

V 經常研究

Ordinary Research

経常研究

固定砥粒加工における目づまり抑制技術の開発

小池 宏侑* 近藤 弘康* 山下 健介*

Development of Technology to Prevent Loading
in Fixed Abrasive Machining Process
KOIKE Hiroyuki, KONDO Hiroyasu and YAMASHITA Kensuke

近年、ファインバブル（以下、FB）を用いた研削加工が注目されており、ステンレスの研削加工においてFBが目づまり抑制に寄与することが報告されている。そこで本研究では、光学レンズ加工における目づまり抑制を目的とし、FBを含有させた研削液を用いて平面研磨加工を行い、FBが目づまりに及ぼす影響の検討を行った。その結果、吸気量3L/minのFB研削液には目づまりを抑制する効果がある可能性があることがわかった。

Key words: 光学レンズ加工, ファインバブル, 目づまり, 平面研磨加工, 吸気量

1 はじめに

光学ガラスレンズの加工は、粗加工・粗研磨・精研磨・仕上げ研磨といった工程を経て、段階的に高い形状精度と表面粗さを達成していく¹⁾²⁾。このうち、最終の仕上げ研磨では、遊離砥粒として酸化セリウムを使用する研磨加工が施される。酸化セリウムによる研磨加工は、機械的除去だけでなく化学的スーミング効果も相乗的に作用することにより、極めて高品位かつ平坦な面が得られる。しかし、加工レートが低く、また非常に多段なプロセスを要することからタクトタイムの短縮化が課題となっている。酸化セリウム工程の短縮には、粗研磨・仕上げ研磨工程でより高番手（微細砥粒）の“砥石”と呼ばれる固定砥粒工具を用いる必要があるが、高番手の砥石を用いた場合には、切りくずが工具に凝着・堆積する「目づまり」が生じやすく、切れ味の復活のためには加工を中断して「目立て」を行う必要があり、連続的な加工ができず自動化の妨げとなっている。

レーザやウォータージェットを用いることで、目づまりをインプロセスで除去する研究も進められているが、コスト及び利便性の観点から実用化が困難と考えられる。一方で、これまでにガラスレンズ加工に電極レスELID研削を援用することで、砥石の目づまりが抑制され、除去効率が向上することが明らかにされている³⁾。電極レスELID研削では、電気分解した研削液を加工点に供給することで電気化学的な作用により砥石のドレッシングを行うものであるが、電気分解により発生した微細な気泡（FB: Fine bubble）も効果的に作用している

と考えられる。加えて、ステンレスの研削加工においては、FBが砥石の目づまり抑制に寄与することも報告されている⁴⁾。ノズルタイプのFB発生装置であれば比較的安価に手に入り、加工機への設置も容易なことから、中小企業への普及しやすいものと考えられる。

そこで本研究では、固定砥粒を用いたガラスレンズ加工における目づまり抑制技術の開発に向けて、FBが目づまりに及ぼす影響の検討を行ったので報告する。

2 研究の方法

2. 1 FB生成方法

図1に示す装置を用い研削液にFBを発生させてFBを含有した研削液（以下、FB研削液）を作製した。研削液は水道水にて50倍希釈した弱導電性研削液（東洋工学株、CG-7）（以下、通常研削液）を用いた。本研究で用いたFB発生器（大生工業株、TH-03）は、吸気量の調整

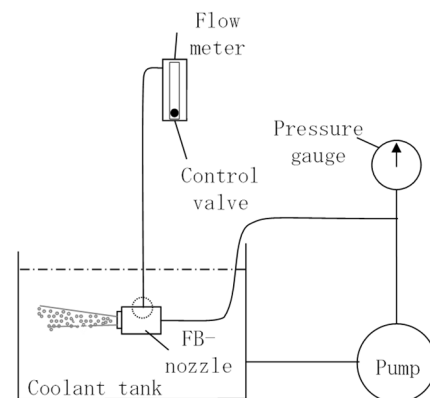


図1 FB循環装置の構成

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

が可能であり、図 1 中の吸気部の先端にフローメータを設置し、その間に吸気量を調整するための絞りを設けることで、大気吸気量の調整を行った。

2. 2 平面研磨試験

供試材として、光学ガラスレンズに広く利用されている BK-7 ($\phi 38.1\text{mm}$) を用いた。これを図 2 に示す平面研磨機 (Buehler Ltd., ECOMET3) の専用ホルダーに 3 個取り付け、研磨盤に研削液を供給しながら平面研磨を行った。この研磨機は、ワークホルダーおよび研磨盤がそれぞれ回転し、一定荷重で被加工物を研磨盤に押し付けて加工を行うものである。ペレットはメタルレジンボンドダイヤモンドペレット #1200 を用いた。研磨条件を表 1 のとおりとし、加工後のペレットの目づまり状況をデジタル顕微鏡 (株) ハイロックス, KH-8700) により評価を行った。

なお、研削液は、意図的に目づまりを発生させるため、予備実験で使用し、目づまりが発生する程度に切りくずが滞留していると思われる研削液を用いて、通常研削液、吸気量 1L/min の FB 研削液、吸気量 3L/min の FB 研削液の順で同研削液を用いて加工実験を行った (N=3)。また、FB 研削液については、120 分間タンク内で FB を生成して作製し、加工中も FB を生成しながら加工を行った。

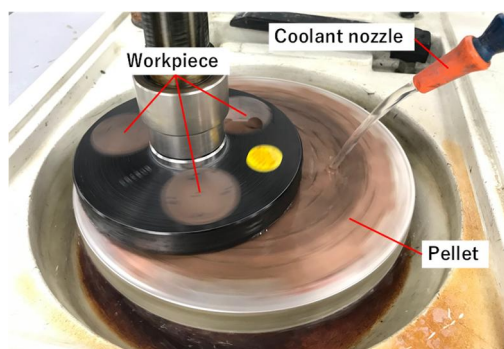


図 2 平面研磨中の様子

表 1 平面研磨条件

使用ペレット	メタルレジンボンドダイヤモンド ペレット #1200
研磨盤回転数	170 rpm
荷重	201 N
加工時間	60 min

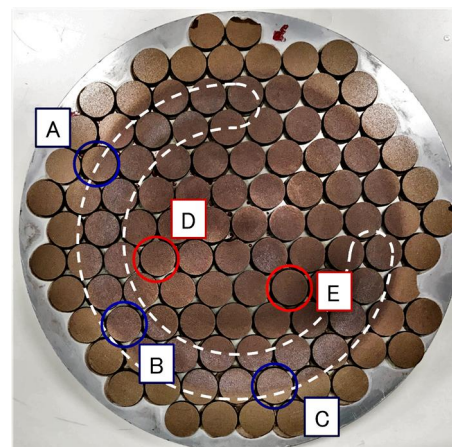
3 結果及び考察

3. 1 FB が目づまりに及ぼす影響

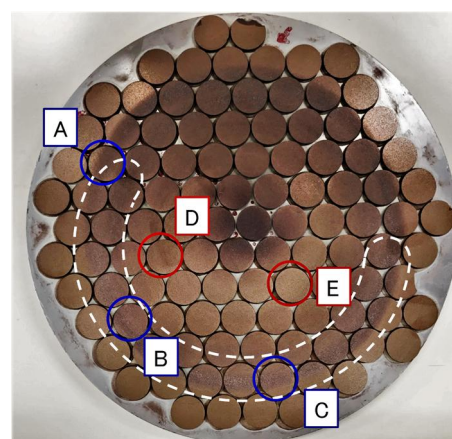
図 3 に通常研削液及び吸気量 3L/min の FB 研削液を用

いた加工後の研磨盤作業面を示す。研磨盤作業面の白い点線で囲まれた領域に、切りくず (白い付着物) が残留しており、目づまりが発生していた。

加工実験後の研磨盤のペレット (A~E, 図 3 参照) の中央部観察画像を図 4 に示す。



a) 通常研削液



b) 吸気量 3L/min の FB 研削液

図 3 加工実験後の研磨盤作業面

外側のペレット (A~C) において、吸気量 1L/min の FB 研削液は通常研削液に比べてペレットの目づまりの状況に変化はないが、吸気量 3L/min の FB 研削液は通常研削液に比べて目づまりがわずかに減少しているように見える。また、内側のペレット (D 及び E) においては、吸気量 3L/min の FB 研削液は通常研削液及び吸気量 1L/min の FB 研削液に比べて目づまりがほぼ見られなくなった。

そこで、内側のペレットに比べて目づまりが多く見られる外側のペレットにおける目づまりを定量的に評価するため、外側のペレットの画像に対し、フリーウェアの画像処理ソフトウェア ImageJ⁵⁾を用いて、加工実験 3 回の目づまりの平均面積率を算出した。

なお、目づまりの平均面積率の算出にあたっては、図 5 に示すように 2 値化を行ったのち、元画像においてレ

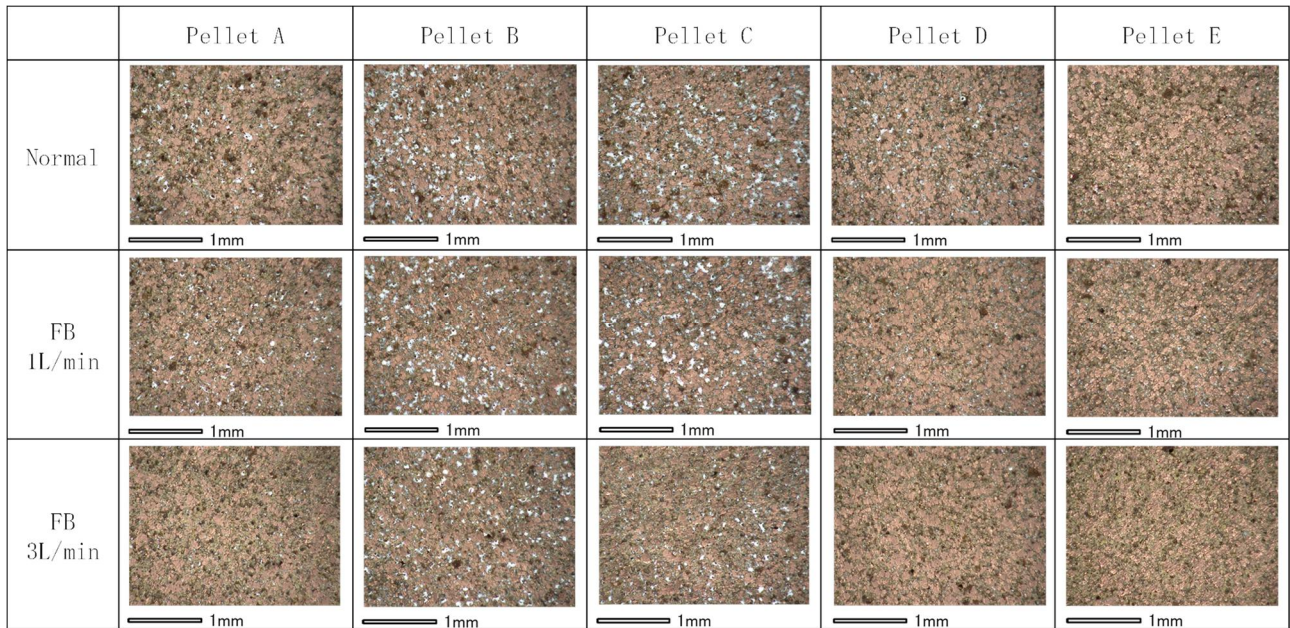


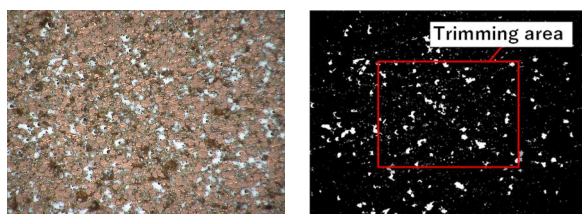
図4 加工実験後のペレットの中央部観察画像

レンズ収差と思われる歪みが画像の外周に見られたことから、画像（1600×1200pixels）の上下400pixels、左右300pixelsずつトリミングを行った画像を用いた。

目づまりの平均面積率を図6に示す。通常研削液に比べて、吸気量3L/minのFB研削液の方が目づまりの面積率は減少したが、標準誤差を含めると有意差は見られなかった。

目づまりは研削液中に含まれる切りくずによって発生することから、加工実験を繰り返すことで、研削液中

に含まれる切りくずが増加し、目づまりが多く発生すると考えられる。通常研削液、吸気量1L/minのFB研削液、吸気量3L/minのFB研削液の順に加工実験を行ったにもかかわらず、吸気量3L/minのFB研削液において、外側のペレットでは目づまりが通常研削液、吸気量1L/minのFB研削液に比べて横ばいであり、内側のペレットでは減少したことから、吸気量3L/minのFB研削液には目づまりを抑制する効果がある可能性があると考えられる。



a) 元画像 b) 2値化画像

図5 目づまり面積率の算出

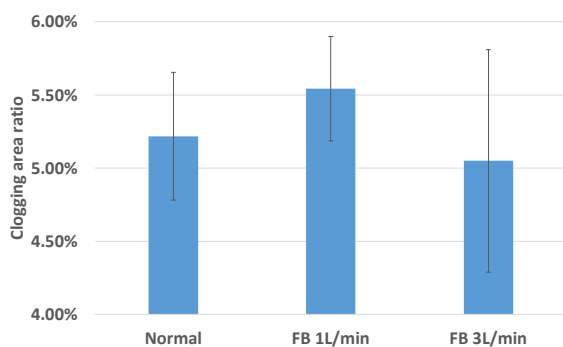


図6 外側のペレット（A～C）における目づまり面積率

4 おわりに

本研究では、光学ガラスレンズに対し、FBを含有した研削液を用いた平面研磨試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 外側のペレットにおいて、通常研削液と吸気量1L/minのFB研削液を比べると、目づまり状況に差がなかったが、吸気量3L/minのFB研削液では目づまりがわずかに減少していた。
- (2) 内側のペレットにおいて、通常研削液と吸気量1L/minのFB研削液に比べて、吸気量3L/minのFBを含んだ研削液では目づまりがほぼ見られなくなった。
- (3) 目づまりが多く見られる外側のペレットについて、画像解析で目づまり面積率を算出した所、有意差は見られなかったものの、加工実験を繰り返すことで、目づまりが多く発生すると推察されることから、3L/minのFB研削液には目づまりを抑制する効果を有する可能性がある。

参考文献

- 1) M.Saeki, et al.: J. Jpn. Soc. Abra. Tech., 41(3), 90, (1997)
- 2) H.Takino :J. Jpn. Soc. Precis. Eng. 70(5), 619, (2004)
- 3) 江面篤志ら：“栃木県産業技術センター研究報告”, 13, 1-4, (2016)
- 4) 稲澤勝史ら：“栃木県産業技術センター研究報告”, 15, 21-24, (2018)
- 5) C.A. Schneider, et al.: NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, Nature Methods, 9, (2012) 671

経常研究

AE センサを用いた工具摩耗状態の監視

棚原 貴登* 近藤 弘康* 松本 健司*

Monitoring of Tool Wear with Acoustic Emission Sensor
TANAHARA Takato, KONDO Hiroyasu and MATSUMOTO Kenji

金属等の材料が破壊される際に発生する弾性波を検出可能な AE センサを用いて、切削加工における工具摩耗・欠損等の工具状態を推定することを目的とし、工具摩耗状態及び欠損状態が AE に及ぼす影響を調査し、工具欠損状態推定手法の開発を行った。その結果、取得した AE 波形に対して FFT 解析を用いることで、AE センサで取得した値と切削力に比例関係があることが分かり、摩耗状態を推定できる可能性を示した。また、欠損の位置及び大きさによって AE 波形が変化することが分かり、開発した工具欠損状態推定手法において、切削動力計では判断できない 30 μ m 程度の微細な欠損を検知できた。

Key words: 工具摩耗, 工具欠損, 切削力, AE センサ, 機械学習

1 はじめに

近年、航空業界では部品価格の低下に伴う部品製造コストの削減が大きな課題となっている。特に難削材の加工においては、製造コスト全体の中でも工具コストの占める割合が大きく、工具コストの削減が重要視されている。また、製品不具合が発生した場合、再製作にかかるコストが余分に発生してしまうため、不具合リスクの低減も加工現場では常に意識されている。

一方、航空機部品の加工現場では加工時間や加工ロットで工具を管理し、工具交換が行われているため、まだ使用できる工具を早期に交換しているという課題がある。

加えて、製品不具合の 1 つとして、仕上げ工程において微細な欠損が生じたことに気づかず、加工を継続することで欠損が大きくなり、結果として製品仕上げ面にスジが残ってしまい、後工程にて手作業による磨きが必要となるケースがある。

このため、切削加工現場では工具コストの削減、欠けの早期発見を目的として、工具の摩耗・欠損を監視する手法が求められている。

令和 2 年度の研究において、AE センサを用いることで工具が定常摩耗から終期摩耗に移行する様子が確認できた¹⁾が、このとき用いた AE センサ（エヌエフ回路設計ブロック AE-901S）は 70kHz 共振型であったため、数百 kHz 以上の帯域での反応は十分に確認できていなかった。

そこで本研究では、広帯域型の AE センサ（エヌエフ

回路設計ブロック AE-900S-WB）及び最大 200MS/s まで取得可能なデータロガー（横河計測 DL950）を用いることで、数十 kHz～数 MHz の広い範囲で工具摩耗及び工具欠損が AE に及ぼす影響を調査した。

その結果から、工具切れ刃の微細な変化を検出することが可能な AE センサ²⁾を用いて工具欠損状態を監視する手法を開発したので報告する。

2 研究の方法

2. 1 工具摩耗状態が AE に及ぼす影響

図 1 に示す段取りで、エンドミルを用いて初期摩耗から終期摩耗に至るまで切削試験（以下、摩耗試験）を複数回行い、切削動力計や刃先画像から得られた工具摩耗状態と AE との関係性を評価した。なお、工具摩耗の進展に伴って切削力が上昇することは一般的に知られているため、切削力と AE との相関関係を示すことで工具摩耗状態を推定することを目指した。

加工機は 3 軸マシニングセンタ（安田工業 YBM640V III）を用いた。また、被削材は 64 チタン（ASTM B348 Gr. 5）とし、加工工具は工具の振れによって半径方向切込み深さが変化しないよう、新品の 2 枚刃スクエアエンドミル（MOLDINO HES2060）をグラインダで 1 枚刃に刃落として使用した。

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

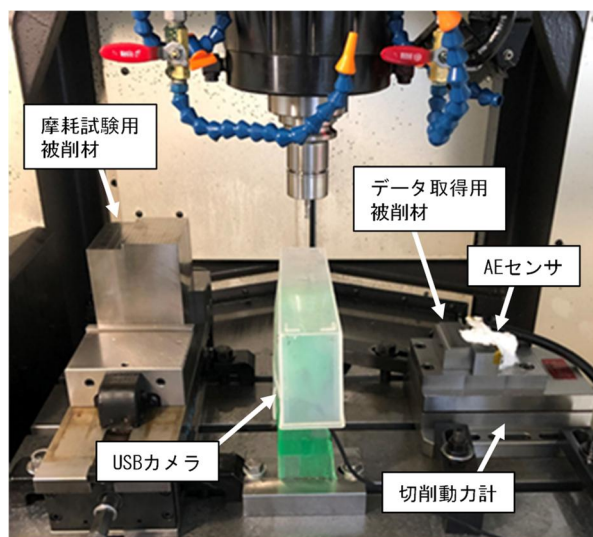


図1 摩耗試験段取り

表1 工具・切削条件

工具	径	6mm
	形状	スクエアエンドミル (アタリ付き)
	コーティング	なし
	母材	超硬
	刃数	2枚刃→1枚刃 (グラインダで刃落とし)
切削条件	切削速度	200mm/min
	1刃切込み	0.1mm/tooth
	軸方向切込み	3.0mm
	半径方向切込み	0.1mm
	切削油	WET

切削条件は表1のとおりとし、片削りの摩耗試験を刃先が大きく欠けるまで実施した。

また、切削力とAEのデータ取得方法は、切削動力計（日本キスラー 9265B）に64チタン被削材を固定した治具を取り付け、被削材に広帯域型AEセンサ（エヌエフ回路設計ブロック AE-900S-WB）を設置し、切削動力計とAEセンサから得られるデータを切削長10m毎に取得した。なお、AEはサンプルレート10MS/sでデータ取得を行った。またAEセンサは防水対策のためシリコーン（信越化学工業 KE-45-W）を表面に塗布した。

2. 2 工具欠損状態がAEに及ぼす影響

機械加工によって所定の位置を任意の大きさに欠損させた工具を用いた切削試験（以下、欠損試験）を行い、工具欠損状態がAEに及ぼす影響を調査した。

試験工具は、摩耗試験と同様の新品6mmスクエアエンドミルをグラインダで1枚刃に刃落としした工具を5本用意し、その内4本にワイヤ放電加工機（ソディック

表2 試験工具の傷の位置と大きさ

工具 No	刃先先端からの位置 [mm]	傷の大きさ [μm]
1	なし	なし
2	1	10
3	1	20
4	1	30
5	2	30

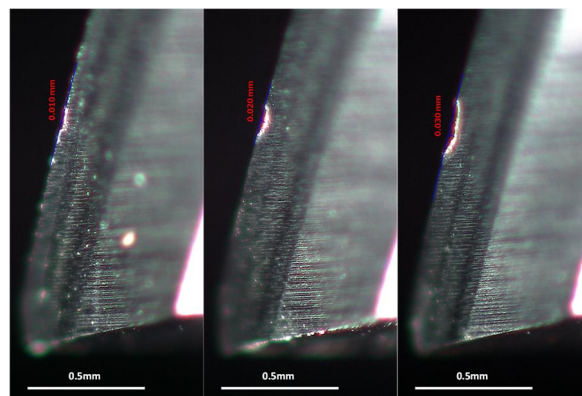


図2 試験工具の顕微鏡写真(傷の大きさ)

左から：No. 2(10 μm)，No. 3(20 μm)，No. 4(30 μm)

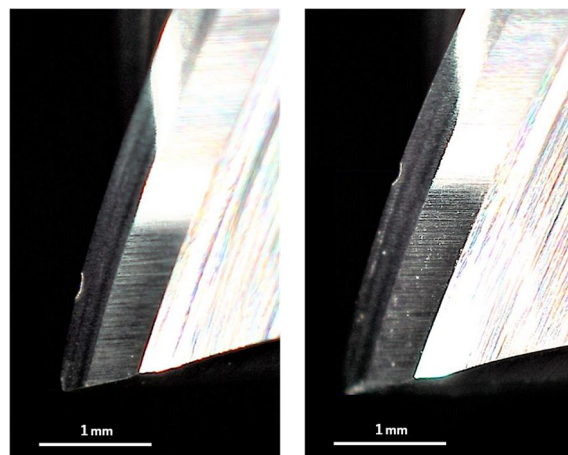


図3 試験工具の顕微鏡写真(刃先先端からの位置)

左：No. 4(1mm)，右：No. 5(2mm)

VL600Q)を用いて、欠損を模した傷を付けた。各工具の傷の位置と大きさを表2に示す。また、デジタルマイクロスコプ（ハイロックス KH-8700）で撮影した試験工具の顕微鏡写真を図2，図3に示す。

試験段取り及び切削条件については、2. 1の摩耗試験と同様とし、データ取得用被削材のみを切削して試験工具毎の切削力及びAE波形を取得した。

次に、工具の傷の大きさが加工面に与える影響を調

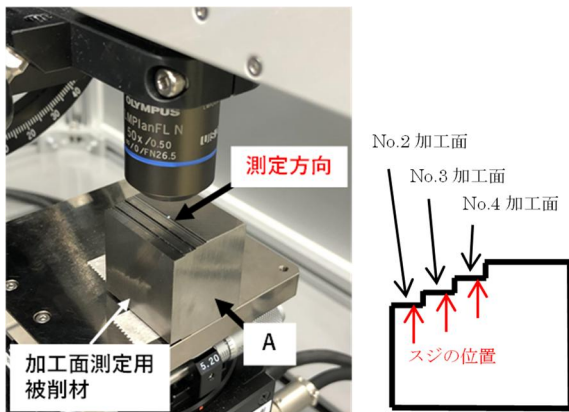


図4 左:測定方向, 右:A の方向から見た参考図

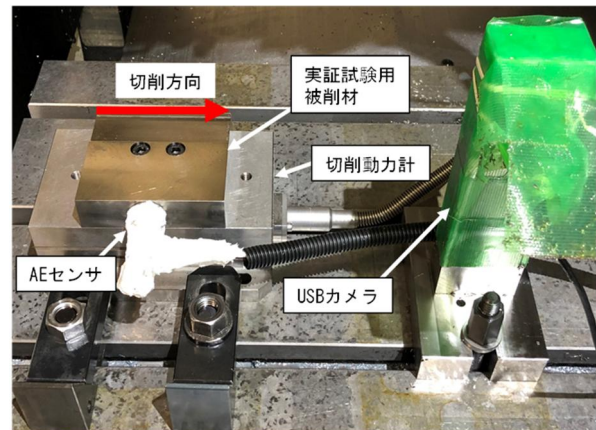


図5 実証試験段取り

査するため、非接触輪郭形状測定機（三鷹光器 MLP-3SP）を用いて試験工具毎の加工面の状態を観察し、工具傷による加工面のスジ高さを測定した。

なお、加工面測定用被削材は 64 チタン材を別に用意し、図 1 の摩耗試験用被削材を取り外したバイスで固定した。欠損試験後に工具 No. 2～4 を用いて欠損試験と同条件で加工面測定用被削材に側面切削を行った後、加工面を図 4 の測定方向で、削り始め、中心付近、抜け際の 3 か所を測定した。

2. 3 工具欠損状態推定手法の開発

2. 1 及び 2. 2 の結果を踏まえ、工具摩耗及び欠損状態を監視可能なデータ処理プロセスを検討するとともに、AE センサから取得したデータを入力すれば工具状態を自動判定するシステムの開発を行った。

2. 4 実証試験

開発したシステムの実証のため、切削試験中すべての加工時のデータを取得する実証試験を行った。なお、実証試験の加工機、被削材材質、工具、切削条件は 2. 1 と同様とし、切削動力計は被削材の都合上、日本キスラー 9257B を用いた。AE のサンプルレートについては、長時間のデータ収集が必要であること、また今後実加工現場への適応を想定し、これまでの 10MHz から 1MHz に変更した。実証試験の段取りを図 5 に示す。

3 結果及び考察

3. 1 工具摩耗状態が AE に及ぼす影響

3. 1. 1 FFT 解析による結果

全部で 3 回行った摩耗試験の中で、1 回目の摩耗試験から得られた AE 波形に FFT 解析を行った結果を図 6 に示す。切削の進行に伴って 14kHz 付近に波形が見られたため、14kHz 付近の振動が工具摩耗に起因していると予

想した。

そこで、切削力は主分力のピーク平均値、AE は 12～16kHz 間の最大振幅値を用いて、切削長毎にプロットしたグラフを図 7 に示す。その結果、AE は切削力と同様に右肩上がりグラフが推移し、摩耗の進展とともに上昇傾向であることが観察できる。

また、再現性を確認するため同一条件の試験を再度行った 2 回目の摩耗試験の結果について、切削長に対する切削力と AE の変化を図 8 に示す。AE のスケールが異なるものの、図 7 と同様に切削力との比例関係が確認できる。AE のスケールが異なる理由は、被削材の切削量によって切削位置と AE センサとの距離が変化するため、距離の差が AE の値にも影響した可能性等が考えられる。

次に、1 回目と 2 回目の切削力と AE の関係を図 9 に示す。1 回目と 2 回目の試験で切削力と AE の傾きが異なる結果となったが、どちらも線形性が見られるため、摩耗状態の推定ができる可能性を示せたと考えられる。

なお、3 回目に行った摩耗試験では、1 回目 2 回目と比較して、早い段階で工具に欠損が発生したため、工具摩耗状態の評価としてデータを扱うには適していないと判断し、欠損発生時点で試験を終了した。

以上の結果から、AE センサで取得した値と切削力に比例関係が確認できたため、AE センサを用いることで工具摩耗状態を推定できる可能性があることが分かった。

一方、今回の結果は同一の加工条件下であっても切削力に対する AE の傾きが異なる場合があることから、加工現場への適用のためには更なる検討が必要と考えられる。

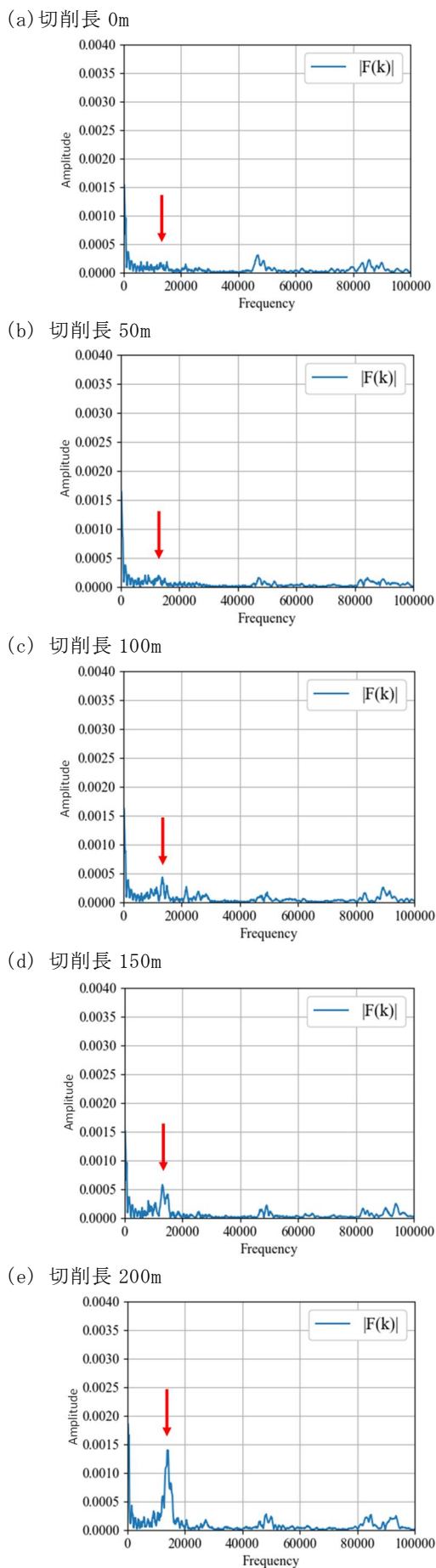


図6 AE FFT 解析結果

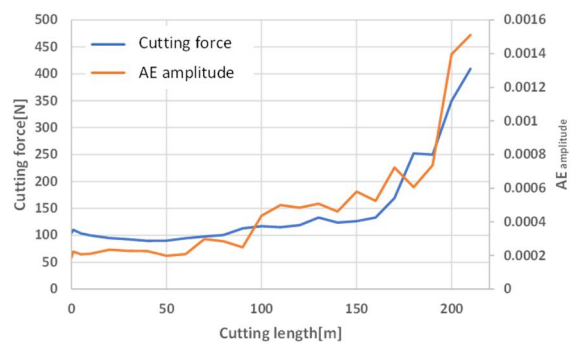


図7 切削長に対する切削力と AE の変化 (1 回目)

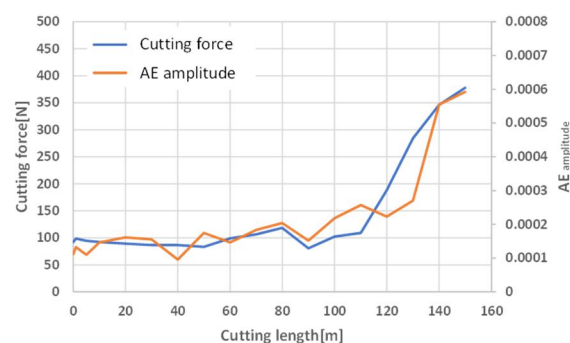


図8 切削長に対する切削力と AE の変化 (2 回目)

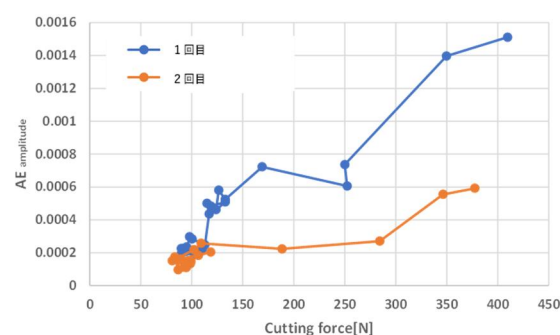


図9 切削力と AE の関係

3. 1. 2 機械学習による結果

今年度は切削試験に使用できる工具に限りがあり、機械学習に十分なデータが揃わなかったため、今年度の条件に近い令和2年度の研究¹⁾の4回分の摩耗試験データから、3回分を学習用データ、1回分をテストデータとして使用し、工具摩耗状態とAEの関係性を調査した。

なお、調査に用いた4回の摩耗試験はすべて同様の試験条件で行っており、試験工具は超硬母材のノンコーティング2枚刃φ6mmのスクエアエンドミル(不二越2CE6)を表1の試験工具と同様にグラインダで1枚刃に刃落として使用した。また、AEセンサは共振型のAE

センサ(エヌエフ回路設計ブロック AE-901S)を使用してサンプルレート 1MHz でデータ取得を行っており、切削液を使用せずにドライ加工で試験を行った。その他の試験条件は2. 1と同様である。

取得した AE 波形から時系列データとしての特徴量を算出し、切削力との相関がある特徴量を選定したところ、AE 波形から切削力を予測させて摩耗状態を推定できる可能性が伺えた。このとき、切削力の評価は XY 方向の合成成分の実効値を用いた。図 10 に切削動力計から取得した切削力(横軸)と、AE 波形から機械学習を用いて予測した切削力(縦軸)をプロットしたところ、予測した切削力に多少ばらつきはあるものの、比例関係が見られ、AE 波形から予測した切削力は切削動力計から取得した切削力に近い値と言える。

ただ、本手法については過去のデータでのみ検証しており、試験条件が異なる今回のデータへの有効性は確認できていない。

今後データを蓄積し、本手法で工具摩耗状態を推定できるか検証を進める。

3. 2 工具欠損状態が AE に及ぼす影響

欠損試験のデータ取得における約 4 秒間の試験切削中の AE 波形は、削り始め及び抜け際は波形が不安定であり、中心付近はセンサ設置位置に近づくにつれて波形が大きくなる傾向があった。そのため、削り始めを 0 秒として、比較的波形が安定している 0.5~1.25 秒間、2.75~3.5 秒間の中から、1.0~1.1 秒の 0.1 秒間の波形を抽出し、その中で 1 刃切削毎の 18 波形を平均化した平均波形を作成した。なお、本研究では実験的に波形安定区間を選択して波形を抽出しているため、今後実用化に向けて、波形抽出について更なる検討が必要である。作成した平均波形の RMS の移動平均を取得した結果、試験工具の欠損の大きさによって波形に変化が見られた(図 11~15)。

また、工具のねじれ角及び切削条件から、被削材への

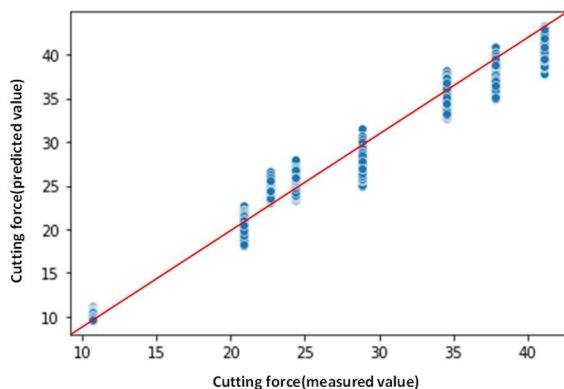


図 10 切削力実測値と予測値の関係

1 刃接触時間及び傷の接触時間を計算したところ、RMS 値に反応が現れている部分と傷の接触時間が概ね一致する結果となった。傷の接触時間は図 12~15 の網掛部分で示す。

一方、傷の位置による AE 波形の変化を確認したところ、図 15 に示すように RMS 値に反応が現れている部分が、他の試験工具と比較すると右にスライドしており、刃先から 2mm の位置にある幅約 0.1mm の傷が被削材に接触する時間である、約 3.44ms~3.80ms 間(図 15 網掛部)と概ね一致した。

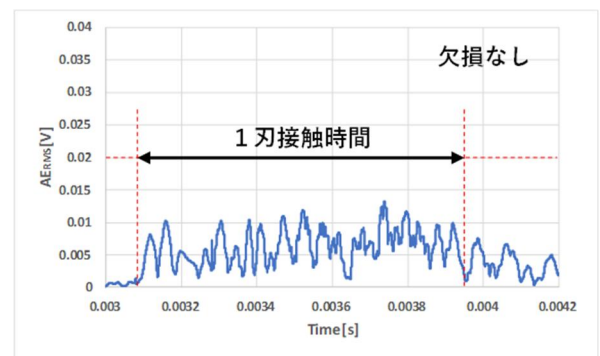


図 11 AE の RMS 波形 No.1(欠損なし)

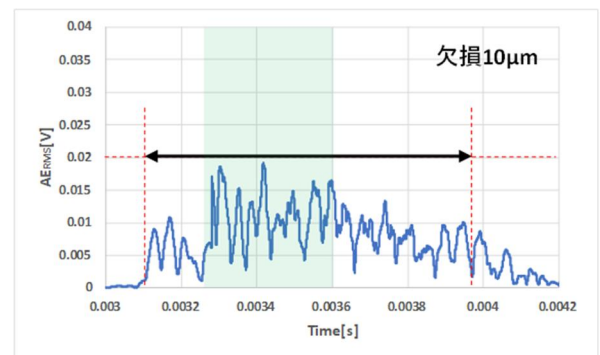


図 12 AE の RMS 波形(網掛部: 傷の接触時間)
No.2(欠損 10 μ m)

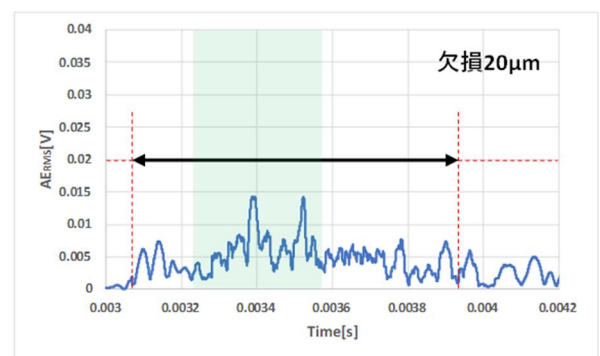


図 13 AE の RMS 波形(網掛部: 傷の接触時間)
No.3(欠損 20 μ m)

また、切削力は主分力のピーク平均値、AE は RMS の最大値を用いて、試験工具毎にプロットしたグラフを図 16 に示す。試験工具毎の切削力を比較すると、傷の有無、大きさに関わらず、大きな変化は見られない。そのため、 $30\mu\text{m}$ までの工具欠損は切削力に影響を与えないと考えられる。

一方、試験工具毎の AE の RMS 最大値を比較すると、工具 No. 1～3 まではほぼ一定だが、No. 4 及び No. 5 では高い値を示した。

以上の結果から、AE を用いることで切削力では捉えられない $30\mu\text{m}$ 程度の欠損に伴う変動を検知できる可能

性が伺える。

次に、工具 No. 2～4 でそれぞれ加工した加工面のスジの高さを測定した結果から、加工面中心付近のスジの位置を拡大表示したものを図 17～19 に示す。その結果、 $30\mu\text{m}$ の工具欠損では $10\mu\text{m}$ 程度の高さのスジとなった。なお、削り始め、抜け際についても同様の結果となった。

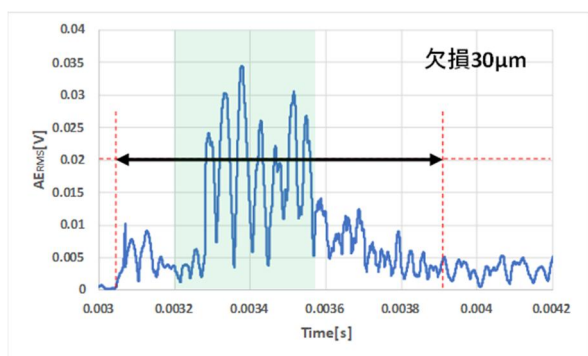


図 14 AE の RMS 波形（網掛部：傷の接触時間）
No. 4 (欠損 $30\mu\text{m}$)

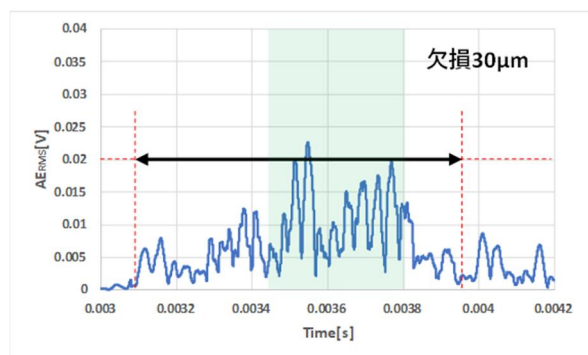


図 15 AE の RMS 波形（網掛部：傷の接触時間）
No. 5 (欠損 $30\mu\text{m}$, 欠損位置刃先から 2mm)

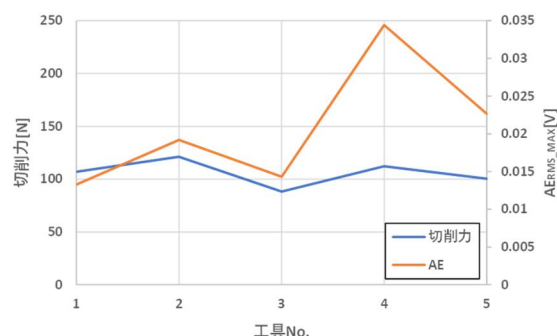


図 16 試験工具毎の切削力と AE の変化

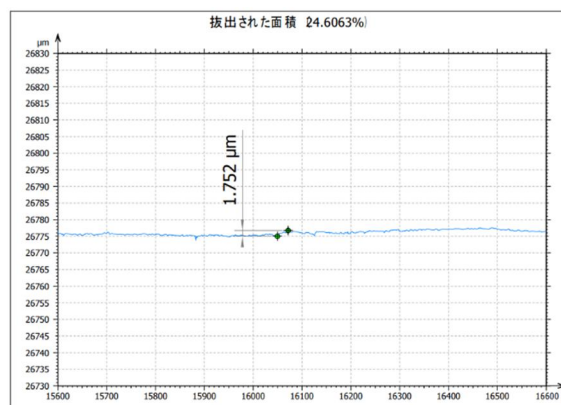


図 17 加工面測定結果
No. 2 (欠損 $10\mu\text{m}$)

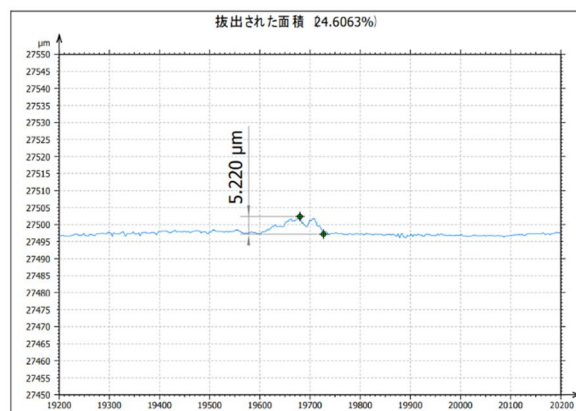


図 18 加工面測定結果
No. 3 (欠損 $20\mu\text{m}$)

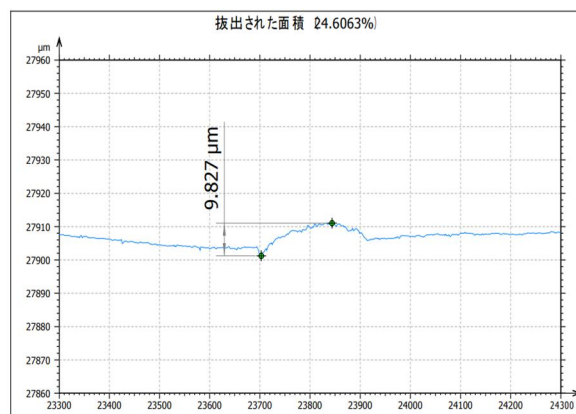


図 19 加工面測定結果
No. 4 (欠損 $30\mu\text{m}$)

3.3 工具欠損状態推定手法の開発

これまでの結果から、3.1で評価を行った工具摩耗状態の推定については加工現場への適用のためには更なる検討が必要である。一方、3.2で評価を行った工具欠損状態の推定については、切削力では捉えられない微細な欠損を AE センサで検知できることから、今回は 3.2 の結果を基に工具の欠損検知を行う手法の開発を目指した。

3.3.1 しきい値判定による欠損検知

今年度行った複数の切削試験から、欠損が発生した際の AE 波形のしきい値を決定し、しきい値による自動判定での実装とした。なお、AE 波形の処理方法は 3.2 と同様の RMS 処理を行った。

切削長 1m 毎に欠損判定を行った結果、図 20 に示すとおり切削長 14m で波形がしきい値を超え、欠損検知を意味する NG 判定を出した。このときの刃先画像を確認すると、図 21 に示すとおり、NG 判定が出た切削長 14m で、約 $25\mu\text{m}$ の欠損が発生していることが確認できた。

以上の結果から、加工条件が同一の場合にのみ適用できるという条件付きではあるものの、しきい値判定によって約 $25\mu\text{m}$ の欠損が発生した際に欠損検知の判定を出すことに成功したと言える。なお、現状の判定処理は変更可能な実装となっているため、判定精度向上を目指して、今後も判定基準の検討を進める。

次に、欠損約 $30\mu\text{m}$ となった切削長 15m 時点の加工面のスジについて、非接触輪郭形状測定機を用いて測定した結果を図 22 に示す。

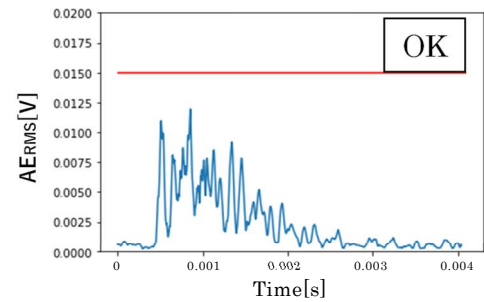
結果は、切り始め、中心付近、抜け際の 3 か所を測定し、スジの大きさは $4.0\sim 5.5\mu\text{m}$ 程度であった。図 22 に中心付近の測定結果を示す。3.2 と比較して小さい値となった原因は、人工的な傷と違い工具に広い範囲で摩耗及び微細な欠損が生じているため、値がならされたこと等が考えられる。

3.3.2 機械学習による欠損検知

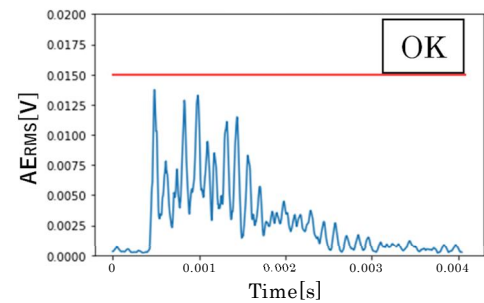
図 14 から欠損を有する工具による切削では、急峻な変化を含む波形であることが予想される。そこで、AE センサ出力波形をウェーブレット解析し、取得した周波数に関するデータを比較することで、工具欠損の有無を推定することが出来ると考えた。

今年度行った切削試験の内、2.1で行った 3 回の摩耗試験を学習用データ、2.4で行った実証試験をテストデータとし、工具欠損有無の推定モデル作成を検討した。当該学習用データの特徴量を主成分分析し、テストデータを同次元に埋め込んだプロットを図 23 に示す。学習用データは、想定通り欠損の有無が反映された分布を形成しているが、テストデータは大きく外れた分布を

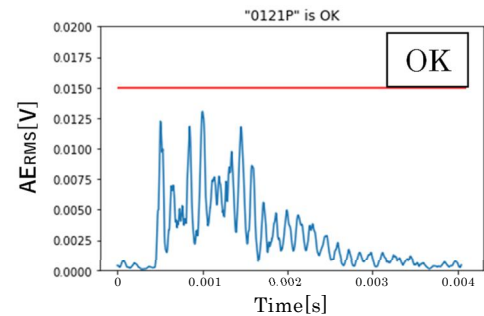
(a) 切削長 8m



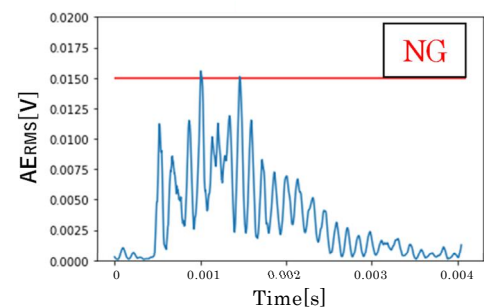
(b) 切削長 10m



(c) 切削長 12m



(d) 切削長 14m



(e) 切削長 15m

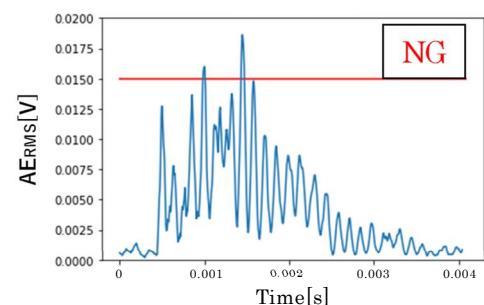


図 20 欠損検知判定結果

形成している。

このことから、学習は良好に実施できることが予想できるが、作成したモデルはテストデータには適応が難しいと判断した。テストデータにおいて分布が大きく外れた原因は、実証試験ではサンプルレートをこれまでの10MHz から 1MHz に変更したことが影響したと考えられる。

次に、サンプルレート 10MHz で試験を行った 3 回の摩耗試験の内、最もデータ数の少ない 3 回目の摩耗試験を

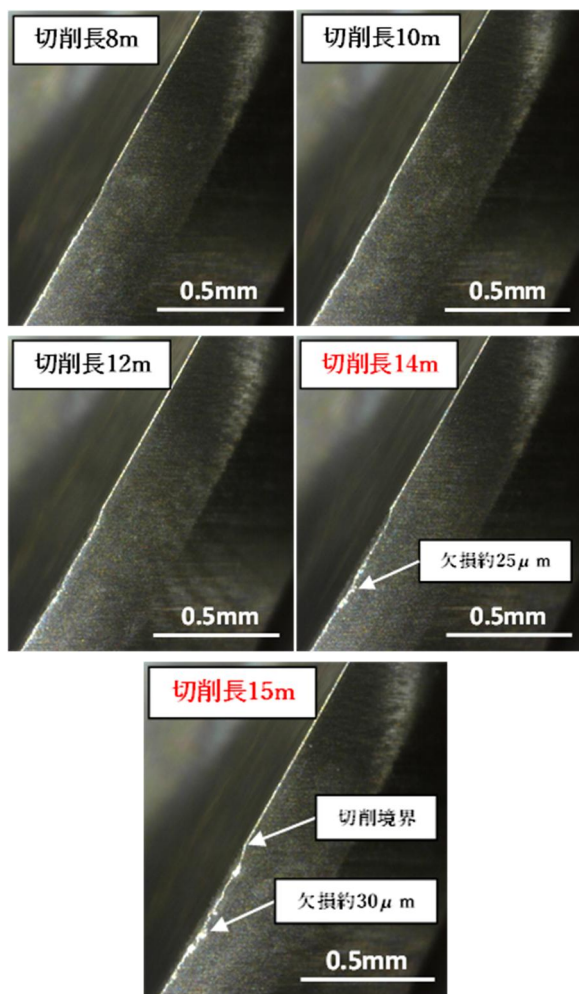


図 21 実証試験刃先画像

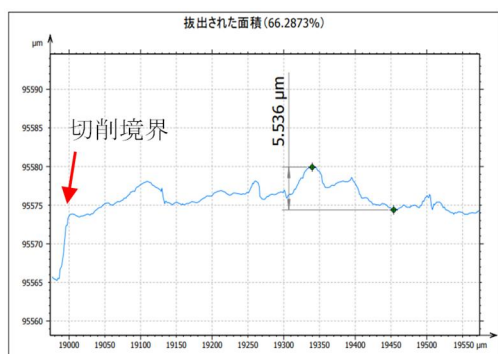


図 22 加工面測定結果 切削長 15m

テストデータ、1 回目及び 2 回目を学習用データとし、同モデルに推定させた推定結果を図 24 に示す。図 25 に示した刃先画像と比較すると、切削長 20m の欠損発生に伴いモデル出力が異常を示ようになっており、良好な推定結果を得られたことが分かる。当該学習用データの特徴量を主成分分析し、テストデータを同次元に埋め込んだプロットを図 26 に示す。テストデータは学習データ分布内に位置しており、2 次元プロットでは欠損の有無の境界線が分かりづらいが、3 次元プロット及び図

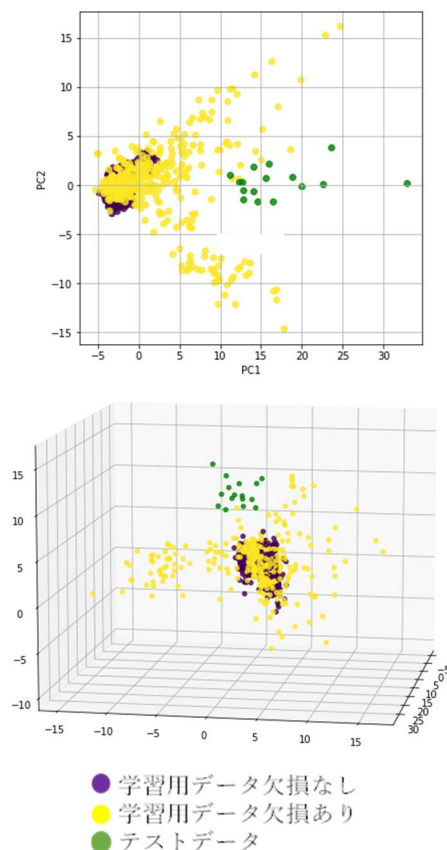


図 23 機械学習による主成分分析プロット
(上：2 次元，下：3 次元)

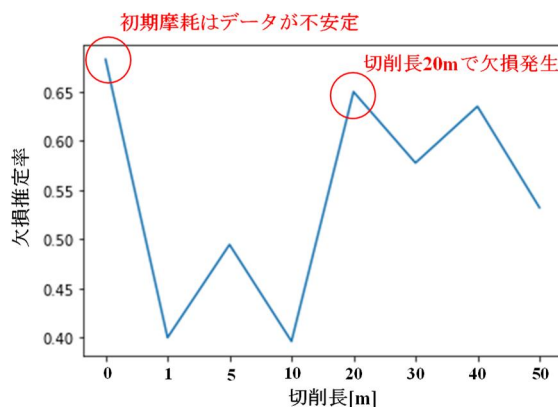


図 24 機械学習による工具欠損推定結果

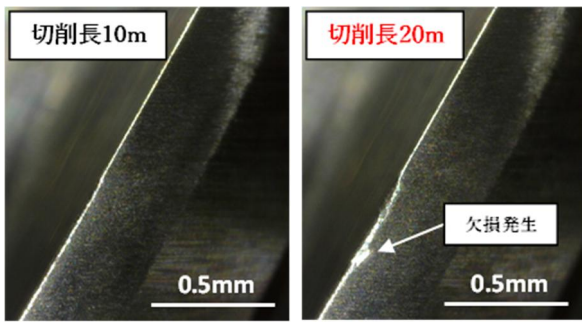


図 25 2 回目の摩耗試験の工具刃先画像

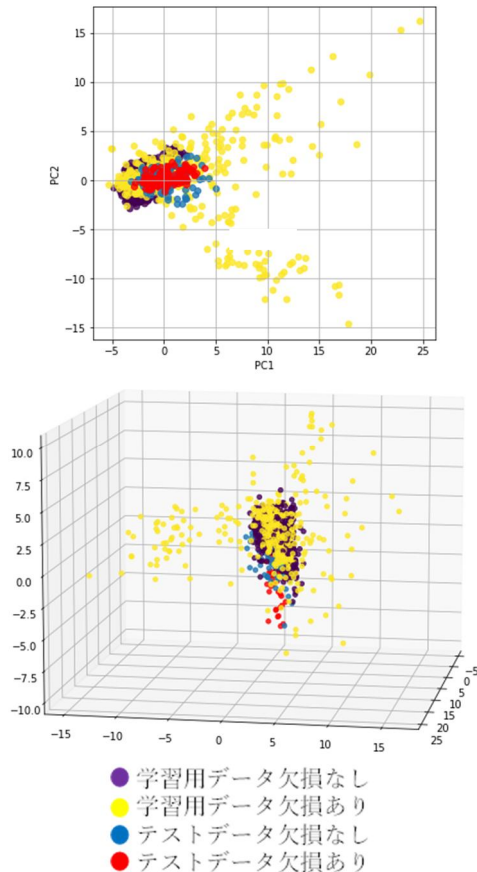


図 26 機械学習による主成分分析プロット
(上：2 次元，下：3 次元)

24 の結果からも分布に違いが出ていることが分かる。

以上の結果より、同一試験条件でのみ適用可能ではあるものの、機械学習を用いることで、工具欠損状態を推定できる可能性がある。

4 おわりに

本研究では、AE センサを用いた摩耗や欠損等の工具状態推定を目的として、工具摩耗及び工具欠損が AE に及ぼす影響を調査し、工具欠損状態推定手法を検討することで、以下の知見を得た。

- (1) 工具摩耗の進展に伴い 14kHz 付近の周波数帯に反応が見られ、切削力の主成分のピーク平均値と AE の 12~16kHz の最大振幅値に比例関係が確認できる。
- (2) 工具欠損の大きさ及び位置により、AE 波形に変化が現れ、切削力では判断できない 30 μ m 程度の微細な工具欠損を検知できる。
- (3) 開発した工具欠損状態推定手法において、しきい値判定または機械学習を用いることで、自動で工具欠損状態が推定できる可能性がある。

参考文献

- 1) 稲澤勝史ほか：“栃木県産業技術センター研究報告”，18, 1-5, (2021)
- 2) 古賀 俊彦ほか：“トライボロジスト”，63(7)，487-498, (2018)

経常研究

研削加工における加工機の電力変化による加工負荷の観察

山下 健介* 小池 宏侑* 曾田 将来*

Observation of Machining Load by Electric Power of the Machine in Grinding
YAMASHITA Kensuke, KOIKE Hiroyuki and SOTA Masaki

研削加工において目立てのタイミングや加工条件は作業者の熟練度によるところが大きく、技能レス化や不良品低減のため、比較的安価な電力計（電流計）を用いた研削加工状態の見える化が求められている。本研究では、加工機の電力（電流）変化と加工負荷の関係を明らかにし、不安定加工における電力（電流）への影響を検討することにより、不安定加工状態の推定を行った。その結果、加工時の主軸電流を測定することにより、接線抵抗の推定が可能であること、研削焼けと目づまり割合の推定が可能であることが分かった。また、高い周波数を有するびびりは、主軸電流から検知が難しい事が分かった。

Key words: 平面研削, 電流, 加工負荷, 目づまり, びびり

1 はじめに

研削加工では加工中に切りくずなどが砥石表面に凝着・堆積し切れ味が低下する目づまりや砥粒先端が摩滅する目つぶれなどが起こる。そのため砥石の表面を削り、切れ味を復活させる目立て作業を行う必要がある。

目立てのタイミングや加工条件が不適切な場合、加工時に砥石の目づまりやびびりなどが生じて加工負荷が増加又は変動する。これにより研削面の形状精度や粗さの低下、研削焼けなどが起こり、製品不良に繋がる。一方で、目立てのタイミングや加工条件の設定は作業者の熟練度によるところが大きく、熟練度によるばらつきが発生や判断が定量的ではないことから OJT における技術伝承の課題になっている。そのため技能レス化や不良品低減のため研削加工状態の見える化が求められている。なお加工状態は動力計を用いれば一定の水準で推定可能だが¹⁾、動力計は高価なため、より低コストな見える化が求められている。

そこで本研究では、比較的安価な電力計（電流計）に着目し、これを用いて加工機の電力変化と加工負荷の関係を明らかにし、不安定加工における電力への影響を検討することにより、不安定加工状態の推定を目指した。

2 研究の方法

2.1 加工負荷と電力（電流）の測定方法

加工機は平面研削盤（株式会社工作機械 PSG-63DXNC）を用い、図 1 に示すとおり被削材を切削動力計（日本キスラー（合）9265B）の上に固定治具ごと固定し加工を行

った。

なお研削砥石は#220 の平型砥石（株式会社タケカンパニーリミテド WA220K7V35R），研削液は水道水にて 50 倍希釈した弱導電性研削液（東洋工学株式会社 CG-7）を用い、切削動力計の出力値はデータロガー（横河計測株式会社 DL950）で測定した。

加工機の電力測定は、予備実験により図 2 に示すとおり電力と電流の傾向は一致したため、電流のみを測定することとし、図 3 に示すとおり、加工機配電盤の主軸モータ配線の三相交流ブレーカーと Y 軸サーボモータ配線に電流クランププローブ（横河計測株式会社 720930，720931）を取り付け、切削動力計と同様にデータロガー（横河計測株式会社 DL950）で測定した。

加工負荷及び電流の評価方法は、加工時間中心の 6 割を評価領域とした。加工負荷は接線抵抗 F_t 、法線抵抗 F_n の各平均値を算出し、電流値は空転時の電流をゼロとして補正後、主軸は R 相、S 相、T 相の合計平均値、Y 軸サーボモータは平均値を算出した。

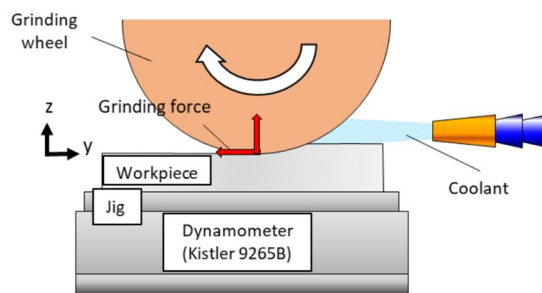


図 1 被削材固定状況

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

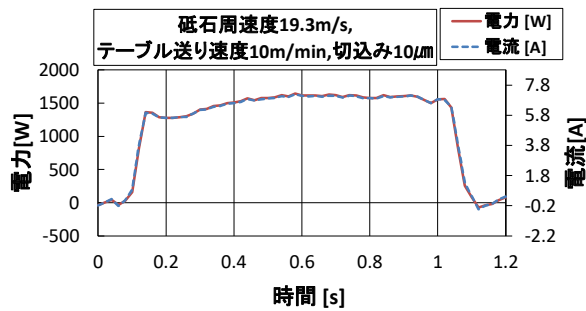


図2 電力と電流の関係

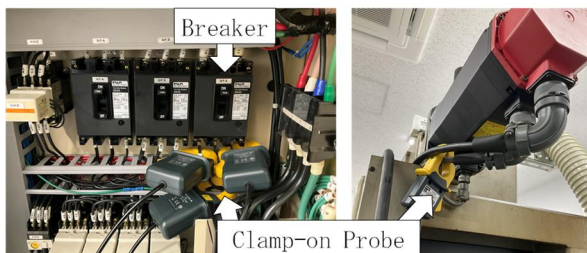


図3 電流測定方法

(左：主軸モータ，右：Y軸サーボモータ)

表1 研削条件

	パターン1	パターン2	パターン3
砥石周速度 [m/s]	12.9 19.3 25.8	19.3	19.3
テーブル 送り速度 [m/min]	10	5 10 15	10
切込み [μm]	10	10	5 10 15

2. 2 加工機の電流変化と加工負荷の関係

研削条件における電流変化と加工負荷の関係を明らかにするため、被削材をSS400 (W15×L150×H15mm) とし、砥石周速度 19.3m/s、テーブル送り速度 10m/min、切込み 10 μm を基準加工条件と設定し、砥石周速度を変更したものをパターン1、テーブル送り速度を変更したものをパターン2、切込みを変更したものをパターン3とし、合計7条件で加工を行った。表1に研削条件を示す。なお各条件の加工パス数は、合計切込み量が 150 μm になるまでとした。

2. 3 不安定加工状態の推定

不安定加工状態として目づまり状態の推定を行うために目づまりを起こしやすいステンレス SUS304 (W20×L81×H24mm) を被削材とし、砥石周速度 25.8m/s、テーブル送り速度 10m/min、切込み 5 μm で加工を行った。

また、砥石の目づまり割合を定量化するため、加工後の砥石表面を高速ビデオカメラ (㈱フォトン FASTCAM SA3 model60K) で撮影した。今回用いた砥石は白色であり黒色部が目づまりと考えられるため、撮影し

た動画から画像を抽出し画像処理ソフトウェア ImageJ Fiji²⁾を用いて二値化後、画像全体の画素数から黒色部画素数の割合を算出した。なお加工を停止するとY軸の位置が変化するため、ドレッシング後、規定の加工パスまで加工を行い、砥石表面を観察した。

加工後の被削材の評価は、表面画像をデジタルカメラで撮影し、表面粗さ (Ra, Rku) を接触式表面粗さ測定機 (アメテック㈱ PGI840) で長さ方向 15mm, 40mm, 65mm の位置を計測し平均値で評価した。

3 結果及び考察

3. 1 加工機の電流変化と加工負荷の関係

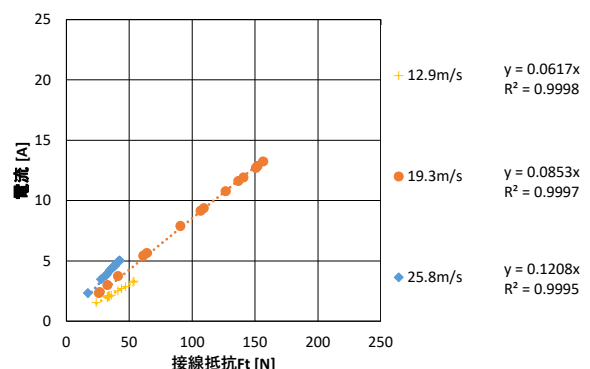
各パターンにおける主軸電流と接線抵抗 F_t の関係を図4～6に示す。

砥石周速度を変えた場合 (パターン1) は、周速度が大きくなるほど、接線抵抗 F_t に対する電流値の傾きが大きくなること分かる (図4)。これは砥石周速度 (回転数) が大きくなると回転に必要な電流が多くなる事と一致している。

テーブル送り速度を変えた場合 (パターン2) 及び、切込みを変えた場合 (パターン3) は、接線抵抗 F_t に対する主軸電流の傾きは大きく変化しないこと分かる (図5, 6)。送りや切込みの大小によって接線抵抗 F_t は増減するが主軸電流と接線抵抗 F_t の関係は変化しないと考えられる。なおパターン2のテーブル送り速度 5m/min の条件は加工初期にびびりが発生した。

全ての条件において主軸電流と接線抵抗 F_t の決定係数 R^2 値が1に近い線形性が見られるため、加工時の主軸電流を測定することにより、接線抵抗の推定が可能であることが分かる。

次に砥石周速度 19.3m/s、テーブル送り速度 10m/min、切込み 5 μm にて加工した時のY軸サーボモータ電流と法線抵抗 F_n の関係を図7に示す。結果として線形性はなくY軸サーボモータ電流から法線抵抗 F_n を推定するの


 図4 主軸電流と接線抵抗の関係
(パターン1：砥石周速度)

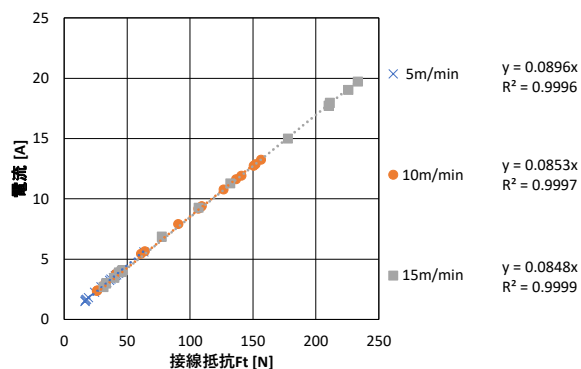
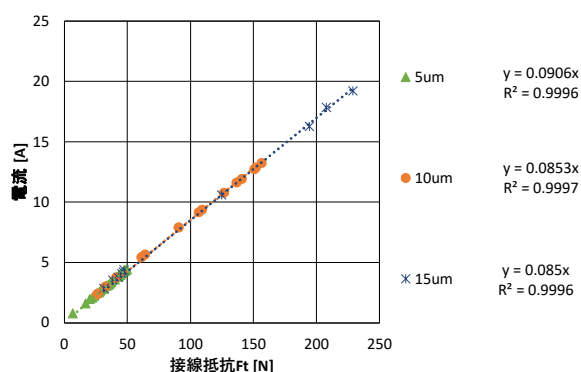
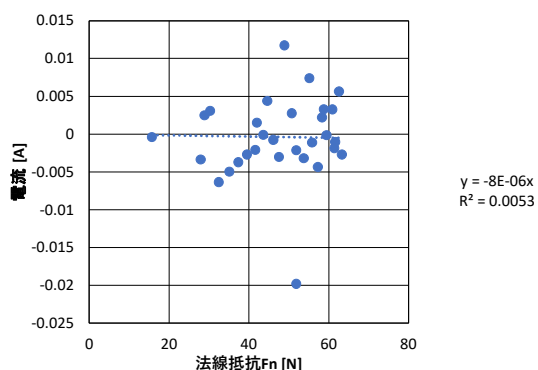

 図5 主軸電流と接線抵抗の関係
(パターン2: テーブル送り速度)

 図6 主軸電流と接線抵抗の関係
(パターン3: 切込み)


図7 Y軸サーボモータ電流と法線抵抗の関係

は難しいことが分かる。加工機Y軸は加工中にロックするためモータ自体に直接負荷が掛からなかったことが原因として考えられる。

3. 2 不安定加工状態の推定

3. 2. 1 目づまり状態の推定

表2に加工パスごとの目づまり割合、主軸電流、被削材表面粗さの結果を示す。Raは3～15パスでは大きく変わらないが、25パスでは大きくなった。Raが増加した理由としてはドレッシング直後の微細粉砕状態から、砥石の自生作用によって砥粒の切れ刃が大きくなったことが考えられる。Rkuは5パスまでは5以上である一方、それ以降のパスは4前後と小さい。これはドレッシング直後の微細粉砕状態により鋭い凹凸が多く、その

後、目づまりや自生作用により鋭い凹凸が少なくなったためと考えられる。

次に加工後の被削材表面画像を図8、砥石表面画像を図9に示す。被削材表面は6パスに変色が起こり研削焼け発生の可能性があり、25パスには解消されていることが分かる。また砥石表面については5パスにドレッシングの軌跡に沿って目づまりが進行しており、6パス目以降はドレッシングの軌跡以外にも目づまりが進行していることが分かる。このことから、6パス以降が目づまりによる不安定加工と推定することが出来る。

次に目づまり割合と主軸電流の関係を図10に示す。

目づまり割合と主軸電流は一定の線形性が見られる。

以上の結果から5パス時点の目づまり割合4%前後が研削焼けの閾値として使える可能性があり、主軸電流から研削焼けと目づまり割合をある程度の精度で推定出来ることが分かる。

表2 目づまり割合、主軸電流、表面粗さの結果

加工パス数 (合計切込み量)	目づまり 割合 [%]	電流 [A]	Ra [μm]	Rku
3 (15 μm)	1.37	1.74	0.669	6.327
5 (25 μm)	3.94	8.58	0.762	5.107
6 (30 μm)	6.07	11.54	0.889	3.881
7 (35 μm)	8.77	13.92	0.810	3.231
10 (50 μm)	7.95	12.81	0.912	4.104
15 (75 μm)	8.25	11.82	1.005	3.614
25 (125 μm)	3.24	6.03	1.720	3.733


 図8 被削材表面画像
(砥石進行方向は画像右方向)

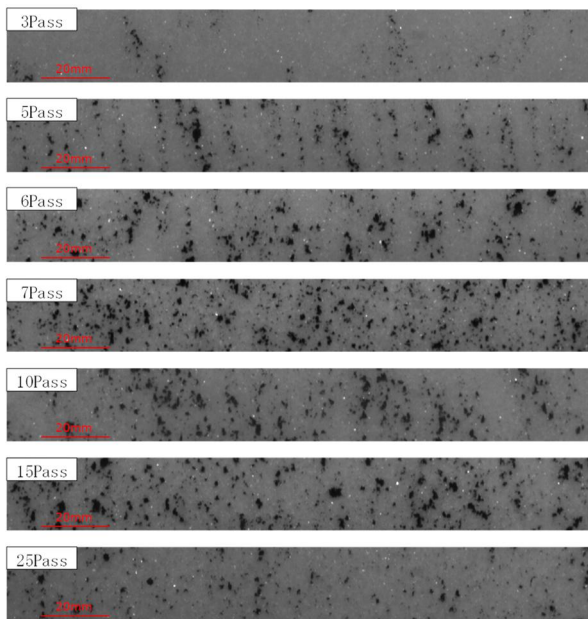


図9 砥石表面画像
(砥石回転方向は画像上方向)

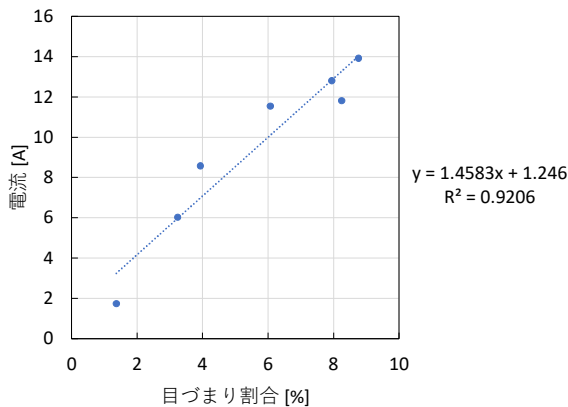


図10 目づまり割合と主軸電流の関係

3. 2. 2 びびり状態の推定

2. 2の実験においてパターン2の砥石周速度19.3m/s、テーブル送り速度5m/min、切込み10 μ mでは加工初期(3パスまで)にびびりが発生した。図11にびびり発生時、図12に同加工条件で定常時(15パス)の加工負荷と主軸電流を示す。びびり発生時は加工負荷が約0.03s周期で変動している。これは主軸回転数である1800rpm(30Hz)とほぼ一致し、加工初期に発生した事を考えると、ドレッシング時の砥石の形状不良によって主軸回転数に同期したびびりが発生した事が考えられる³⁾。一方、主軸電流を見ると、びびりに同期した小さな変動があるが加工開始前の空転時にも変動があり、びびりに伴う変動か判断が難しい。今回は主軸モータ配線の三相交流ブレーカーの電流変化を測定していることから、電源周波数50Hz毎に電流値が変動しているため、観察できる周波数は50Hzの数分の一の周波数と考えられる。びびりの周期は発生要因によって異なるため、電

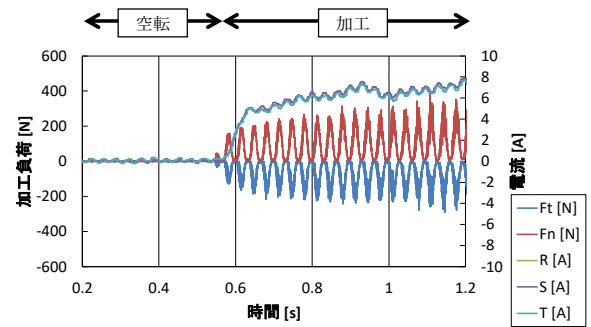


図11 びびり発生時(1パス)の加工負荷と主軸電流

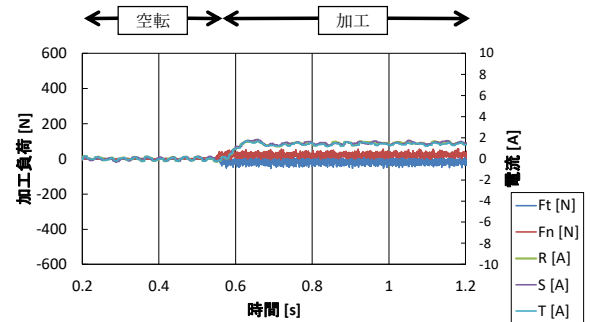


図12 定常時(15パス)の加工負荷と主軸電流

源周波数で観察出来る周期のびびりについては判別出来る可能性があるものの、今回発生したような高い周波数を有するびびりについては、主軸電流から検知することは難しいと考えられる。

4 おわりに

本研究では、研削加工における加工機の電流変化と加工負荷の関係の調査及び不安定加工状態の推定を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 加工時の主軸電流を測定することにより、接線抵抗の推定が可能であることが分かった。
- (2) 加工機の主軸電流から研削焼けと目づまり割合をある程度の精度で推定出来ることが分かった。
- (3) 高い周波数を有するびびりについては、主軸電流から検知することは難しいことが分かった。

参考文献

- 1) 奥山：“砥粒加工学会誌”，59，6(2015)，pp.355-358
- 2) Schindelin, J.; Arganda-Carreras, I. & Frise, E. et al. (2012), “Fiji: an open-source platform for biological-image analysis”, Nature methods 9(7): 676-682, PMID: 22743772”
- 3) 稲崎ら：“精密機械”，35，1(1969)，pp.47-53.

経常研究

樹脂 3D プリント造形物の機械的性質と造形限度に関する調査

高岩 徳寿* 石川 信幸*

Investigation on Mechanical Properties and Modeling Limits of Resin 3Dprinter Models

TAKAIWA Norihisa and ISHIKAWA Nobuyuki

本研究では、栃木県産業技術センターに導入した熱溶解積層と光造形の2種類の樹脂 3D プリントについて、造形物の機械的性質や造形限度、品位について調査した。その結果、熱溶解積層の材料4種、光造形の材料4種について、機械的性質は熱溶解積層では積層方向による異方性が大きく影響し、光造形については異方性が比較的小さいことがわかった。また樹脂 3D プリントが一般的に苦手とする形状を造形し、それぞれの形状での造形限度、品位について知見を得ることができた。

Key words: 3D プリント, 積層造形, 機械的性質, 造形限度, 品位

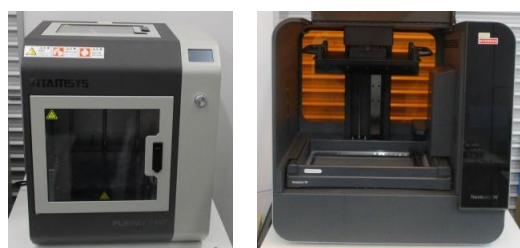
1 はじめに

近年、樹脂 3D プリントは、幅広い産業分野において試作開発サイクルの短縮やコスト削減のために盛んに活用されている。樹脂 3D プリント造形物は、積層方向によって機械的性質に異方性があることが知られている¹⁾²⁾。また、複雑形状の造形を得意としているが、形状によってはそのままでは造形できず、サポートの付与や設計変更が必要となる³⁾。樹脂 3D プリントを効果的に活用するためには、造形物の機械的性質や造形限度、品位を的確に把握することが必要となる。そこで本研究は、栃木県産業技術センターに導入した樹脂 3D プリント（図1）について、造形物の機械的性質や造形限度等を調査し、それぞれの装置で使用可能な樹脂毎の特性を評価した。

2 研究の方法

2.1 機械的性質等の調査

図1に研究に用いた熱溶解積層（INTAMSYS FUNMAT HT Enhanced）と光造形（Formlabs Form 3L）の樹脂 3D プリントを示す。



(a) 熱溶解積層

(b) 光造形

図1 樹脂 3D プリント

表1に使用する材料を示す。熱溶解積層の材料は、PLAはPolymaker社のPolyLitePLA、ABSはPolymaker社のPolyLite ABS、PCはPolymaker社のPolyLite PC、PEEKはINTAMSYS社のPEEKを使用した。光造形の材料は、全てFormlabs社の材料を使用した。造形条件はそれぞれの材料に対応した、3Dプリンタメーカーの標準条件を使用した。

表1 造形方式毎の調査対象材料

熱溶解積層	PLA, ABS, PC, PEEK
光造形	Clear, Tough2000, Rigid10k, Flexible80A

表2に実施項目及び準拠したJIS番号と試験片形状、試験回数を示す。Flexible80Aは軟質材料であるので、曲げ試験及びシャルピー衝撃試験は実施しなかった。引張試験と曲げ試験は、万能材料試験機（島津製作所 AG-50kN-XV）を用いて実施した。引張試験の試験速度は20mm/min、曲げ試験の試験速度は2mm/minとした。シャルピー衝撃試験は、ノッチ加工機（安田精機製作所 No.189-PNCA）でノッチ先端半径が0.25mm、ノッチ後残り幅が8mmとなるように加工し、ハンマー容量は2.0Jとして衝撃試験機（東洋精機製作所 IT）を用いて実施した。硬さ試験は、Flexible80A以外はロックウェル硬さ試験機（フューチャアテック LC-200R）を用いてRスケールで、Flexible80Aはデュロメータ硬さ計（テクロック GS-719G）を用いて実施した。粗さ試験は、表面粗さ測定機（テーラーホブソン PGI840）を用

*栃木県産業技術センター 機械電子技術部

いて、引張試験片の平行部を評価した。寸法測定は、マイクロメータ (Mitutoyo MDE-25MX) を用いて、引張試験片の平行部を 1 材料につき 5 本、1 本につき 5 回ずつ実施した。

表 2 実施項目及び試験方法

項目	JIS	試験片	回数
引張試験	K7161-1 K6251 (Flexible80A)	1A形 3号形	5
曲げ試験	K7171	短冊形	5
シャルピー 衝撃試験	K7111	短冊形	10
硬さ試験	K7202-2 K6253-3 (Flexible80A)	50×50 ×10mm	10
粗さ測定	B0601	引張試験片	3
寸法測定		引張試験片	5

各試験片の造形方向について図 2 に示す。また熱溶解積層の斜め方向の造形物の写真を図 3 に示す。図 2 のとおり、水平方向、斜め方向、垂直方向の 3 方向で造形し、それぞれの方向で各試験結果の異方性を評価した。また、斜め方向については各装置のスライスソフトにおいて自動でサポートを生成し、造形後にニッパ等で除去した状態で試験を実施した。図 3 に示すとおり、熱溶解積層では造形物の反りによる剥がれを抑制するためにラフトを作製し、造形後にニッパ等で除去した。

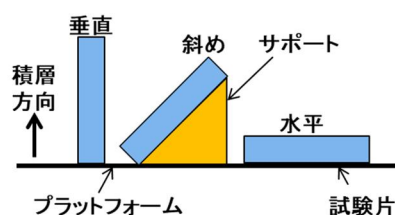


図 2 造形姿勢の模式図

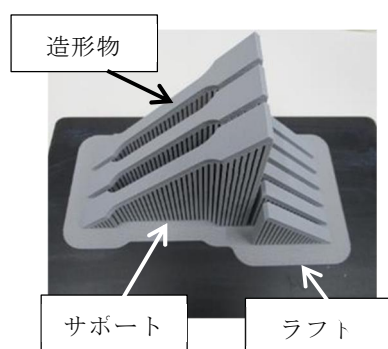


図 3 熱溶解積層における斜め方向の造形物

2. 2 造形限度、品位の調査

それぞれの造形方式における造形限度や造形物の品位を確認するために、表 3 に示す形状を造形した。熱溶解積層の材料は、Polymaker 社の PolyLiteABS を使用した。光造形の材料は、Formlabs 社の Tough2000 を使用した。穴については垂直方向と水平方向で調査した。熱溶解積層では使用する材料の消費を抑える目的で、造形物の内部の充填率をスライスソフトで設定できるのが一般的である。設定した充填率で造形した後、造形物の 3D 形状を X 線 CT 三次元測定機(ニコン MCT225)で取得し、内部の体積から設定値に対する実際の充填率を調査した。

表 3 造形限度、品位の調査項目

項目	内容
傾斜	水平から 15, 30, 45, 75, 90°
球	直径 0.5, 1, 3, 5, 10mm
ピン	直径 0.1~1(0.1 毎), 3, 5, 10mm
穴	直径 0.1~1(0.1 毎), 3, 5, 10mm
ブリッジ	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50mm
充填率	20, 40, 60, 80, 100% (熱溶解積層のみ)

3 結果及び考察

3. 1 機械的性質等の調査

表 4 に各材料の引張強さの平均値を示す。熱溶解積層の造形物は水平、斜め、垂直の順に引張強さが小さくなる傾向があり、造形方向による影響を受けることが分かった。熱溶解積層は材料によって異方性の強さが異なるが、これは材料毎の層と層の密着性の違いが現れており、層間の密着性が高い材料は異方性が小さく、密着性が低い物は異方性が強く表れていると考えられる。一方、光造形の造形物は造形方向による引張強さの低下はあまり見られなかった。光造形の一部の材料で引張強さが低下しているものがあるが、薄板形状では洗浄、二次硬化によって試験片が反ってしまう場合があり、造形方向の影響よりも形状変化の影響で強度が低下していると思われる。

表 4 引張強さの平均値

材料	方向	引張強さ (MPa)	材料	方向	引張強さ (MPa)
PLA	水平	37.59	Clear	水平	61.48
	斜め	34.00		斜め	62.67
	垂直	32.06		垂直	65.58
ABS	水平	27.75	Tough 2000	水平	42.81
	斜め	20.56		斜め	42.07
	垂直	17.86		垂直	44.15
PC	水平	64.62	Rigid 10K	水平	48.71
	斜め	39.24		斜め	62.49
	垂直	25.04		垂直	66.63
PEEK	水平	79.49	Flexible 80A	水平	4.587
	斜め	12.05		斜め	4.392
	垂直	7.163		垂直	4.350

表 5 に各材料の曲げ強さの平均値を示す。熱溶解積層の造形物は水平、垂直、斜めの順に曲げ強さが小さくなる傾向があり、造形方向の影響を受けることが分かった。曲げによる変形でせん断方向の応力が強くなり、斜め方向の曲げ強さが低下していることが推測される。材料間の異方性の強度の違いは、引張強さと同様の理由と考えられる。光造形の造形物は造形方向による曲げ強さの差はあまり見られない。

表 5 曲げ強さの平均値

材料	方向	曲げ強さ (MPa)	材料	方向	曲げ強さ (MPa)
PLA	水平	53.09	Clear	水平	78.24
	斜め	49.39		斜め	74.85
	垂直	54.74		垂直	79.45
ABS	水平	48.96	Tough 2000	水平	45.22
	斜め	34.38		斜め	44.39
	垂直	41.93		垂直	55.33
PC	水平	94.43	Rigid 10K	水平	106.79
	斜め	55.78		斜め	98.24
	垂直	64.38		垂直	105.34
PEEK	水平	133.67			
	斜め	36.13			
	垂直	30.94			

表 6 に各材料のシャルピー衝撃値の平均値を示す。熱溶解積層の造形物は水平、斜め、垂直の順に衝撃値が小さくなっている。光造形の造形物は引張強さや曲げ強さの傾向とは異なり、水平方向が最も強くなり、斜め、垂直方向は同程度に小さくなっていることが分かった。衝撃試験では、引張試験や曲げ試験のように荷重のかかり方が緩やかではなく、ハンマーによって

瞬間的に力が加えられ積層面が剥がれるように破壊されるため、光造形においても造形方向の影響が表れていると推測される。

表 6 シャルピー衝撃値の平均値

材料	方向	衝撃値 (kJ/m ²)	材料	方向	衝撃値 (kJ/m ²)
PLA	水平	3.725	Clear	水平	2.388
	斜め	2.782		斜め	1.577
	垂直	1.157		垂直	1.530
ABS	水平	11.234	Tough 2000	水平	3.306
	斜め	5.425		斜め	2.456
	垂直	2.322		垂直	2.757
PC	水平	2.629	Rigid 10K	水平	1.639
	斜め	1.274		斜め	0.949
	垂直	1.152		垂直	0.968
PEEK	水平	10.524			
	斜め	2.967			
	垂直	1.211			

表 7 に各材料の硬さの平均値を示す。熱溶解積層の造形物は、垂直方向が一番小さくなるものが多いが材料によって傾向が異なっている。光造形の造形物は造形方向による硬さの大きな変化は見られなかった。

表 7 硬さの平均値

材料	方向	硬さ HRR	材料	方向	硬さ HRR
PLA	水平	73.46	Clear	水平	117.57
	斜め	84.87		斜め	114.93
	垂直	66.41		垂直	118.77
ABS	水平	66.63	Tough 2000	水平	100.81
	斜め	46.19		斜め	98.29
	垂直	40.30		垂直	101.66
PC	水平	109.98	Rigid 10K	水平	118.92
	斜め	90.88		斜め	103.33
	垂直	80.34		垂直	118.69
PEEK	水平	109.01	Flexible 80A	水平	84.65
	斜め	94.86		斜め	80.75
	垂直	102.72		垂直	82.20

表 8 に各材料の表面粗さの平均値を示す。水平方向と斜め方向はアップスキン（斜め方向の造形時にサポートが付く面と反対の面）を表、ダウンスキン（斜め方向の造形時にサポートが付く面）を裏と定義して評価した。また表 8 の※はサポートを付与し造形されて

いる面で、造形後にサポートを除去して表面粗さを評価した。熱溶解積層では、水平方向裏面の表面粗さが一番悪く、次に斜め方向の粗さが悪い傾向があった。PEEK では斜め方向裏面の表面粗さが悪く、水平方向裏面の表面粗さがあまり悪くないが、これはサポートが造形物との密着性が良く剥がしにくいのに対して、ラフトと造形物は密着性が低く、ラフトから造形物を剥がしやすいことが影響していると考えられる。PLA, ABS, PC においてはラフトとサポートのどちらも造形物との密着性が良く、造形物から剥がしにくく水平方向裏面ではラフトは造形物全体についてしまう影響で裏面全体の粗さが悪化し、斜め方向裏面ではサポートが付く箇所と付かない箇所があるため、水平方向裏面よりは粗さが良くなっていると考えられる。また斜め方向表面では、緩斜面となっている影響で垂直方向よりも積層段差が目立ちやすく、粗さも悪くなることが分かった。光造形では、緩斜面の影響で斜め方向の粗さが若干悪くなる傾向があるが、全体的には良好な表面粗さとなっている。

表 8 表面粗さの平均値

材料	方向	Ra(μm)	Rz(μm)	材料	方向	Ra(μm)	Rz(μm)
PLA	水平-表	7.05	43.58	Clear	水平-表	0.82	4.88
	水平-裏	42.21	254.43		水平-裏	2.96	16.18
	斜め-表	25.84	149.97		斜め-表	6.01	27.51
	斜め-裏※	25.72	170.58		斜め-裏※	2.67	17.91
	垂直	16.39	95.16		垂直	1.18	6.04
ABS	水平-表	24.57	171.23	Tough 2000	水平-表	0.96	5.86
	水平-裏	49.34	324.51		水平-裏	4.02	23.32
	斜め-表	25.95	130.33		斜め-表	4.25	21.54
	斜め-裏※	22.76	145.11		斜め-裏※	2.02	11.55
	垂直	16.97	107.38		垂直	2.14	11.62
PC	水平-表	11.46	55.70	Rigid 10k	水平-表	0.56	4.78
	水平-裏	38.15	241.87		水平-裏	3.61	19.53
	斜め-表	21.93	143.74		斜め-表	8.14	45.72
	斜め-裏※	24.38	169.27		斜め-裏※	3.23	21.94
	垂直	15.81	91.49		垂直	2.49	19.73
PEEK	水平-表	3.97	27.13	Flexible 80A	水平-表	0.86	7.39
	水平-裏	6.31	42.80		水平-裏	3.14	17.66
	斜め-表	25.10	126.31		斜め-表	2.54	19.78
	斜め-裏※	29.06	177.12		斜め-裏※	1.84	12.16
	垂直	12.34	65.12		垂直※	2.18	13.63

表 9 に各材料の引張試験片の平行部の幅 (Flexible80A は 5mm 狙い。その他は 10mm 狙い) の寸法測定の前平均値を示す。溶解積層の造形物は、狙いの寸法より大きめにできる傾向のものが多く、誤差は 0.2mm 程度であった。光造形の造形物はおおむね狙い通りの寸法であり、誤差は 0.1mm 以下であった。

表 9 寸法測定の前平均値

材料	方向	寸法	材料	方向	寸法
PLA	水平	10.11	Clear	水平	10.04
	斜め	10.20		斜め	10.06
	垂直	10.18		垂直	10.04
ABS	水平	10.05	Tough 2000	水平	9.89
	斜め	10.18		斜め	9.93
	垂直	10.20		垂直	9.95
PC	水平	10.15	Rigid 10K	水平	10.01
	斜め	10.25		斜め	10.05
	垂直	10.27		垂直	10.09
PEEK	水平	10.04	Flexible 80A	水平	4.82
	斜め	10.11		斜め	5.01
	垂直	10.08		垂直	5.03

3. 2 造形限度、品位の調査

図 4 に傾斜の造形物を示す。すべて造形可能であったが、熱溶解積層ではダウンスキンの品位が大きく低下することが分かった。

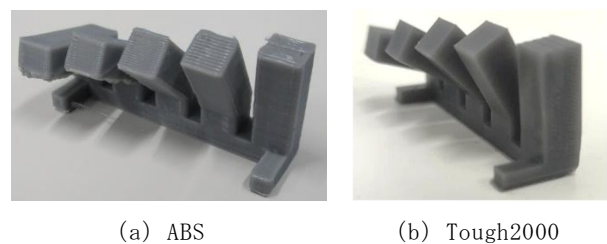


図 4 傾斜の造形物

図 5 に球の造形物を示す。熱溶解積層は 1mm 以上で造形可能、光造形はすべて造形可能であった。どちらもダウンスキンの品位や形状は良くないことが分かった。

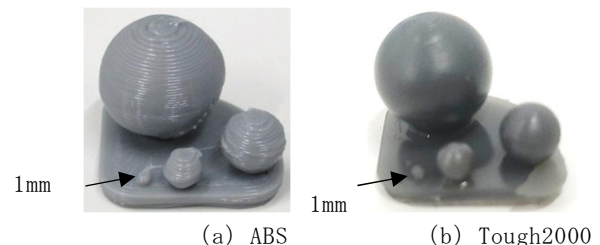
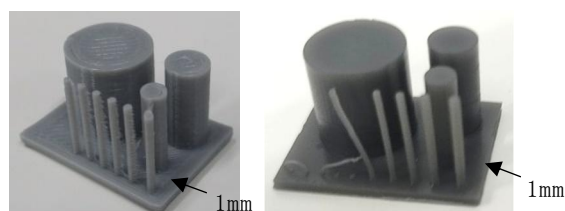


図 5 球の造形物

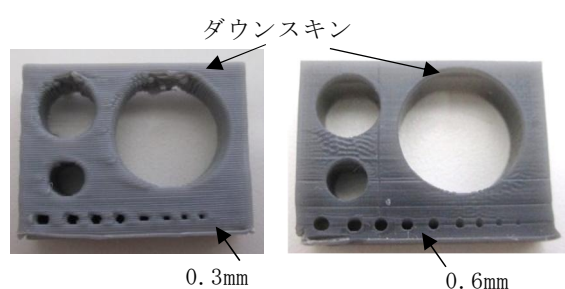
図 6 にピンの造形物を示す。熱溶解積層は 0.5mm、光造形は 0.6mm 以上で造形可能であった。どちらも 1mm 以下では傾きや倒れが発生することが分かった。



(a) ABS (b) Tough2000

図6 ピンの造形物

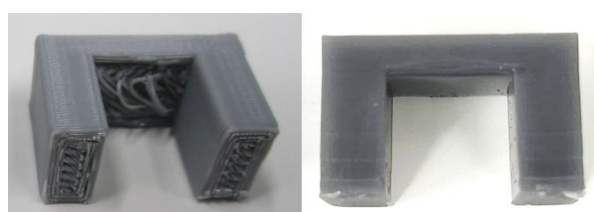
図7に穴の造形物を示す。熱溶解積層の垂直方向は0.3mm以上、水平方向は3mm以上で、光造形の垂直方向は0.6mm以上、水平方向は0.8mm以上で貫通穴が造形可能であった。どちらも垂直方向ではダウンスキンで品位が低下していることが分かった。



(a) ABS (b) Tough2000

図7 穴の造形物（垂直方向）

図8にブリッジの造形物を示す。熱溶解積層は40mmまで、光造形は30mmまで造形可能であることが分かった。どちらも10mm以上からダウンスキンの品位が低下することが分かった。



(a) ABS (b) Tough2000

図8 ブリッジ（10mm）の造形物

表10に各充填率での設定値と、造形物のCTデータから実測した充填率を示す。図9に充填率20%の造形物のCT画像を示す。60%までは設定値より実測値の方が小さいが、80%では設定値より実測値の方が大きくなる傾向があった。

表10 各充填率の設定値と実測値

設定値(%)	実測値(%)
20	17.80
40	31.58
60	56.56
80	93.47
100	99.87

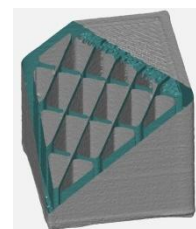


図9 充填率20%の造形物のCT画像

4 おわりに

樹脂3Dプリンタ造形物の機械的性質や造形限度等を調査し、各樹脂材料の特性を把握し、次の結論が得られた。

- (1) 熱溶解積層の造形物は、引張強さ、曲げ強さ、シャルピー衝撃値、表面粗さ等で異方性があることが分かった。
- (2) 光造形の造形物では、異方性はあまりないことが分かった。ただし、試験片のような薄板形状では反りが発生する場合があります、強度に悪影響を及ぼす可能性があることが分かった。
- (3) それぞれの造形方式での、造形限度や品位を把握することができた。造形可能であっても、ダウンスキンの粗さや形状が大きく悪化する場合があることが分かった。

参考文献

- 1) 太田崇文, 岡田耕治, 齊藤梓, 吉田一也, 村澤剛, 川上勝, 古川英光: "日本機械学会論文集", vol. 83 No. 850, 1-11, (2017)
- 2) 佐藤一志, 角田圭佑, 石川信幸: "仙台高等専門学校名取キャンパス研究紀要", 第51号, 7-10, (2015)
- 3) 安齋正博: "日本ゴム協会誌", 第87巻 第9号, 20-25, (2014)

経常研究

三次元座標測定機を用いた曲面形状測定に関する研究

片岡 智史* 渡部 篤彦* 石川 信幸*

Research on Measurement of Curved Surface using Coordinate Measuring Machine
KATAOKA Satoshi, WATANABE Atsuhiko and ISHIKAWA Nobuyuki

三次元座標測定機の測定子の接触方向による滑りの影響を調査するため、ブロックゲージや曲面形状を有するワークで検証を行った。100mmのブロックゲージを点測定し、接触角度を変化させたときの2点間の距離を求めた。接触角度が大きくなると、2点間の空間距離は測定子の滑りの影響を受けるが、ブロックゲージの長さ方向の距離は滑りの影響を受けないことがわかった。曲面形状を有するワークを作製し、測定子を法線方向から接触させた場合と、垂直方向から接触させた場合の点の座標値を比較し、垂直方向接触の場合の滑り量を求めた。結果として、斜面の角度が大きくなるほど測定子の滑り量は大きくなり、斜面角度 70° では、約 $250\mu\text{m}$ の滑りが発生することが明らかになった。

Key words: 精密測定, 三次元座標測定機, タッチ測定, 曲面形状, 誤差

1 はじめに

近年、航空機部品や金型部品において曲面形状を有する部品が増加し、部品製造を行う加工メーカにおいても曲面形状の精度検証の要求が増加している¹⁾。

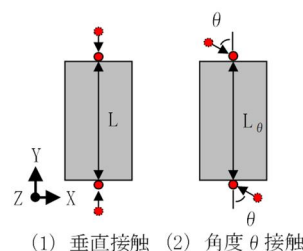
当センターでは、このような要求を受けた企業に対して、非接触三次元デジタイザやX線CTなど非接触の装置で測定支援を行っている。曲面形状を非接触で測定するメリットとしては、曲面形状全体の点群データが得られることがあげられる²⁾。一方で、非接触の装置の測定精度は最小で約 $10\mu\text{m}$ と高精度な測定はできないことがデメリットであった。非接触の測定機よりも高い精度で測定したいという要求から、三次元座標測定機を用いて曲面形状を測定するケースが増加している。三次元座標測定機は測定点が離散点となるので、非接触の測定機のように曲面形状全体の点群データを取得することは難しいが、非接触の測定機よりも高い精度で測定が可能である。三次元座標測定機で曲面形状を測定する場合の課題として、測定子が測定面に対して法線方向以外から接触した場合に、測定子の滑りが測定結果に影響を及ぼすことが考えられる³⁾。

そこで本研究ではブロックゲージや曲面形状を有するワークを測定し、測定子の接触方向による滑りの影響について調査を行った。

2 研究の方法

2. 1 ブロックゲージを用いた滑り検証

ブロックゲージの測定において、測定子の接触角度 θ が、測定値にどのような影響を及ぼすか検証した。測定の模式図を図1に、測定セットアップを図2に示す。三次元座標測定機はミットヨ製 LEGEX9106 を使用した。ブロックゲージを三次元座標測定機の Y スケールに沿って配置し、ブロックゲージの2面を点測定した。測定した2点間の距離からブロックゲージの長さを求めた。接触角度 0° は、測定子は図1(1)のように測定面に対して垂直に接触する。接触角度 θ は、図1(2)に示す角度 θ 方向から接触する。ブロックゲージはミットヨ製の長さ100mmのものを使用した。使用したブロックゲージの仕様を表1に示す。測定条件を表2に示す。測定子は直径2mmのものをを使用した。接触角度 θ は $0, 15, 30, 45, 60, 75^{\circ}$ の6条件で測定を行った。ブロックゲージの長さを算出する際は、測定面と接触子の接触位置による誤差を取り除くために、半径補正なしでデータを出力した。



(1) 垂直接触 (2) 角度 θ 接触

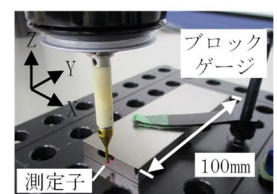


図1 測定模式図

図2 測定セットアップ

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

表 1 ブロックゲージ仕様

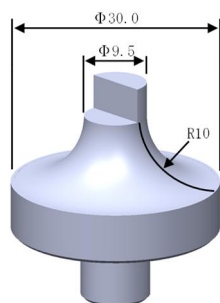
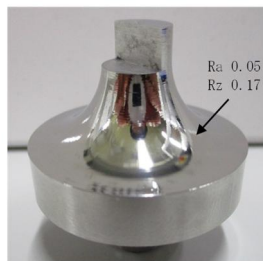
メーカー	株式会社ミットヨ
製造番号	No. 184655
ブロックゲージ等級	K 級
呼び寸法	100mm
中央寸法の寸法差	+0.097 μ m
校正年月日	2022 年 10 月

表 2 測定条件

測定子	直径 2 mm, 鉛直方向
接触角度	0, 15, 30, 45, 60, 75°
半径補正	なし

2. 2 曲面形状ワークを用いた滑り検証

曲面形状を有するワークを点測定するときの測定子の滑りの影響について検証した。まず測定に用いるワークの設計・加工を行った。製作したワークを図 3 に示す。 $\phi 30$ mm の丸棒を旋盤で加工し、R10 の曲面形状を生成した。測定の際の表面粗さの影響を小さくするために、旋盤加工後に金属磨きで研磨を行い、表面粗さ Ra0.05 μ m, Rz0.17 μ m とした。測定の模式図を図 4 に、測定条件を表 3 に示す。接触位置 X に対して (1) 法線方向から接触する場合と、(2) 垂直方向から接触する場合でそれぞれ点測定を行い、法線方向接触の座標値から垂直方向接触の座標値を減算することで、垂直方向接触の場合の滑り量を求めた。接触位置 X は、X=5.5~14.5 の範囲で、1mm ピッチで測定を行った。ブロックゲージの測定と同様に、測定面と接触子の接触位置による誤差を取り除くために、半径補正なしでデータを出力した。測定セットアップを図 5 に示す。図 5 (a) は三次元座標測定機の機械座標系を示している。測定時のプローブ駆動面による影響を調査するため、測定する断面を機械座標系の ZX 平面に一致させた場合 (図 5 (b)) と、XY 平面に一致させた場合 (図 5 (c)) の 2 パターンで測定を行った。



(a) ワーク 3Dモデル (b) ワーク写真

図 3 曲面形状ワーク

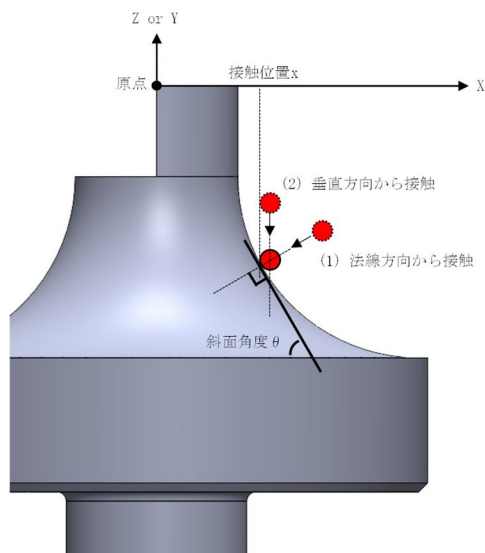


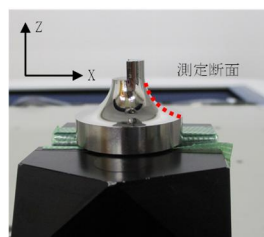
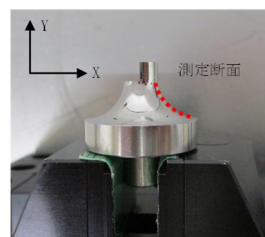
図 4 ワーク測定模式図

表 3 測定条件

測定子	直径 2mm, 鉛直方向
接触位置	X=5.5~14.5 の範囲で 1mm ピッチ
接触方向	測定面の法線方向, 垂直方向
半径補正	なし



(a) 三次元座標測定機の機械座標系



(b) ZX 平面での測定 (c) XY 平面での測定

図 5 測定セットアップ

3 結果及び考察

3.1 ブロックゲージを用いた滑り検証の結果

図6に測定子の接触角度に対するブロックゲージの測定値をプロットしたグラフを示す。2点間の空間距離は、接触角度 30° までは、垂直に接触する場合と比較してほぼ同じ値であったが、接触角度 45° を超えると増大した。これは図7に示すように、測定面接触時に測定子が滑り、ブロックゲージの長さを斜めに測定していることが原因と考えられる。一方でY方向の2点間距離については、2点間の空間距離で確認された滑りの影響はなく、接触角度が大きくなっていても一定であった。すなわちブロックゲージのような直方体の長さを測定する場合、2点間の空間距離は滑りの影響を受けてしまうが、2点間の測定方向に対する距離（この測定ではY方向）を算出すれば、滑りの影響のない測定結果を得ることができる。

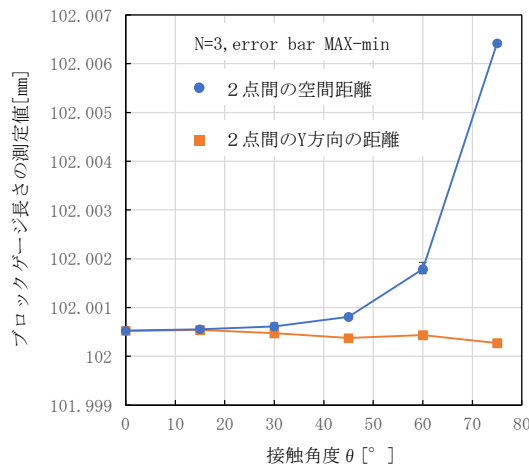


図6 ブロックゲージ測定結果

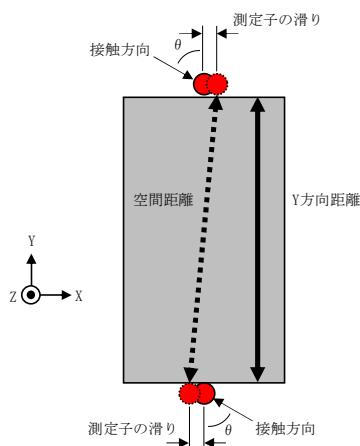
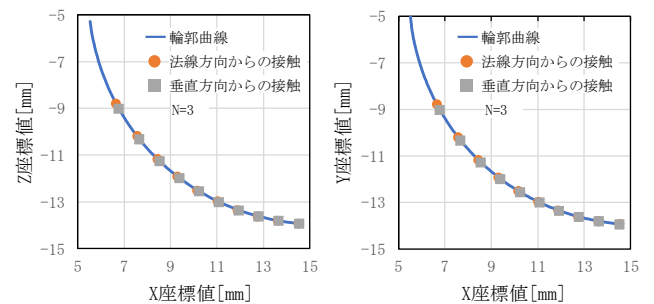


図7 測定結果の考察

3.2 曲面形状ワークを用いた滑り検証の結果

点測定した座標値をプロットしたグラフを図8に示す。図8の曲線は倣い測定で取得した測定断面の輪郭曲線を示している。図8(a), (b)のいずれの場合においても、測定点の座標値は輪郭曲線上に存在するが、接触する面が急角度であるほど、法線方向接触の場合と垂直方向接触の差が大きくなり、垂直方向から接触した点は法線方向から接触した点と比較して測定子が接触方向に進みすぎていることが読み取れる。これは垂直接触において測定子の滑りが発生したことが原因と考えられ、接触する面が急角度であるほど滑り量は大きくなる。図9に横軸に測定面の斜面角度を、縦軸に滑り量をプロットしたグラフを示す。図9から斜面角度約 70° の斜面では滑り量が約 $250\mu\text{m}$ になることが明らかになった。また、斜面角度が 3° の面に接触した場合でも $10\sim 20\mu\text{m}$ ほどの滑りが発生していることがわかった。以上から、三次元座標測定機を用いて曲面形状の点測定を行う場合、測定子の接触方向が測定面の法線方向からわずかでもずれると、誤差の要因になると考えられる。



(a) ZX平面測定結果 (b) XY平面測定結果

図8 曲面形状ワーク測定結果

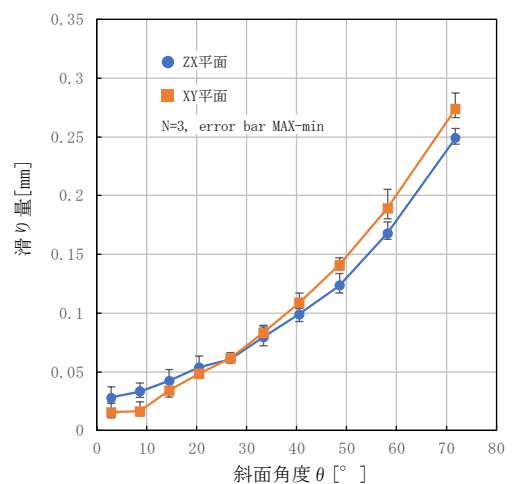


図9 斜面角度に対する滑り量の変化

4 おわりに

ブロックゲージや曲面形状を有するワークを測定し、測定子の接触方向による滑りの影響について以下の知見を得た。

- (1) ブロックゲージの長さ測定において、接触角度が大きくなると、2点間の空間距離は測定子の滑りの影響を受ける。一方で、ブロックゲージの長さ方向の2点間距離は滑りの影響を受けない。
- (2) 曲面形状を点測定する場合、測定面に対して測定子を垂直方向から接触させた場合では、法線方向から接触させた場合と比較して、測定子の滑りによって座標値に誤差が生じる。約 70° の斜面では約 $250\mu\text{m}$ の誤差が生じ、 3° の斜面でも $10\sim 20\mu\text{m}$ の誤差が生じる。

- (3) 三次元座標測定機を用いて曲面形状の点測定を行う場合、測定子の接触方向が測定面の法線方向に対してわずかでもずれると、測定誤差の要因になる。

参考文献

- 1) 渡邊真莉：“計測と制御”，61巻，10号，762-769，(2022)
- 2) 赤羽孝彦：“精密工学会”，85巻，5号，396-400，(2019)
- 3) 岸浪建史，中村久，斎藤勝政，亀井明敏：“精密工学会誌”，52巻，8号，1420-1425，(1986)

経常研究

BI ツール・RPA ツール等を活用したデータ収集・可視化及び 定型作業自動化の検討

八木澤 秀人* 島田 智*

Data Collection and Visualization using BI and RPA tools and
Study of Automation of Routine Tasks
YAGISAWA Hideto and SHIMADA Satoshi

近年、活用が進んでいる BI ツール、RPA ツール等を用いて、ローコードベースでデータ収集と可視化を実現する仕組みを構築した。本システムでは、センサデバイスをサーバ化し、RPA ツールからアクセスすることでデータを収集し、そのデータを csv ファイル形式で保存することで直接データを参照できる形とした。また、そのファイルに対して BI ツール等を用いてデータの結合・整形を自動化することで複数のセンサデータの可視化を実現した。

さらに、これらのツール群を活用した産業技術センター業務の自動化にも取り組み、定型作業の自動化が可能かについても検証を行った。

Keywords: BI ツール, RPA ツール, IoT, 可視化, センシング

1 はじめに

県内ものづくり企業が IoT 要素技術や AI 技術を活用し、自社の生産性向上や競争力強化を図ることを支援するため、産業技術センターでは IoT・AI 関連の研究を実施しノウハウを蓄積するとともに、スマートものづくり研究会等を通じ、県内ものづくり企業における身の丈 IoT 活動を支援している。研究会活動を機に、自社の IoT 化に取り組み始めた企業も出てきている一方で取組が停滞している企業もあり、こうした企業に聞き取りした結果では、Python¹⁾等のテキストベースのプログラミング言語や、データの蓄積で使われる MySQL²⁾等の RDB (Relational Database)、データベース操作のための SQL (Structured Query Language) などに馴染みがなくハードルが高いと感じていることが要因として挙げられている。

一方、デジタル技術の進展に伴い、データ可視化や定型作業自動化のための各種ソフトウェアも市販されてきており、こうしたサービスを自社の業務改善に活かす企業も徐々に増えてきている。特に、RPA (Robotic Process Automation) ツールについては、定型業務の自動化を目的とし、プログラミングに不慣れな人でも扱えるようなユーザーインターフェースを備えていることから、プログラミング言語やエンジニア向けツール・ソフ

トに比べて扱う上でのハードルは低いと考えられる。

そこで本研究では、プログラミングの経験がなくても比較的扱いやすい RPA ツールを用いてデータ収集を行い、BI (Business Intelligence) ツールや一般的なオフィスソフトと連携・可視化を実現することにより、ローコード・ノーコードベースでデータの収集・可視化を行える仕組みを検討した。加えて、蓄積データに対して RPA ツールや BI ツールを用いて、日次、週次等のデータ集計処理の自動作成を行うことにより、定型作業の自動化が可能かについて検証を行った。

2 研究の方法

2. 1 データ収集・可視化システム

2. 1. 1 システム要件検討

システムを構築するにあたり、以下3つの課題を抽出し、それぞれの対応策を検討した(図1)。

2. 1. 2 ツール選定・システム構成検討

次に、2. 1. 1 で検討した要件を満たすためのツールの選定及びシステム構成の検討を行った。

今回使用するツールは、

- ・ 企業が保有する PC 環境でも導入が容易なこと
- ・ 企業保有の PC の OS として、Windows OS のシェアが高いこと

を考慮し、RPA ツールには Microsoft 社の Power

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

Automate Desktop³⁾, BI ツールには同じく Microsoft 社の Power BI Desktop⁴⁾を採用した。また、最近の Microsoft Excel⁵⁾では、Power BI Desktopと同様に、ETL(Extract-Transform-Load)機能を持つ Power Query⁶⁾が備わっており、データ整形処理の自動化が可能なことから Power BI Desktop, Microsoft Excel 双方で可視化を実現することとした。

システム構成としては、図2に示すとおり、Power Automate Desktop を用いてセンサデバイスからデータ収集を行い、デバイスごとのデータを単一ファイルで保存する。その後、保存したファイルに対して Power BI Desktop, Microsoft Excel 上の ETL 機能を活用することでデータの整形・可視化処理を自動化する。

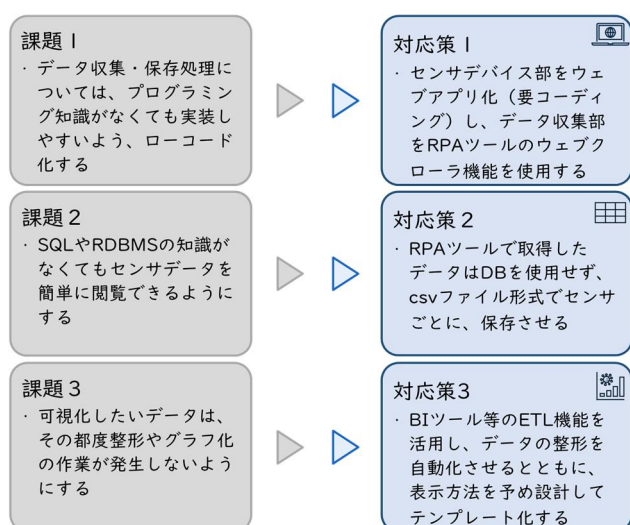


図1 システム要件

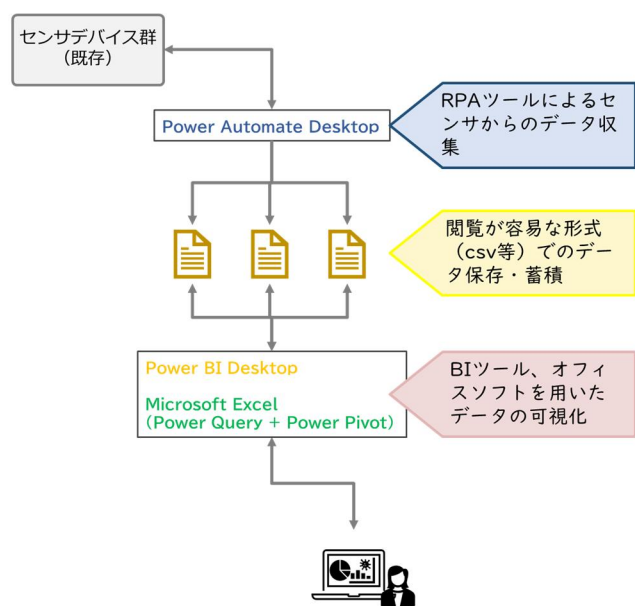


図2 システム構成

2. 2 定型作業自動化

2. 2. 1 対象業務の選定

自動化の検証を行う業務の選定にあたって、以下の点を考慮した。

- ・決まった手順に沿って実行するルールベースの業務
- ・定期的に発生する業務
- ・手作業の場合にヒューマンエラーが発生する可能性のある業務

上記3点を考慮し、以下の2つの業務を選定した。

①月次報告の集計作業

②HP 更新作業

2. 2. 2 対象業務の現状把握

次に、選定した2つの業務についてそれぞれの業務の現状把握を行った。

①月次報告の集計作業

月次報告の集計作業業務では、情報システム上から必要なデータをダウンロードし、ダウンロードした csv 形式のデータを基に、データの集計作業を行い、最終的に報告用ファイルへの入力を行っている(図3)。

②HP 更新作業

HP 更新作業では、当センターHP で定期的に更新を行う必要があるコンテンツに対して、アップロード用ファイルの元データに適宜入力を行い、定期的にそのファイルを pdf 形式ファイルに変換後、センターHP の管理者用ページからデータをアップロードし、一般閲覧用ページから更新の確認を行うフローとなっている(図4)。

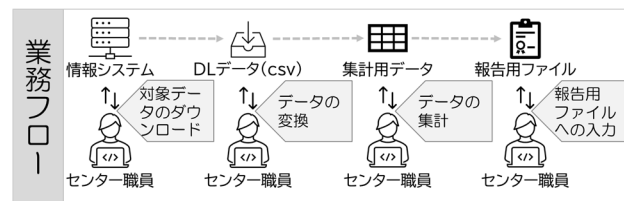


図3 現状の業務フロー (月次報告集計作業)

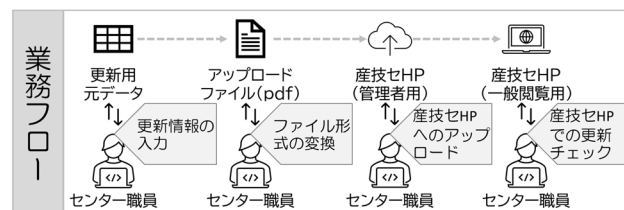


図4 現状の業務フロー (HP 更新作業)

2. 2. 3 自動化処理の検討

選定した2つの対象業務について、それぞれ自動化を適用する箇所の検討を行った。

①月次報告の集計作業

この業務においては、以下の部分について自動化処理が可能であると考えられる。

- ・対象データダウンロードの自動化：RPA ツールを用いて情報システム上から必要なデータを自動的にダウンロードする。
- ・データ集計の自動化：ダウンロードしたデータに ETL ツールを適用して自動的に変換・集計する。

ただし、情報システム上からのデータの自動ダウンロードについては、システム環境の制約から実施が難しいため対応を見送り、データ変換の自動化についてのみ Microsoft Excel を用いて検証を行うこととした。

②HP 更新作業

この業務においては、以下の部分について自動化処理が可能であると考えられる。

- ・ファイル変換の自動化：アップロード用のファイルを自動的に pdf 形式ファイルに変換することで、手動での変換作業を不要とする。
- ・ファイルアップロードの自動化：自動的にデータをアップロードすることで、手動でのアップロード作業が不要となる。

こちらについては、RPA ツールを用いて検証を行うこととした。

ることを確認した。なお、収集したセンサデータについては、期間の関係上、環境データ（温湿度）2 か所と稼働データ（クランプ電流）1 か所分に限定した。

3. 1. 2 データ可視化

3. 1. 1 に示したとおり、RPA ツールを使用することで、温湿度センサやクランプセンサごとに csv 形式でファイルが保存されるため、そのデータを直接参照することでデータの確認は可能となる。

一方で、全体を通してデータを確認したい場合には個別ファイルのままでは不向きのため、BI ツール等を用いてデータの結合・整形・可視化を行った。

各センサデータの結合処理については、Power BI Desktop 及び Microsoft Excel に備わる Power Query を活用し、下図に示すように、各センサの横持ち形式のデータを縦持ち形式に変換し、一つのテーブルにまとめる処理を作成した（図7）。

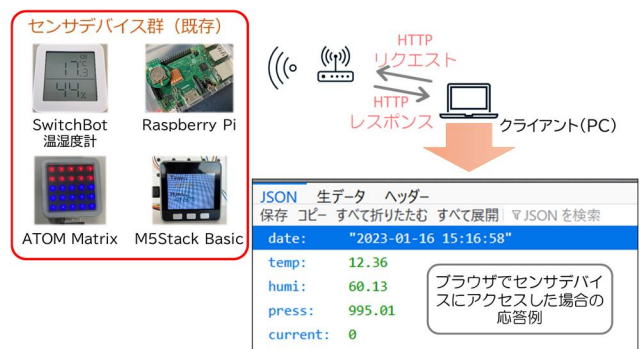


図5 ブラウザでアクセスした場合の応答例

3 結果及び考察

3. 1 データ収集・可視化システム

3. 1. 1 データ収集

センサデバイス部については、M5Stack⁷⁾や Raspberry Pi⁸⁾を使用し、プログラムについても過去の研究⁹⁾で開発したものを大部分活用することで開発効率の向上を図った。

RPA ツールでデータ取得を行えるようにするため、RPA を動かす PC をクライアント側、センサデバイスをサーバ側とし、PC 側から HTTP リクエストを行うことでセンサデバイスにアクセスし、最新のセンサデータをレスポンスで返してもらう形とした。レスポンス時のデータ形式については、RPA ツールでパース（構文解析）しやすいように JSON 形式とした（図5）。その後、RPA ツールを用いて、センサから取得した1回分の JSON 形式のデータをテーブル形式の1レコードの形に変換し、csv ファイルの末尾に挿入するシナリオを作成した（図6）。これら一連のプロセスをシナリオ化し、1 か月程度動作させ、問題なく複数センサからデータが収集・保存でき

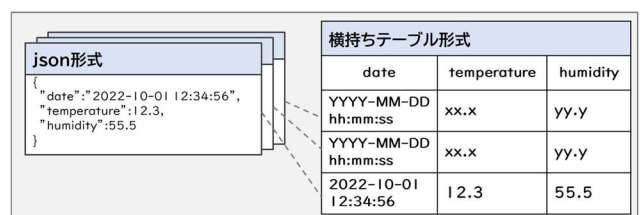


図6 センサデータの格納イメージ

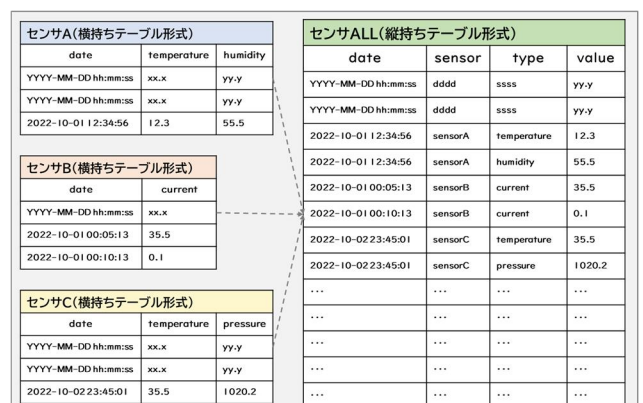


図7 各センサデータの結合イメージ

次に、結合したデータを読み込み、Power BI DesktopとMicrosoft Excelそれぞれで可視化用のダッシュボードを作成した。ダッシュボード化することで、センサデータがテーブルに追加された後も、改めてデータを読み込むことでグラフ部分が更新されることを確認した。

なお、開発を進める上で、これらダッシュボードはウェブアプリと比較し、時系列データの期間範囲の大幅な変更（日時表示→月次表示）に追従することが難しいことが判明したが、複数シート（日次表示用、月次表示用など）に分けてダッシュボードを作成することで対策は可能であると考えられる。

3. 2 定型作業自動化

3. 2. 1 月報集計作業

職員が集計用に情報システムからダウンロードしたデータについて、Microsoft Excel の Power Query, Power Pivot 機能を活用し、集計に必要なデータ整形・結合処理の自動化を図った。なお、集計作業において、定型処理が行えない、手動での作業が必要な箇所が一部あったため、その部分についてはセンター職員が補完する形とした（図8）。

3. 2. 2 HP 更新作業

職員が入力を行ったアップロード用ファイルに対して、Power Automate Desktop を用いて、ファイルの変換処理、HP 用管理ページへのアップロード処理を行うシナリオを作成し、自動化を図った（図9）。作業の自動化が行えることを確認した一方で、シナリオがエラー停止する場面もあった。これは、画面遷移の処理において、ある画面から別の画面に切り替わる場合のタイミング依存で発生していると考えられる。今後、処理が遷移する際の待機条件を再検討することで改善を図る。

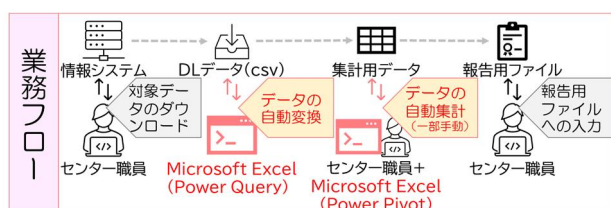


図8 対応後の業務フロー（月次報告集計作業）

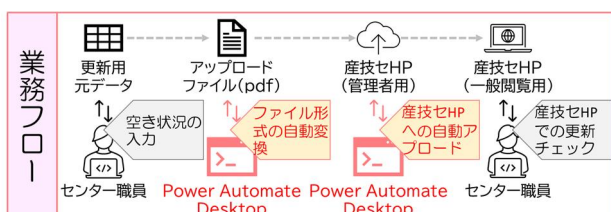


図9 対応後の業務フロー（HP 更新作業）

4 おわりに

今回の研究で、以下のことに取り組み、ローコードツールによるデータ収集・蓄積・可視化の仕組みを構築し、実際に動作することを確認した。

- (1) 既存のセンサデバイスから RPA ツールを使用してセンサデータの取得、csv ファイルへの保存を行うシナリオを作成し、問題なく動作することを確認した。
- (2) csv データの読み込み・整形・可視化までを自動化させるダッシュボードを作成した。

また、これらのツールを活用することでセンター定型業務の自動化についても一部実現できる可能性があることを検証できた。

参考文献

- 1) Python : "https://www.python.org/"
- 2) MySQL : "https://www.mysql.com/jp/"
- 3) Power Automate Desktop : "https://powerautomate.microsoft.com/ja-jp/robotic-process-automation/", Microsoft 社
- 4) Power BI Desktop : "https://powerbi.microsoft.com/ja-jp/desktop/", Microsoft 社
- 5) Microsoft Excel : "https://www.microsoft.com/ja-jp/microsoft-365/excel", Microsoft 社
- 6) Power Query : "https://learn.microsoft.com/ja-jp/power-query/", Microsoft 社
- 7) M5Stack : "https://m5stack.com/", M5Stack 社
- 8) Raspberry Pi : "https://www.raspberrypi.org/", ラズベリーパイ財団
- 9) 島田智, 八木澤秀人 : "栃木県産業技術センター研究報告", No.19, 51-56, (2022)

経常研究

ポリプロピレン樹脂の結晶化度制御による接着性向上

益子 朱音* 男澤 嶺* 大森 和宏*

Improvement of Adhesive Properties by controlling crystallinity of polypropylene
MASHIKO Akane, OTOKOZAWA Ryo and OMORI Kazuhiro

様々な熱プレス成形条件で作製した結晶化度が異なる PP 成形板に対し、UV 処理の後、SUS304 との接着強さの評価を行い、結晶化度と接着強さの関係を調査した。結晶化度は冷却温度 40℃で最も低く、徐冷で最も高くなり、プレス温度よりも冷却温度の影響が大きいことが確認された。PP 成形板の水に対する接触角は UV 照射 20 分で最も低下した。PP と SUS304 の接着強さは UV 照射 3 分又は 20 分で最大となり、UV 照射 60 分では低下した。また、結晶化度が高い方が接着強さは大きくなる傾向が見られた。

Key words: 結晶化度、接着強さ、UV 処理

1 はじめに

自動車産業では、大型のバッテリー搭載等による車重の増加が課題となっており、燃費向上に向けた軽量化への要求は従来にも増して高まっている。このため、適材適所に材料を使用するマルチマテリアル化が進んでおり、様々な異種材料を接合するための接着技術の重要性が高まっている。

近年、自動車の重量に占める樹脂の構成比率は増加しており、現在は約 1 割に達すると推定され、その中で、ポリプロピレン (PP) は全樹脂の約 50%を占める。PP は軽量かつ成形性に優れることから、インパネ、ドアトリム、ピラー等の内外装で多く使用されている一方、表面張力が小さく難接着性という欠点があり、PP を接着するためには表面処理が必要となる。樹脂の表面処理方法として、化学処理、火炎処理、プラズマ処理があるが、環境負荷や熱変形、基材表面が荒れる等の問題がある。一方、紫外線 (UV) 処理は試料に UV を照射することで表面に極性基を導入し濡れ性を向上させるため、環境負荷や基材表面へのダメージが少ないという利点がある。

他方、結晶性高分子において、酸化等の反応は非晶領域で起きることが知られており¹⁾、UV 処理による表面改質効果は結晶化度等の表面構造の影響を受けると推察される。しかし、結晶化度と UV 処理効果及び接着強度を結びつけた報告は少ない。

そこで本研究では、樹脂成形品の結晶化度の違いが、UV 処理による改質効果や樹脂と金属の接着強度に及ぼす影響を検討したので報告する。

2 研究の方法

2. 1 材料

PP はペレット (J106MG, プライムポリマー㈱) を使用し、SUS304 はテストピース (150mm×70mm×t0.8mm, TP 技研㈱) を使用した。接着剤はエポキシ樹脂 (ボンド E セット、ユニシ㈱) を使用した。

2. 2 PP 板の成形

PP のペレットをプラスチックカッティングミル (PLC-2M, 大阪ケミカル㈱) を用いて粉碎した。粉碎材をミニテストプレス (MP-WNL, ㈱東洋精機製作所) を用いて、プレス温度 180℃又は 230℃で 5 分間、20MPa で熱プレス成形し、100mm×100mm×t0.5mm の PP 成形板を作製した。PP の結晶化度を变化させるため、プレス後の冷却温度は 40℃冷却、120℃冷却、徐冷の 3 通りとし、40℃冷却及び 120℃冷却は 5 分間冷却し、徐冷は冷却速度約 1℃/min で 70℃以下になるまで冷却した。続けて、PP 成形板を 140℃の定温乾燥器内で 30 分、3 時間、6 時間保持し、熱処理 PP 成形板を作製した。

2. 3 UV 処理と接着

UV ランプ (UV253MINI, フィルジェン㈱) を用いて各 PP 成形板に対して、波長 185nm 及び 253nm の UV を 3, 10, 20, 30, 60 分間照射した。なお、UV ランプと試料間の距離は 3mm とした。その後、速やかに接触角計 (DMs-400, 協和界面科学㈱) を用いて UV 処理した PP 成形板の水に対する濡れ性を接触角で評価した。測定には蒸留水を用い、滴下量は 2 μ L とした。

次に、PP 成形板を 10mm×40mm の大きさに切り出し、UV ランプを用いて 10×10mm² の範囲に UV を 1, 3, 20, 60 分間照射した後、速やかに UV を照射した範囲に接着

* 栃木県産業技術センター 材料技術部

剤を厚さ 0.3mm で塗布した。その後、10mm×70mm の大きさに切り出した SUS304 を張り合わせ接着した。なお、接着層の厚みは 0.3mm のステンレスワイヤーを挟んで調節した。接着剤が硬化した後、PP 成形板の接着面の逆側に別途 SUS304 を張り付けて補強し 23℃、45%RH で 3 日養生したものを接着試験片とした。

2. 4 評価

PP 成形板の結晶化度は、当該試料を約 5mg 切り出してアルミパンに詰め、示差熱量計 (DSC7020, 株式会社日立ハイテクサイエンス) を用いて 10℃/min の速度で 200℃まで昇温し、融解熱 ΔH を測定し、以下の式 (1) より算出した。

$$\text{結晶化度 (\%)} = (\Delta H / \Delta H_c) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 ΔH_c は PP 完全結晶体の融解熱であり、 $\Delta H_c = 207 \text{ J/g}^{(2)}$ の値を用いた。

PP 成形板の結晶構造は、X 線回折装置 (RINT2100H, 理学電機工業株式会社) を用いて解析した。

PP と SUS304 の接着強さは、万能材料試験機 (AG-50KNI M2, 株式会社島津製作所) を用いて試験速度 1mm/min、つかみ具間距離 50mm で引張せん断接着強さ試験を行い評価した。

接着試験片の破壊形態は、引張せん断接着強さ試験を行った PP 側の接着破壊面を走査型電子顕微鏡 (JSM-6010PLUS/LA, 日本電子株式会社) を用いて観察し評価した。また、破壊後の SUS304 側に付着した接着剤をフーリエ変換赤外分光光度計 (FT/IR-4600, 日本分光株式会社) 及び熱分解ガスクロマトグラフ質量分析計 (GCMS-QP2010Ultra, 株式会社島津製作所) を用いて分析した。

3 結果及び考察

3. 1 PP 成形板の結晶化度および構造

プレス温度と冷却温度が異なる 6 種類の PP 成形板を作製し、成形条件が結晶化度に与える影響について検討した。表 1 に各成形条件における PP 成形板の結晶化度を示す。PP 成形板の結晶化度は、プレス温度 180℃及び 230℃において冷却温度 40℃で最も低く、徐冷で最も高くなった。また、プレス温度 180℃及び 230℃の条件で作製した PP 成形板の結晶化度を比較すると、すべての冷却温度条件においてプレス温度による差は見られなかった。このことから、プレス温度が結晶化度に与える影響は少なく、冷却温度による影響が大きいことが確認された。このため、以降の実験ではプレス温度は 180℃一定とした。また以降は、180℃でプレスした後 40℃で冷却し作製した PP 成形板を 180℃→40℃ (結晶化度 43.5%) と表記することとし、同様に 180℃でプレスした後 120℃で冷却し作製した PP 成形板を 180℃→120℃

(結晶化度 47.8%)、180℃でプレスした後徐冷し作製した PP 成形板を 180℃→徐冷 (結晶化度 51.4%) とした。

表 1 各成形条件における PP 成形板の結晶化度

No	プレス温度 (℃)	冷却温度 (℃)	結晶化度 (%)
1	180	40	43.5
2	230	40	42.8
3	180	120	47.8
4	230	120	47.7
5	180	徐冷	51.4
6	230	徐冷	51.1

続いて、冷却温度が異なる 3 種類の PP 成形板を 140℃で所定の時間熱処理を行い、熱処理が結晶化度に与える影響について検討した。図 1 に各成形条件における熱処理 PP 成形板の結晶化度を示す。成形条件に関係なく、すべての PP 成形板で 140℃の熱処理により結晶化度が増加することが確認された。加熱保持中に結晶が成長したため、結晶化度が増加したものと考えられる。また、成形条件と結晶化度の増加量との間に明確な関係性は見られなかった。

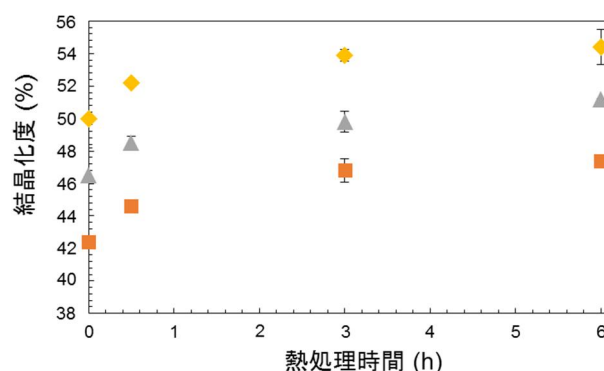


図 1 各成形条件における熱処理 PP 成形板の結晶化度；

- 180℃→40℃ (結晶化度 43.5%)、
- ▲ 180℃→120℃ (結晶化度 47.8%)、
- ◆ 180℃→徐冷 (結晶化度 51.4%)。

次に、各 PP 成形板の結晶構造について X 線回折装置を用いて解析した。図 2 のとおりすべての PP 成形板で同一の回折ピークが観測されたことから、成形条件に関係なく同一の結晶構造を有することが確認された。

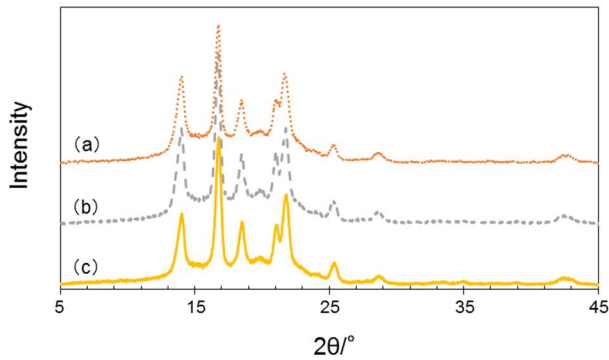


図2 各PP成形板のX線回折パターン；
 (a) 180℃→40℃（結晶化度 43.5%），
 (b) 180℃→120℃（結晶化度 47.8%），
 (c) 180℃→徐冷（結晶化度 51.4%）。

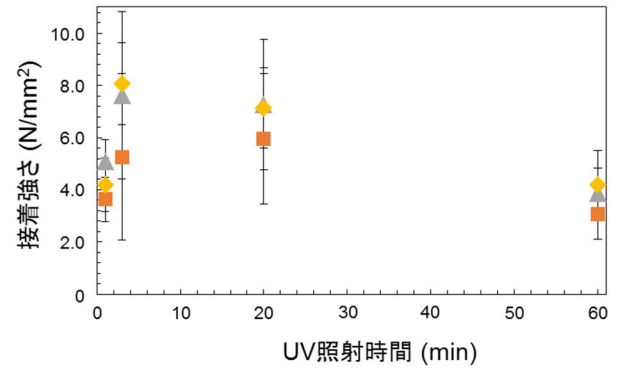


図4 UV処理によるPPとSUS304の接着強さ；
 ■180℃→40℃（結晶化度 43.5%），
 ▲180℃→120℃（結晶化度 47.8%），
 ◆180℃→徐冷（結晶化度 51.4%）。

3. 2 PPのUV処理と接触角

図3に各PP成形板へのUV照射時間が接触角に及ぼす影響を示す。すべてのPP成形板でUV照射時間が10分までの間に接触角は急激に下がり、UV照射20分で最も接触角が低くなり、それ以降では接触角が上がった。UV処理により樹脂表面に親水基が生成したことで接触角が下がったと推察される。結晶性高分子は非晶領域で酸化等の反応が起きることが知られており、結晶化度が低いほど短時間で接触角が低下する又は接触角がより低下すると予想したが、本研究で検討した結晶化度の範囲においては結晶化度の違いによる明確な差は見られなかった。

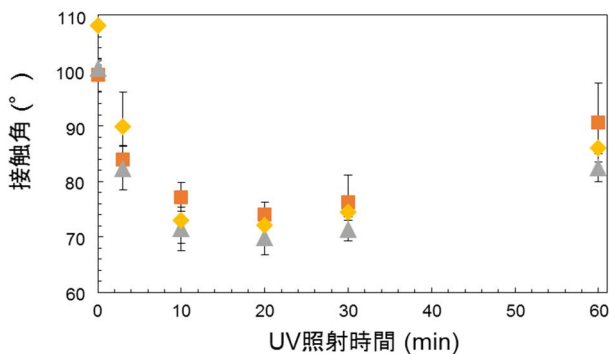


図3 各PP成形板におけるUV照射時間による接触角測定結果；
 ■180℃→40℃（結晶化度 43.5%），
 ▲180℃→120℃（結晶化度 47.8%），
 ◆180℃→徐冷（結晶化度 51.4%）。

3. 3 接着強さ

図4にPP成形板のUV処理時間とSUS304との接着強さの関係を示す。接着強さはすべてのPP成形板においてUV照射3分又は20分で最大となり、UV照射60分で

は低下した。

引張せん断接着強さ試験における破壊形態は、UV照射1分及び60分ではPP成形板と接着剤の界面での破壊であり、UV照射3分及び20分ではPP成形板と接着剤の界面での破壊又はPP成形板の材料破壊であった。UV照射1分では、UV処理による改質が不十分であったためPP成形板と接着剤の界面で剥離したと考えられる。一方、UV照射60分で接着強さが低下したことについて考察するため、引張せん断試験を行ったPP成形板の接着破壊面を走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて観察した。図5にPP表面のSEM画像を示す。引張方向に対して垂直に線状の跡が生じており、一部塑性変形しPP表面が剥がれたと思われる様子が観察された。

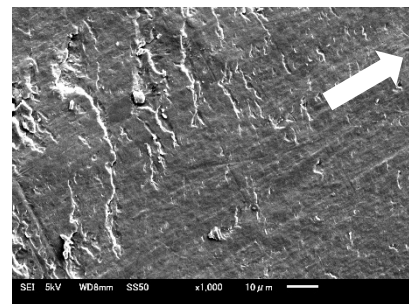


図5 PP接着破壊面のSEM画像；
 矢印は引張方向を示す。

また、フーリエ変換赤外分光光度計（FT-IR）及び熱分解ガスクロマトグラフ質量分析計（熱分解GC-MS）を用いてPP成形板と接していた側の接着剤の分析を行ったところ、FT-IRで $1,378\text{cm}^{-1}$ にPP由来と思われる成分が検出され、熱分解GC-MSではリテンションタイム5.5分にPPの熱分解生成物である2,4-ジメチル-1-ヘプテンと思われるピークが検出された。以上よりUVを60分

間照射した PP 成形板は PP 表面で破壊したことが明らかになった。UV 処理を過剰に行うと極性基が導入され濡れ性は向上するが、同時に表面の分子鎖は切断され低分子量化することが知られている³⁾。UV 照射 60 分で接着強さが低下したのは、低分子量化により生成した脆弱層によるものと考えられる。

また、UV 処理した PP 成形板の水に対する接触角（図 3）と接着強さ（図 4）を比較すると、180℃→120℃（結晶化度 47.8%）及び 180℃→徐冷（結晶化度 51.4%）は UV 照射 3 分で接着強さが最大となり、接触角が最も低下した条件で接着強さが最大となるわけではないことが明らかになった。このことは、UV 照射による PP 表面の改質は非晶領域における極性官能基の導入による濡れ性向上の効果よりも脆弱層の形成による強度低下の影響の方が大きかったためと推察される。

また、接着強さは PP 成形板の結晶化度が高い方が大きくなる傾向が見られた。結晶性樹脂は結晶化度が高くなると弾性率が高くなることが知られており⁴⁾⁻⁵⁾、結晶化度が高くなることにより、表面の剛性が高くなったことが一つの要因と考えられる。

4 おわりに

様々な成形条件で熱プレス成形により PP 成形板を作製し、成形条件による結晶化度の影響を確認した。また、結晶化度の違いが UV 処理による改質効果や樹脂と金属の接着強度に及ぼす影響について評価し、以下の知見を得た。

- (1) 結晶化度に関係なく、PP 成形板で UV 照射時間が 10 分までの間に接触角は急激に下がり、UV 照射 20 分で最も接触角が低くなり、それ以降では接触角が上がった。
- (2) PP と SUS304 の接着強さは、UV 照射 3 分又は 20 分で最大となり、UV 照射 60 分では低下した。また、結晶化度が高い方が接着強さは大きくなる傾向が見られた。
- (3) UV を 60 分間照射した後 SUS304 と接着強さ試験を行った PP 成形板は、表面に形成された脆弱層で破壊したことが分かった。

参考文献

- 1) 角岡正弘：“日本ゴム”，68（5），274，（1995）
- 2) Roger L. Blaine：THERMAL APPLICATIONS NOTE
Polymer Heats of Fusion, Table 1—Polymer
Heats of Fusion
- 3) 小川俊夫：“プラスチックの表面処理と接着”，共立出版，95，（2016）
- 4) 刈茅孝一，高橋清久：“日本複合材料”，21（1），8，（1995）
- 5) 植松市太郎，植松淑子：“高分子”，10（3），285，（1961）
- 6) 杉村博之：“成形加工”，30（3），107，（2018）
- 7) 北尾幸一，鶴田秀和：“高分子論文集”，52（8），497，（1995）
- 8) 佐藤千明：“表面技術”，67（12），644，（2016）

経常研究

インクジェットプリンタによるテキスタイル製品の生産効率化

吉葉 光雄* 飯沼 友英*

Research on Production Efficiency of Textile Products using Inkjet Printer
YOSHIBA Mitsuo and IINUMA Tomohide

柄の自由度が高く多品種少量生産に適しているテキスタイルインクジェットプリンタの特徴を活用し、テキスタイル製品の生産効率化を目指すため、型紙データと柄データの一体化を検討するとともに、試作による検証を行った。その結果、柄のつながりや審美性を考慮したデザインの作成・調整を行う一連の手順を確立した。

Key words: テキスタイルインクジェットプリンタ, 型紙, デザイン

1 はじめに

近年ものづくりの現場では、デジタルトランスフォーメーション（DX）に代表されるようにデジタルツールを利用した情報の連携が進んでおり、繊維産業でもデジタル化が徐々に浸透してきている。また、SDGs の概念が広まるにつれ、生産時の環境負荷が注目を集めるようになってきている。繊維製品については、製品になるまでに必要となるエネルギーや水の消費量が多く、生産現場での対応が求められる。

こうした情勢を受けて注目されつつあるのが、インクジェットプリンタによるテキスタイルの捺染である。テキスタイルインクジェットプリンタによる捺染は、20 年以上前から普及が始まっており、当初はフラットベッドタイプのものが主流であったが、現在では紙用の大判プリンタと同様の形状をしたタイプも広く普及している（図1）。プリンタ本体の性能向上とともに、制御 PC やソフトウェアも進化しており、またデジタルとの親和性が高く、捺染時のエネルギー消費が少ない。このような特徴から、従来からのメーカーに加え、大手プリンタメーカーも参入している。



図1 テキスタイルインクジェットプリンタ

また、テキスタイルインクジェットプリンタは柄の自由度が高く、納期短縮、多品種少量生産に適していることから、製品の差別化や生産の効率化につながる手法が期待される。本研究では、これらの特性を活用し、縫製した際の柄あわせを考慮した柄配置について検討を行い、型紙と柄データを一体化してプリントする手法を確立することを目標とした。

2 研究の方法

2. 1 型紙・図案のデザイン検討・作成

型紙のデータについては、製品の企画を想定して、センターで所有する 9A（成人女性の標準体型）の人台から立体裁断で採寸を行った。一般的には採寸した型紙はデジタルタイザースキャナで取り込み、アパレル CAD のデータとするが、本研究では簡便な方法としてデジタルカメラで撮影、画像化し、CAD データにする方法を試みた。また、図案はセンター所有のデザイン資料データを活用し、加工して用いることとした。

2. 2 型紙と図案一体データの調整

2. 1 で準備した型紙と図案のデータについて、縫製の際の審美性を念頭に合成を行い、併せて位置合わせ精度を評価するためのパターンも配置した。その後制御 PC にデータを取り込み、制御ソフトによりインクジェット捺染の生地幅に合わせて配置した。

2. 3 試作（プリント～縫製）

2. 2 で作成した画像データをテキスタイルインクジェットプリンタ（株式会社ミマキエンジニアリング製 Tx2-1600）で捺染し、スチーム処理、ソーピング処理等の後縫製を行い、マネキンに試着して、型紙の整合性や図案の位置合わせ精度等の確認を行った。

* 栃木県産業技術センター繊維技術支援センター

3 結果及び考察

3. 1 型紙データ作成と図案の検討

パターンメイキングの様子を図2に示す。綿のシーチング生地を使用し、虫ピンで人台に固定しながら形作った。今回使用したパーツは前身頃、後身頃、前スカート、後スカートの4点であり、中心線やバストライン、ウエストライン等を参照しながら固定やダーツの作成等を行い、合わせ目部分を鉛筆等でトレースした。



図2 パターンメイキング

描画が完了した布は、人台から取り外し、40センチ間隔で縦横にマーカーを配置したボードに装着後、三脚を用いてデジタルカメラで撮影した。なお、そのままではフォーカスが合いにくいため、十字型のマーカーを貼付して撮影することにより、シャープな映像を取り込むことができた(図3)。

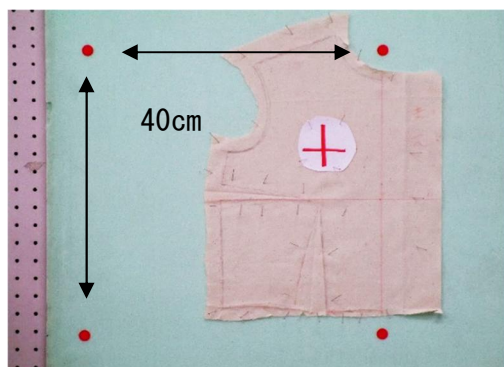


図3 作成したパターンの取込み

撮影した画像は、マーカーを参照して歪み補正を行った後、Adobe Illustrator®で輪郭部分を描画し直した。次に、人体の動きを考慮してゆとり入れを行い、最終的な型紙データとした(図4)。



- A: 画像をもとに線を描画
- B: 体を動かすのに必要となるゆとり入れ
- C: 作成した型紙データ

図4 型紙データの編集

型紙データと合わせて用いる図案データについて、もとなるデザイン資料のデータは、手書の絵をスキャンしたものである。これをデザインに使用できるように、モチーフの抽出・色まとめ・輪郭修正など一連の図案調整を Adobe Photoshop Elements®を使用して実施した(図5)。

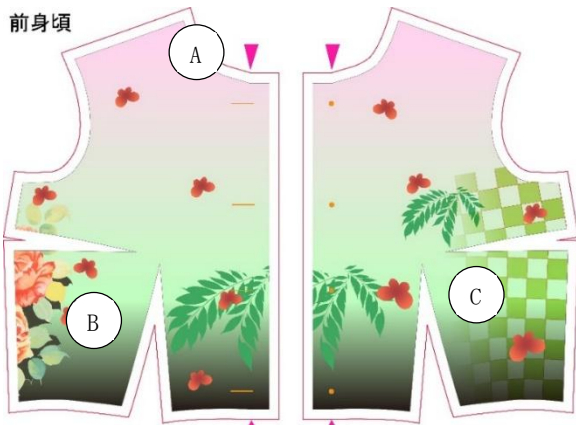


図5 図案の調整

3. 2 型紙と図案一体データの調整

3. 1 で作成した型紙データと図案データの合成には、引き続き Adobe Illustrator®を使用した(図6)。型紙には体形にフィットさせるためにダーツが入っており、また前後で型紙が別々となっており、これを縫製した際に柄を合わせるには位置の確認が重要となる。今回位置合わせを確認するために、図6に示すように試作

する衣服の縫い合わせやダーツが複合する位置に大柄を配置したほか、左半身（向かって右側）には5cm間隔で作図した市松模様をデザイン中に配置し、位置の精度を確認することとした。また、縫い代だけでなくボタンホルの位置等も併せて作図することで、効率化を図った。

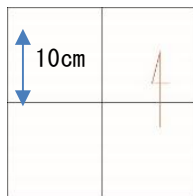
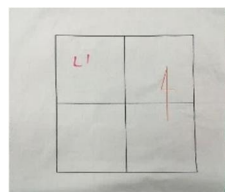


- A: 裁断ラインやボタン位置を付与
 B: ダーツや後ろ身頃にまたがる部分に柄を配置
 C: 位置決めのため市松模様を配置

図6 型紙とデザインの一体化

3.3 試作（プリント～縫製）

作成した画像データをテキスタイルインクジェットプリンタでプリントした場合、熱処理やソーピングで寸法が変化する恐れがある。そこで、JIS L1096の手法に準じて図7に示した画像データをプリント後スチーム処理、ソーピング等を行い、寸法の変化を確認した。



画像データ プリントサンプル

図7 寸法変化率の測定

寸法変化率の測定結果は表1のとおりであった。プリントはほぼ設計どおりの寸法であったが、処理後はたて方向で2.0%、よこ方向で0.8%収縮した。また中央と左右ではほぼ同様の結果であった。このことから、安全

マージンとして2%を追加し、ソフトウェアによりたて方向4%、よこ方向3%拡大してプリントを行った。なお、印刷に際しては、ソフトウェア上で生地が無駄にならないようデータの配置を行った。

表1 寸法変化測定結果

	左	中央	右	平均
たて方向	-1.8	-2.0	-2.3	-2.0
よこ方向	-0.9	-0.9	-0.6	-0.8

(単位：%)

プリントした生地は、寸法変化測定時と同様にスチーム処理、ソーピング等を行った後、アイロンがけ、仮縫いを経て縫製し、完成とした(図8)。



図8 試作したワンピース

デザインの位置精度を確認するために入れた市松模様分を拡大したのが図9である。縫製による緩和もあるものの、ずれの大きさは最大1mmに収まった。その他の部分についても、想定した位置でデザインが自然につながった。

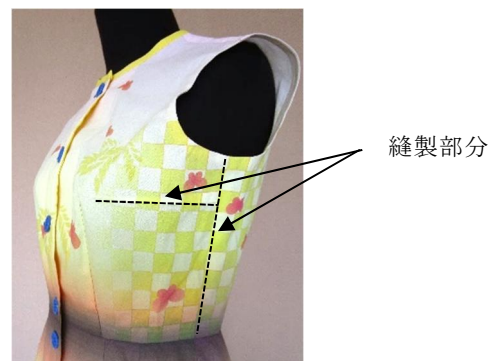


図9 市松模様部分の縫製状況

また、今回作図時に型紙のラインに合わせて図案の切り抜き等を行ったが、縫製時に柄のつながりをより自然に出すため、画像を切り抜くラインを 1~2mm 外側へ拡張し、重複部分をつくる必要があることも確認できた(図 10)。また、作業のしやすさを念頭に縫製ラインをやや濃色で設定したが、審美性向上のためには服の色と近似した単色が望ましい。



1~2mm 画像を重複させる

図 10 画像の位置調整の改良案 (イメージ)

以上により、テキスタイルインクジェットプリンタを使用した型紙データと画像の一体化は、製品開発に有効であることが示唆された。加えてソフトウェアにより簡単に小サイズの見本も作成可能であり、試作開発の期間短縮やコスト低減に寄与できる。

4 おわりに

テキスタイルインクジェットプリンタを活用し、型紙データと柄データの一体化による柄のつながりや審美性を考慮したデザインの作成・調整を行う一連の手法を確立した。これにより地域内でテキスタイルインクジェットプリント技術を用いた差別化された独自製品の開発が進めば、製品の競争力強化やブランド化が期待できる。

なお、デザイン開発に当たっては、繊維技術支援センター保有のデザイン資料の活用も可能である。

テキスタイルインクジェットプリンタは普及が進みつつあり、今後捺染方法の一つとして定着するものと予想される。一方従来の捺染技術は大量生産に適しており、今後用途に応じて棲み分けされるものと考えられる。DX が繊維業界にも広がってゆく今後、県内産地での企画開発力強化の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 大野順之助：“AF 立体裁断研究書 1 パターンメイキングの原理”，株式会社アミコ ファッションズ (1985)
- 2) 小池千枝：“文化ファッション講座 新・立体裁断” 文化出版局 (1984)
- 3) 中川信行：“速攻図解 Illustrator CS”，(株)毎日コミュニケーションズ
- 4) 佐瀬文彦ら：“栃木県産業技術センター研究報告”，No. 18, 43-46, (2021)

経常研究

広幅の解し織における仮織の自動化に関する研究

井田 恵司* 堀江 昭次*

A Study on Automation of Temporary Weaving in Wide Width HOGUSHI-ORI
IDA Keiji and HORIE Shouji

繊維技術支援センターで開発した試製仮織機織機の巻取部、開口部、飛杼部について電動化等を行い、実際に製織試験を行った。さらに、マイコンボードを活用し巻取部、開口部、飛杼部の連携を図ること
で、仮織の自動化に向けたモデルの構築に取り組んだ。その結果、千巻の電動巻取り機構、開口を確認
する開口部機構、電動で緯糸を挿入する飛杼機構を製作し、試製仮織機織機に組み込んだ。また、実際に
仮織を行い、概ね1本/1.0cm以上であれば任意の緯密度で緯糸の挿入が可能であることを確認した。
さらに、仮織の自動化モデルとして、試製仮織機織機に組み込んだ各種センサ等からの情報をマイコンボ
ードに集約するプログラムを開発し、作業者が開口するためのペダルを踏むだけで、緯糸の挿入までの
工程を自動化させることに成功した。

Key words: 仮織, 解し織, 織機, 自動化

1 はじめに

大正から昭和初期にかけて流行した銘仙（着物）は、足利地域でも主に解し織の技法により、第二次世界大戦頃まで盛んに生産されていたが、洋装の普及に伴い生産量が減少した。さらに、企業数の減少や技術者の高齢化等が追い打ちになり、地域内で安定的に解し織を一貫生産することは困難になっている。

一方で、銘仙の特徴の一つである緋模様が与えるレトロモダンな印象は、国内外を問わず高い評価を得ており、地域の繊維関連企業群では、洋装に対応するための銘仙（生地）の広幅化への取組や、これを含む繊維関連製品のブランド化に向けたPR活動を行い、最近では「足利銘仙」が地域団体商標登録に至っている。

このような背景のもと、当センターでは、解し織に関して洋装に対応するための広幅化や、捺染業を中心とした一貫生産による短納期化及びコストダウンを図る効率的生産体制の確立を目指して、企業支援や共同研究などに取り組んできた。

しかし、試作開発や製品化が進み、将来にわたる安定的な生産体制の確立が必要となる中で、解し織独自の工程である仮織について、広幅化への対応は担い手や規格が限られており、生産への対応が課題となっている。

平成30年度に実施した広幅の解し織における仮織の内製化を目指した共同研究¹⁾では、試製織機の開発及び試織は達成し、解し織に使用できることは確認したものの、手動であったため実用性の示唆については十分とは

言えず、実用的な仮織機織機の例を示し、企業における実製機の導入促進を図る必要があった。

そこで本研究では、以前の研究成果である試製仮織機織機について、電動化を含む自動化に向けた検討を行い、実用的な仮織モデルの構築を図った。

2 研究の方法

2.1 織機の動作・駆動方法の検討及び設計

本研究では、経糸を千巻に巻き取る「巻取部」、緯糸を挿入するために経糸を上下に分ける「開口部」、緯糸の挿入に使用する杼を経糸の幅の分だけ往復させる「飛杼部」に着目し、電動化・自動化について検討を行った。試製仮織機織機及び電動化を検討した各部分を図1に示す。

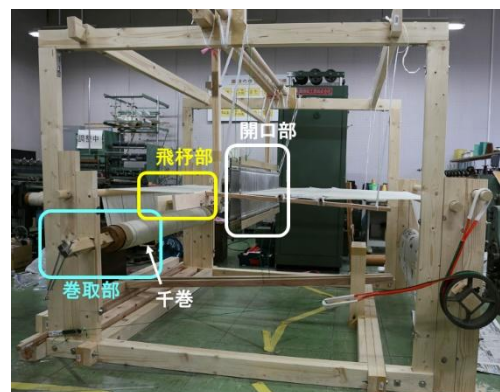


図1 試製仮織機織機の電動化検討部分

* 栃木県産業技術センター繊維技術支援センター

各部については、動作を検証した上で、センサ等を用いて糸や操作部分の動きを監視することの必要性や各駆動部分の電動化の必要性を検討した。仮織に従事する技術者の高齢化に伴い、作業者のスキルや経験によらない仮織を実現するため、できる限り手動・目視から電動・センサ監視を積極的に取り入れるとともに、安価で容易に入手できる部材のみを用いるよう設計した。

2. 2 織機の改造と製織試験

2. 1 で示した検討結果を踏まえ、各部ごとにセンサやモータをはじめとした電動化部材等を試製仮織織機に組み込み、動作確認を行った。

各部は、センサ等からの信号を受け取り、作業者に各部の稼働状況を必要な情報としてまとめて提供するため、データの表示や警報の発出が可能なマイコンボードとして M5 GO, M5 BASIC (M5Stack 社製) を接続した。

巻取部、開口部、飛杼部全ての部分の改造後、製織試験を実施した。製織試験で使用した経糸の規格は既報²⁾と同じとした。仮織で挿入した緯糸は、経糸と同糸(絹紡糸、織度 2/120 [約 150 d])を用いた。さらに、試織時の緯糸を挿入する間隔(緯密度)は、1 本/1.0 cm 程度を最密とし、1 本/5.0 cm 程度まで、密度を変えながら制御の可否を検討した。

2. 3 自動化に向けた検討

仮織作業者のスキルや経験によらず、安定的に仮織を行うことができる実用的な仮織織機のモデルを示すため、2. 2 で試製仮織織機に取り付けたセンサ等から得られた情報を活用し、マイコンボード上で巻取部、開口部、飛杼部を連携させることにより、連続的に仮織工程を行う手法の開発を行った。

3 結果及び考察

3. 1 織機の動作・駆動方法の検討及び設計

3. 1. 1 巻取部

巻取部は、定速で千巻を回転し、経糸を巻き取る動作を行う部分である。実際の巻取り作業工程では、経糸をあらかじめ任意に指定した長さだけ巻き取り、完了を作業者に知らせる必要があることから、経糸の巻取り量を計測する機構を試製仮織織機に組み込むこととした。経糸の巻取り量を計測する機構については、以下に示す 2 つの機構を選定した。

- (1) 試製仮織織機にスイッチを取り付け、千巻の逆回転を防ぐラチェットの歯車がスイッチを押した回数を計測する「スイッチ式」
- (2) 試製仮織織機にロータリーエンコーダを千巻と接するように取り付け、千巻の回転量を計測する「エンコーダ式」

3. 1. 2 開口部

開口部は、2 枚の綜絊を上下させることで、経糸を上下に動かし、緯糸を挿入するための杼口を作る動作を行う部分である。実際に綜絊を上下させる動作は、改造前の機構をそのまま利用し、足踏み式のペダルで行うこととした。作業者は、緯糸を挿入する際、杼口が開いている状態か、杼口が閉じている状態かを確認する必要があることから、センサを使用し、綜絊が上下した状態すなわち、杼口が開いた状態を検知する機構を加えた。

3. 1. 3 飛杼部

飛杼部は、緯糸を収めた杼を、左右に往復させる動作を行う部分である。改造前は、手で杼を左右に動かしていたが、慣れないと時間を要する工程であることから、ソレノイドを用いて、電動で経糸の幅の分だけ杼を飛ばす機構を選定した。

3. 2 織機の改造と製織試験

3. 2. 1 巻取部の改造

モータによる駆動で千巻を回転させ、経糸を巻き取る駆動部分を製作し試製仮織織機に組み込んだ。製作した駆動部分を図 2 に示す。



図 2 巻取部駆動部分

駆動部分の巻取速度は、モータ制御用コントローラで可変式となっており、経糸の切れやすさや作業者の熟練度に応じて、適切な速度に調節することが可能である。

また、巻取量を計測するため、「スイッチ式」及び「エンコーダ式」の計測機構を試製仮織織機に取り付けた。それぞれの機構を試製仮織織機へ取り付けられた状態とマイコンボードへ計測値を表示した例を図 3 及び図 4 に示す。



図 3 スwitch式巻取量計測機構

(左：スイッチ部 右：マイコンボード表示)

各方式で巻取量の計測を行った結果、1 本/5.0 cm 程度の緯密度であれば、どちらの方式でも経糸の巻取量を

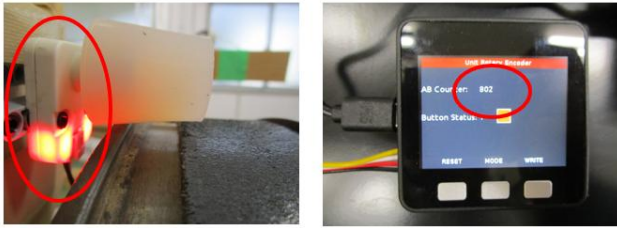


図4 エンコーダ式巻取量計測機構

(左：エンコーダ部 右：マイコンボード表示)

計測することが可能であることを確認した。スイッチ式は、歯車の歯でスイッチを押す設計になっていることから、歯の枚数に合わせて千巻が 6° 回転した時点でカウント可能となっている。カウントするたびにマイコンボードから警報音を出すように設定し、目視のみならず、聴覚でも巻取量を確認できるようにした。

一方、エンコーダ式は、常に細かく回転を把握することができた。(スイッチ式の約 10 倍の精度でカウント可能。)ただし、図 4 左図に示すとおり、回転部分とエンコーダの接点としてゴムを使用しており、この部分がスリップすると正確な回転量を把握できなくなる。作業者が、接点が千巻の回転と同調していることを確認しながら使用する必要がある点については、改善の余地があると考えられる。

それぞれの方式を用いて様々な緯密度となるよう巻取量を変更して製織したところ、実用的に計測可能な緯密度は、スイッチ式で 1 本/1.5 cm 以上、エンコーダ式で 1 本/1.0 cm 以上であった。

このことから、仮織の際に力糸を密に挿入する場合等、より詳細に緯密度を制御する必要がある場合は「エンコーダ式」で巻取り量を計測することが望ましいと考えられる。

3. 2. 2 開口部の改造

試製仮織機機の足踏みペダル部分に、磁気ホールセンサを取り付け、マイコンボード上で杼口の開閉状態を作業者に知らせる開口部機構を追加した。

図 5 に足踏みペダル部分に取り付けたセンサと杼口の状態をマイコンボードに表示する開口部機構を示す。

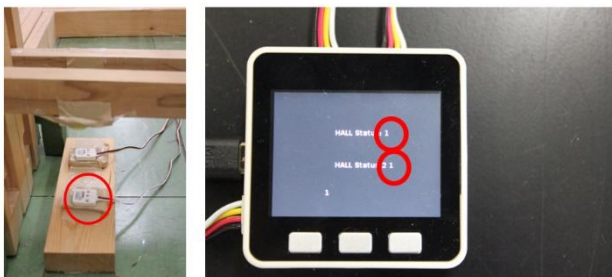


図5 開口部機構

(左：磁気ホールセンサ部 右：マイコンボード表示)
足踏みペダルは左右にあり、製織の際は、作業者が左

右交互に踏む。そのため、センサも左右のペダルに取り付け、マイコンボード上でどちらのペダルが踏まれている状態かを認識できるようにした。

磁気ホールセンサは、踏み込んだペダルの固定場所へ固定された際に検知するように設置したため、作業者が踏み込む際にはセンサが反応せず、杼口が完全に開いた時点で作業者に知らせることが可能である。

3. 2. 3 飛杼部の改造

緯糸を電動で挿入するため、ソレノイドで緯糸を収めた杼を飛ばす飛杼機構を作製し、試製仮織機機の箆部分の左右に取り付けた。図 6 に作製した飛杼機構を示す。

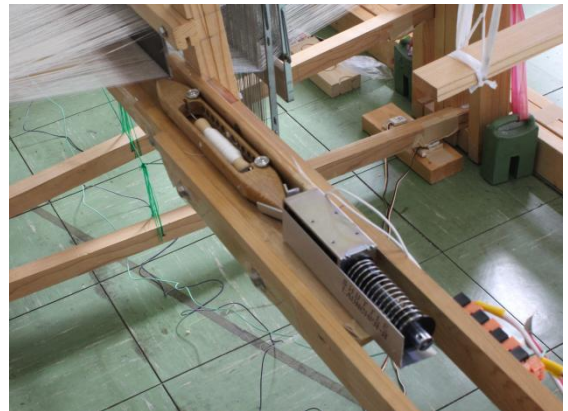


図6 飛杼機構

図 6 は、3. 2. 2 で示した開口部機構で開いた杼口に向かって、杼を飛ばす直前を撮影したものである。杼を飛ばすタイミングは、リレーを介してマイコンボードから制御できることから、作業者が任意に決定することができる。

3. 2. 4 製織試験

3. 2. 1 ~ 3. 2. 3 で各部を改造した試製仮織機機を使用し、実際の仮織を想定した緯密度で製織試験を行った。図 7 に製織した仮織生地例を示す。



図7 製織試験で仮織を行った生地

エンコーダ式で巻取り量を監視した場合、エンコーダカウンタで約 50 カウントした時点で緯糸を挿入すると緯密度が 1 本/4.8 cm となった。(図 7 実線)

一方、カウンタで約 40 カウントの時点で緯糸を挿入すると、緯密度は 1 本/3.6 cm となり(図 7 破線)、カウンタで約 10 カウントの時点で緯糸を挿入すると、緯密度は 1 本/約 1.0 cm (写真掲載なし)となった。

以上のことから、今回構築したシステムを用いると、緯密度 1.0 cm 以上については、任意に緯密度を設定でき、実際の仮織にも対応できることが明らかとなった。

3.3 自動化に向けた検討

3.2 で試製仮織機に取り付けた各機構から得られたセンサ情報や電動化機構等を活用し、巻取部、開口部、飛杼部を連携させることで、試製仮織機を自動化し、仮織工程において作業者が手動で操作する工程を減らすモデルの構築に関する検討を行った。

図 8 に構築した自動化モデルの構成を示す。

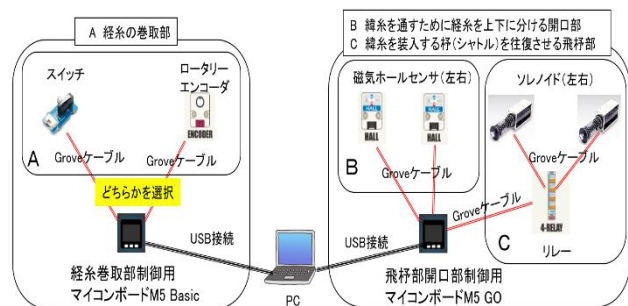


図 8 試製仮織機用織機の自動化モデル構成

図 8 において「A 経糸の巻取部」は、3.1.1 で示した 2 つの巻取量計測機構から片方を選択し、マイコンボードと接続したものである。また、図 8 において「B 緯糸を通すために経糸を上下に分ける開口部」は、足踏みペダルの状態を検知する磁気ホールセンサとマイコンボードを接続したもので、「C 緯糸を挿入する杼を往復させる飛杼部」は、杼を押し出すソレノイドとマイコンボードを接続したものである。

図 8 の「B 緯糸を通すために経糸を上下に分ける開口部」、 「C 緯糸を挿入する杼を往復させる飛杼部」に関しては、磁気ホールセンサから得られた開口部情報を開口部・飛杼部制御用マイコンボードが認識した後、リレーを介してソレノイドに信号を送り、任意のタイミングでソレノイドが杼を飛ばす工程を自動で行う「開口部・飛杼部連携プログラム」を開発した。

このプログラムは、Web ベースのプログラミングツール「UIFlow³⁾」を用いて作製した。

これにより、作業者は開口するための足踏み式のペダルを踏むだけで、緯糸の挿入までの工程を自動で行うことが可能となった。実際にプログラムを作動させたところ、作業者の慣れに応じて待機時間を自由に設定できることから、仮織作業の初心者から熟練者まで、作業者のペースにあわせて自動で緯糸挿入が可能であることを確認した。

一方、図 8 に示した「A 経糸の巻取部」に関しても、同様のプログラミングツールを用い、スイッチ又はロータリーエンコーダから千巻の回転情報を経糸巻取部制御用マイコンボードに送るプログラム「巻取部制御プログラム」を作製した。制御マイコンボードに巻取り量を表示するとともに、一定数カウントするごとに警報音を出すようにし、作業者が画面を見なくても、回転状況を把握し、駆動部分を制御することが可能となった。

今後、マイコンボードにおけるコネクタの増設、ポートの割振り等を検討することで、両プログラムを連携させれば、さらなる自動化を進めることができると考えられる。

4 おわりに

本研究では、試製仮織機の巻取部、開口部、飛杼部について、電動化に関する検討を行った。また、電動化等を行った各部分を作動させながら、製織試験を実施した。さらに、マイコンボードを活用して巻取部、開口部、飛杼部の連携を図ることで、試製仮織機用織機の自動化に向けたモデルの構築に取り組んだ。その結果、以下の結果が得られた。

- (1) 試製仮織機の巻取部となる千巻の電動巻取り機構、綜統の状態を監視し、開口を確認する機構、電動で緯糸を挿入する機構の設計を行い、それらを試製仮織機に組み込んだ。
- (2) 電動化機構等を組み込んだ試製仮織機で、実際に仮織を行い、概ね 1.0 cm 以上であれば任意の緯密度で緯糸の挿入が可能であることを確認した。
- (3) 仮織工程における自動化のモデルとして、試製仮織機に組み込んだ各種センサ等からの情報をマイコンボードに集約し、作業者が開口するためのペダルを踏むと、自動で緯糸を挿入するまでの工程を自動で行うプログラムを作製し、動作することを確認した。

参考文献

- 1) 佐瀬文彦ら：「栃木県産業技術センター研究報告」，No.16，41-44，(2019)
- 2) 佐瀬文彦ら：「栃木県産業技術センター研究報告」，No.18，43-46，(2021)
- 3) M5Stack “UIFlow”
https://m5stack.github.io/UIFlow_doc/ja/

経常研究

ドリル加工におけるバリ抑制手法の開発

岡村 弘太* 西宮 紹*

Development of Method for Burr Suppression in Drilling

OKAMURA Kota and NISHIMIYA Sho

ドリル加工において穴の出口に発生したばりは、部品の機能や品質の悪化につながるため除去作業を行っている。ばりを抑制し除去作業の短縮化を図るため、ステンレス鋼のドリル加工において、加工条件を変え、発生したばりの高さや硬さを測定し、ばりを抑制する加工条件を検討した。

その結果、HV450 以上の硬いばりのほとんどが 0.3mm 以下の小さなばりであることがわかった。さらに、より材料内部まで硬化している方がばりが小さくなった。ばり抑制の加工条件として、切削速度と 1 刃送りを抑えて加工することで、硬く小さなばりが生成された。また、表面付近があまり硬化していない材料に関しては、フェイスミルを用いて面をより硬化させた後ドリル加工を行うと、ばり抑制の効果が期待できる結果となった。

Key Words : ドリル, ばり, 切削加工, ビッカース硬さ

1 はじめに

金属の部品加工では、ほとんどの場合穴あけ加工が行われ、その中でもドリル工具を用いて穴あけをするドリル加工法が大きな割合を占めている。ドリル加工では、被削材から切り粉として分断せずに残った残留部が塑性変形することで、穴の出口にばりが発生する。ばりは、部品の機能や品質の悪化につながるため、製造現場ではばりの除去作業工程が必要となり、その工程が加工時間や加工コストの増大を招き、加工の高能率性が阻害されている。そのため、ばりの抑制は企業の長年の課題となっており、製造現場で対応できる、加工時におけるばり抑制の手法が求められている。

ばりの発生要因は、工具形状や摩耗、被削材の材質、加工条件等が複雑に影響している。穴の出口にばりが発生しやすいステンレス鋼は、切削加工で加工硬化が起きやすい材料である。加工硬化とは、金属材料に力を加えると材料が硬くなる現象のことである。そこで、加工条件により加工硬化を起こすことで、残留部が塑性変形しにくくなり、ドリルで削り取られることでばりが抑制できるのではないかと考えた。

既往研究としてドリル外周コーナを面取りした特殊形状ドリルの使用に関する報告¹⁾や、ばりの高さや加工条件の関心に着目した報告²⁾³⁾があるものの、加工

条件変化による加工硬化とばりの関係を明らかにした報告は見当たらない。

そこで本研究では、穴の出口ばりを抑制し除去作業の短縮化を図るため、加工条件による加工硬化とばりの関係を明らかにし、加工硬化の観点から、ばりを抑制する加工条件を検討した。

2 研究の方法

2. 1 ドリル加工

加工条件を変えてドリル加工を行った。加工機はマシニングセンタ(オークマ(株)製 MB-56VA)を用い、工具は直径 6 mm 2 枚刃超硬ドリル((株)不二越製 AQDEXR0600)を使用した。ドリルの先端角は 135° である。被削材はステンレス鋼 SUS304 を使用した。試験片形状は縦 140mm、横 20mm、厚さ 5mm の短冊状である。

加工条件を表 1 に示す。切削速度と 1 刃送りの 2 因子を 3 水準に振って組み合わせた 9 条件(条件 1～9)と追加の 3 条件(条件 10～12)を加えた計 12 条件を設定した。

2. 2 ばりの測定

ドリル加工であけた穴を精密切断機で半分に切断し、穴の断面が観察できるよう樹脂埋め、鏡面研磨を行った。

ばりの高さの評価には、金属顕微鏡(オリンパス(株)製 GX71)を用いて、1 穴に対して 2 つのばりの高さを測定した。測定の様子を図 1 に示す。

* 栃木県産業技術センター 県南技術支援センター

表 1 加工条件

加工 条件	切削速度 [m/min]	1 刃送り [mm/刃]
1	15	0.025
2	15	0.05
3	15	0.1
4	30	0.025
5	30	0.05
6	30	0.1
7	45	0.025
8	45	0.05
9	45	0.1
10	45	0.2
11	60	0.025
12	60	0.1

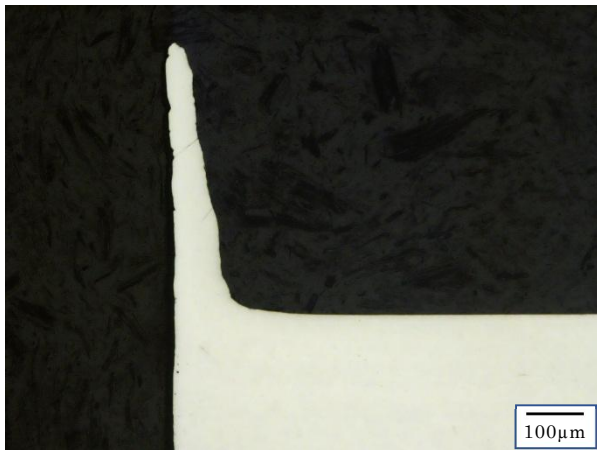


図 1 金属顕微鏡で観察したばりの一例

ばりの硬さの評価には、ワイドレンジビッカース硬さ試験機((株)フューチャテック製 FLV-10ARS-F)を用いて測定を行った。試験荷重は 0.9807N で、1 つのばりに対して根元、中間、先端の 3 か所のビッカース硬さの測定を行った。なお、使用した SUS304 の母材硬さは HV200 程度であった。

3 結果及び考察

3. 1 ばりの高さの測定

ばりの高さとの加工条件の関係を図 2 に示す。なお、ばりの高さは各条件の平均値で表している。切削速度が大きくなるとばりの高さが緩やかに小さくなり、1 刃送りが大きくなるとばりの高さが大きくなっていくことから、ばりの高さは 1 刃送りの影響が大きいことがわかった。このことから、1 刃送りを抑えて切削速

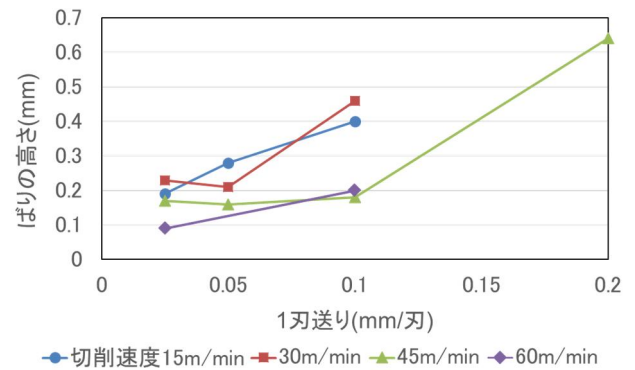


図 2 ばりの高さとの加工条件の関係

度を大きくすることで、送り速度を保ったままばりを抑える加工が可能であることがわかった。

3. 2 ばりの硬さの測定

得られたばりの硬さとの加工条件の関係を図 3 に示す。なお、ばりの硬さは各条件の平均値で表している。切削速度、1 刃送りが小さくなるとばりの硬さが硬くなることがわかった。

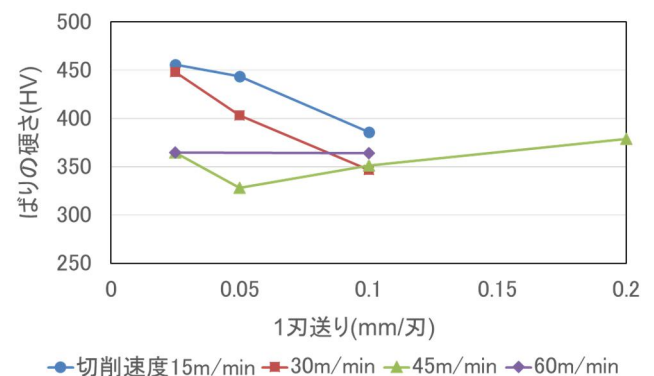


図 3 ばりの硬さとの加工条件の関係

3. 3 ばりの高さとの硬さの関係

ばりの高さとの硬さの関係を図 4 に示す。HV300 台前半の柔らかいばりは、どの高さにも存在している。一方で、HV450 以上ある硬いばりに関しては、ほと

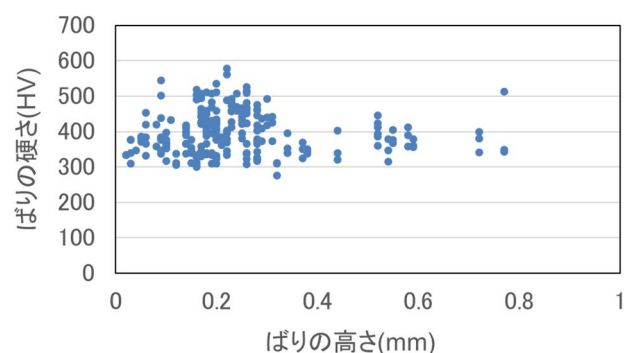


図 4 ばりの高さとの硬さの関係

んどが 0.3mm 以下の小さなバリであることがわかった。

図 3, 4 から得られた結果より、ばりの抑制条件として、切削速度と 1 刃送りを抑えてドリル加工することで、硬く小さなバリが生成されることがわかった。

3. 4 前加工による加工硬化の影響

硬いバリは高さが小さい傾向にあるという結果から、バリが生成される面を事前に加工硬化によって硬化させたのちドリル加工を行えば、さらに硬く小さなバリが得られるのではないかと考え、追加実験を行った。

ドリル加工前の被削材に対して、バリが生成される面をフェイスミルを用いて切削加工し、加工硬化を発生させた。この切削加工を行った被削材の表面のビッカース硬さを測定したところ、HV450 以上の硬さとなった。また、被削材を切断し、断面について硬さを測定したところ、表面から 0.075mm 程度内部まで硬化が確認された(図 5)。

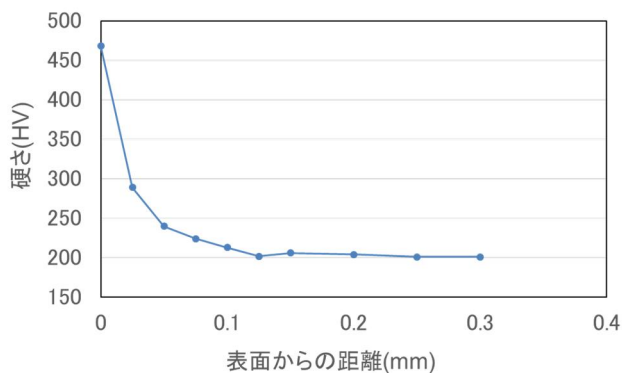


図 5 前加工による硬化の深さ

ドリル加工の加工条件として、比較的大きなバリが出た条件 3(切削速度 15m/min, 1 刃送り 0.1mm/刃)を用い、フェイスミルによる前加工の有無で生成されたばりの高さと硬さの平均を比較した。実験結果を表 2 に示す。

表 2 前加工の有無によるばりの比較

	ばりの高さ [mm]	ばりの硬さ [HV]
前加工なし	0.42	399
前加工あり	0.53	406

ばりの硬さに関しては前加工の有無でほとんど違いはなかったが、ばりの高さに関しては、前加工なしと比較して前加工ありの方がバリが 0.11mm 高いという

結果となった。そこで、前加工なしの被削材の表面と内部の硬さを測定したところ、前加工なしの被削材の方が表面からより深くまで硬化していたことが確認できた(図 6)。つまり、用いた被削材(被削材 A)は表面が硬化していたため、元から硬かった表面部分が前加工によって削り取られ、表面付近が相対的に柔らかくなってしまったため、バリが大きくなったと考えられる。

そこで、表面があまり硬化していない SUS304(被削材 B)についてフェイスミルによる前加工とドリル加工を行った。前加工の有無による材料内部の硬化の深さを図 7 に、ドリル加工の結果を表 3 に示す。材料内部の硬さについて、前加工ありの方が表面が硬く、より材料内部まで硬化していることが確認された。

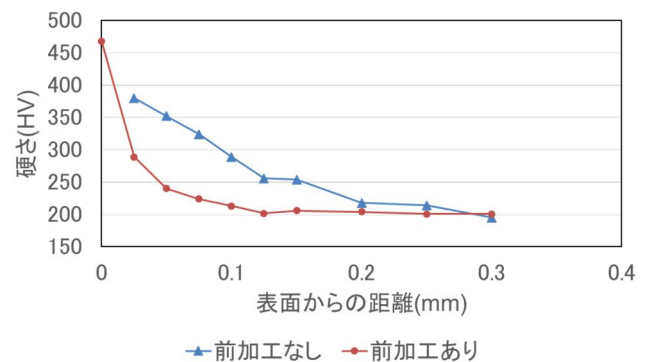


図 6 材料内部の硬化の深さ(被削材 A)

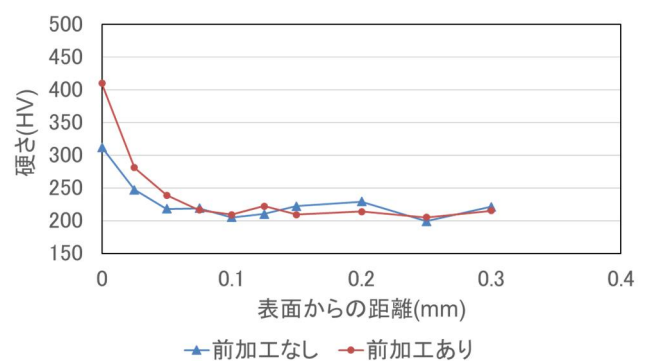


図 7 材料内部の硬化の深さ(被削材 B)

表 3 前加工の有無によるばりの比較(被削材 B)

	ばりの高さ [mm]	ばりの硬さ [HV]
前加工なし	0.50	413
前加工あり	0.46	427

そしてドリル加工で発生したバリについて、前加工ありの方がばりの硬さが HV14 硬くなり、高さが 0.04mm 小さくなった。

この追加実験から、より材料内部まで硬化している方がドリル加工において発生するバリは小さくなるということがわかった。また、表面付近があまり硬化していない材料に対して、フェイスミルによる前加工の有効性が期待できる結果となった。

4 おわりに

SUS304 のドリル加工において、加工条件による加工硬化とばりの関係及び、ばりを抑制する加工条件について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) HV450 以上の硬いバリに関しては、ほとんどのバリが 0.3mm 以下である。
- (2) より材料内部まで硬化している方がバリは小さくなる。

(3) 切削速度、1 刃送りを抑えて加工することで、硬く小さなバリが生成される。

(4) 表面付近があまり硬化していない材料に関しては、フェイスミルを用いて面をより硬化させた後ドリル加工を行うと、バリ抑制の効果が期待できる。

参考文献

- 1) 和田 浩明, 吉田 薫: “金属のドリル加工におけるバリ無し化”, (2000)
- 2) 三宅 輝明, 山本 章裕, 北嶋 弘一, 田中 行雄, 高沢 孝哉: “ドリル加工におけるバリ生成に関する研究”, (1991)
- 3) 安木 誠一, 藤原 久一: “ドリル出口バリの生成過程とその抑制”, (2014)

経常研究

手つむぎ糸の生産に関する研究

金子 優* 太田 仁美*

Research on the Production of Hand Spun Yarns for Yuki-Tsumugi
KANEKO Masaru and OTA Hitomi

結城紬に使用される手つむぎ糸は、原料の真綿を手で適切な太さに引き出し、唾液を付けることによって糸にまとめられている。唾液の利用は伝統的な方法であるが、衛生面や唾液の質に個人差があることなどが課題となっている。そこで、安全で質の高い手つむぎ糸の生産を行うため、唾液の代替材料を検討し、試作した手つむぎ糸と布の評価を行った。その結果、唾液の代替材料として濃度1%程度のPVA系糊が適することが分かった。

Key words: 結城紬, 手つむぎ糸, 唾液, 代替材料, PVA系糊

1 はじめに

結城紬は、真綿から手でつむいだ糸を原料とし、緋の模様を付けるときは手括りで行い、地機で製織することを特徴とする伝統的な絹織物である。国の重要無形文化財、伝統的工芸品に指定され、ユネスコ無形文化遺産に登録されている¹⁾²⁾。

原材料となる手つむぎ糸は、真綿から手でつむぎ唾液をつけて固めることで製作される。唾液の使用は伝統的な方法であるが、衛生面や唾液の個人差等の課題がある。特に最近の感染症対策の影響による指導の難しさも課題の一つとして挙げられる。重要無形文化財の指定要件の一つである糸つむぎ技術は、真綿から手で糸をつむいでいくことであり、糸を固める材料は唾液に限定されていない。コロナ禍における感染症対策として、展示会等の実演や糸つむぎ講習会での糸つむぎでは、唾液に替えて水を使用している。しかしながら、水には粘着成分が含まれないため、つむいだ糸は形状や強度にむらがあり、結城紬の生産には不向きとされている。

本研究では、現代生活に即し、安全で質の高い手つむぎ糸の生産を行うため、唾液の代替材料の検討及び試作した手つむぎ糸と布の評価を行った。

2 研究の方法

2.1 唾液代替材料の選定

比較のベースとなる唾液のほか、唾液の代替材料として3種類の材料を選定して、2名の糸取り技術者により手つむぎ糸を製糸した。使用した材料は次のとおり。

*栃木県産業技術センター 絨織物技術支援センター

- (1) 唾液
- (2) 水
- (3) 小麦粉糊（日清製粉㈱「ニッポンたけ」）

※結城紬産地で手つむぎ糸の糊付け工程で使用している。通常の下糊付け工程では濃度2.4%相当が使用されている³⁾⁴⁾。

- (4) PVA系糊（三菱化学㈱「ゴーセノール」）

※結城紬産地で製織時のたて糸用糊剤として使用している。通常は濃度3%相当が使用されている。

なお、代替材料として検討した小麦粉糊とPVA系糊の濃度を表1に示す。

表1 手つむぎ糸の糊材及び濃度

糊剤名	糊剤の濃度				
PVA系糊	0.5%	0.8%	1.0%	1.2%	1.5%
小麦粉糊	1.5%	2.0%	2.4%	3.2%	4.0%

2.2 手つむぎ糸の評価試験方法

2.2.1 手つむぎ糸の引張強さ試験

各条件で試作した手つむぎ糸の強度を比較検討するため、万能材料試験機（インストロン 5569 型）を用いて、JIS 試験方法「JIS L 1095:一般紡績糸試験方法単糸引張強さ及び伸び率」に準拠して実施した。試験条件は次のとおりとした。

- (1) つかみ間隔 200 mm
- (2) 試料長さ 300 mm
- (3) 引張速度 200 mm/min
- (4) 試験回数 30 回(材料の種類・濃度ごと)

全試料の織度測定を行い、試験結果を 100D(デニール)あたりの N (ニュートン) で表記した。

2. 2. 2 手つむぎ糸の表面観察

各条件で製作した手つむぎ糸の表面をデジタルマイクロスコープ (ハイロックス RH-2000) で観察し、糸のまとまり状態を検証した。

2. 2. 3 糸つむぎの作業性評価

2 名の糸取り技術者から各条件の手つむぎ糸を製糸する過程の作業性を調査し、評価した。

2. 3 下拵え作業・製織作業の糸状態

2. 3. 1 精練・染色作業の影響

2. 2 の結果を踏まえ、小麦粉糊と PVA 系糊の適する濃度をそれぞれ一つずつ選定し、水と唾液を含めた 4 つの材料で手つむぎ糸を製糸し、下拵え作業 (精練工程、染色工程、糊付け工程) の作業性及び糸の状態等について検証した。

なお、染色条件は、以下のとおりとし、製糸した糸をたて糸とよこ糸に分けて同浴で染色した。

たて糸：ラナセットブロン B 0.5%

よこ糸：イルガラブラック 0.5%

2. 3. 2 糊付け工程の影響

2. 3. 1 に引き続き、糊付け工程における作業性と糸の固さについて検証した。

2. 3. 3 下拵え作業の影響

手つむぎ糸の製糸に使用する材料の違いが、下拵え及び染色工程における糸の品質に及ぼす影響を調べるため、染色後及び糊付け後の糸の表面状態をデジタルマイクロスコープで観察するとともに、測色計を用いて染色後と糊付け後の糸の色彩 L*, a*, b* の測定を行い、その色差 ΔE^*ab を求めた。

2. 4 製織した布表面の評価

2. 4. 1 製織状況及び結果

各手つむぎ糸を用いて 4 種類の評価用布を製織し、その製織状況及び製織結果について検証した。

2. 4. 2 製織した布の堅ろう度試験

糊剤が結城紬生地品質に及ぼす影響を調べるため、各条件の布について、耐光試験及び染色摩擦試験を行った。耐光試験は、紫外線カーボンアーク型耐光試験機 (スガ試験機 (株) 製 U48AU) を用いて JIS L 0842:2021 (紫外線カーボンアーク灯光に対する染色堅ろう度試験方法) で 4 級相当の 20 時間の照射を行い評価した。染色摩擦試験は、染色摩擦堅ろう度試験機 (大栄科学精器製作所製 RT-200) を用いて JIS L 0856:2013 (摩擦に対する染色堅ろう度試験方法) を用いて行った。

3 結果及び考察

3. 1 手つむぎ糸の評価試験

3. 1. 1 手つむぎ糸の引張強さ試験

各手つむぎ糸の引張強さ試験の結果を図 1 に示す。

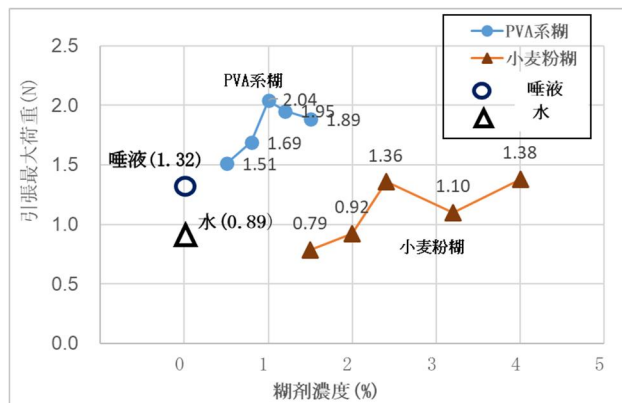


図1 手つむぎ糸の引張最大荷重

小麦粉糊、PVA 系糊の濃度と引張最大荷重の関係には、ばらつきがあるが、糊剤濃度の高さに応じて引張最大荷重が高くなる傾向を示した。唾液由来の糸は 1.32 (N)、水由来の糸は 0.89 (N) となり、小麦粉糊由来の糸は濃度 4.0% のとき 1.38 (N) と最大となった。PVA 系糊由来の糸は濃度 1.0% で 2.04 (N) と最大となり、全ての条件で最大となったが、ばらつきが原因でより濃度が高い条件を上回った。ばらつきの原因は、手つむぎ糸形状の不安定さに起因すると考えられる。

引張最大荷重について、糊剤使用の糸は、小麦粉糊の濃度 1.5% と 2.0% を除き、唾液使用の糸よりも強度が高かった。

3. 1. 2 試作した糸の表面観察

各手つむぎ糸の表面をデジタルマイクロスコープで観察した結果を図 2 から図 5 に示す。

小麦粉糊、PVA 系糊ともに濃度が高くなるにつれて毛羽立ちが少なくなり、小麦粉糊濃度は 2.4% 程度、PVA 系糊濃度は 1.0% 程度から唾液と同程度となった。また、水で製作した糸は、まとまりが弱く毛羽立ちが見られた。唾液による本来の手つむぎ糸は毛羽立ちが少なかった。

表面観察の結果、糸のまとまりについては、水由来の糸は乾燥後に解れて膨らむが、糊剤の濃度が高い場合は唾液以上のまとまりとなった。

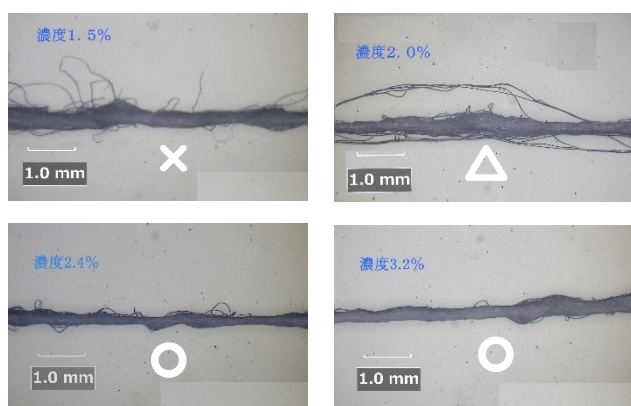


図2 小麦粉糊使用（4例）

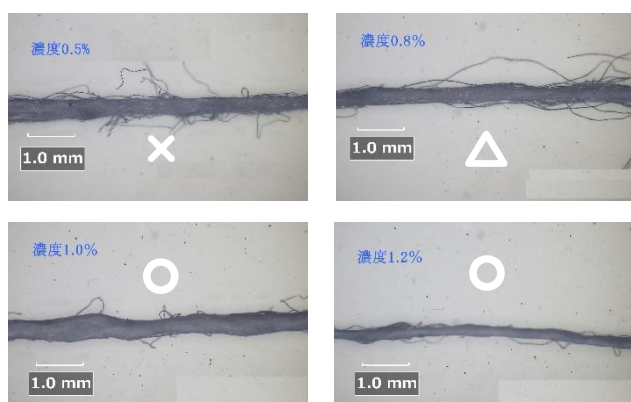


図3 PVA系糊使用（4例）

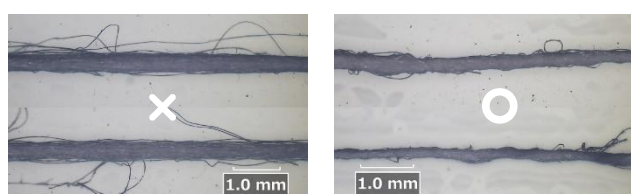


図4 水使用

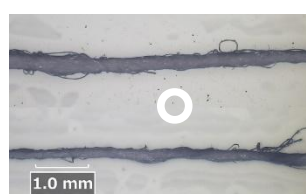


図5 唾液使用

3. 1. 3 手つむぎ糸の作業性評価

各手つむぎ糸の製糸過程における糸取り技術者の感想は表2のとおりであり、以下のことが分かった。

- ① 唾液使用の場合が最も動作がスムーズにでき、潤滑も良く、製糸しやすい。
- ② 糊剤は製糸する際に指がべたつき、真綿を固くするため、濃度は低い方が望ましい。
- ③ 小麦粉糊は、数十分で沈殿が始まり、作業中に攪拌が必要となり、手間が増える。
- ④ 製糸動作では適度な潤滑性を有し、べたつきを抑制する必要がある、小麦粉糊は2.4%程度、PVA系糊は1.0%程度までが適切と思われる。

なお、糸の毛羽立ちやまとまり不足（強度不足に繋がる）はボッチ揚げ作業に支障が生じるため避ける必要がある。検討の結果、ボーダーラインが小麦粉糊濃度は2.4%程度、PVA系糊濃度は1.0%程度と分かった。

糸のまとまり、強度及び作業性を総合すると、手つむ

ぎ糸の製糸する際の適する糊剤濃度は、小麦粉糊が2.4%、PVA系糊が1.0%程度であることが分かった。

表2 各材料における糸つむぎの作業性

材料名	糸つむぎ者の感想
唾液	<ul style="list-style-type: none"> ・適度な水分量で、糸がまとまりやすい。(○) ・指から糸が離れやすく、べたつきがない。(○)
水	<ul style="list-style-type: none"> ・糸を挟んでなでる動作時に、引っかかる。(潤滑性不良)(×) ・真綿を解す動作の時に真綿に水が付いてしまうと、糸を引くときに摩擦抵抗が増して作業性が悪い。(×) ・糸の乾燥後の膨らみや毛羽立ちが目立つ。(×) ・水を多めに付けると滑りが悪く、引いた結果玉状になりやすい。(×) ・膨らんだ糸がボッチ揚げの時に糸絡みになりやすい。(×)
小麦粉糊	<ul style="list-style-type: none"> ・糊剤が沈殿しやすく、定期的な攪拌が必要となる。(×) ・唾液でとった糸より固くパリッとする。(×) ・ボッチ揚げの際、糸絡みがなくても、糸がくっついて出てくることがある。(×) ・真綿を解すときに真綿に付くと、固まって引き出しにくくなる。(×) ・指につけるとヌルッとしていて、長時間の作業は気持ちのいいものではない。(×)
PVA系糊	<ul style="list-style-type: none"> ・指先に糊剤を小まめに付けても乾燥が早く、糸をなでる動作での滑りが悪くなりやすい。(×) ・他の材料に比べて乾いた後の糸が固くなる。(×) ・糊剤が湿っているうちは滑りやすく、糸のまとまりが良かった。(○) ・周りの綿に糊剤が付いてしまうと、固まって引き出しにくくなる。(×)

3. 2 下拵え作業・製織作業の糸状態

3. 2. 1 精練・染色作業の影響

各材料による手つむぎ糸の精練・染色工程の状況を表3に示す。唾液以外の条件では欠点を確認できた。

表3 精練・染色工程の状況

材料	精練工程	染色工程
唾液	○ 問題なし	○ 問題なし
水	○ 問題なし	△ 染着時間が長くなる傾向
小麦粉糊	△ 白濁、洗浄に影響	△ 染着時間が長くなる傾向
PVA系糊	△ 白濁、洗浄に影響	△ 着色濃度が小さい傾向

なお、糸の状態、唾液を基準に各材料との色差を分光測色計（コニカミノルタジャパン製 CM-5）で測定したところ、PVA系糊（ ΔE^*ab 0.81）＜小麦粉糊（ ΔE^*ab 1.48）＜水（ ΔE^*ab 2.79）の順に色差があったが、その値が比較的小さく、材料による染色への影響は少ないと判断できる。

3. 2. 2 糊付け工程の影響

糊付け工程における作業性と糸の固さ状態を表4に示す。

糊付け工程については、4つの材料による作業性に大きな差はなかったが、糊付け後の乾燥状態では、小麦粉糊及びPVA系糊を使用した糸は若干固めになることが分かった。

表 4 糊付け工程の作業性と糸の固さ（作業者の主観）

材 料	作 業 性	糸 の 固 さ
唾液	○ 通常通り	○ 通常通り
水	○ 通常通り	○ 通常通り
小麦粉糊	○ 通常通り	△ 唾液より固め
PVA系糊	○ 通常通り	△ 唾液より固め

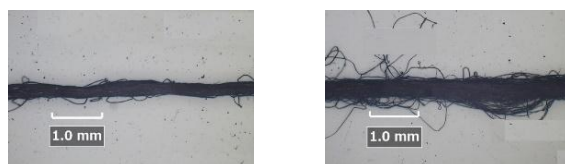
3. 2. 3 下拵え作業の影響（表面観察）

染色後及び糊付け後の糸の表面状態をデジタルマイクロスコップで観察した結果を図 6 から図 9 に示す。

- ・唾液を使用した糸よりも、糊剤を使用した糸のほうが糸のまとまりを維持する様子が分かった。
- ・水を使用した糸は、糸のムラが多く、糸のまとまりを維持できない様子が分かった。
- ・染色後の糸は、糊が精練で失われたため、糸が膨らんで太くまとまって見えるが、糊付け後は、糊が付くため糸が細くまとまる様子が分かった。



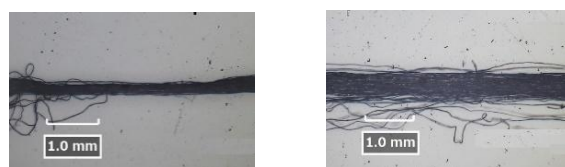
〔下糊付け後〕 〔染色後〕
図 6 水を材料として製作した糸



〔下糊付け後〕 〔染色後〕
図 7 唾液を材料として製作した糸



〔下糊付け後〕 〔染色後〕
図 8 小麦粉糊を材料として製作した糸



〔下糊付け後〕 〔染色後〕
図 9 PVA 系糊を材料として製作した糸

3. 2. 4 下拵え作業の影響（測色）

染色後と糊付け後の手つむぎ糸の色差を測定した結果を表 5 に示す。

表 5 染色後・糊付け後の色彩と色差

糸区分		染色後			糊付け後			色差 (糊付け後-染色後)
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	ΔE^*ab
唾液	経糸	44.45	4.91	5.69	42.57	5.42	6.03	1.98
	緯糸	39.68	-1.92	-3.54	38.66	-1.89	-3.6	1.02
水取り	経糸	46.58	5.27	5.98	40.27	5.21	5.66	6.32
	緯糸	35.82	-1.81	-3.35	40.87	-2.11	-3.73	5.07
小麦粉糊	経糸	50.95	5.79	6.27	41.14	5.47	5.71	9.83
	緯糸	39.35	-2.09	-3.84	43.47	-2.21	-3.58	4.13
PVA系糊	経糸	47.54	5.05	5.85	44.11	5.3	6.05	3.44
	緯糸	34.65	-1.74	-3.62	38.65	-1.95	-3.92	4.02

各糸の色彩については若干の差が現れたが、肉眼での違いは感じられなかった。

染色後の同一素材に糊付けを施した場合の色差については、比較的良好な結果となった。色差は、唾液に次いで数値が低い PVA 系糊が望ましい結果となった。

3. 3 製織した布表面の評価

3. 3. 1 製織状況及び結果

評価用布の製織時の状況及び結果を表 6 に示す。

唾液や小麦粉糊、PVA 系糊では、たて方向に 30cm 製織した結果 2～8 本の糸切れを生じたが、通常の結城紬の状況と変わらない。水由来の糸で製織した場合は、下拵え段階では問題なかったが、製織段階では、毛玉になって糸切れすることが多かった。

表 6 製織状況及び結果

材料	製織作業性（作業者の主観）	糸切れ回数	毛羽立ち
唾液	・たて糸が少し白っぽく見える。(△) ・織物としての欠陥はなし。(○)	4本/30cm(○)	通常通り(○)
水	・たて糸が毛玉になりやすく、細くなって切れやすい。(×)	60本/30cm(×)	多い(×)
小麦粉糊	・特に支障なし。(○)	8本/30cm(○)	通常通り(○)
PVA系糊	・たて糸がほとんど切れなかった。(○)	2本/30cm(○)	通常通り(○)

3. 3. 2 各条件で製作した糸による製織結果

図 10 に 4 条件由来の手つむぎ糸で織り分けた布を示し、図 11 に水由来の布を拡大した写真を示す。

水由来の糸をたて糸に使用した部分が白味を帯びて見える。これは、水由来のたて糸が製織過程で、篋打ちの摩擦力により毛玉や毛羽が多くなり、製織表面の色彩に影響を及ぼしたためと考えられる。

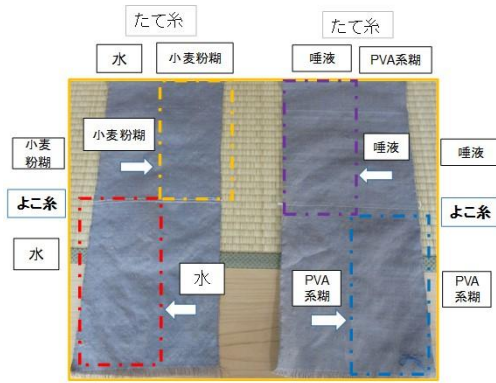


図 10 4 条件で織り分けた布

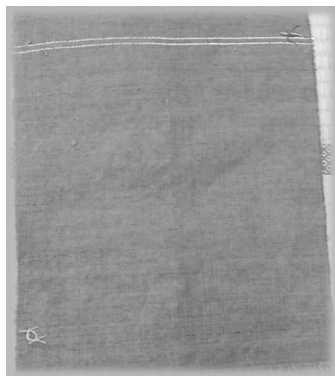


図 11 水由来の布（左半分）

3. 3. 3 製織した布の堅ろう度試験

各条件の布について、耐光試験及び染色摩擦試験の結果と、耐光試験前後の色差⁵⁾を表7に示す。

表 7 製織した布の染色堅ろう度試験結果

試料名	耐光試験 (20時間照射)		染色摩擦試験	
	判定	色差 ΔE*ab	乾燥 (たて方向)	湿潤 (たて方向)
唾液	4級未満	2.59	5	4
水	4級未満	3.16	5	4
小麦粉糊	4級未満	2.56	5	4
PVA系糊	4级以上	1.48	5	4-5

耐光試験では、PVA 系糊由来の糸による布が耐光試験 4 級以上と最も良好であり、他の 3 種類は 4 級未満であった。この理由は、PVA 系糊由来の布は耐光試験によるダメージを受けやすい毛羽が比較的少なかったためと考える。色差は、PVA 系糊由来の布は比較的少なく、毛羽立ちの量が生地表面の色差に影響したと考えられる。

染色摩擦試験結果はいずれも良好であった。

総合すると製織した布については、次のことが分かった。

○水由来の布は製織時にたて糸が傷みやすく、白味を帯びやすい。

○PVA 系糊由来の布は毛羽が少なく、糸つむぎ・下拵え・製織を一貫して糸をまとめる作用が維持される。

○染色摩擦試験では、全て 4 級以上であり、色落ちの問題がない。

○耐光試験前後の布地の色差は、PVA 系糊由来の布が最も少なく、色あせの問題がない。

4 おわりに

唾液に代わる材料の検討及び試作した手つむぎ糸の評価を行ったところ、以下のことが分かった。

- (1) 手つむぎ糸の強度とつむぎ易さにはトレードオフの関係があり、唾液使用の手つむぎ糸相当の強度を有し、作業に支障のない代替材料は、小麦粉濃度では 2.4%程度、PVA 系糊濃度では 1.0%程度である。特に PVA 系糊の強度は高い。
- (2) 水は唾液に比べて潤滑性が少なく製糸しづらく、乾燥後の強度が低い。
- (3) 代替材料の適切な条件では精練・染色性を阻害する要因は認められないが、糸つむぎ時に糊の濃度が高いと指がべたつき、真綿に付くと糸つむぎが難しくなる。
- (4) 各条件の糸を用いて製織した布の染着性を比較すると、PVA 系糊由来の布にやや優位性がある。

当研究の結果から、唾液代替の材料として PVA 系糊濃度 1.0%程度の条件が最も適する結果となったが、研究過程での個人差や個体差の影響が考えられるため、引き続き、多くの糸つむぎ者からの情報収集を行った上で、さらに最適条件を求めることが必要と考える。

参考文献

- 1) 奥澤武治：“日本シルク学会誌”，29, 5-11, (2021)
- 2) 本場結城紬振興協議会編：“本場結城紬産地振興計画（令和 3 年度～令和 7 年度）”，(2021)
- 3) 堀江昭次，太田仁美：“栃木県産業技術センター研究報告”，No.15, 86-89, (2018)
- 4) 堀江昭次，太田仁美，石井優利：“栃木県産業技術センター研究報告”，No.16, 45-48, (2019)
- 5) 吉葉光雄，太田仁美，渡辺智文：“栃木県産業技術センター研究報告”，No.14, 62-65, (2017)

経常研究

県内産原料を用いた耐熱土及び耐熱釉薬の試作開発（第1報）

磯部 大我* 星 佳宏* 大和 弘之*

Development of Clay and Glaze for Heat-resistant Pottery using Raw Materials from
Tochigi Prefecture (1st Report)
ISOBE Daiga, HOSHI Yoshihiro and YAMATO Hiroyuki

県内産原料を用いた耐熱粘土及びペタライトの代替としてモミ灰を用いた安価な耐熱粘土の開発を行った。県内産原料として益子すいひ土を用い、ペタライト及び木節粘土を所定量配合した粘土を、1200℃～1220℃の温度域で焼成したものは、熱衝撃試験で割れ等の発生はなく、吸水率、熱膨張係数ともに一般的な耐熱陶器に必要とされる値を満たした。一方で、モミ灰からシャモットを作製し益子すいひ土に配合した粘土は、実用的な成形性がなく、焼成温度に関わらず耐熱粘土に要求される収縮率及び吸水率を満たすものではできなかった。

Key words: 耐熱粘土, 低熱膨張, 耐熱衝撃性, ペタライト, モミ殻灰

1 はじめに

陶器販売店において、土鍋やごはん鍋などの耐熱製品は、消費者からの一定のニーズがあり、季節を問わず販売されている。益子町を中心とした販売店、国内外から訪れる消費者は、陶芸作家の個性的な作品を期待している傾向にある。このようなニーズがあるにもかかわらず製陶事業者は耐熱製品の製造を敬遠している。この理由は製造技術、原材料、安全性に課題があるためである。耐熱製品は、普通の陶器とは粘土も釉薬も焼き方も違い、粘土に配合し製品の割れを防いでくれるペタライト長石も高価である。また県内産の原料を用いた耐熱粘土の調製法が確立しておらず、製造もされていない。製陶事業者が直火で割れない安全な製品のために研究、試験することは多くの時間や経費が必要であり、技術面でもハードルが高い。消費者に求められていても耐熱製品の製造が難しい理由はここにある。

そこで、本研究では県内産原料を用いた安全な耐熱粘土及び、モミ灰を原料に用いた安価な耐熱粘土の開発を行った。

2 研究の方法

2.1 ペタライトを用いたリチア系耐熱粘土の開発

耐熱粘土の原材料として、益子すいひ土（益子焼協同組合・栃木県産）、木節粘土（岐阜県産）、ペタライト #52, #80, #200（ジンバブエ産）を用いた。木節粘

土は可塑性に優れ、配合することで可塑性が改善される。ペタライトは、40%程度坯土に配合することで低熱膨張化することが知られており¹⁾、本試験においても同様に行った。

益子すいひ土は他産地の粘土に比べて砂分が多く、ペタライトは非可塑性の粉末であることから配合により可塑性が悪くなる。このため益子すいひ土に対し、ペタライトの粒度、木節粘土の配合割合を変えて調合し、ロクロ成形、タタラ成形の試験を行い、可塑性を評価した。

最も益子すいひ土の使用感に近い配合を用い、実際の使用に近い鍋型試験体と、各種試験用としてタイル型試験体を作製した。温度を変えた焼成試験に供し、目視による割れ歪みの確認、熱衝撃試験、煮沸吸水試験を行った。熱衝撃試験は、実際の使用に近い条件とするため2.95 kW相当の家庭用ガスコンロを用い、直火で温度差350℃として実施した。煮沸吸水試験は、乾燥機で100℃を3時間保持、室温まで自然空冷し重量測定、乾燥重量とした。次に水中で2時間煮沸後、12時間以上浸漬し、水分を拭き取り重量測定、飽水重量として吸水率を計測した。さらに、熱膨張係数の計測（NETZSCH Japan TD-5000S）、X線回折測定（樹リガク UltimaIV）を行った。

また、石膏型鑄込み成形用泥漿においては、粘土に水と、解膠剤（水ガラス）を加える必要がある。ロクロ成形用と同様の配合を用いて、水と水ガラスの添加量を検討した。鑄込み成形のためには、水分量はできる限り少ない方が優れているため、少しずつ水を加えながら練り

* 栃木県産業技術センター 窯業技術支援センター

合わせ、適切な水分量を見出した。水ガラスの添加量は、自作の粘度計を用い、100mlの流出時間を測定することで泥漿の解膠状態を推定した。調製した泥漿を用いて、鍋型試験体を成形し、鑄込み時間、着肉量、排泥及び脱型の良否を評価した。

2.2 モミ灰を用いた非晶質シリカ系耐熱粘土の開発

安価な耐熱粘土として、ペタライトに代わる原料として、非晶質シリカが低熱膨張²⁾であることに注目し、モミ殻灰が非晶質であることから、非晶質シリカ系耐熱粘土を検討した。原材料には、益子すいひ土（益子焼協同組合・栃木県産）、モミ灰（JA いみず野・富山県産）、木節粘土（岐阜県産）、ペタライト#200（ジンバブエ産）を用いた。モミ殻灰は、灰にする焼成温度の違いによって成分に違いが生じるため、安定したモミ灰非晶質シリカを製造しているJA いみず野・富山県産を使用した。ペタライトは、モミ灰の中で分散しやすいように粒度の小さい#200を使用した。

モミ灰は植物の灰であるため、4%程度の炭酸カリウムの他に、微量なアルカリ、アルカリ土類金属、その他の金属が含まれている。カリウムやナトリウムなど水溶性の炭酸塩は焼結に影響するため水洗によって除く必要がある。また、モミ灰は反応性の高いシリカ原料であることが知られている。そこで粗粒とするため、フルイ40目（#34）を通す程度に粉碎する。予備実験から、直接粘土に配合すると可塑性が悪くなるため、モミ灰をシャモットにすることを考えた。シャモットとは、粘土を焼いて粉碎した原料で、坏土に配合すると、乾燥時の変形を防ぎ、焼成時の収縮を抑える効果がある。

モミ灰シャモットの作製方法は、木節粘土をバインダーとして配合し、まとめ上げ、煅焼する。これを粉碎して粒度を整えることを考えた。煅焼温度は結晶水が抜ける750℃と、焼結が始まる頃と考えられる900℃の2条件で行った。シャモットの粒度は粗粒にするため、フル

イ40目（#34）とした。作製したモミ灰シャモットのX線回折測定を行い非晶質であるかを確認した。

モミ灰・非晶質シリカ耐熱粘土の作製及び評価は、リチア系耐熱粘土と同様の手順で行った。

3 結果及び考察

3.1 ペタライトを用いたリチア系耐熱粘土の開発

リチア系耐熱粘土はペタライト40%程度の添加により低熱膨張化できることが知られている。入手可能なペ

表1 ペタライトを用いた耐熱粘土の配合

(%)

試料	益子 すいひ土	木節 粘土	ペタライト		
			#52	#80	#200
PC1	60	—	40	—	—
PC2	50	10	40	—	—
PC3	40	20	40	—	—
PC4	30	30	40	—	—
PC5	30	30	—	40	—
PC6	30	30	10	30	—
PC7	30	30	20	20	—
PC8	30	30	—	30	10

タライトには#52、#80、#200があるが、坏土との組み合わせによる成形性への影響について検討した。表1に、検討した配合割合を示す。ロクロ成形による成形試験を行った結果、#52ペタライトを配合したものはザラつきがあり、ロクロ成形時のコテ当て作業に支障があった。#200ペタライトを配合したものは、滑らかではあるが腰が弱くなった。#80ペタライトを配合したものは最も益子すいひ土の使用感に近かった。このため、PC5の配合を最適とし、以後の評価試験に供した。

表2 温度を変えた焼成試験結果

焼成 温度 (℃)	鍋型試験体		タイル型試験体				
	割れ・歪み	熱衝撃試験*	乾燥 収縮率(%)	焼成 収縮率(%)	全収縮率 (%)	吸水率(%)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
1180	なし	○	3.5	3.1	6.5	8.1	2.3
1200	なし	○	3.5	3.6	7.0	5.4	2.6
1220	なし	○	3.5	4.1	7.5	3.0	2.5
1250	なし	△	3.5	4.6	8.0	1.7	2.9
1280	底にブク有	×	3.5	3.6	7.0	0.8	3.9

*熱衝撃試験：○変化なし、△小さなひび割れ、×割れ

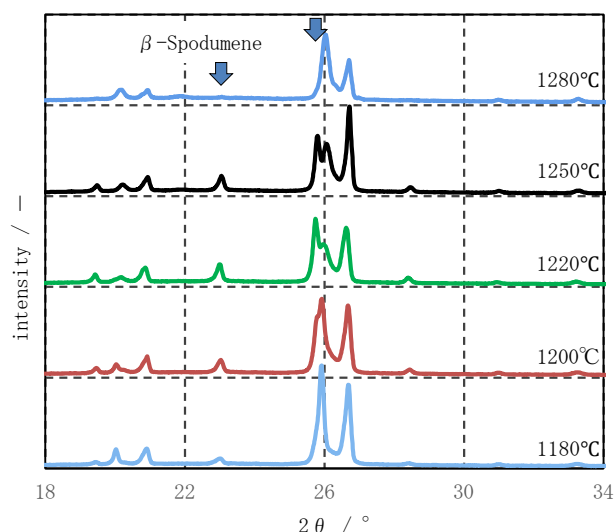


図1 温度を変えて焼成したPC5粘土のX線回折パターン

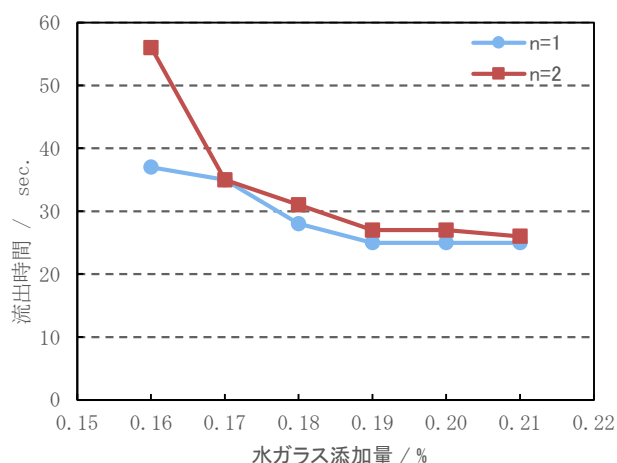


図2 泥漿の粘度変化

次に、鍋型試験体、タイル型試験体を作製し、温度を変えた焼成を行った。その結果を表2、X線回折パターンを図1に示す。実際に直火で使用するためには熱衝撃試験が重要であるが、その結果、1180℃～1220℃において、割れ、ひび等の問題は起こらなかった。しかし1180℃では焼結が弱いため水の染みが発生した。1250℃では内側に小さなひびが入ったが、この原因は吸水率が1.7%と低く、加熱による熱衝撃を消費できるような気孔が少ないためと考えられる³⁾⁴⁾。1280℃では大きく割れが入った。この原因は、X線回折パターンが示すように、1250℃まで生成されていた低熱膨張結晶 β -Spodumene 固溶体が、1280℃では消失していることにあると考えられる。また、熱膨張係数においては、1220℃以下で $2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以下であり、一般的な耐熱陶器に必要とされる $3.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以下を満たしている。以上の結果から、適した焼成温度域は、1200℃～1220℃であると考えられる。

次に、PC5の配合を用いた石膏型鑄込み成形用泥漿を検討した。乾燥させた原料を調合し、水を加えて坏土がクリーム状になる水分量を求めたところ、水分量30%程度であることが分かった。この泥漿に対し、解膠剤として水ガラス（珪酸ナトリウム）の添加量を検討した結果を図2に示す。泥漿は完全に解膠させると石膏型への着肉が悪くなることから、完全に解膠する少し手前が良いとされる⁵⁾。実験の結果、0.17%～0.19%が最適であると考えられる。また、この配合における比重を計測したところ、1.9程度であり、土鍋など肉厚な製品の泥漿として適していると言える。また、石膏型鑄込み成形試験において、着肉、排泥、脱型ともに良好であった。

3. 2 モミ灰を用いた非晶質シリカ系耐熱粘土の開発

表3に示したモミ灰、木節粘土、ペタライトの配合割合を変えた8種類のシャモットを作製した。モミ灰シャモットの製作にあたり、木節粘土の粘性によってモミ灰を練り上げることができると予測したが、まとめることが困難だった。このため、CMCをバインダーとして用いたところ、練り上げることができた。乾燥後、結晶水が抜ける750℃と、焼結が始まると考えられる900℃で焼成、粉碎したモミ灰シャモットを、X線回折測定に供した。結晶構造に大きな違いは認められなかった。

表3 モミ灰シャモットの配合

(%)

試料	ペタライト#200	木節粘土	モミ灰
PS1	20	30	50
PS2	16	24	60
PS3	12	18	70
PS4	8	12	80
MS1	—	50	50
MS2	—	40	60
MS3	—	30	70
MS4	—	20	80

表4 モミ灰シャモットを用いた耐熱粘土の配合

(%)

試料	益子 すいひ土	木節 粘土	シャモット(750℃)			
			PS1	PS4	MS1	MS4
CPS1	20	20	60	—	—	—
CPS4	31.25	31.25	—	37.5	—	—
CMS1	20	20	—	—	60	—
CMS4	31.25	31.25	—	—	—	37.5

表5 温度を変えた焼成試験結果

試料	焼成温度(℃)	割れ・歪み	乾燥収縮率(%)	焼成収縮率(%)	全収縮率(%)	吸水率(%)
CPS1	1080	大きな歪みなし	3.0	8.3	11.0	20.3
	1200	歪みあり	3.5	12.4	15.5	0.7
	1280	歪みあり	3.5	膨化	—	18.5
CPS4	1080	歪みあり	4.0	6.3	10.0	23.6
	1200	歪みあり	4.5	12.0	16.0	6.8
	1280	歪みあり	4.5	膨化	—	16.6
CMS1	1080	大きな歪みなし	3.0	6.2	9.0	25.0
	1200	変形少なめ	3.5	14.0	17.0	6.4
	1280	歪みあり	3.5	膨化	—	13.1
CMS4	1080	大きな歪みなし	4.0	5.2	9.0	25.8
	1200	歪みあり	4.5	11.0	15.0	8.7
	1280	歪みあり	4.5	膨化	—	15.7

750℃と比較すると 900℃の方がより炭素が抜けているため白く、焼結が進んでいるため固い。このため、砕きやすさのために 750℃焼成のシャモットを試験に供することとした。

成分比を大きく振った4種類のシャモットを選び、粘土素地への配合、焼成試験に供した。なお、モミ灰シャモットは乾燥収縮、焼成収縮を低くし、成形物の変形を防ぐ目的で、比較的粗粒である40目のフルイを通す程度に粉碎した。モミ灰・非晶質シリカ系耐熱粘土の予備実験から、シャモットの成分比に関わらず、坯土に対するモミ灰の含有率が30%以上で可塑性が悪くなるため、表4の配合にて行った。しかし、実際に土練り、ロクロ成形、タタラ成形で試験体を作製したところ、全ての配合において、可塑性が悪く実用的ではないことが分かった。

可塑性が悪いが、モミ灰シャモットと坯土との反応についての知見を得る目的で、作製した試験体を、温度を変えて焼成した。焼成収縮率の結果は表5の通りである。ペタライトを配合したものはより大きく収縮、変形していて、1220℃以上でガラス化した素地からのガスの発生により膨化が始まっていた。これは、ペタライトの成分であるリチウムによって焼結が促進されたと考えられる。また、モミ灰シャモットの配合が多い素地の方が、収縮が大きい。これは、シャモットを原因とする空隙が多く存在し⁶⁾、焼結によって空隙が潰されたと考えられる。すべての試験体に共通することは、焼成温度が高いほど歪みや変形が大きい。実用的な焼成収縮率は、6%程度であるが⁷⁾、その条件を満たしているのは、1120℃以下である。しかし焼結が進んでいないため強度に劣る。

煮沸吸水率は、表5の通りである。耐熱陶器では適度な気孔の存在が熱衝撃を消費してくれるため、煮沸吸水率 5～

10%が良いとされている³⁾⁴⁾。しかし、煮沸吸水試験の結果、その条件を満たすのは 1140℃～1180℃以上の試験体であるが、いずれも焼成収縮率が10%以上であり、歪みや変形が起こりやすく、実用的ではない。

これらの試験体において、この結果をもたらした原因を調査、物性を評価するため、熱膨張率測定、X線回折測定を行った。モミ灰の坯土への影響を調べるため、ペタライトの含まれていない 1200℃焼成の試験体を選び、熱膨張率を測定した。結果は $5.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、一般的な耐熱陶器の $3.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以下を超えており、直火には耐えることができ

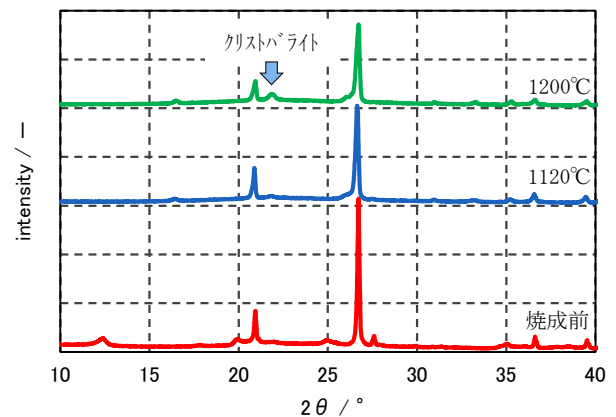


図3 CMS4 粘土の X 線回折パターン

ない。また、焼成前、1120℃及び 1200℃で焼成した試験体を X 線回折により結晶構造の違いを調べた結果を図3に示す。1120℃で高熱膨張結晶であるクristバライトが析出していて、1200℃ではより増加していることが分かる。

以上の結果から、次のような課題が明らかになった。①比表面積が大きく、親水性があるため坯土へ配合したときに可

塑水量が増加し、ブヨブヨして成形性が悪くなる。②焼成時にモミ灰の細孔、空隙が潰れ、焼成収縮が大きくなる。③水洗後も、カリウムが残り、モミ灰非晶質シリカのクリストパライトへの結晶化が起こるため、熱膨張が大きくなる。モミ灰に含まれる炭酸カリウムは水溶性のため、水洗によって除去できると考えられるが、モミ灰を配合した素地の焼成試験において、一般的な陶器よりも100℃程度低い1140℃以上で焼結が進んだ。これは水洗後も残留したカリウム及び微量なカルシウムやナトリウムなどの影響ではないかと推測される。

今後、これらの課題の解決のために、モミ灰の比表面積を減らすことと、カリウムをできる限り取り除く方法の開発などが必要と考えられる。

4 おわりに

県内産原料を用いた、益子すいひ土に近い成形性、焼成呈色を持つ、リチア系耐熱粘土の開発を行った。県内産原料として益子すいひ土 30%、可塑性付与のため木節粘土 30%、低熱膨張化のためにペタライト 40%の配合とし、1200℃～1220℃の温度域で焼成したものは、煮沸吸水率は3%～5%であり、無釉であっても水の染みは少なく、熱衝撃試験において、割れ、ひび割れの発生は認められなかった。次年度は、開発した耐熱粘土に適合する透明釉、乳濁釉、マット釉を開発する予定である。

また、ペタライトに代わる安価な低熱膨張原料を用いた耐熱粘土の開発において、非晶質シリカ原料であるモミ灰の利用を検討した。水洗したモミ灰を粘土と配合、焼成、

粉碎を行い、粗粒モミ灰シャモットとし、これを坏土に対し38～60%配合して焼成試験を行ったが、成形性が悪く、また熱膨張率も要求される 3.0×10^{-6} よりも高い値となった。これらの解決のために、次年度は、粘土に配合する原料の再選定及びモミ灰の前処理方法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 伊藤隆:土鍋 セラミックスアーカイブズ p98 (2009)
- 2) 内山貴文:耐熱粘土原料および耐熱陶磁器 公開特許公報 p5 (2019)
- 3) 鈴木弘茂:窯協 72 [11-2] p95 (1964)
- 4) 丸林良嗣・榎谷幹雄・林茂雄:合成コーディライトを添加した伊賀焼耐熱陶器における透明釉薬の開発とその釉薬を用いた土鍋の試作及び評価 三重県工業研究所 研究報告 No. 40 p99 (2016)
- 5) 樋口わかな:やきものの科学 誠文堂新光社 p63 (2021)
- 6) 井上耕三・原尚道:もみがら灰の加熱条件とその性状 無機マテリアル Vol. 3 p316 (1996)
- 7) 栃木県窯業指導所:窯指ニュース データファイル 56 p2 (2001)
- 8) 佐藤努:粘土基礎講座 I 粘土科学第4巻第1号 p2-5 (2001)
- 9) 素木洋一:わかりやすい工業用陶磁器 技報堂 (1969)
- 10) 社団法人窯業協会編:窯業工学ハンドブック新版 技報堂 (1973)



令和4（2022）年度

栃木県産業技術センター研究報告

第20号

Reports of Industrial Technology Center of Tochigi Prefecture

No. 20 (2023)

発 行 令和5（2023）年8月

発行所 栃木県産業技術センター

〒321-3226 栃木県宇都宮市ゆいの杜 1-5-20

T E L （028）670-3391

F A X （028）667-9430

VERY 
GOOD
LOCAL

とちぎ