した。コンプライアンスとは外力に対する変形のしやすさを表す指標であり、剛性が外力による変形のしにくさを表す指標であることから、コンプライアンスは剛性の逆数となる。よってコンプライアンスを最小化することは、剛性を最大化することであり、これを目的関数に設定することで、外力による変形が生じにくい構造を導くことができる。

二つ目として、変位の最大化（以降、目的関数2）を設定した。今回の解析課題は、対象形状の左中央から加えられた力によって、右側開口部が開く構造を導くことを目的としている。そのため、開口部に基準位置を設け、その位置の変位を評価し、それを最大化することを目的関数に設定することで、より大きく口を開く構造を導くことができる。

三つ目として、水平反力の最小化（以降、目的関数3）を設定した。課題領域の左中央部を既定の量だけ水平に動かしたときの水平方向の反力を評価し、それを最小化することを目的関数に設定することで、小さな操作

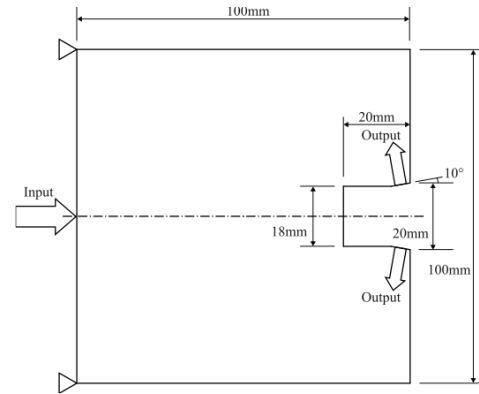


図1 解析課題

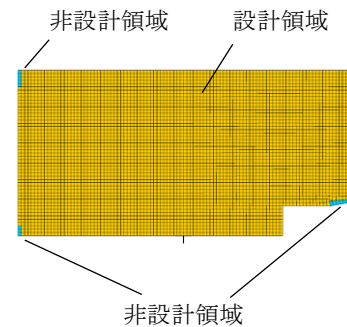


図2 有限要素モデル

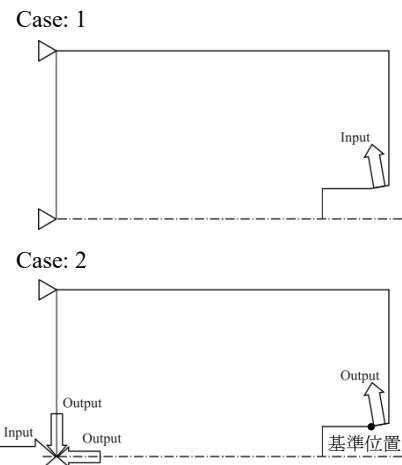


図3 解析ケース

力で動作させることができる構造を導くことができる。

四つ目として、垂直反力の最小化（以降、目的関数4）を設定した。目的関数3が水平方向の反力を評価するのにに対し、これは垂直方向の反力を評価する。

なお、目的関数1は、解析ケース1に対して設定した。他の目的関数は、解析ケース2に対して設定した。

また、目的関数1が構造全体を剛にするように働くのに対し、目的関数2、3、4は構造を柔にするように働く。両者は互いに背反するように作用するので、このバランスをとることで、目的とするコンプライアントメカニズムを導出した。

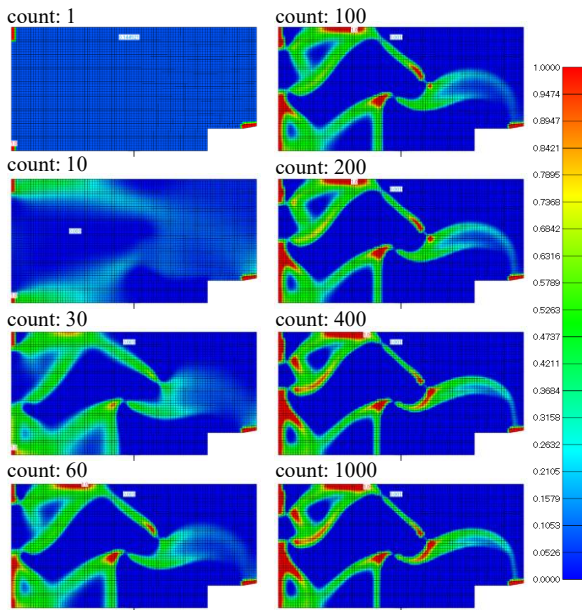


図4 計算の繰り返し回数による解析結果の推移

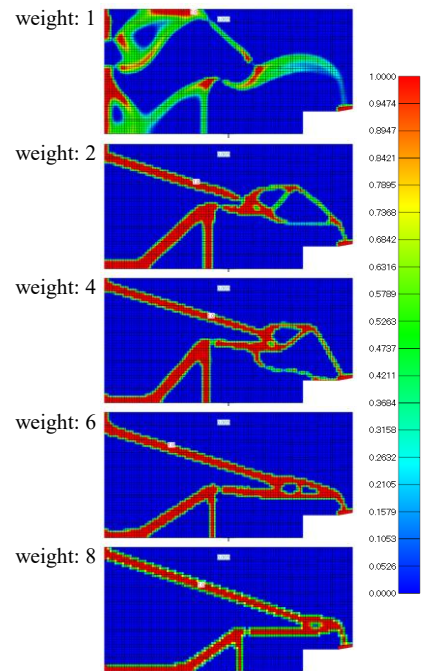


図5 重み係数を変化させた場合の解析結果

3.5 解析結果

本研究では、トポロジー最適化に OPTISHAPE-TS 2022.2 ((株)くいんと製) を用いた。

解析結果を図4に示す。図4には、数値計算の繰り返し回数が、1、10、30、60、100、200、400、1000回時点の結果を示している。ここから、計算が繰り返されるに従い、次第に構造が浮かび上がってくる様子が分かる。なお、今回の課題において、計算結果は400回でほぼ収束し、それ以降は計算を繰り返しても構造に変化は見られなかった。

図4において、赤色領域が材料密度の濃い部分、青色領域が材料密度の薄い部分を表している。赤色領域を残し、青色領域を除くことで、構造が得られる。

この解析モデルでは、前述したとおり、4つの目的関数を設定した。これらの重要度は、各目的関数に設定する重み係数によって決定される。この重み係数は試行錯誤によって決定した。図5には、最上図の構造を得た重み係数に対し、構造を剛にするように働く目的関数1の係数値を2、4、6、8倍に設定した場合を示している。ここから、重み係数を変化させると、導かれる構造が変化することが分かる。

また、各構造には節となる部分が見られる。この部分は他の部分より密度が低いいため構造的に弱く、変形しやすい。各構造に対し NX Nastran V7.1 (SIEMENS 製) を用いて静弾性解析を行った結果を図6に示す。ここでは解析ケース2において、右側に2mm変位させた場合と、左側に2mm変位させた場合を示している。変形図は等倍で、変形前の形状を灰色で、変形後の形状を塗りつぶしコンターで示しており、コンターはミーゼスの相当応力

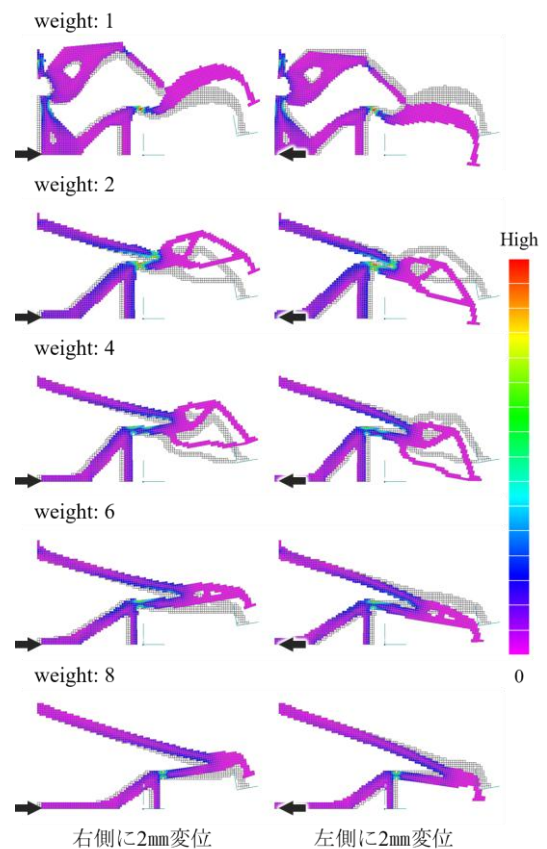


図6 各構造の静弾性解析結果

表1 各指標と目的関数1の重みの関係

重み1	変位1	変位2	水平反力	垂直反力
1	100%	100%	100%	100%
2	31%	76%	77%	68%
4	12%	49%	56%	20%
6	8%	42%	63%	23%
8	4%	29%	38%	14%

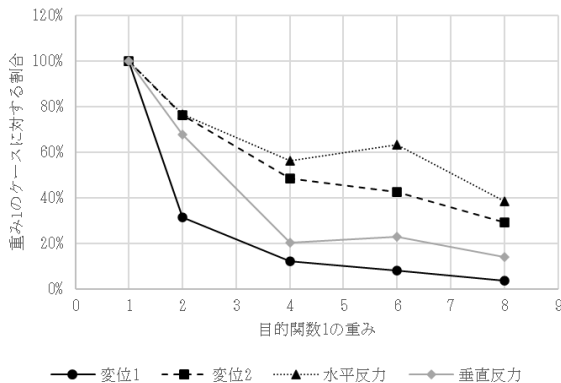


図7 目的関数1の重みの変化による各指標の推移

を示している。ここから、各構造で節を中心に変形が起こり、構造全体としてメカニズムが動作する様子が分かる。

解析ケース1において構造全体で最も変位した箇所の変位量（以降、変位1）、解析ケース2における開口部の変位量（以降、変位2）および左下隅の強制変位に伴う水平方向の反力（以降、水平反力）および垂直方向の反力（以降、垂直反力）と目的関数1の重みの関係を表1および図7に示す。ここで各数値は、目的関数1の重みが1の場合と比較したときの割合で示している。

目的関数1の重みを増やすと、変位1と変位2は小さくなる傾向が見られた。これは重み係数が大きくなるにつれ、他の目的関数に対する目的関数1の相対的な影響が大きくなり、構造の剛性が高まる方向に優位に解析が進展し、変形しにくい構造が導かれたためと考えられる。

また、目的関数1の重みが増えるに従い、水平反力・垂直反力も小さくなっている。これは、目的関数2が目的関数1の重みが増えるに従い影響が抑制されたため、構造を柔にする目的関数のなかで相対的に目的関数3、目的関数4の影響が大きくなったためと考えられる。

3.6 試作

トポロジー最適化によって導いたコンプライアントメカニズムが実際に動作するものであるかを確認するため、完全固定部を支えるためのフレームと外力を入力するためのハンドルを追加設計し、3Dプリンター

（Markforged 製 Mark two）によって試作した。造形材料は、Smooth TPU（熱可塑性ポリウレタン）95A

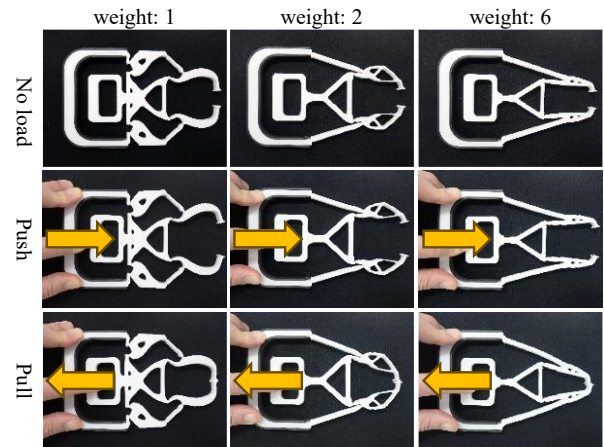


図8 試作結果

（Markforged 製）を使用した。

図8に試作した造形品と、実際に力を加えた場合を示す。この試作から、導いたコンプライアントメカニズムが正しく動作していることがわかる。

4 まとめ

本報告では、トポロジー最適化によりコンプライアントメカニズムを導出することを通じて、構造物の形態設計を自動で行う方法を示した。以下に結果を示す。

1. トポロジー最適化技術を活用することで、構造物の具体的な形を数値解析によって導くことができる。
2. 最適化計算における目的関数は複数設定できる。このとき構造を剛にする目的関数と、柔にする目的関数の間で互いにバランスをとるよう重み係数を設定することで、コンプライアントメカニズムを導出できる。
3. 導出されたコンプライアントメカニズムの形状および特性は、トポロジー最適化における目的関数によって変化する。

実際の製品・構造物の設計においては、いかに設計意図を目的関数や重み係数に適切に反映させるかが重要になる。適切な目的関数・重み係数が与えられたならば、形態は解析によって自動的に求まるので、設計工程の効率化に寄与するものと思われる。

【参考文献】

- 1) 西脇ら, トポロジー最適化, 丸善出版, 2013
- 2) 久富ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp7-10, 2023
- 3) 小林ら, 「トポロジー最適化と形状最適化に基づいたコンプライアントメカニズムの多段階設計法」, 精密工学会誌 Vol.70, No.11, pp1455-1460, 2004

デジタルツインを活用した危機予測 AI に関する研究（第1報）

安部貴大*、渡辺博己**

Study on AI for crisis prediction utilizing digital twin（I）

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 を利用して人、ロボットおよびモビリティが空間を共有する未来を目指し、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、様々な分野での利用が期待されている。今年度は空間内を移動する物体を検出し、仮想空間上に投影する DT の試作を行った。試作した DT により移動する人などを認識し仮想空間上へ投影できることを確認した。

1 はじめに

近年、IoT や AI、ビッグデータなどの技術が飛躍的に進化したことでデジタルツイン（DT）の実用化が進み、注目を集めている。DT とは、現実空間から得たモノや環境に関するデータからそれらを仮想空間上に再現する概念であり、監視・メンテナンス業務の省力化、機器や設備の予兆保全や社会課題の要因分析等への貢献が期待されている。国内の活用事例として「Toyota Woven City¹⁾」の開発が進められており、Woven City 内で行われる実証実験のシミュレーション効率や精度の向上に DT が貢献することが期待されている。DT は製造業から医療まで多岐にわたる分野で利活用が進んでいき、産業の発展に欠かせない重要な技術となっていくと考えられる。そこで当センターではこれらの技術を取り込み県内企業の DX 推進に対する一助とする。

近年は協働ロボットの普及で人とロボットが同じ空間で作業する環境が増えている。また自動運転やモビリティサービスの発展を受けて国土交通省は人と車両が空間をシェアする生活道路を道路行政の目指す形として示している²⁾。これらの背景を踏まえ、本研究では空間内における人やロボットおよびモビリティのような移動する物体をセンサによって捕捉し、仮想空間にそれらを投影した DT を構築し、AI 技術を組み合わせて空間内に存在する移動物体の経路予測を行い、衝突事故などの危機を予測する。その結果から、衝突などの危機が発生しない効率的な移動を行うための情報をロボットやモビリティへフィードバックするシステムを提案する。従来研究では高額なセンサを使用しているが、社会実装のハードルを下げるために本研究ではシステム実装の低コスト化を意識しつつ開発を進めていく。

目標とするシステムを3段階に分けて開発を進める。第1段階は空間内の移動物体を検出する人流計測の実装、

第2段階は取得した移動物体の位置情報を仮想空間に投影し DT を構築、第3段階はデジタルツインから得た情報を用いて衝突予測を行う AI の実装である。本年度は第2段階までの試作を行ったのでその結果を報告する。

2 人などの移動予測に基づく危機予測システム

2.1 関連研究

移動ロボットの障害物回避に関する研究はこれまでに数多く行われ、様々な行動計画法が提案されている。井上らは複数の動的障害物の行動原理を推定し、将来の軌道を予測するアルゴリズムを提案している³⁾。田村らは環境に設置したセンサによって観測された歩行者の移動データを移動傾向データベースとして保持しこれを移動予測に用いる手法を提案している⁴⁾。

目標地点が明確に定められたロボットの自律制御に関する研究が主に行われているが、国土交通省の示す生活道路のような人と車両が空間をシェアするようなシチュエーションでは、車両に目的地が設定されていなかったり道中で不意に寄り道をしたりするなどといった可能性があるため、自律型の制御ではなく人の操作を補助して安全な運転を行うシステムが必要となる。Wang らは衝突回避や配送最適化といった安全運転支援を行うために、次世代高度道路交通システム（次世代 ITS）で導入されるような路側機（RSU）と自動運転車からのデータをクラウドに集約し、Smart Mobility Digital Twin(SMDT)を構築した⁵⁾。

2.2 提案システム概要

Wang らの研究のように交通 DT を構築するためには次世代 ITS で導入されるような RSU を用いることが一般的となっている。RSU には3次元 LiDAR センサ、カメラ、通信用のアンテナが備えられており非常に高価である。また自動運転車が装備しているセンサのデータも交通 DT を構築するために利用されるので、モビリティ側にも LiDAR センサやカメラなどが搭載されている必要がある。モビリティを含めて初期投資費用が高額にな

* 生産システム部

** 情報技術部

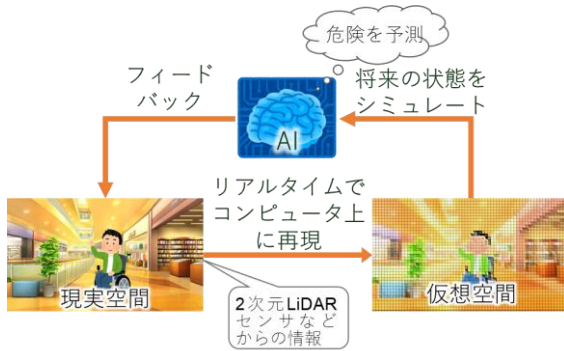


図1 システム概要

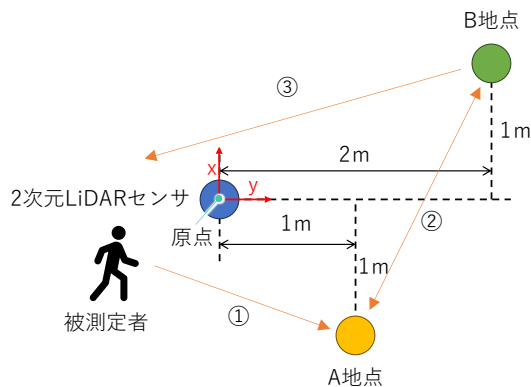


図2 位置精度評価実験概要

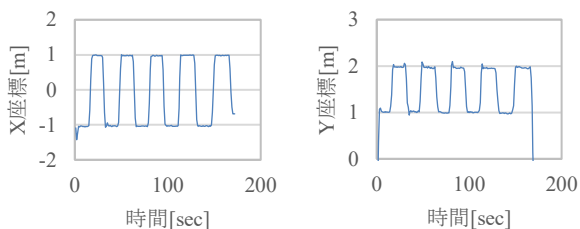


図3 位置精度評価実験結果

ると、社会への普及が困難になる。

そこで本研究では低コストで実現可能なモビリティ向けの安全制御支援システムの開発を行う。提案するシステムの概要を図1に示す。システムは「現実空間」「仮想空間」「AI」の3要素から構成される。現実空間内の人、モノ、ロボットおよびモビリティといった移動する物体をLiDARセンサなどによって検出し、仮想空間にそれらを投影する。DTを構築し、AI技術を組み合わせることによって移動物体の衝突予測を行いロボットやモビリティに予測結果を通知する。通知を受けたロボットやモビリティは取得した情報から停止や減速などの回避行動を行う。本研究で開発するシステムはロボットやモビリティではなくそれらが移動を行う環境側にセンサを設置することでロボットおよびモビリティ本体のコスト上昇を抑制する。これによって、各移動体にセンサを搭載する必要がないため、システム全体として各移動体に

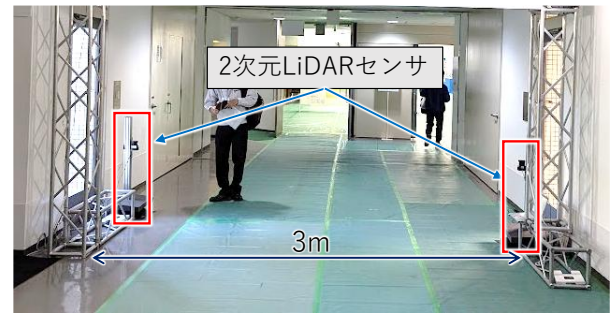


図4 オクルージョン評価実験の様子

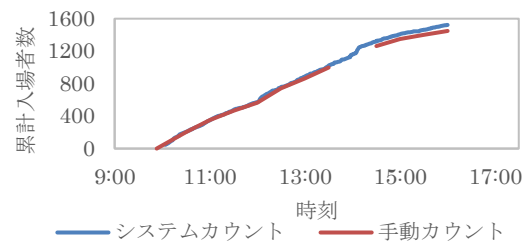


図5 オクルージョン評価実験結果

センサを搭載する場合と比較して安価となり、移動体の大きさや重量も軽量化を図ることが可能となる。また本研究では、設置するセンサは2次元LiDARセンサとする。

3 危機予測用デジタルツインの試作

3.1 人流計測システム

2次元LiDARセンサ（北陽電機株式会社製 UTM-30LX-EW）と付属ソフト「Flow Radar」を用いて人などの移動物体の検出を行い、位置精度およびオクルージョンについて評価を行った。「Flow Radar」はイーサネットに接続されたUTM-30LX-EWから取得したデータにより範囲内の人を検出するソフトウェアである。

位置精度の評価実験では図2に示すとおり、2次元LiDARセンサを1つ原点に設置し、その検出範囲内に2つの目標地点A、Bを設定した。被測定者がこの2点間を5往復したときの測定結果を図3に示す。A地点（X: -1m, Y: 1m）B地点（X: 1m, Y: 2m）に対して最大誤差は約35mmであった。これは人の腹部厚径の約18%程度であり、移動予測に大きな影響はないと考えられる。またオクルージョンとは、非接触型のセンサによる計測において、手前にある物体が後ろにある物体を隠してしまう現象を指す。この課題に対し、2台以上のセンサを用いることで、その影響を軽減する。有効性を確認するために県内で開催された展示会にて、運営団体協力のもと入場ゲートの左右の支柱付近にそれぞれ2次元LiDARを1台ずつ設置し入場者数計測を行った（図4）。このシステムによる計測と同時に手動の計測を行い、両者を比較した結果を図5に示す。システムによる計測と手動計測は同じ傾向を示したため、一定の有用性が確認できた。なお

手動計測結果は1449人であり、計測誤差は74人であった。原因として大きな荷物を抱えた人間を2人と認識してしまうなどといったシステムの挙動を確認した。試作したシステムで利用しているFlow Radarでは認識するサイズを設定しており、このサイズを超えている移動物体は2人以上の人が並んで歩いていると推定するようになっている。そのためデータ処理を自作のアプリケーションで行うように、システムを変更する必要がある。

3.2 デジタルツインの構築

図6に試作したDTの概要を示す。Flow Radarから専用のAPIを通して人の移動データを取得し、仮想空間上に楕円体として投影する。現実空間にある机や壁といった静止物体はCADソフトによってモデリングしたものを配置した。図7に示す通り、試作したDTは現実空間上の移動物体を仮想空間上に投影できていることを確認した。

4 まとめ

現在注目を集めているデジタルツインを利用したロボットやモビリティのための安全運転支援システムのDT部分の試作を行った。人などの移動する物体を検出し、仮想空間上に投影を行えることを確認した。今後の課題として、Flow Radarでは一定のサイズを移動物体として認識し、そのサイズを超えた場合に複数人が並んで移動していると推定するため、大きなものを持って移動している人物を2人以上とみなしてしまう場合がある。そのためFlow Radar内で行っているデータ処理について自作アプリケーション内で行うようシステムを変更し、オブジェクトの認識アルゴリズムを最適化する必要がある。

【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) TOYOTA WOVEN CITY ホームページ,
<https://www.woven-city.global/jpn/> (参照 2025/2/18)
- 2) 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 2025/2/18)
- 3) 井上ら,日本ロボット学会誌 Vol.15,No.2, pp249-260,1997
- 4) 田村ら,日本機械学会論文集 (C編) 79巻 799号, pp168-179,2013
- 5) Wang ら,IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol.9,No.3, pp4348-4361,2024

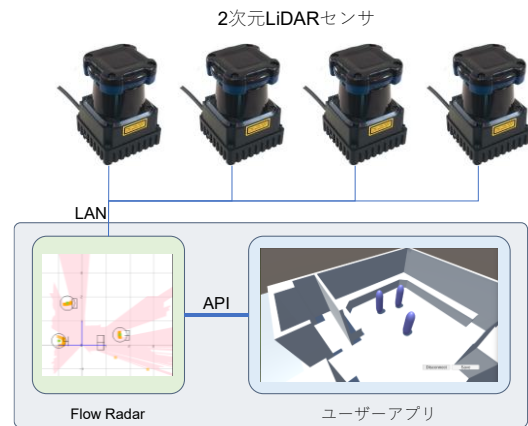


図6 試作したデジタルツイン

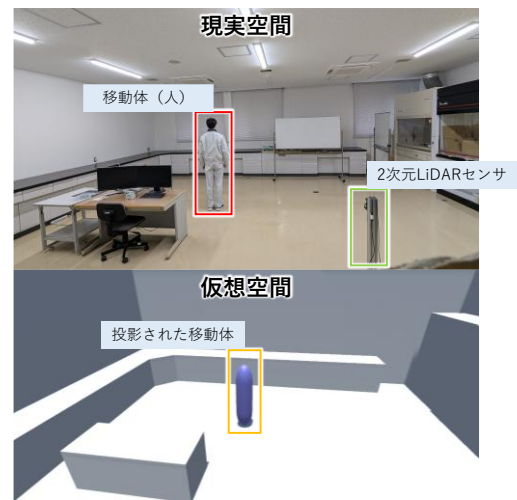


図7 現実空間と仮想空間

3D プリンタの付加価値を高める空間充てん構造体の研究（第3報）

藤井勝敏*

Study on flexible structure object using 3D printer（Ⅲ）

FUJII Katsutoshi*

小さな形状を複数組み合わせた立体構造を効率的に設計し、3D プリンタで造形する試みを通し、本装置の新たな活用方法を研究した。円環と円弧を組み合わせた粒形状を、互いに接触しないよう絡み合わせ、それらを規則的に配置することで、紐、布、泡状の不定形で鎖状の構造物を組上がった状態で造形する技術を改良し、その応用事例として今年度は乳児サイズのマネキン人形を試作した。また粒形状の生成パラメータを工夫することで、従来よりも外力に対する変形幅が大きい構造体を得た。

1 はじめに

3D プリンタは、CAD ソフトなどを使って編集した3D データを実体化する装置であり、切削加工などの従来の造形方法では製造困難な複雑形状を造形できることや、金型を作らずに少量生産可能なことなどが利点であると考えられてきた。当センターでも、熱溶解積層方式や粉末床溶融結合方式の3D プリンタを導入し、研究開発および企業の技術支援に活用している。

本研究は、令和2年度に導入した粉末床溶融結合方式の3D プリンタ Jet Fusion 540(日本 HP 製)の特徴と可能性に注目し、その新たな活用方法を研究している。本報告では、これまでに開発した技術について総括した上で、今年度研究開発した造形技術を中心に報告する。

2 空間充てん構造体

本装置は、粉末樹脂を敷き詰めた上に黒インクで積層断面を印刷し、光で加熱し溶融する繰り返し動作で立体造形する。このとき、造形空間内にいくつ形状を配置しても総造形時間は高さで決まることと、敷き詰めた粉末材料自体がサポート材として機能することから、図1の



図1 空間充てん構造体

ように基本形状を多数配列した構造体（本研究ではこれを「空間充てん構造体」と定義し、以下「構造体」と呼ぶ）を造形する用例が、この方式のプリンタの優位性であると考えた。

このような構造体を3D プリンタで造形する場合、形状データの作り方と、造形後の仕上げ処理方法が課題で、これまでに以下の研究開発を行った。

2.1 形状データ作成

3D プリンタで機械部品を造形する場合、単一形状を設計することが一般的であるが、本研究で扱う構造体は、複数の基本形状を鎖のように互いに絡めた構造である。このため、基本形状は絡み合うための環状部分（円環）と弦状部分（円弧）を併せ持つ立体物になる。本研究では表1に示すパラメータで制御する基本形状バリエーション群を基本形状として、三次元的に配置した形状データを生成するプログラムを開発した¹⁾。

表1 基本形状のパラメータ

名称	作例
弦の数	
弦の幅	
肉厚	
外観	

* 情報技術部

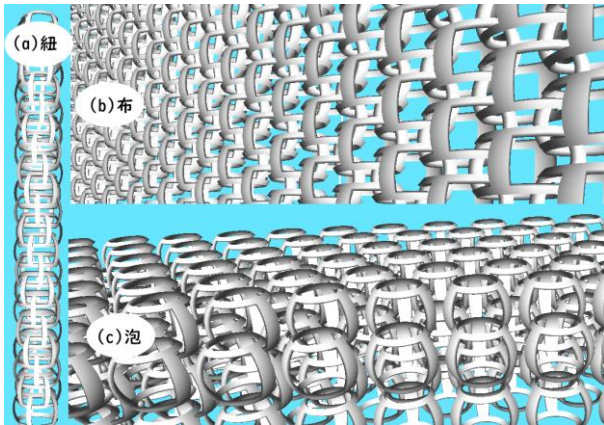


図2 紐、布、泡状構造体と応用例

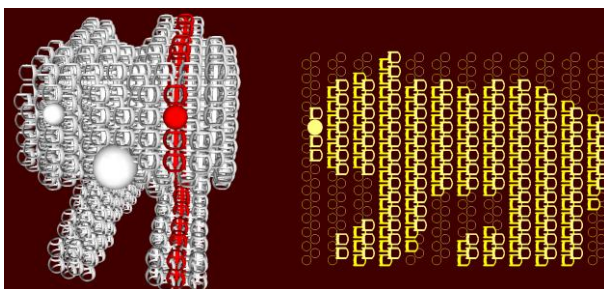
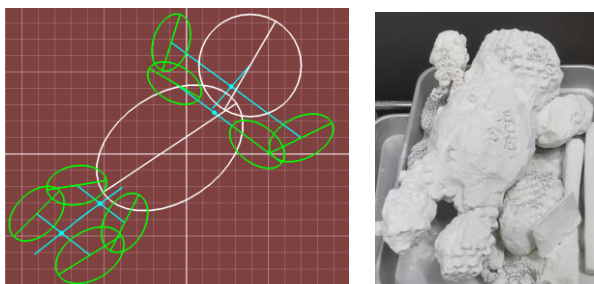


図3 泡状構造体編集ツール

この基本形状を繰り返し空間配置するときは、互いに接触しないように3Dプリンタの造形可能サイズに収める必要がある。配置条件によっては基本形状のパラメータの一部が制限されるが、これまでに図2(a)~(c)に示す紐状、布状、泡状の構造体を設計、試作した。その上で、泡状構造体の一部を除去または置換する方式の編集ツール(図3)を開発し、応用モデルを制作した²⁾。なお、このように同じ形状を繰り返す構造を3Dプリンタに与える際は、従来のSTL形式に代えて3MF形式を利用すると効率的であった。

今年度は、この方式が抱える編集の手間を改善するため、楕円球を基本形状とする編集ツールを開発し、図4(a)の平面図から図4(b)の立体物を出力した。これは泡状構造物が“ふわわり”とした感触に仕上がる特性を活かし、応用例として人形のような形状設計に特化したツールである。平面に配置した楕円の位置関係をもとに、三



(a)設計ツール画面 (b)造形出力直後
図4 人形設計ツールと出力結果



図5 電動ふるい機による除粉

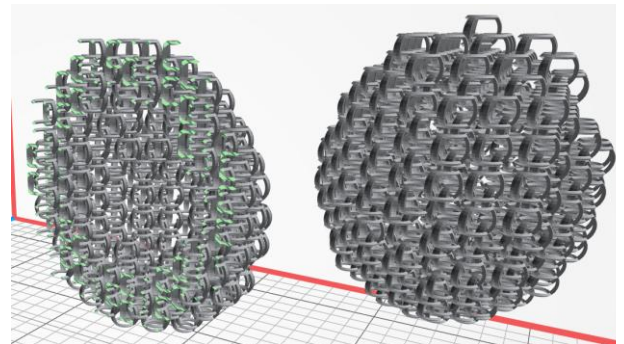


図6 中空化泡状構造体の断面表示

次元的な楕円球配置を計算し、その内部を基本形状で埋めた形状データを出力する。平面図の作図の際に、二つの相似な楕円ペアに左右対称という条件を付与すると、両腕や両足を平面図で配置するだけで自動的に三次元マネキン人形モデルを設計できる。

2.2 造形後の仕上げ処理

粉末床熔融結合方式の3Dプリンタは、材料をローラーで押し固めながら造形が進むため、造形直後は未硬化部分も固く締まった状態にある。通常は造形後に大半が崩れ落ちるが、本研究の構造体では基本形状内に粉末を抱えやすく、特に構造体中心部付近の未硬化材料は容易に崩れない傾向がある。また、基本形状を構成する部材が細いため、通常造形物の仕上げに使うビーズブラスト装置を使って吹き飛ばす方法では、中心に作用する前に破損する恐れがある。そこで、電動ふるい機による除粉(図5)や、構造体の空白部分を縦貫する棒状の捨て材を配置し、中心部分を崩すなどの対策を実施してきた。今年度は、データ作成時点に中心付近の基本形状を除去する改良(中空化、図6)を行ったところ、大型の泡状構造体造形物の除粉が容易になり、より柔らかい感触の形状が得られた。

3 基本形状の拡張

本研究で扱ってきた基本形状は、前述の通り細い弦状の部分が含まれており、それ自体が弾性を発揮する。その集合体や連続配置構造体も柔軟性を継承するため、本装置では、基本形状の設計パラメータを操作

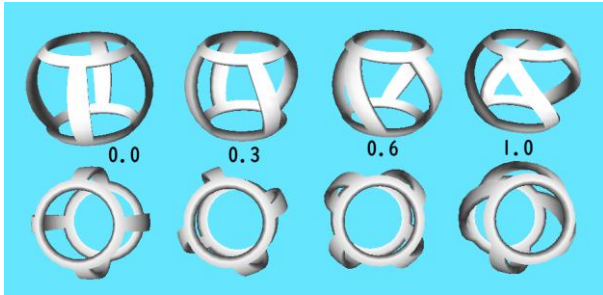


図7 ねじりパラメータ付き基本形状

することで、単一材料での造形物でありながら、部分的に硬さが異なる状態に造形できる。既報では、屈伸を意図する部分の太さパラメータを変化させたときの弾力の変化を示したが、今回は形状生成に新たなパラメータを追加して評価する。

従来の基本形状は、図1に示したとおり2本の円環を複数の円弧支柱で結合する構造で、特に支柱部の形状パラメータが弾性に関係することは容易に想像できる。ここで基本形状の径を保ちながら上下の円環をねじるように回転すると、図7に示す基本形状が得られる。ねじり角度は、円周を弦の本数で割った角度を単位とする符号付き回転パラメータで、これにより変化を付けることもできる。

3.1 圧縮特性

単体の基本形状を圧縮引張試験機(AD-2150)に乗せ、座屈するまで圧縮したときの反力の変化を図8に示す。全体の傾向として、ねじり角度なしと ± 0.5 の試験体では、反力や座屈までの様子に目立った差異はなかったが、 ± 1.0 の試験体では、低反力で深く圧縮され破断した。ねじり方向の左右差はなかった。圧縮が進む際は、ねじり方向が増す方向に接触面が回転する様子も見られた。座屈時の破断箇所は、円環との接合部でも円弧の途中にも現れ、規則性はなかった。

3.2 引張特性

基本形状を鎖状に連ね、破断するまで引き伸ばしたときの張力変化を図9に示す。こちらも、ねじり角なしと $+0.5$ では類似する傾向があるのに比べ、 $+1.0$ は顕著な伸びしろがあった。伸びる過程でねじり角度が減少する方向に回転し、破断は鎖玉のいずれかの円環と円弧の接合部で発生し、同じ鎖玉の破壊が進んで、最終的に分断した。

3.3 複合体の構成

3.1、3.2節より、基本形状にねじりを加えることで、径を変えずに柔軟性を増すことができたが、複数の基本形状を絡み合わせた複合構造体を作る上で、基本形状同士の干渉を避ける配置パラメータを再検討する必要がある。

引張試験にも用いた基本形状を直線的に並べた紐型の構造体は、直線配置の際に一段ごとに軸周りに加え

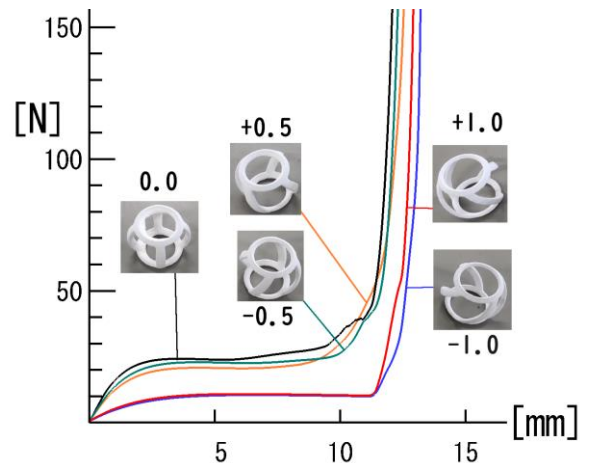


図8 圧縮特性

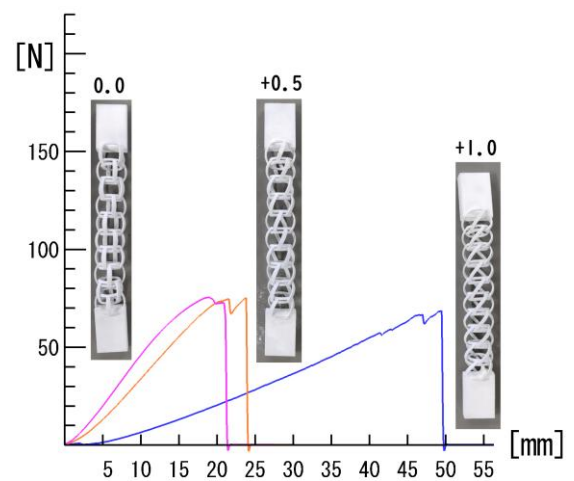


図9 引張特性

る回転角度に、基本形状のねじり角度と基本形状間の距離を考慮して加減調整することで、比較的容易に干渉を回避できる。

平面的に並べた布状構造体は、従来は円弧支柱4本の構造体を図10(a)のように配置していたが、ねじりを加えた支柱の場合、例えば図10(b)のような絡み配置ができる。これを実際に造形した出力結果が図10(c)で、従来の布状構造体と比べて、柔らかい手触りの造形物が得られた。

なお、立体的(泡状)構造体については、ねじり変形を加えた基本形状同士の干渉を避けるのが難しく、期待する配置方法は発見できなかった。

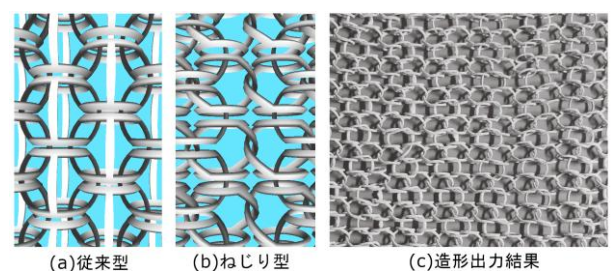


図10 ねじり布状構造体



図 11 「3D プリント造形物の付加価値を高める空間充てん構造体」 作品例

4 まとめ

本研究は、当センターで導入した新方式 3D プリントを研究し、その特徴を活かした利用方法を探索するところから始まった。特にインクジェット方式による多数同時、高速高精細の特徴に注目し、主に情報処理技術、3D CG 技術に関する知見を応用して空間充てん構造体と称する複合立体形状を設計、試作を行ってきた。効率的な設計のために、3D プリントでは一般的な STL ファイルではなく 3MF を導入したことや、基本形状の反復配置を CAD 操作ではなくプログラム処理により行った。さらに、繊細な造形物の仕上げに係り、除粉作業の改善や染色処理にも取り組んだ。

3D プリントは、入力した 3D 形状データを立体物で得る装置であり、その造形物にどのような価値を見出すかは、当然のことであるが使用目的に依存する。その上で、本研究の対象とした機種は、輪郭が明瞭に印刷される特徴に加えて、形状設計によって伸縮性を制御できることや、染色により色鮮やかな造形物が得られるという付加価値を示した。

最後に、本研究で得られた技術を結集して制作した 3D プリント造形物(図 11)を紹介する。これは造形可能な最大サイズである身長約 30 cm の乳児型マネキンを、泡状構造体で構成したものである。この作品を手にとれば誰でも、画面上の写真や映像だけで形状を確認することと、造形物に手で触れて確認する行為との間にある、感覚的な違いが実感できる。その上で、本研究を通して向き合ってきた 3D プリント造形物の付加価値について

思考を深め、今後も本装置の新たな活用方法を探索する考えである。

【参考文献】

- 1) 藤井,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp101-104,2023
- 2) 藤井,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp112-113,2024

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1報）

—めっき処理部品の外観不良を検出する画像検査システムの開発—
内野義友輝*、渡辺博己*

Research and development of AI technology utilization in manufacturing (I)
- Development of an image inspection system for detecting defects in plated parts -
UCHINO Yoshiyuki* and WATANABE Hiroki*

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 技術を活用した外観不良を検出する画像検査システムの開発に取り組んでいる。今年度は、めっき処理された部品の表面に発生するめっき不良を対象とし、画像検査システムに適したカメラや照明の条件を検討し、通常のエリアスキャンカメラとフラットドーム照明を組み合わせた画像取得手法を選定した。さらに、PatchCore を適用した異常検知技術により、めっき不良を検出できることを確認した。

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、労働力不足が業界全体で深刻な問題となっており、目視検査の維持が困難になりつつある。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。

特に、めっき処理部品の外観検査では、微細な傷や欠陥を確実に検出することが求められるが、従来の検査工程では作業者の熟練度に大きく依存するため、検査結果にばらつきが生じやすい。

そこで、本研究では、AI 技術を活用して外観不良を検出する画像検査システムの開発に取り組んでいる。本稿では、めっき処理された部品の表面に発生するめっき不良を対象として、画像取得技術の検証結果および異常検知技術の適用結果について報告する。

2 画像取得技術の検証

図 1 に、通常のエリアスキャンカメラ（ELP 社製 USB8MP02G-SFV）とリング型 LED 照明を用いて撮影した、めっき不良がある部品の画像を示す（以下、通常カメラおよびリング照明）。めっき処理された部品の表面は平滑かつ光沢があるため、適切な照明条件を設定しない場合、図 1 のように鏡面反射によるグレアが発生する。そこで、グレアの抑制を目的として、カメラの種類による影響と照明の種類による影響の両方から検証した。

2.1 カメラの検証

通常カメラの代わりに偏光カメラ（LUCID Vision Labs 社製 VP-PHX050S-Q）を使用し、リング照明と組み合わせて撮影したが、グレアの発生を抑制できなかった。

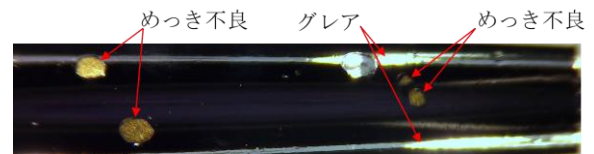


図 1 通常カメラ、リング照明を用いた撮影画像



(a) 偏光フィルタなし



(b) 偏光フィルタあり

図 2 偏光カメラ、リング照明を用いた撮影画像

た（図 2(a)）。これは、カメラの偏光特性のみでは強い鏡面反射を十分に除去できないためと考えられる。

次に、偏光フィルタを装着したリング照明を使用し、偏光カメラと組み合わせて撮影した（図 2(b)）。この結果、グレアの発生は抑制されたが、照明の映り込みが残り、さらに画像全体が暗くなる現象が確認された。これは、偏光フィルタによって反射光が低減されたものの、照明の光量が減少したためである。以上の結果から、偏光カメラや偏光フィルタの適用だけでは、不良部位を明確に撮影できないことが明らかとなった。

2.2 照明の検証

照明の違いによる影響を検証した。まず、ワーク全体に均一に照射できるドーム照明を使用し、通常カメラと組み合わせて撮影した（図 3(a)）。その結果、画像全体が明るくなり、照明の映り込みもなくなったが、カメラ穴の映り込みによる影が発生した。

* 情報技術部

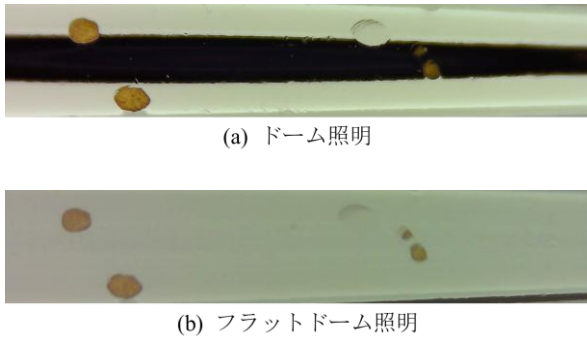


図3 照明の違いによる撮影画像
(カメラは通常カメラ)

そこで、ドーム照明の効果を維持しつつ、カメラ穴の映り込みを解消するため、フラットドーム照明を使用し、通常カメラと組み合わせて撮影した(図3(b))。フラットドーム照明は、ワークに近い位置に配置することで、ドーム照明と同様に拡散光をワーク全体に照射できるという特徴を持つ。その結果、ドーム照明では発生していた影がなくなり、不良部位を明確に撮影できることを確認した。

3 異常検知技術の適用と評価

3.1 異常検知アルゴリズムの選定

本研究では、画像検査システムにおける異常検知アルゴリズムとして PatchCore²⁾を採用した。PatchCore は、教師なし学習の異常検知手法であり、正常データのみを学習して異常を検出できる。そのため、異常データの収集が困難なケースでも適用可能である。さらに PatchCore は局所的な異常の検出能力が高く、微細な欠陥を高精度に検出できることが期待される。

3.2 データセットの概要

本研究では、異常検知モデルの学習には正常品の画像 50 枚を使用し、モデルの評価には正常品の画像 16 枚と異常品 16 枚の画像を用いた。モデルの学習後、正常データおよび異常データを用いて評価を実施した。

3.3 異常スコアの分布分析

異常スコアのヒストグラム(図4)を用いて、正常データ、異常データの分布を確認した。全体として、正常品の異常スコアは低く、異常品の異常スコアは高く分布していることが確認された。

3.4 異常検出精度の評価

異常検出の精度を確認するため、異常スコアの閾値を変えながら、それぞれの閾値に対する F1 スコアを算出した。F1 スコアは適合率と再現率のバランスを示す指標であり、高いほど誤検出と見逃しの両方が少ないことを意味する。F1 スコアが最大となる閾値は 0.48 で、その時の F1 スコアは 0.89 だった。この結果、高精度な異常検出が可能であることが確認された。

さらに、モデルの性能を包括的に評価するために図5

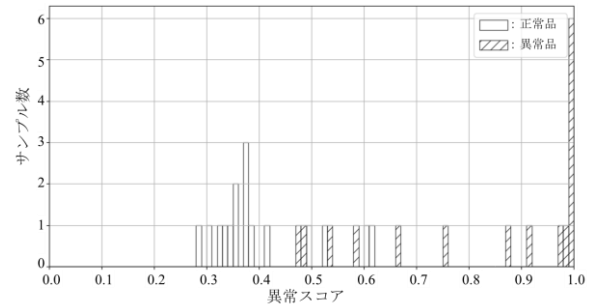


図4 異常スコアのヒストグラム

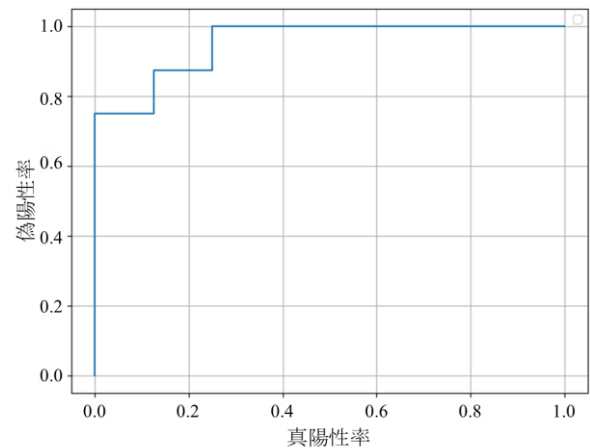


図5 ROC 曲線

のように ROC 曲線を描画し、AUC を算出した。AUC は異なる閾値設定における真陽性率と偽陽性率の関係を示しており、異なる閾値を設定した場合のモデル精度を評価することができる。結果として、AUC は 0.95 となり、閾値に依存せず、モデルは異常と正常を高い精度で識別できることが確認された。

3.5 異常部位の可視化

異常スコアの分布をより詳細に分析するため、ヒートマップを用いて異常部位の可視化を行った。ヒートマップは、画像内の各領域に対する異常度を色で可視化したものであり、赤色が濃いほど異常スコアが高く、異常の可能性が高いことを示す。図6に入力画像(上)とその異常度を可視化したヒートマップ画像(下)の例を示す。図6(a)は不良部位が大きい異常品に対するヒートマップであり、異常部位が明確に赤く強調されている。この異常品の異常スコアは最大値である 1.0 となり、確実に異常と判定された。一方で、図6(b)は不良部位が小さい異常品に対するヒートマップであり、不良部位の異常度が低く表示されている。この場合、異常スコアは 0.49 と低く、閾値に近い値となった。

4 まとめ

本研究では、めっき処理された部品の表面に発生するめっき不良を対象とし、外観不良を検出する画像検査システムのための、カメラや照明の条件を検討した。その

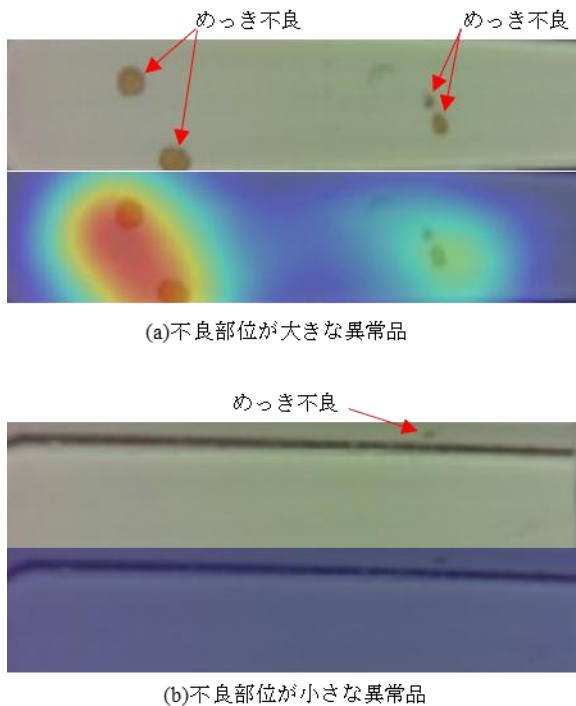


図6 入力画像（上）とヒートマップ（下）の例

結果、通常カメラとフラットドーム照明を組み合わせた画像取得手法を選定した。これにより、めっき不良部位を明確に撮影することが可能になった。さらに、異常検知アルゴリズムとして **PatchCore** を適用し、めっき不良の検出が可能であることを確認した。

今後は学習データの量などを検証し、モデルの精度向上を目指す。また、今年度はめっき不良のみを対象としたが、今後は微細な傷の検出にも対応できるよう、システムの改良を進める。

【謝 辞】

本研究を遂行するにあたり、検査対象部品をご提供いただきました株式会社水生活製作所の皆様に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 増村, マシンビジョンライティングー画像処理照明技術ー基礎編, 産業開発機構株式会社, pp126-128, 2018
- 2) K. Roth, et al., arXiv: 2106.08265, 2021

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1報）

曾賀野健一^{*}、佐藤雅之[†]、齊藤信之[†]、濱野敦子[†]

Study on visualization and management technology of optimal inventory information for reducing production lead time (I)

SOGANO Kenichi^{*}, SATO Masayuki[†], SAITO Nobuyuki[†] and HAMANO Atsuko[†]

電動車椅子の特注・改造を行う生産現場では、利用者のニーズに応じた特注・改造の多様化に伴い、部品を遅滞なく供給し生産計画を効率的に進行する取り組みが求められるが、必ずしも適正在庫を管理できているとは言えず、様々な問題から欠品や余剰在庫を生むリスクを抱えている。このような課題を解決するため、適正在庫管理手法の研究を行い、本年度は、電動車椅子の特注・改造工程を対象に在庫管理の現状を調査し、在庫数や製造消費数の分布傾向等を確認した。また、欠品や余剰在庫の発生要因を特性要因図により分類・整理し、要因別に対応策を検討した。

1 はじめに

生産現場では、顧客ニーズに基づいた製品やサービスの提供を確実かつ迅速に進めるために、顧客への多種多様な付加価値を高め、生産工程に要する時間（以降、生産リードタイムと記す）を短縮し競争力強化につなげる取り組みが求められている¹⁾。

例えば、電動車椅子の特注・改造を行う生産現場では、利用者の症状やライフスタイルに応じて様々な対応が必要である。図1に電動車椅子の種類と特注・改造の一例を示す。この例では、関節疾患の利用者向けに、走行の制御をサポートするトグル操作機能の改造等、主に機構系や電装系の特注・改造を行っている。

このような利用者のニーズに応じた特注・改造の多様

化に伴い、膨大な品目数の部品を扱うようになると、部品を遅滞なく供給し、生産計画を効率的に進行する取り組みが一層求められる状況となる。ただし、必要以上の部品補充は過剰な在庫を抱えるため、必要最小限の適正在在庫管理が要求される。しかし生産現場では、必ずしも適正在在庫を管理できているとは言えない。例えば、発注の目安等が規則化されておらず、担当者の経験により判断が行われるケースでは、膨大な品目数の部品ごとに最小限必要な在庫数を完全に把握できているとは言えず、欠品や余剰在庫を生むリスクを抱えている。また、業務の内容に応じて構成の異なる電子ファイルや帳票を扱うようになると（多重管理）、情報の共有不足や不整合等の問題が発生する。その結果、部品の在庫を把握しきれなくなり、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、過剰な在庫を抱える事態となる。

そこで本研究では、このような事態を防ぐため、膨大な情報を一元的に管理し、欠品せず余剰在庫とならない適正在在庫管理のしくみを開発することを目的とする。

本稿では、まず、電動車椅子の特注・改造工程を対象に在庫管理の現状を調査した。次に、在庫管理に使用している電子ファイルの情報をを用い、部品ごとに在庫数や製造消費数等の分布傾向を確認するとともに、欠品や余剰在庫の可能性を有するサンプルについて在庫数の変化傾向を確認した。欠品や余剰在庫の発生要因に関して、現場が抱える問題と考えられる要因を分類・整理し、それに基づいて要因別に対応策を検討したので報告する。



図1 電動車椅子の種類と特注・改造の一例

^{*} 生産システム部

[†] 株式会社今仙技術研究所

2 在庫管理の現状

電動車椅子は、機能別に様々な型式が存在する。しかし、基本仕様の状態で利用されるケースはほとんどなく、

利用者の症状やライフスタイルに応じて、機構系や電装系等の特注・改造の仕様を調整する。この特注・改造の仕様に基づいて生産計画を作成し、この生産計画に基づいて特注・改造工程が進行する。

特注・改造工程では、製造に関わる部署（以降、製造部と記す）において、生産計画で定められた日程や部品に関する情報に基づいて部品の出庫を行う。出庫時には、持出表（紙帳票）に部品名や出庫数等を手入力により記録する。特注・改造工程が進行し工程が終了すると、製造部が管理する電子ファイルに対し、消費した部品の在庫数等の情報を更新する。消費した部品の発注は、購買の業務に関わる部署（以降、購買部と記す）が、月ごとに発注が必要な部品を検討する。この検討では、在庫数等の情報に基づいて購買部の担当者の経験により発注の適否を判断する。在庫数等の情報は、特注・改造工程で消費した最新の情報が必要となるため、製造部から購買部に対し情報を伝達する。この伝達は、手書きの紙帳票を用いて行い、伝達された在庫数等の情報は、購買部が管理する電子ファイルに対し入力を行う。製造部と購買部では、それぞれの業務内容に応じて情報の管理対象が異なるため、構成の異なる電子ファイルを使用している。製造部では、出庫、製造消費、在庫金額等に関する情報を管理し、購買部では、発注や入庫等に関する情報を管理している。生産計画や在庫数等の情報は、製造部と購買部で別々に管理しており、電子ファイルは、それぞれの部が月単位で作成している。

このような在庫管理において、様々な問題が発生している。例えば、出庫時における持出表の記録では、記入忘れや記入ミスが発生している。消費後の在庫数等の情報伝達では、紙帳票の記入ミスや電子ファイルの入力ミスが発生している。また、製造部と購買部の電子ファイルには、在庫数等の情報に不整合が起きている。このように在庫数等を正確に把握しきれていない問題と、発注の目安等が規則化されていない問題が、補充不足や過剰な発注を生み、欠品や余剰在庫の発生に至る一因となっているのではないかと考えられる。

3 欠品と余剰在庫の実態

欠品や余剰在庫の可能性を有する部品は、どの程度存在し、どのような在庫状態となっているのかを把握するため、製造部が管理している電子ファイルの情報を用いて確認を行った。

電動車椅子の機構系部品（部品数：763 件）を対象に、ある月の在庫数と製造消費数を用いて分布傾向を確認した結果を図2に示す。在庫数が製造消費数を下回る場合には、在庫不足に陥り欠品の状態に至る可能性がある（以降、欠品群と記す）。欠品群に属する部品は12.8%存在した。また余剰在庫の目安として、在庫数が500個以上かつ在庫数が製造消費数の5倍を上回る場合には、在庫を消費しきれず余剰在庫の状態に至る可能性がある

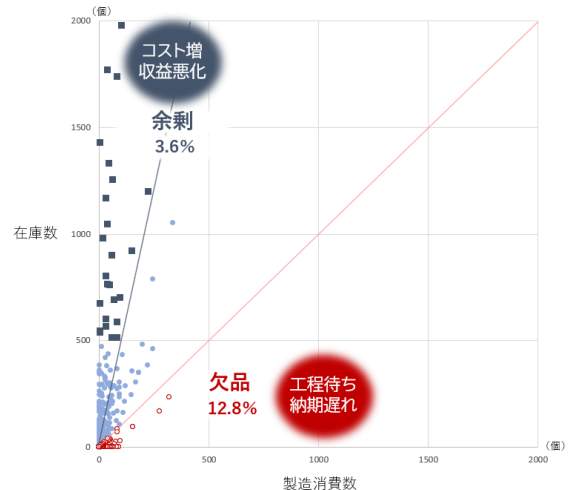


図2 機構系部品の在庫数と製造消費数の分布

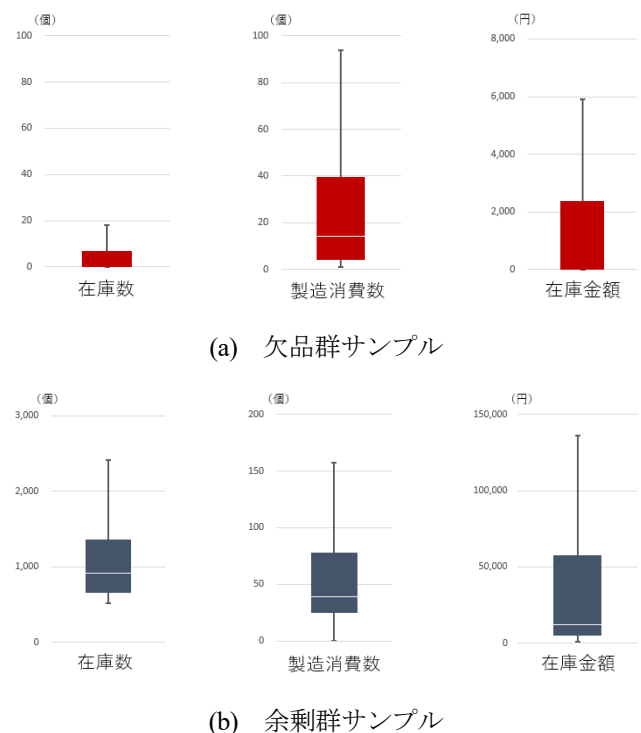


図3 在庫数等の分布傾向

（以降、余剰群と記す）。余剰群に属する部品は3.6%存在した。

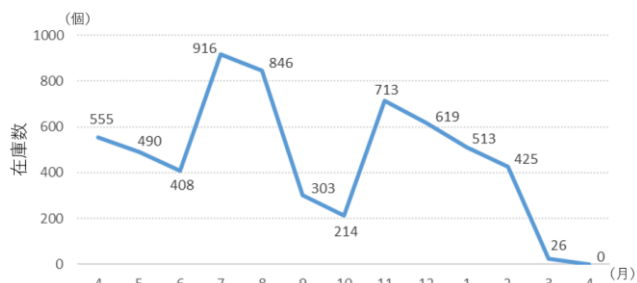
在庫状態をより詳細に把握するため、ある月の在庫数、製造消費数、在庫金額を対象に四分位数を用いて欠品群と余剰群の分布傾向を確認した。結果を図3に示す。なお、最大値を示す1分位数については、分布に対する最大値のレンジが大きいため、75%分位点を示す第3四分位数（以降、 $Q_{3/4}$ と記す）にIQR（四分位範囲）の1.5倍の値を加えた値を用いた²⁾⁻³⁾。IQRは、25%分位点を示す第1四分位数（以降、 $Q_{1/4}$ と記す）と第3四分位数の差である。分布傾向の確認では、50%分位点を示す中

中央値（以降、 $Q_{2/4}$ と記す）とIQRを用い、分布の散布度を $Q_{2/4}(Q_{1/4} - Q_{3/4})$ の表記で示す³⁾。

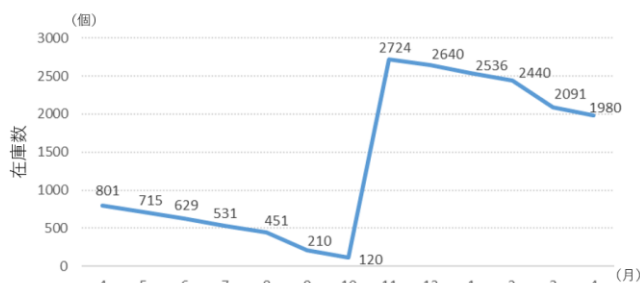
欠品群の分布（図3(a)）では、在庫数の0(0 - 7)個に対し製造消費数は15(4 - 40)個であり、製造消費数に対し在庫数が不足している傾向がみられる。余剰群の分布（図3(b)）では、在庫数の914(658 - 1,359)個に対し製造消費数は39(25 - 78)個であり、在庫を消費しきれていない傾向がみられる。また、余剰群の分布において在庫金額は12,121(5,014 - 57,449)円であり、1分位数は136,101円（実際の最大値は563,425円）と大きな在庫金額を抱えている部品が存在する。

欠品や余剰在庫の状態に至った状況を把握するため、欠品群や余剰群に属する部品のサンプルを対象に在庫数の月別変化を確認した。結果を図4に示す。

欠品群に属するサンプル（図4(a)）では、月に概ね100個の製造消費が発生しているが、9月や3月のように400～500個程度の製造消費が発生している月も存在する。3月に部品の発注を行った際には、入庫までに時間を要し、部品の使用時期に間に合わず欠品に至ったと考えられる。余剰群に属するサンプル（図4(b)）では、月に概ね100個の製造消費が発生しているが、10月に2,600個ほど大量に発注をかけている。この場合には必要以上の発注が行われた可能性がある。このように、部品ごとに発注時期や発注数等の判断は様々である。欠品や余剰在庫が実際に発生している現状では、適正に在庫を管理できているとは必ずしも言えない。



(a) 欠品群サンプル



(b) 余剰群サンプル

図4 在庫数の月別変化

4 欠品と余剰在庫の発生要因

欠品や余剰在庫の状態に至る問題と要因を整理するため、特注・改造工程において、製造部と購買部が抱える問題と、その問題に対して考えられる要因に関して現場で調査を行った。この調査により得られた情報には様々な問題が混在しており、欠品や余剰在庫の状態に至る要因を把握することは容易ではなかった。そこで、問題と要因の関係性を把握しやすくするため、特性要因図を用いて情報を分類・整理した。特性要因図は、品質管理に用いられる手法の一つで、品質に関わる特性と要因に注目しデータを系統的・階層的に分類・整理する手法である。

本稿では、品質特性を欠品と余剰の発生とし、この品質特性に対して考えられる主要因（以降、大骨と記す）を記述した。製造業では一般的に4M等を用いて分類し解釈づけを行う。4Mは、Man（人）、Machine（機械）、Material（材料）、Method（方法）を指すが、要因の性質によっては4Mでは十分に分類できない場合があるため、System（システム）、Space（空間）等を加えることもある⁴⁾。

大骨に対して考えられる要因を中骨、中骨に対して考えられる要因を小骨、小骨に対して考えられる要因を孫骨という分類方法で要因を整理した。この分類方法を用いて作成した特性要因図を図5に示す。

大骨には、Man（人）に起因する主要因として不注意、System（システム）に起因する主要因としてシステムの欠如、Method（方法）に起因する主要因として外的要因という解釈づけを行い、これらの主要因に対する要因を分類し記述した。不注意には、在庫数の差異、発注忘れ、発注数のミス等の要因が影響し、在庫数の差異は、出庫時の伝達不足や伝達ミスという要因が影響している。このような要因は、人為的な判断や作業上の誤りにより生じるものであり、この要因が欠品の発生につながっている。システムの欠如には、使用数の把握ミス、ひと月の在庫確保数の設定の欠如、出庫時の記録不備、発注タイミングのずれ等の要因が影響し、使用数の把握ミスは、生産計画や仕様変更の情報を把握しきれていない要因が影響している。発注タイミングのずれは、使用数をリアルタイムに把握できないことや生産リードタイムを把握できていない要因が影響している。このような要因は、員数管理や工程管理等のしくみが欠如していることにより生じるものであり、この要因が欠品の発生につながっている。一方で、システムの欠如には、過剰な発注や部品構成数の管理問題等の要因が影響し、過剰な発注は、コストや適正な発注数を把握できていない問題に関する要因が影響している。このような要因は、員数管理等のしくみが欠如していることにより生じるものであり、この要因が余剰の発生につながっている。

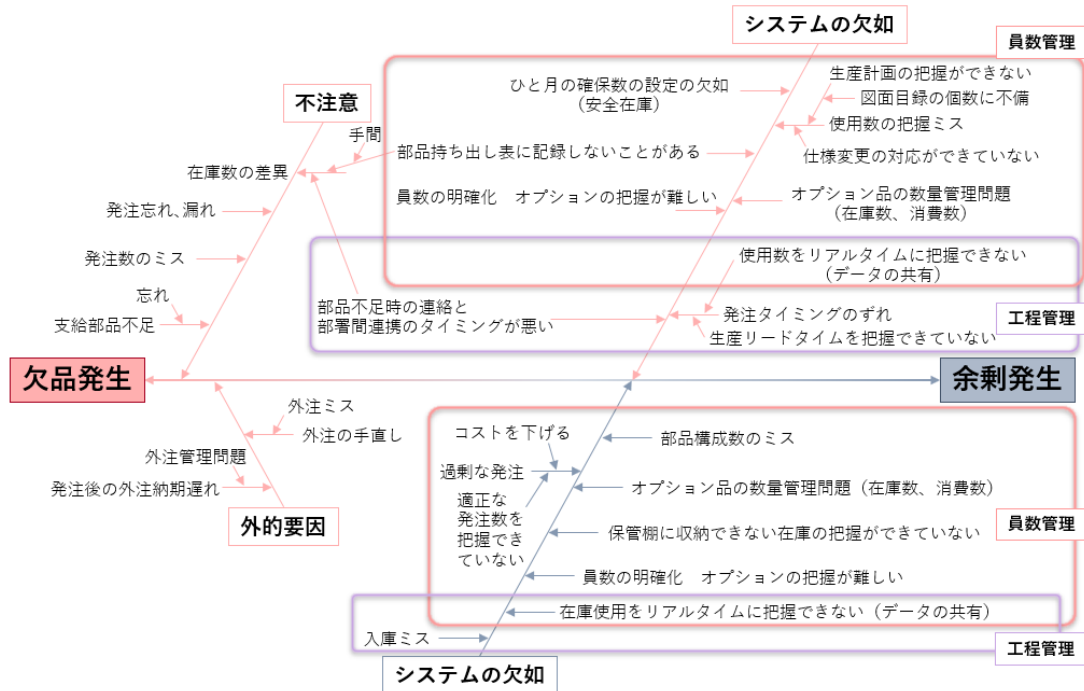


図5 欠品と余剰発生に関する特性要因図の一例

この特性要因図で整理した情報を用いて要因別に対応策を検討し、その検討結果を整理した。その一例を表1に示す。この表は、特性が欠品の発生、大骨がシステムの欠如に該当する要因の一部を対象に、中骨、小骨等の要因と、各要因に対する対応策を整理したものである。使用数の把握ミスに関する要因に対しては、データベースを活用した一元管理技術を確立し、生産計画や特注・改造工程の進行に応じて情報の入力や検索が可能な機能を開発する。また、特注・改造の仕様に変更が生じた場合には、データベースの該当レコードに対し更新を行う機能を開発する。部品持ち出し表に記録しないことがある要因に対しては、記入に要する手間を軽減するためバーコードカウントの非記入方式を用いた情報の入力機能を開発する。ひと月の在庫確保数の設定がない要因に対しては、発注数や安全在庫等の適正に在庫を管理するために必要な員数管理技術を確立する。このように整理した要因別対応策の情報は、今後、在庫管理のしくみ（システム）を設計開発する過程において諸機能の要件や仕様のベースになると考えている。

表1 要因別対応策に関する管理表の一例

特性	大骨	中骨	小骨	孫骨	対応策
欠品発生	システムの欠如	使用数の把握ミス	生産計画の把握ができない	図面目録の個数に不備	データベースの活用 情報の入力と検索機能
			仕様変更の対応ができていない	-	データベースの活用 仕様変更内容の更新機能
		ひと月の在庫確保数の設定の欠如 (発注量、安全在庫)	-	-	適正な在庫数の把握 (員数管理技術の確立)
			部品持ち出し表に記録しないことがある	記入に手間がかかる	非記入方式として バーコードカウント機能

5 まとめ

電動車椅子の特注・改造工程を対象に在庫管理の現状を調査し、在庫数、製造消費数、在庫金額等の情報を用いて、欠品や余剰在庫の可能性を有する部品の分布傾向を確認した。この分布において欠品や余剰在庫の可能性を有するサンプルを対象に在庫数の変化傾向を確認し、発注時期や発注数等の在庫管理に必要な情報を適正に管理できていないことを確認した。さらに、欠品や余剰在庫の発生要因を調査し、特性要因図を用いて分類・整理し、要因別に対応策を検討した。

今後は、欠品や余剰在庫の状態を防ぐ員数管理の手法に関して、解析学的な視点でアプローチを試みる予定である。また、本稿で整理した特性要因図や要因別対応策に基づいて、まず出庫を対象とした諸機能の設計開発に企業と協力して取り組む予定である。

【参考文献】

- 1) 経済産業省,ものづくり基盤技術の振興施策, pp201-203,2024
- 2) 生物科学研究所, <https://biolab.sakura.ne.jp/box-whisker-plot-outlier.html> (参照 2025/2/1)
- 3) 荒瀬康司,論文投稿に際しての統計学的記述の留意点,日本人間ドック・予防医療学会誌,33 巻,第4号, pp557-570,2018
- 4) 生産現場に眠る宝の山 IoT で「4M2S」データ全部取り,日経情報ストラテジーVol.24,No.3, pp24-29, 2015

カキの剪定トレーニングシステムの開発（第3報）

ーカキ栽培のデジタルトランスフォーメーション（DX）化に関する研究ー

藤井勝敏*、鈴木哲也†

Development of the trimming simulator of persimmon trees (Ⅲ)

- Research on a digital transformation (DX) about planting persimmons -

FUJII Katsutoshi * and SUZUKI Tetsuya†

カキの剪定作業について、名人の技能をトレーニングシステムに反映するために、剪定後の実際の樹構造を手作業で調査する手順を検討し、実際の果樹を目測して得たデータからCG(コンピュータグラフィックス)による樹形の復元表示を試みた。一本の立木を、直線的な単位要素の複合体とみなして枝ごとに分割し、固有番号を割り当てて親子関係を記録することで、階層構造で記録した。個々の枝要素の大きさや伸長方向は、測定精度よりも圃場での作業性を優先して目測により行うこととし、このことによる再現性への影響を検討した。

1 はじめに

岐阜県ではカキの生産技術の向上に資するデジタル技術の活用方法を模索している。筆者らはその一環として、VR(バーチャルリアリティ)を応用した剪定トレーニングシステムを提案し、仮想樹形の生成手順と剪定体験操作手順を報告した¹⁾。このシステムに剪定の良否を判定、採点する基準を搭載する上で、実在のカキ果樹の剪定がどのような思考判断に基づいて行われたのかの記録が必要になった。過去に熟練者からの聞き取りや作業映像解析から推定する方法を検討したが、VRによる果樹表現技術を応用することによって、より具体的な剪定中の思考が明らかとなることが期待できる。そこで、実際の剪定樹を計測調査し、CGにより再現するまでの方法を研究したので報告する。

2 計測調査の目的と方法

本研究の最終目標は、良い剪定の本質を技術継承可能な媒体に記録することであるが、“良い剪定”とは、剪定名人の手技を基準にする。名人は剪定講習会等で技術を実演しているが、その様子を撮影した写真や動画、口述記録からでは、剪定の本質究明には至っていない。

講習中の名人の発言と手技を観察すると、剪定の動機には以下のパターンが見られる。

(1) 樹形を整えるために除去する枝

全体的な樹形の制御、主枝等の更新、病虫害防除などの年間作業効率、隣の木との距離感を理由とした比較的太い枝を間引き、切り返し剪定する。

(2) 明確に不要とされる枝

枯れ枝、病虫害に侵された枝、折れた枝、内向枝、立ち枝、下り枝等は、説明不要で除去する。

(3) 特定の枝を活かすために除外した枝

末端付近で混みあっている枝の中から有望な枝を残

し、その周辺で干渉、交錯する小枝を切除する。

(1)に関しては、作業性のよい樹形を理想としつつも、現場では隣接樹との位置関係や日当たりなどを考慮して、不要部分を大胆に切断していく。

(2)は剪定の基本知識であり、規定の条件に該当する不要な枝²⁾を覚えれば、名人でなくても一定水準で作業できると考えられる。ただし、該当数が非常に多いため、通常は(1)の作業後に行われる。

これらに対し(3)は、どこを切ったかではなく、どの枝を残したのが重要で、名人はそのすべてを意識的に残しているように見受けられる。つまり、名人が剪定を終えたカキ樹の枝には、一本ずつに存在理由があり、これを区別して分類する必要があると考えた。

2.1 樹木の枝分割

一般に樹木は主幹から枝分かれを繰り返し、無数の小枝で構成されている。無数と言っても目視できる枝の数は有限であり、特に剪定直後は最小数の状態であるため、人の目で数えることは十分可能である。

図1のように、親枝からの分岐点を起点に直線的で太さが一様で、樹皮の形質が同じとみなせる部分を枝の最小単位とし、1本の樹体を複数の枝の集合体として分割の上で記録する。この分割基準は主観的であるが、太い枝の剪定では分岐点の付け根で切断するのが通例であ

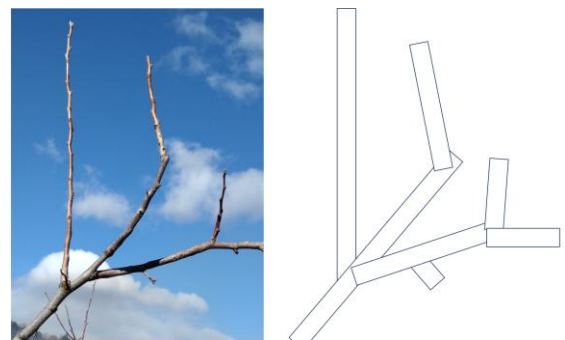


図1 枝記録のための分割

* 情報技術部

† 岐阜県農業技術センター

表1 計測項目記入シートの項目

枝番号	枝齢等特徴	枝の接続	枝の長さ太さ	伸長方角	伸長上下
	当年・前年・3年・以前 主幹・主枝・亜主枝 結果母枝・枯枝	親枝番 _____ cm・末端 時(口北)	cm 直径 ミリ	☐ 親枝基準 ☐ 北基準 時	垂直基準 時

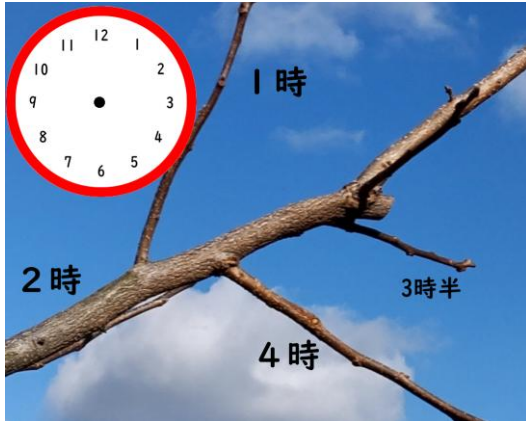


図2 枝伸長方向(上下)の目測イメージ



図3 測定したカキ樹

り、この知識がある剪定経験者が計測調査をする前提で、測定者による分割基準の揺らぎは問題にしないことにした。

2.2 計測項目

分割した枝には、個別に重複しない番号を付けて識別する。この調査の目的は、枝ごとの存在理由を明らかにするためであり、枝を特定するために識別番号を最初に付与する。この枝番は、親子関係を記録するときにも利用する。

枝の個性を表す情報は、枝の見た目の年齢、太さや長さ、親枝からの分岐点の場所、伸長方向とし、表1の記録用紙に枝を観察して記入する。屋外の圃場で道具を用いるのは手間が掛かるため、目測で行うことにした。特に、枝の伸長上下方向は、図2に示すように鉛直上向きが12時を指す仮想的な時計の文字盤を念頭に置き、枝が指し示すおおよその時刻を記録する方法とした。

3 測定データからの樹構造復元

試験的に調査したカキ樹は農業技術センター内で管理されている図3の木で、熟練者により1月中に剪定されたものを3月に計測したところ、116本の枝の集合体として計測データを得た。

このうち36本の枝は、主幹、主枝、亜主枝などの太い枝で、果樹の個性を形作る骨格要素である。これらの配向を再現するだけで果樹の概形がわかり、圃場内の別の果樹と識別することができる。

残りの末端の枝は80本確認でき、そのほとんどが当年または前年の剪定で残した細枝であり、春以降に花を咲かせる芽がある「結果母枝」と呼ばれる有望な枝

である。

測定データをCGで再現したシステム(図4)は、画面上で枝ぶりを全方向から自由に眺めることができ、マウスポイントをいずれかの枝に重ねると、その枝の固有番号および親枝接続情報や寸法情報などを確認することができる。

3.1 再現性に関する考察

前述の通り、測定データは現地での目測によるため、立体形状として見た樹形の再現性は低い。特に、角度の目測と記録については目測の誤差だけでなく方向の誤認があり、計測作業時の記録写真と照合して一部訂正が必要であった。

その一方で、樹構造に関する骨格枝の誤認や取り違えはなかったとみられ、枝の親子関係は元の樹構造を想像させるに十分な水準で復元できている。

「結果母枝」などの若い枝は曲がりやすく、また成長が著しいことと、数が多いことを勘案し、次回からは記録と再現方法の簡略化を検討する。

3.2 樹形再現システムの活用方法

本システムにより、主幹から任意の「結果母枝」に至る経路を画面上で観察できる。「結果母枝」は次期の収穫を意図して残した枝であるが、その分布は骨格構造に制約され、枝ぶりを読み解く支援になる。

また、計測した枝に割り振った固有番号は、当期の栽培管理や収穫まで有効で、剪定時に意図したとおりの結果が実際に得られたかを枝単位で精密に評価検討するための基礎資料になりうる。剪定時に枝を残した意図と照合し、剪定トレーニング時に実例として提示する使い方が見込まれる。

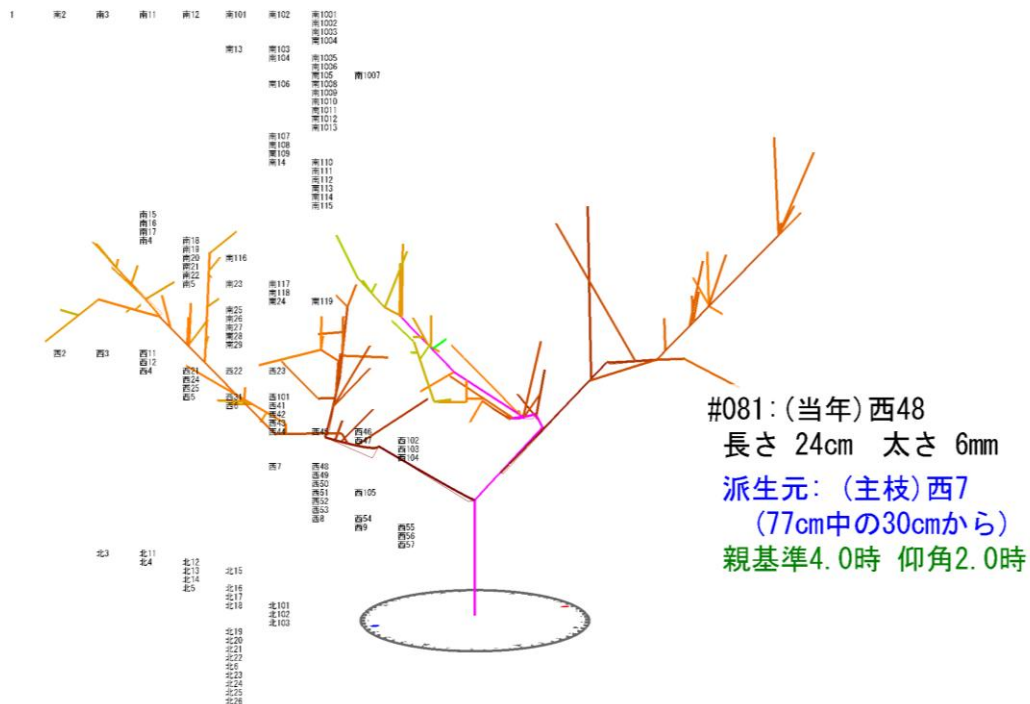


図4 樹形再現結果と情報確認画面

4 まとめ

これまで感覚的に評価されてきたカキ剪定の良し悪しを、情報処理技術基盤に載せて利活用(DX)するために、実在する剪定済みカキ樹の調査項目を検討し、試験的に測定の上、再現を試みた。その際、剪定技術の本質が、空間的形状だけでなく枝の階層構造にも含まれるのではないかと予想し、これらの情報を最小限の道具で目測する方法を考案し、実測およびCGによる復元を行った。

その結果、剪定後の枝総数は百本超程度の有限値で、樹形の個性に係る主要枝に限れば更に絞り込み可能であるとわかった。一般的なカキ圃場では、1か所に4~50本の果樹が栽培されているが、数日間かけて主要な枝だけを測定すれば、圃場全体の3D台帳を作ることも現実味を帯びて検討できると考えている。

課題として、目測による方位や仰角等の信頼性がまだ低いことで、測定の練度による改善か、道具の併用を検討する。また、枝の大半を占める「結果母枝」の記録項目については太さや長さを省略の上で、剪定理由になりうる新たな情報として、花芽・葉芽の数等を記録することを考えている。

【参考文献】

- 1) 藤井ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp105-106,2023
- 2) 上条,剪定「コツ」の科学,講談社, pp46-47,2016

令和7年7月 発行

令和6年度
岐阜県産業技術総合センター研究報告
第6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/>

