

V 經常研究

Ordinary Research

経常研究

加速度センサを用いた工具摩耗推定方法の開発

阿部 雅* 近藤 弘康* 棚原 貴登*

Development of in-Process Tool Wear Monitoring Method by using Accelerometer
ABE Masashi, KONDO Hiroyasu and TANAHARA Takato

切削時の振動を加速度センサで検出し、工具の摩耗状態を把握することを目的とし、加速度センサの設置位置や切削速度を変えたとき、検出される振動にどのような影響を及ぼすか、比較・検討を行った。その結果、加速度センサをテーブルに設置すると、加工中の加速度は被削材の固定状況に影響を受け、加速度センサを主軸に設置すると、加工中の加速度は主軸の振動特性に影響を受けることが分かった。また、摩耗状態把握の精度を低下させる主軸回転数があるため、予め使用する加工機において振動特性を確認する必要があることが分かった。64 チタン圧延材を用いた摩耗試験を行ったところ、主軸に設置した加速度センサで、加工中の工具摩耗状態を終期摩耗へ遷移するまで把握することができた。

Key words: 工具摩耗, インプロセス, 切削力, 加速度センサ

1 はじめに

航空機部品の製造において切削加工のコスト削減が求められている。そのため、工具は寿命限界まで使用することが望ましい。しかし、生産現場では仕上がり面の品質を担保するため、工具の摩耗状態を把握しないまま、十分な余裕をもって工具交換を行っている。

切削加工に用いられる工具であるエンドミルの摩耗状態は、以下の3段階に分類できる。

- ①加工開始直後、切れ刃先端が摩耗する初期摩耗
- ②切削距離に比例して摩耗する定常摩耗
- ③摩耗が急速に進行する終期摩耗

終期摩耗状態に移行する直前までの工具摩耗状態を把握し、工具交換のタイミングを遅らせることができれば、工具の長寿命化と同様にコスト削減の効果が得られると考えられる。

インプロセスで摩耗状態を把握する場合は、摩耗の進行とともに切削力が増大することから、切削動力計で切削力を測定する方法が用いられている。しかし、切削動力計は非常に高価であり、かつ被削材の大きさに制限があることから、生産現場で活用することは困難である。

昨年度の研究において、データ取得ユニット（以下ユニットという。）を開発し、ユニットを加工した際の振動を加速度センサで測定することにより、安価なセンサでも工具の摩耗状態を把握可能であることが分かった¹⁾。

生産現場への適用範囲を広げるためには、製品加工中の摩耗状態をユニット加工無しに把握することが望ましい。そこで本研究では、加速度センサの設置位置と加工中の加速度の関係性及び工具摩耗状態を把握するための切削条件について検討することで、安価な加速度センサを用いて加工中の工具摩耗状態を把握するための条件を明らかにしたので報告する。

2 研究の方法

2.1 加工機

切削加工は5軸マシニングセンタ（DMG 森精機㈱：DMF180、以下加工機という。）を用いた。

2.2 加工工具

工具の振れによって径切込み深さが変化しないよう、スクエアエンドミル（㈱MOLDINO：EPSM4060-PN）の2枚刃のうち1枚をグラインダで削り1枚刃とし、切削速度 200m/min, 1刃送り 0.1mm/tooth, 軸方向切込み 3mm, 径方向切込み 0.1mm, 水溶性切削液下で被削材（NAK80 材）を切削長 30mm まで加工して定常摩耗まで予備摩耗させた後、実験に用いた。

2.3 加速度センサ及び周波数解析方法

加速度センサには電荷出力型の一軸加速度センサ（日本キスラー(同)：Type 8776A50）を使用した。

エンドミル加工では、主軸回転に合わせて刃先が断続的に被削材と接触する際に発生する周波数（以下強制振動という。）及びその整数倍の高調波周波数の振動が生じることが知られている²⁾。周波数解析方法

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

は、昨年度の研究による知見から、加速度センサで取得した信号をフーリエ変換し、第7高調波までの周波数帯でローパスフィルタ処理を行い、さらに逆フーリエ変換した波形のうち、加工開始から1割と終了までの1割を除く、加工時間の8割の区間で最大値のピーク平均を算出し、これを加速度値とした。

2. 4 加速度センサの設置位置の影響

加速度センサの設置位置と加速度の関係を明らかにするため、加工機のテーブル及び主軸に加速度センサを設置し、加工時の振動による加速度を比較検討した。

2. 4. 1 テーブル設置

被削材と加速度センサの距離による影響を明らかにするため、被削材の固定位置を変え、加工時の振動による加速度を測定することとした。被削材（NAK80）をテーブル中心から被削材中心までの距離で左右に600mm固定治具ごと移動し、それぞれの場所で表1に示す切削条件により加工を行った。段取りの模式図を図1に示す。加速度センサはテーブル右端に固定し、送り方向の法線成分を測定した。また、図2に示すとおり、被削材の上面には20mm間隔で溝を施し、被削材内での加工位置による影響も検討した。

表1 切削条件

切削速度 V_c	200 m/min
1刃送り f_z	0.1 mm/tooth
送り方向	Y軸正方向
軸方向切込み a_e	3 mm
径方向切込み a_p	0.1 mm
切削液	水溶性切削液
削りの向き	ダウンカット

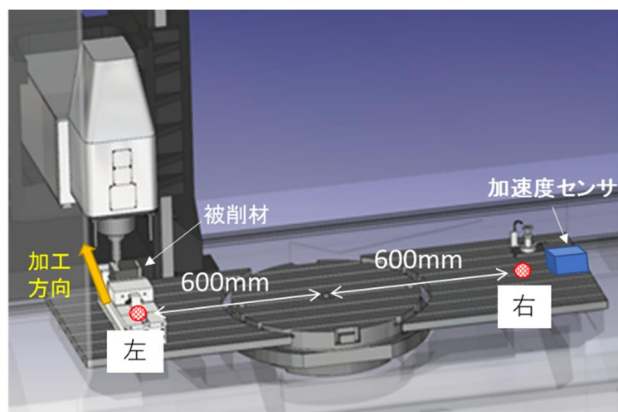


図1 段取り模式図（●：被削材設置位置）

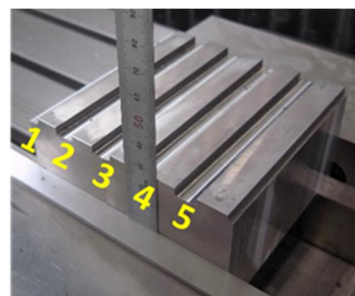


図2 被削材内加工位置

2. 4. 2 加工機主軸設置

被削材の固定状況の影響を受けずに摩耗状態を把握可能か確認するため、加工機主軸のX軸正方向側に加速度センサを設置（図3）し、送り方向の法線成分を測定した。切削条件は表1と同様、被削材の段取り及び上面は図1、2と同様とし、加工を行った。



図3 加速度センサ主軸設置

2. 5 工具摩耗状態把握に適した切削条件

昨年度の研究から、工具摩耗の進行に伴って切削力が増加すること、加工時の加速度と切削力の関係は線形性があることが明らかとなった。したがって、加速度センサを用いて工具の摩耗状態を精度よく把握するためには、加速度と切削力の線形性を評価する決定係数 R^2 値が1（完全なる直線）に近い値の切削条件であることが望ましいと考えられる。そこで表1に示した切削条件のうち、切削速度を50, 70, 75, 100, 150, 200m/min, 径方向切込みを0.1, 0.2, 0.4, 0.6mmとして加工した際の加速度と切削力から、摩耗状態を精度よく把握するための切削条件について検討を行った。

2. 6 工具摩耗状態把握の確認試験

加速度センサで、ユニット加工を行わずに工具摩耗状態の把握が可能かを確認するため、摩耗試験用の被削材を加工した時の加速度及びユニットを加工した時の加速度と切削力を測定し、比較した。

摩耗試験用の被削材は、航空機部品加工を想定して64チタン圧延材（AMS4911）とし、加工工具は2枚刃の

うち1枚をグラインダで削り1枚刃とした新品のスクエアエンドミル（髙橋MOLDINO EPSM4060-PN）を用いて、切削速度 75m/min, 送り速度 0.1mm/tooth, 軸方向切込み 3mm, 径方向切込み 0.1mm, 水溶性切削液下での片削りの摩耗試験を、5軸マシニングセンタで切削長 700mm まで実施した。

3 結果及び考察

3.1 加速度センサの設置位置の影響

3.1.1 テーブル設置

被削材をテーブルの左右において加工を行った時の被削材内加工位置ごとの加速度値を図4に示す。

被削材と加速度センサが遠い（被削材左側設置）場合、被削材内加工位置による加速度値の違いは見られなかった。

被削材と加速度センサが近い（被削材右側設置）場合、遠い場合と比べて距離減衰の影響が少ないため、遠い場合の3倍程度の加速度値となった。また、被削材内加工位置ごとの加速度値は、加速度センサに対して遠くなるほど加速度値が高くなる傾向になった。振動の伝播が距離減衰のみの影響を受ける場合、加工位置が遠くなるほど加速度値は低くなるが、固定治具及びテーブルの振動特性や密着度合いなどの固定状況による影響で、逆の傾向が生じたものと考えられる。

このことから、生産現場では多数個加工や固定治具の移動などで被削材の固定状況が常に同じとは限らないため、生産現場への適用を想定した場合、テーブルに設置した加速度センサでの工具摩耗状態の把握は、困難であると考えられる。

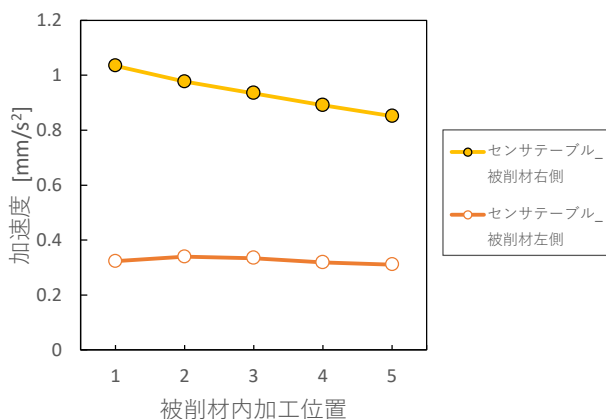


図4 被削材設置位置変更時の被削材内加工位置と加速度 (n=4)

3.1.2 加工機主軸設置

加速度センサを主軸に設置して加工を行った際の被削材内加工位置ごとの加速度値を、前項の結果と併せて

図5に示す。

加速度センサを主軸に設置した場合、加速度センサと加工位置が非常に近いため、加速度センサをテーブルに設置した時よりも得られる加速度値は大きくなっている。また、被削材がテーブルの左右にあってもほぼ同じ値を示したことから、加速度値に及ぼす被削材の固定状況の影響はテーブル設置時よりも小さいと考えられる。しかし、データのばらつきを比較すると、テーブル設置時より主軸設置時の方が大きい（図6）。これは主軸や加速度センサの振動特性によって切削時における強制振動（Vc200の場合176.9Hz）の整数倍以外の振動が生じたことによるものと考えられる（図7）。この現象が低速域でも発生するか確認するため、切削速度を70m/minに下げて再度加工を行ったところ、概ね強制振動（Vc70の場合61.9Hz）の整数倍のみで振動しており（図8）、加速度値のばらつきが減少した（図9）。

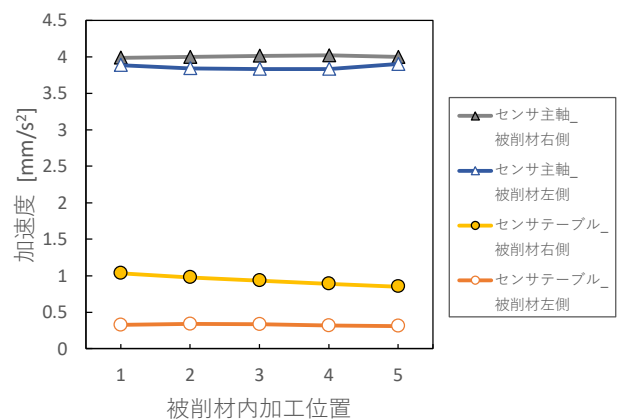


図5 設置位置の違いによる加速度の比較 (n=4)

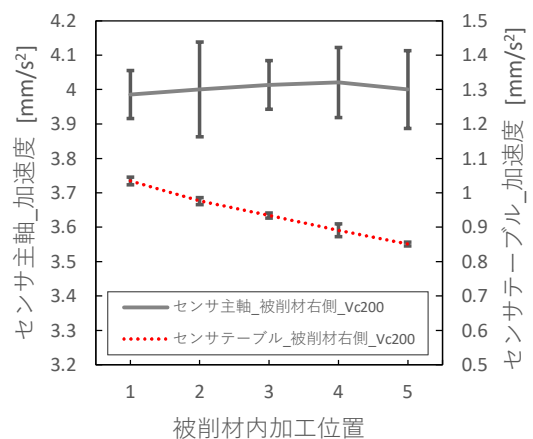


図6 Vc200の加速度値のばらつき (n=4, 誤差範囲±σ)

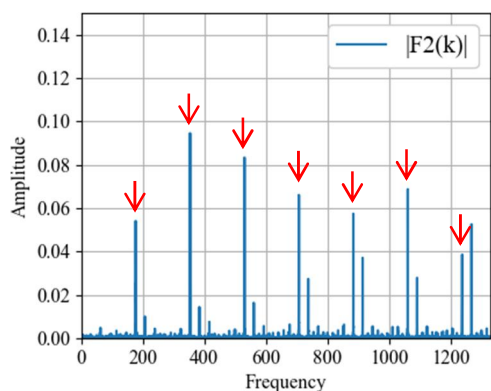


図7 Vc200の加速度波形の周波数解析結果
(矢印は強制振動の整数倍)

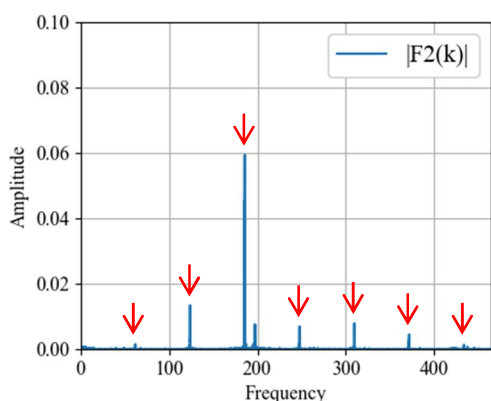


図8 Vc70の加速度波形の周波数解析結果
(矢印は強制振動の整数倍)

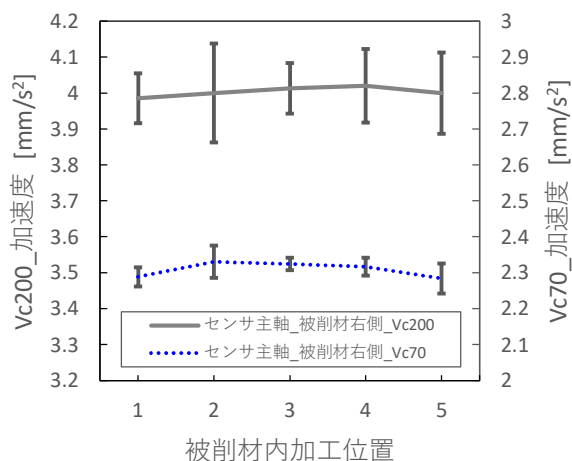


図9 Vc200とVc70の加速度値のばらつき
($n=4$, 誤差範囲 $\pm\sigma$)

3.2 工具摩耗状態把握に適した切削条件

加速度センサを主軸に設置した状態で切削速度と径方向切込みを変え、加工した際の加速度と切削力を図10に示す。

R^2 値が切削速度によって異なることから、加速度と切削力の線形性の悪い条件が存在することがわかる。

また、径方向切込み 0.6mm で加工した際の加速度波形とその周波数解析結果を図11～16に示す。Vc50, 70, 75では概ね強制振動の整数倍のみの振動であるが、Vc100以上では強制振動の整数倍以外の振動が見られたことから、本研究で用いた5軸マシニングセンタにおいては、Vc100以上は摩耗状態把握の精度を低下させる恐れがある。このことから、予め使用する加工機において切削速度を変えた際の振動特性を確認する必要があると考えられる。

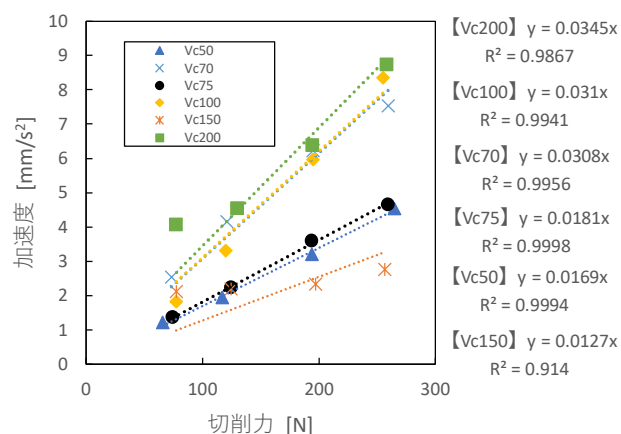


図10 切削条件変更時の加速度と切削力の関係

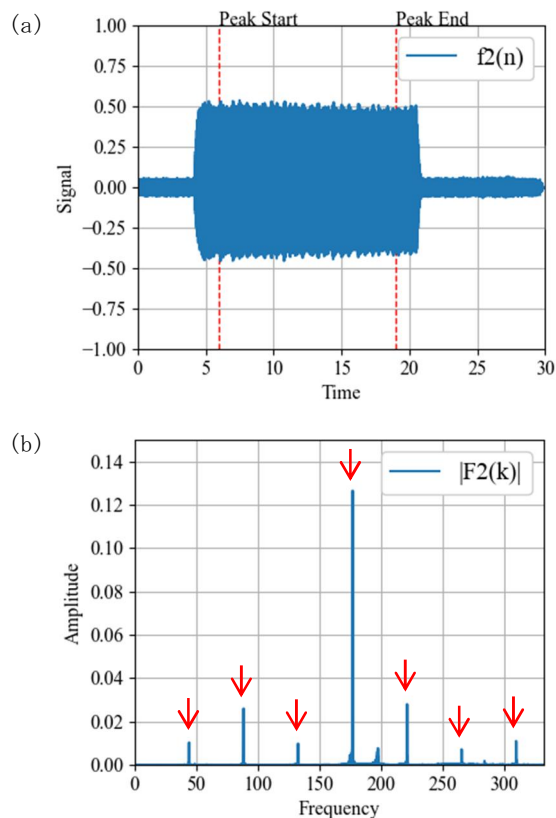


図11 Vc50加工時の(a)加速度と(b)周波数解析結果
(矢印は強制振動の整数倍)

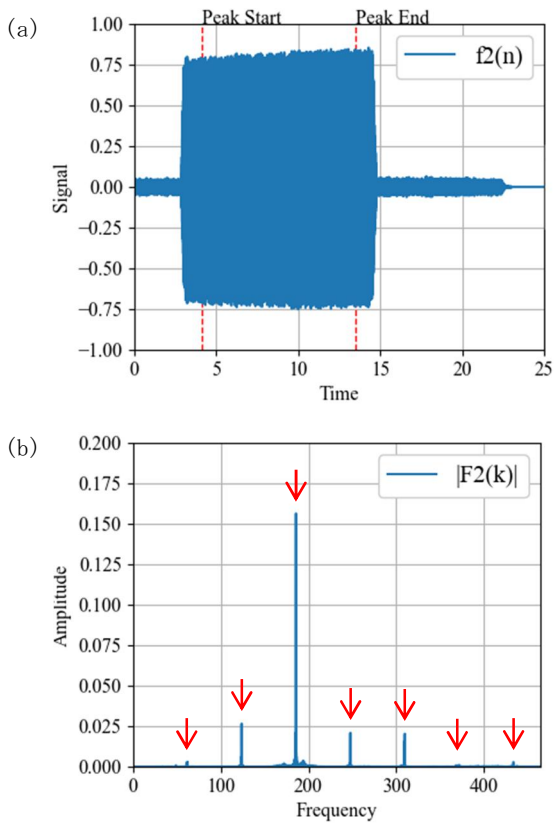


図 12 Vc70 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果
(矢印は強制振動の整数倍)

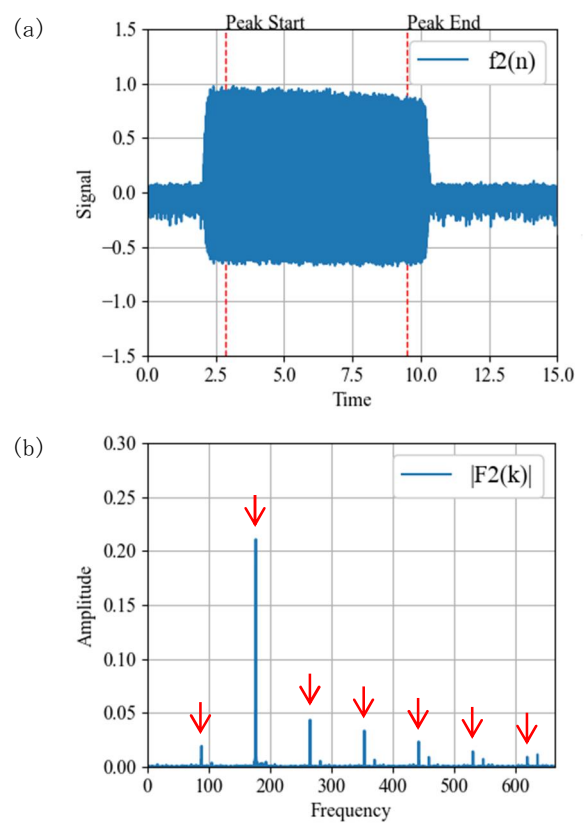


図 14 Vc100 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果
(矢印は強制振動の整数倍)

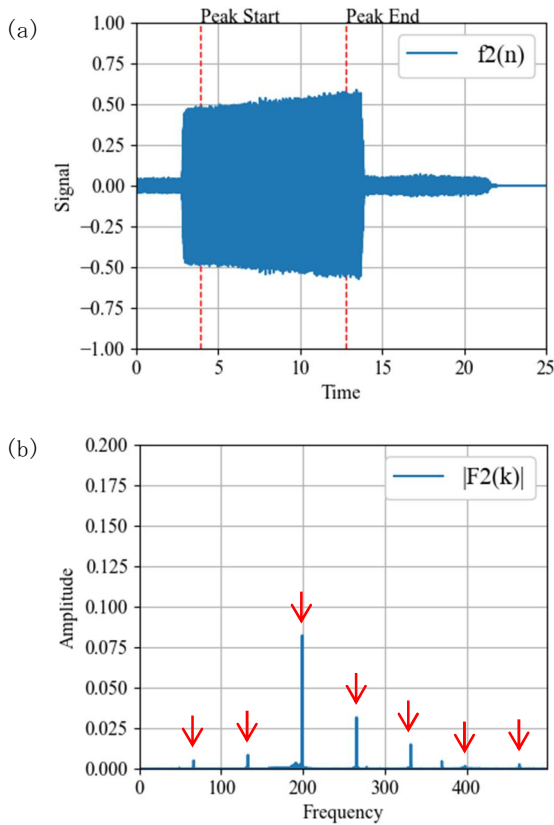


図 13 Vc75 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果
(矢印は強制振動の整数倍)

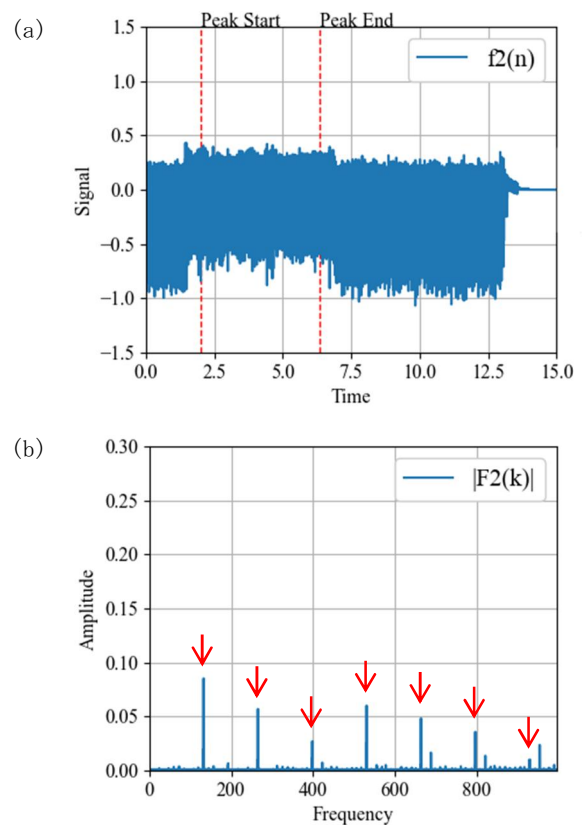


図 15 Vc150 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果
(矢印は強制振動の整数倍)

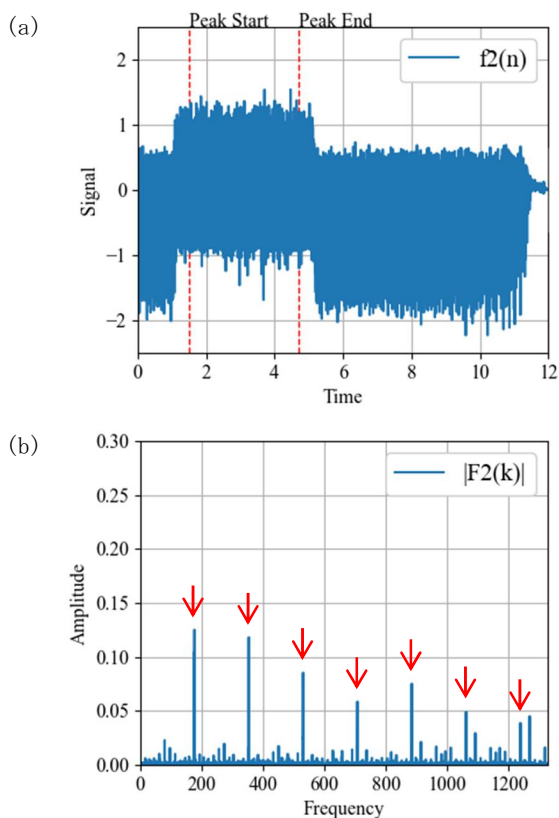


図 16 Vc200 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果
(矢印は強制振動の整数倍)

3. 3 工具摩耗状態把握の確認試験

摩耗試験用被削材加工時とユニット加工時の加速度では、切削長 550m 程度までほぼ一致した挙動を示し (図 17), ユニット加工時の加速度と切削力も、切削長 550m 程度まで挙動が一致している (図 18)。このことから、ユニット加工の代わりとして、主軸に設置した加速度センサによって工具が定常摩耗から終期摩耗へ遷移する様子を把握可能であると考えられる。

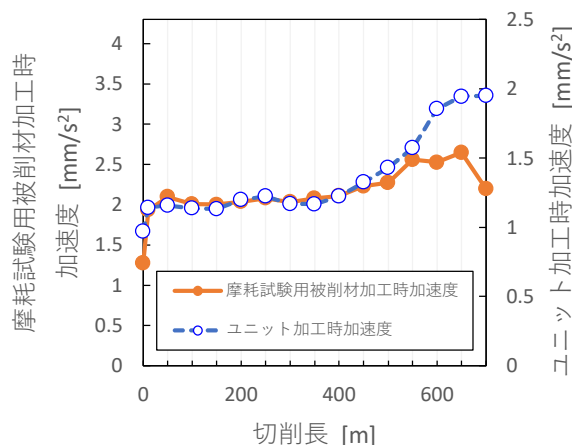


図 17 摩耗試験用被削材とユニットの加速度の比較

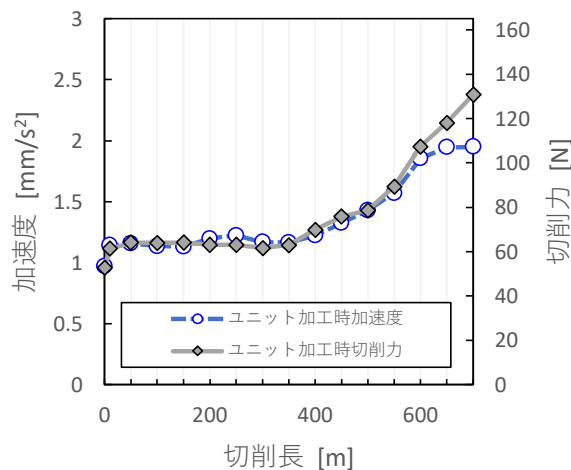


図 18 ユニットの加速度と切削力の比較

4 おわりに

本研究では、加速度センサの設置位置と加工中の加速度の関係性を調べ、工具摩耗状態を把握するための切削条件について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 加速度センサをテーブルに設置すると、加工中の振動は被削材の固定状況に影響を受ける。
- (2) 加工機主軸に加速度センサを設置して、主軸回転数を変更したときの加速度を測定し、振動特性を確認することで、安価な加速度センサであっても、加工中の工具摩耗状態を終期摩耗へ遷移するまで把握することが可能である。

参考文献

- 1) 稲澤勝史ら: “栃木県産業技術センター研究報告”, 18, 1-5, (2021)
- 2) 竹山秀彦ら: “加工技術データファイル基礎編切削加工編”

経常研究

測定手法の違いによる円筒内形状測定結果への影響

内藤 恭平* 石川 信幸* 片岡 智史*

Effect of Differences in Measurement Methods on Results of Measuring the Shape of the Inside of a Cylinder

NAITO Kyohei, ISHIKAWA Nobuyuki and KATAOKA Satoshi

測定手法の違いによる円筒内形状測定結果への影響を調査するため、内径及び表面性状の異なる試験片を複数の手法で測定し、その評価と比較を行った。円筒内径の測定値は、特に測定子の大きさ及び測定物の表面性状に影響を受けており、接触式測定の結果よりも非接触式の測定結果の方が内径が大きく測定されることが分かった。測定手法による差はモルフォロジフィルタ及び表面粗さパラメータを用いることで補正が可能であることが分かった。

Key Words: 円筒内測定, 精密測定, 非接触測定, 表面性状

1 はじめに

昨今の機械加工技術の進歩や要求精度の向上に伴い、部品製造を行う下請け企業に対する加工品の精度検証の要求が多くなっている。産業技術センターでは、これらの要求を受けた企業に対して三次元座標測定機をはじめとする高精度測定機器を使用した測定支援を行ってきた。しかし、加工部品の形状複雑化が進み、直径数 mm～十数 mm 程度の小径深穴の測定など、非破壊での測定が困難なケースが増加している。自動車業界における車体軽量化のための部品の一体化などにより、この傾向は今後も続いていくことが予想される¹⁾。

これらのケースに対応するため、新たに円筒内形状測定機を導入した。この測定機は、測定部に光学検出器を有する小径プローブを挿入し回転させることで非破壊で小径深穴の円筒内形状を測定する事が可能である。しかし、このような手法の測定機は前例が少なく、従来の測定手法と比較して測定結果にどのような違いがあるか把握しておく必要がある。

本研究では、測定手法の違いによる円筒内形状測定結果への影響の調査を目的として、円筒内形状測定機及び三次元座標測定機をはじめとする従来装置を使用して、任意に作製した検証用試験片の形状測定を行い、測定結果の比較を行った。

2 研究の方法

2.1 検証用試験片の作成

2.1.1 円筒内径の異なる試験片

測定内径による測定値への影響を調査するため、 $\phi 15\text{ mm} \sim \phi 30\text{ mm}$ までの直径 2.5 mm おきの穴を加工した標準径試験片及び、 $\phi 1\text{ mm} \sim \phi 14\text{ mm}$ までの直径 1 mm おきの半円を加工した小径試験片を作製した。試験片の材料は A5052 板、板厚は 8 mm のものを使用し、加工にはワイヤ放電加工機を用いた。

2.1.2 表面性状の異なる試験片

測定物の表面性状による測定結果への影響を調査するため、複数の加工手法による穴加工試験片を作製した。穴直径は $\phi 20\text{ mm}$ で統一した。作製した試験片の詳細を表 1 に示す。

表 1 試験片加工条件

加工手法等	材質	加工条件等
ワイヤ放電加工	アルミ (A5052 材)	ワイヤ径 $\phi 0.25\text{ mm}$
ドリル加工	アルミ (A7150 材)	ドリル径 $\phi 20\text{ mm}$
エンドミル加工	アルミ (A7150 材)	工具径 $\phi 10\text{ mm}$, 等高線加工
リングゲージ	鋼製	購入品 (ミットヨ製)
3D プリント造形	マルエージング鋼	レーザ焼結

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

表2 測定手法及び測定条件

測定手法	測定子	測定点数等	繰返し数	装置精度
三次元座標測定機 LEGEX9106	φ2 mm ルビー球, 40 mm 超硬軸	32 点タッチ測定	3	± (0.35+L/1000) μm 最大許容指示誤差(MPE _L)
非接触輪郭形状測定機 MLP-3SP	スポット径 2 μm	スキャン測定 2.5[deg/s], 内径治具使用, Rθ 測定 0.1 deg ピッチ(標準径) インデックス測定, 断面測定, 5 μm ピッチ(小径)	3	± (2.0+20L/1000) μm 最大許容指示誤差(MPE _L)
円筒内形状測定機 BoreInspect	スポット径 15 μm~30 μm	プローブ回転速度 6.0 rpm 0.00036 deg ピッチ	10	1 μm~3 μm 測定繰返し精度(1σ)

2. 2 検証用試験片の測定

本研究における試験片の測定には、三次元座標測定機((株)ミットヨ製 LEGEX9106), 非接触輪郭形状測定機(三鷹光器(株)製 MLP-3SP), 円筒内形状測定機(Novacam 社製, BoreInspect)を使用した。それぞれの測定機での測定条件を表2に示す。

なお、円筒内形状測定機は測定の際に基準器を必要とするため、φ2 mm, φ4 mm, φ10 mm, φ20 mm, φ30 mm のリングゲージを用意し、試験片径に最も近い直径のリングゲージを基準器とした。

また、測定機ごとに測定軸出しの手法が異なることによる測定値への影響を除外するため、測定は穴深さ方向に3断面の円測定を行った結果から円筒形状を計算し、その直径を測定値として扱うこととした。計算の際は、測定機ごとに設定した繰返し数分の測定を行い、その平均値を測定値として使用した。

3 結果及び考察

3. 1 円筒内径の異なる試験片の測定結果

横軸に試験片直径の設計値、縦軸に設計値と測定値の差でプロットしたグラフを図1に示す。φ15 mm 以上の標準径試験片において、測定手法による明確な傾向の違いが見られた。非接触輪郭形状測定機での測定値が最も大きく、次いで円筒内形状測定機であり、三次元座標測定機での測定結果が最も小さくなった。非接触輪郭形状測定機と三次元座標測定機の直径測定値は、φ15 mm 以上の試験片で平均して11.5 μm, 円筒内形状測定機と三次元座標測定機は4.3 μm の差であった。

また、試験片直径による傾向を見ると、円筒内形状測定機による結果では大きな変化がないのに対し、非接触輪郭形状測定機の結果ではφ15 mm 以上の標準径試験片と比較してφ14 mm 以下の小径試験片の測定結果が小さい傾向にあった。

3. 2 表面性状の異なる試験片の測定結果

表面性状の異なるφ20 mm の試験片の表面粗さパラメータを非接触輪郭形状測定機で測定した結果を表3に示す。

また、三次元座標測定機での直径測定値を基準とした時の、円筒内形状測定機、及び非接触輪郭形状測定機の直径測定値の差を表したグラフを図2に示す。なお、3D プリント造形試験片に関しては、他試験片の結果と大きくスケールが異なったため、軸を分けてグラフ化した。

図2より、測定手法により表面性状による測定値への影響の受け方に違いがあることがわかる。

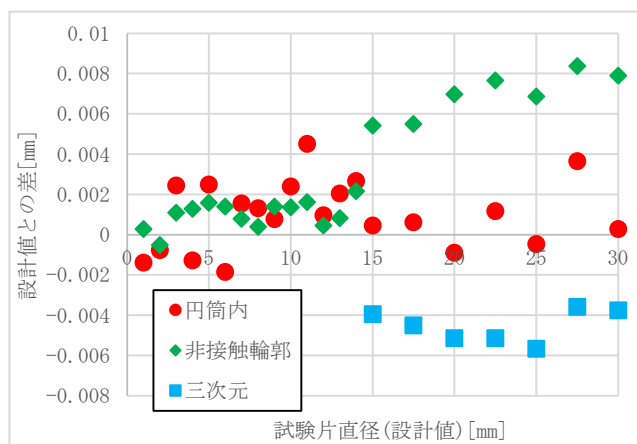


図1 各測定機における設計値と測定結果の差

表3 各試験片の表面粗さパラメータ

	Ra [μm]	Rz [μm]	Rv [μm]	Rc [μm]	Rsk [-]
ワイヤ放電加工	2.57	28.78	15.02	10.25	-0.07
ドリル加工	4.79	28.92	13.42	19.83	0.22
エンドミル加工	1.81	13.56	5.30	5.73	0.69
リングゲージ	1.17	9.98	3.27	4.34	0.75
3D プリント	15.85	109.0	52.76	50.83	0.13

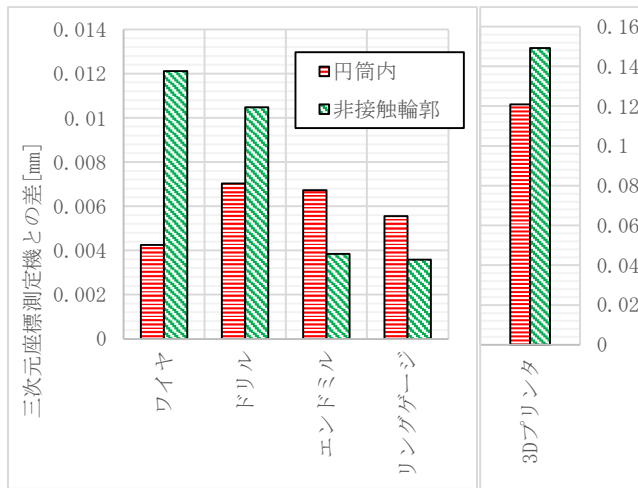


図2 三次元座標測定機を基準とした各測定機の差

3. 3 測定プローブ径を考慮した直径値の補正

3. 1 項及び3. 2 項に示した結果から、各測定手法の結果の差は、測定物の表面性状及び測定に使用するプローブの大きさやレーザのスポット径の影響を受けていると推定した。測定結果が小さくなった三次元座標測定機は先端φ2 mm(=2,000 μm)のルビー球プローブを使用しているため、レーザスポット径が2 μmである非接触輪郭形状測定機や、同じくスポット径が15 μm~30 μm程度である円筒内形状測定機と比較して、表面にある微細な幅の谷形状の情報が取得できず、結果として穴直径が小さく計算されたと考えられる。

この推定を検証するため、測定プローブ径の違いによる測定値の差を、モルフォロジフィルタにより補正することを試みた。モルフォロジフィルタは画像の構造抽出などに使用される演算²⁾で、要素界面を拡大・縮小することで基準以下の大きさの要素を除去する際などに使用される。

図3に、ワイヤ放電加工機で作製したφ20試験片の表面形状を非接触輪郭形状測定機で取得したデータ

(図中下の線)に対してモルフォロジフィルタを適用し、φ2mm円盤が通過した場合の経路(図中上の線)を計算した結果を示す。得られたそれぞれの線の平均高さの差を、プローブ径の違いによる補正值として使用し、三次元座標測定機による結果との差を比較した(図4)。

なお、円筒内形状測定機の測定結果は、出力されるデータ形式の違いから今回フィルタ処理に使用したソフトウェアでは取り扱えないため、非接触輪郭形状測定機で取得したデータを円筒内形状測定機のスポット径相当である15 μmピッチで平均化したデータを作製し、代用した。

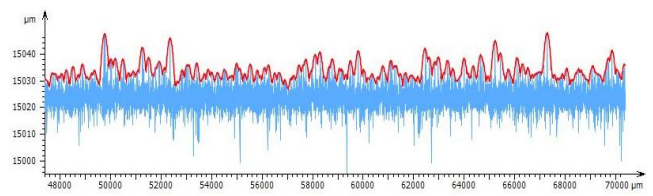


図3 モルフォロジフィルタの適用

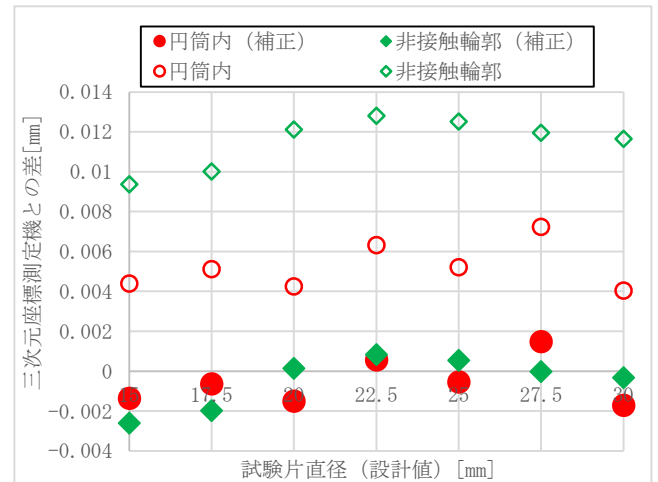


図4 モルフォロジフィルタを用いた補正後の差

図4のとおり、モルフォロジフィルタを使用することによってプローブ径による測定値の差を補正可能であることがわかった。

3. 4 表面性状による測定値への影響

続いて、図2に示した表面性状の異なる試験片の測定結果に対して3. 3項で求めたモルフォロジフィルタによる補正を適用した結果を図5に示す。

ワイヤ放電加工及びドリル加工試験片はいずれの測定機による結果もおおよそ補正ができていたのに対し、エンドミル加工試験片とリングゲージの円筒内形状測定機による測定値はその他の測定値と比較すると補正が不十分であるように見える。

表3に示した各試験片の表面性状パラメータを確認すると、補正がエンドミル加工試験片及びリングゲージは、他試験片と比較してRsk(スキューネス, 歪度)が大きいことがわかる。

Rskは表面性状の山谷の対称性を見る無次元数であり、Rsk>0であるほど、図6に示すような山よりも谷の領域が多い表面であることを示している³⁾。3. 3項で述べた通り、円筒内形状測定機のモルフォロジフィルタによる補正值を算出するときは非接触輪郭形状測定機の測定結果の平均化データを代用している。図6の形状を例にとると、図中の範囲を平均化し、破線で示した高さの測定点が計算される。しかし、実際の円筒内形状測定機による取得データの場合、光干渉法

を測定原理としているため、高さ方向で光の干渉強度（反射強度）が最も強くなる谷底の位置を測定点として取得すると推定される。この差により、代用データから算出した補正量が小さく計算されたと考えられる。

これによる差を再度補正する為、エンドミル加工及びリングゲージ試験片の測定結果に対して、各表面の山高さ R_c に対し、全高さ R_z における谷深さ R_v の比率をかけた値を補正值として適用した結果を図 7 に示す。

図 5 に示す結果と比較して、 R_{sk} を考慮した計算によって数値の補正が可能であることがわかった。

これらの結果から、特に R_{sk} の大きな表面では、平均化フィルタによるデータの代用の際に実測値との測定点差を考慮に入れる必要があることがわかった。

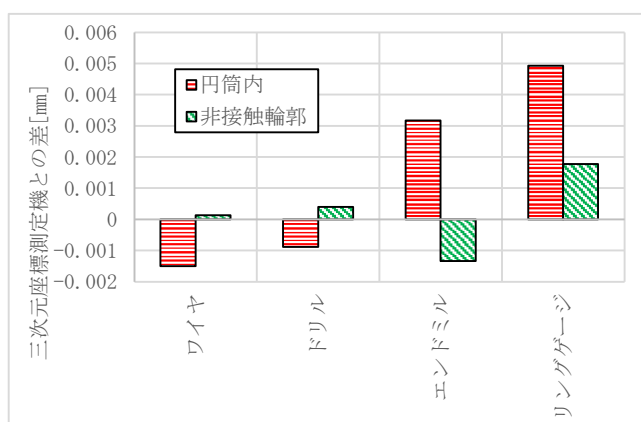


図 5 補正後の各表面試験片の三次元座標測定機との差

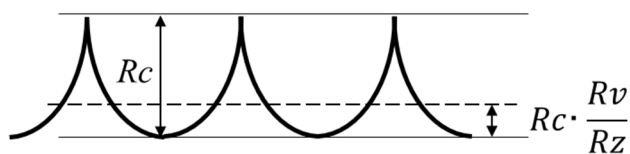


図 6 R_{sk} の大きな表面の補正

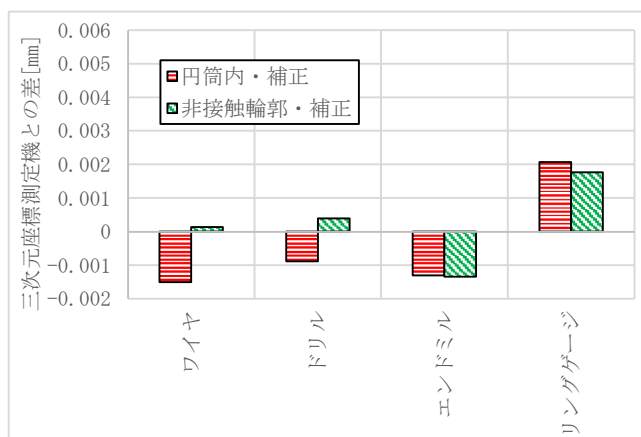


図 7 R_{sk} を考慮した再補正後の差

3. 5 レーザ入射角による表面性状の影響

図 1 に示した結果のうち、非接触輪郭形状測定機による測定結果が標準試験片 ($\phi 15 \text{ mm} \sim \phi 30 \text{ mm}$) では設計値に対して平均で $+6.9 \mu\text{m}$ の差であるのに対し、小径試験片 ($\phi 1 \text{ mm} \sim \phi 14 \text{ mm}$) では平均して $+1.0 \mu\text{m}$ 程度であり、異なる傾向を示している。

円筒内形状測定機による測定結果では、直径の変化による傾向の差は見られなかったことから、この差は試験片形状の違いによるものではなく、非接触輪郭形状測定機による測定の際のレーザ入射方向が関係しているものと考えられる。

図 8 に非接触輪郭形状測定機の測定手法の概略図を示す。標準径試験片の測定は、内径測定用治具を用いた回転測定 ($R\theta$ 測定) によって行っているため、レーザは常に測定面に対して垂直に入射される。小径試験片では径の小ささから同様の測定が困難であるため、垂直方向から照射したレーザを走査する断面測定によって測定を行っている。断面測定による測定では、半円の端に近づくにつれレーザ入射角が大きくなる (図 9)。これにより、端付近の表面性状、特に入射角度によりレーザの死角となる谷深さ R_v 成分の影響が小さくなると推定した。

検証のため、ワイヤ放電加工で作製した小径試験片の $\phi 12 \text{ mm}$ 半円を断面測定及び回転測定で測定した結果を図 10 に示す。回転測定での測定結果の方が $5.24 \mu\text{m}$ 大きく計算され、最小二乗円に対する偏差成分 ($\times 200$ 表示) を見ると、回転測定の結果では位置によってほぼ変化していないのに対して断面測定では円の端に近づくほど偏差が小さくなっている。

小径試験片の設計値からの差の平均 $1.0 \mu\text{m}$ に断面測定と回転測定の測定値差 $5.24 \mu\text{m}$ を足すと、標準径試験片の設計値からの差の平均 $6.9 \mu\text{m}$ におおよそ一致する。

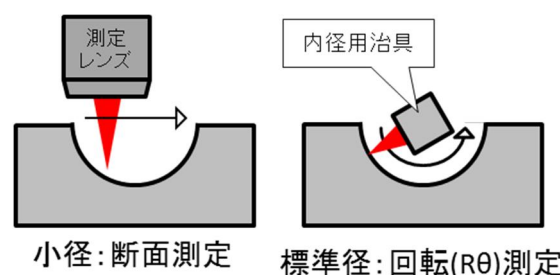


図 8 非接触輪郭形状測定機の測定手法概略図

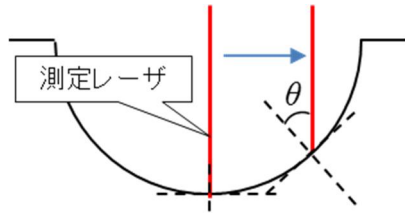
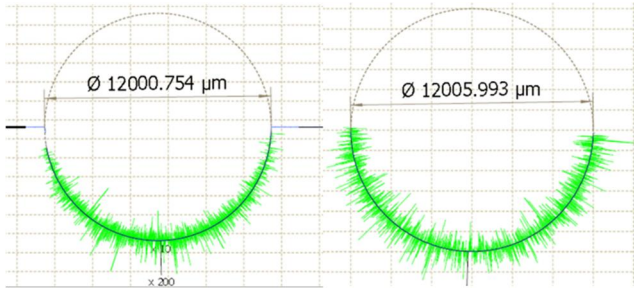
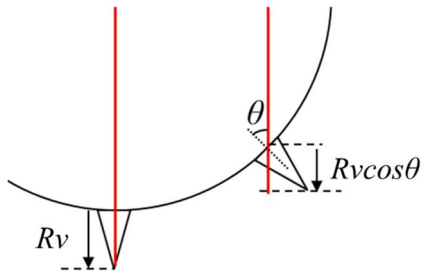


図9 断面測定時のレーザ入射角の変化


 図10 φ12 mm 半円の測定結果
(左：断面測定 右：回転測定)

 図11 レーザ入射角による谷深さ R_v 成分への影響

今回の試験片におけるレーザ入射角による谷深さ R_v の影響を、計算で求めることを試みる。レーザ入射角が θ である際の谷深さ R_v の成分は、図11に示すように $R_v \cos \theta$ で表すことができる。測定により取得された表面データへの R_v 成分の影響は、レーザ入射角 θ を $-\pi/2$ から $\pi/2$ の範囲で積分した面積の比で表現できるのではないかと考えた。

回転測定では常に $\theta = 0 \text{ deg}$ 、つまり $\cos \theta = 1$ であるので、 R_v 成分の積分は

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} R_v d\theta = R_v [\theta]_{-\pi/2}^{\pi/2} = R_v \cdot \pi \quad \cdots (1)$$

となる。

一方断面測定では、

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} R_v \cdot \cos \theta d\theta = R_v [\sin \theta]_{-\pi/2}^{\pi/2} = R_v \cdot 2 \quad \cdots (2)$$

となるので、(1)、(2)式より、断面測定によって無視される R_v 成分は

$$R_v \frac{\pi - 2}{\pi} \quad \cdots (3)$$

(3)式で表すことができる。表3よりワイヤ放電加工試験片の R_v は $15.02 \mu\text{m}$ であるので、計算される成分は

$5.46 \mu\text{m}$ となる。この値は、図10に示したレーザ入射角の差による測定値差とおおよそ等しくなった。

3. 6 円筒内形状測定機の最大許容指示誤差相当値の算出

本研究において使用した三次元座標測定機、及び非接触輪郭形状測定機は、測定装置中に基準器を持つ装置であるため、測定メーカーの定義する最大許容指示誤差 (MPE_E) の数値が定義されている。円筒内形状測定機は装置内に基準器を持たないため、 MPE_E は定義されていないが、使用する測定機が必要な精度を満たすかどうかの指標として MPE_E を用いるケースがあるため、本研究で得られた各測定機での測定結果から、円筒内形状測定機の MPE_E 相当値の算出を試みた。

図12に、円筒内形状測定機の測定結果を、前項までで得られた補正を適用したうえで、三次元座標測定機、非接触輪郭形状測定機それぞれを基準として整理したグラフを示す。

それぞれの測定点には、円筒内形状測定機の最大繰り返し精度である $\pm 3 \mu\text{m}$ の誤差範囲を表示している。傾きとして三次元座標測定機を基準とした測定結果の近似直線の値、繰り返し精度範囲を十分内包できる切片をそれぞれ設定し、円筒内形状測定機の MPE_E 相当値を $\pm (7+60 \times L/1000) \mu\text{m}$ (L は測定直径 [mm]) と算出した。

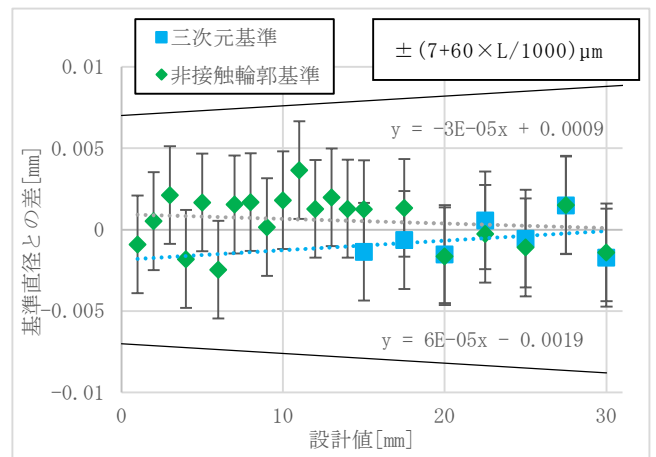


図12 各装置を基準にした円筒内形状測定機の測定値

4 おわりに

内径寸法の異なる試験片、及び表面性状の異なる試験片を複数の測定手法で測定・比較し、以下の知見を得た。

- (1) 三次元座標測定機での測定値と比較して、非接触輪郭形状測定機、円筒内形状測定機の測定値が大きくなる傾向にあった。
- (2) 測定手法による結果の差は、測定物の表面性状、測定機器のプロブ径・スポット径の影響による

ものと考えられ、モルフォロジフィルタの使用や表面粗さの考慮により測定手法ごとの差の補正が可能であった。

- (3) 非接触輪郭形状測定機を使用した測定の場合、レーザー入射角によって測定値に影響が出ることが分かった。
- (4) 三次元座標測定機、非接触輪郭形状測定機の測定結果を基準として、円筒内形状測定機の最大許容指示誤差(MPE_E)相当値を $\pm(7+60 \times L/1000)\mu\text{m}$ と算出した。

参考文献

- 1) 小倉翔吾, 瀬戸雅宏ら: “成型加工”, 33 巻 8 号, 289-293, (2021)
- 2) 浅野晃: “電子情報通信学会”, 4 巻, 2 号 113-122, (2010)
- 3) 宮下勤: “精密工学会誌”, 73 巻 2 号, 201-205, (2007)

経常研究

データ収集・解析システムの機能拡張

ー データ収集・解析システムユーザインタフェースの拡張 ー

島田 智* 八木澤 秀人*

Enhancements in the Data Collection / Analysis System
SHIMADA Satoshi and YAGISAWA Hideto

当センターがこれまでに開発してきた、データ収集・解析システムの見える化部分について、表示内容のカスタマイズをブラウザ上から簡単にできるよう、機能の拡張を行った。また、ブラウザ上からの設定で、7 セグメント表示器やアナログメータ読み値の教師データを作成するツールや、クラウド上で推論モデルを生成するツール、推論モデルを用いて、画像から値を読み取り、データを保存するツールを作成し、実際にセンターの消費電力計やアナログメータの読み取りを行うモデルを構築、継続的に値を収集し、これらのツールの有効性を確認した。

Key words: IoT, 可視化, YOLO, アノテーション

1 はじめに

ものづくり企業を取り巻く環境は、新興国の技術革新に加え、コロナ禍による半導体不足や原料高騰により、生産性向上、競争力の強化が求められている。顧客満足度を高めるためにも、機会を捉え、リスクを回避するためにも、データに基づく素早く適切な判断が必要で、IoT や AI 等の先端技術利用が不可欠である。しかし、ものづくり現場においては、作業日報や品質情報などのデータ収集を行っているものの、データ収集の電子化・自動化や、収集したデータの活用が進んでいない企業も多い。

そこで産業技術センターでは、平成 30 年の「所内設備の IoT 化に関する研究¹⁾」から 3 年間にわたり、ものづくり現場で発生する様々なデータの利活用を目的として、データの収集、蓄積、分析を行うためのツールを開発^{2),3)}を行ってきた。

こうしたツールを予め準備し、利活用することで、研究会でのハンズオン活動がスムーズに実施できるとともに、相談を寄せられる多種多様な IoT, AI 利活用に関する企業ニーズに素早く対処することが可能になっている。

一方、研究会参加者の多くが、システム管理やプログラミングの経験に乏しく、こうしたツールを企業内で使い続けることを考えた場合、長期的な人材育成が不可欠である。また、多品種少量生産を行う企業にとって、システムを一度作り込んでも、表示するデータや、その見

せ方の変更が必要となることが想定される。

そこで本研究では、ユーザが自ら望んだ形にシステムのカスタマイズを行えるよう、これまでに構築したデータ収集・解析システムの機能の拡張を行った。

2 研究の方法

2. 1 見える化ツールの機能向上

これまでの研究では、データ収集・解析システムに Raspberry Pi 4B 上の Apache で動作するオリジナルの PHP 見える化プログラムを作成した。このプログラムでは、ダッシュボード(図 1) (複数の情報源からデータを集め、概要をまとめて一覧表示する画面)の表示内容を、JSON 形式のテキストファイル(表 1)で管理している。このため、希望する表示対象データを選択し、グラフの種類、キャプション等の表示方法を得るには、このファイルの編集方法、編集箇所、記載内容について、細かな内容まで理解する必要がある、ユーザが容易に変更できるものではなかった。

こうしたことから、以下の 2 つの手法により、ユーザが容易にデータ表示画面をカスタマイズできるよう、機能の拡張を行った。

2. 1. 1 ダッシュボード編集のための UI 拡張

まずは、現在のデータ収集・解析システムのトップページである見える化ツールのダッシュボードを、テキストファイルの編集をすることなく、ブラウザ上から、ボタンや選択リストで編集できる機能を加えた。

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

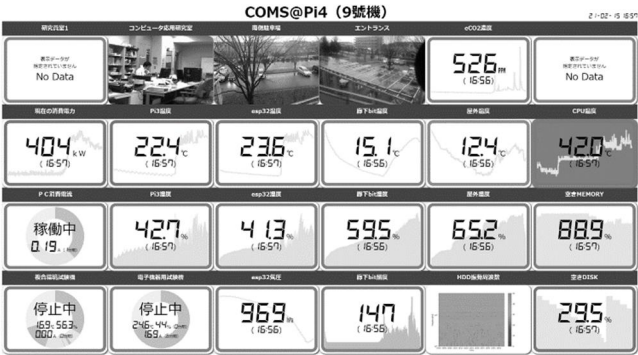


図 1 ダッシュボード画面

表 1 パネル毎の設定内容

<pre>{ "title": "eCO2 濃度", "text": ". / dashboard.php?MODE=FULL &GW_ID=3&DEV_NO=1&CH_NO=5&BG=LG&UNIT=PPM &NumDEC=0&NumMIN=400&NumMAX=1000&COUNT=120 &COLOR=255,200,200&THICKNESS=5", "link": ". / chartview.php#dt5", "update": "100" }</pre>

2. 1. 2 統合監視ツールや BI ツールの活用

もう一つが、統合監視ツールや BI ツール等、外部のツールを活用する手法の検討である。こうしたツールの中には、FOSS（フリーソフトウェアやオープンソースソフトウェア）や、機能が限定された範囲ならば無償で使うことのできるものが存在している。独自ツールと比較すると、表示手法や連携可能なデータベース等の機能、構築や操作、トラブル発生時の対処方法等に関するマニュアル等の情報が豊富で、運用のハードルが低い（表 2）。そこで、こうしたツールの中からいくつかを選び、収集したデータの表示を試み、独自ツールの置き換えを検討した。

表 2 ツールの機能比較

ツール 比較項目	オリジナル 見える化ツール	統合監視ツール	BI ツール
費用	○	△ 多くが有償	△ 多くが有償
必要な使用スキル	△	○	○
導入・管理スキル	△	○	○
セキュリティ・サービスの持続	△ 後目に維持していく必要	○ ベンダー側で対応	○ ベンダー側で対応
カスタマイズ	○ 細かな作り込みも可能	△	△

2. 2 計器読取プログラムの機能向上

データ出力が難しい加工機からデータを収集するには、振動、電流、電圧、リレーやマグネットスイッチの開閉などをセンサで監視するほかに、装置に備付けの計器の画像を用いる方法がある。特に 7 セグメント表示器やアナログメータは、ヒトが目視で状態を監視するために多くの装置に付けられている。また、これらの装置の状態を連続して記録するために、様々な製品や安価に構築する手法が開発されている。

これらは大別すると、パターンマッチや輝度の差などをベースとした手法と、物体検出アルゴリズムなどの DNN を用いた手法とに分けられる。

前者は後者に比べると計算量が少なく済み、高速で安定している一方、環境に応じたパラメータの設定が必要で、明るさの変化や外光の映り込み、カメラのズレなどの外乱には比較的弱く、うまく認識ができなくなる恐れがある。一方後者は一度外乱に強いモデルを構築すれば、カメラのズレや明るさの変化にも対応できる一方、計算量、計算時間は余計にかかることになる。

これまでの研究では、物体検出モデルである YOLOv3 を用いた 7 セグメント表示器の読取りモデルを構築し、電力値の読取りを行ってきた。そこで、今回は実際の企業での活用を考え、YOLOv3 よりもサイズが小さくても高い精度が出るとされる YOLOv5 を用いて、アノテーション作業（図 2）からモデルの構築、活用までの環境構築を行った。

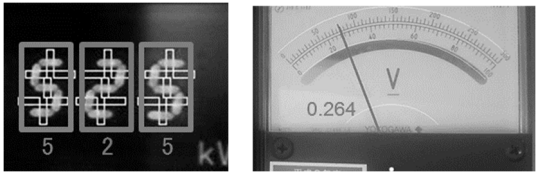


図 2 アノテーション作業

画像にラベル（今回の場合は読み値）付けしていく作業

2. 2. 1 モデル作成環境の構築

7 セグメント表示器やアナログメータについて、様々な画像を学習させることで様々な計器に対応したモデルを作ることにも可能である。一方で、対象を特定の計器に絞ることで、より安定した読取りを実現できる。この場合、対象物毎に、読取りのためのモデルを構築する必要がある。

今回作成するモデルは、画像を入力として、読み値を返すもので、学習には大量の画像とその読み値を与える必要がある。画像に読み値を与えていくアノテーション作業は、時間以上に苦痛を伴う作業であることから、まず、従来手法により画像と読取り結果を同時に収集するプログラムを作成することで、アノテーション作業の軽減を試みた。

また、このプログラムにより得られる画像とラベルを教師データとして、転移学習により、画像から読み値を推定するモデルを生成するツール、構築したモデルを用いて、画像から値を読み取り、csv 形式のファイルや DB にデータ保存するツールを作成した。

2. 2. 2 作成したモデルの実タスクへの適用

センターの消費電力量表示と、太陽光パネルからニッケル水素電池に充電を行う回路に取り付けたアナログ電圧計、電流計を用いて、実際にモデルを構築し、アノテーションに用いた従来手法との比較を行った。

3 結果及び考察

3.1 見える化ツールの機能向上

3.1.1 ダッシュボード編集のための UI 拡張

まずはダッシュボード上のパネルダッシュボード一つの表示につき、対象となるデータや背景のグラフ表示の方法について、選択式で表示、更新するプログラム（図3）を PHP で作成し、加えて JavaScript を用いて、画面表示を選択内容に合わせて変更し、設定内容を自動生成するプログラムを作成した。しかしながら、前述のとおり、見える化部分を自作し、機能を拡張していくことには、課題が多い。

図3 作製したダッシュボード編集画面

3.1.2 統合監視ツールやBIツールの活用

そこで今回、BI ツールや統合監視ツールとして、無償で使用できること、導入や使用方法、導入事例についての情報が豊富なことなどを考慮し、Google Data Portal⁴⁾、Microsoft Power BI Desktop⁵⁾、Grafana⁶⁾、Zabbix⁷⁾を用いて、見える化ツールの置き換え可能性の検討を行った。

3.1.2.1 Google Data Portal

Google Data Portal は、Google が提供する、基本料無料のクラウド BI ツールであり、Google BigQuery、Cloud SQL、スプレッドシート等のデータが利用可能である。Google のアカウント情報を基にデータの共有、編集権限の割り当てなどが可能で、レポート作成機能に特化（日報、月報等の作成が得意）している。

データ収集・解析システムのデータは、MariaDB 内に格納されており、Google のサーバからアクセス可能な場所にこの DB を配置することで、データの連携が可能である。

実際にデータの表示を行ってみたところ、日報等のレポート作成には非常に有効なツールである一方、定期更新が必要なリアルタイム監視は不得手な印象がある。特に今回、DB に Google 内のサービスを使わなかった為か、1 か月分の温湿度データの表示に 1 分以上要するなど、少し大きめのデータを参照しただけで、非常に大きな遅延が発生し、見える化ツールの置き換えには不向きと判断した。

3.1.2.2 Microsoft Power BI Desktop

Power BI Desktop は、Microsoft が提供する無償版

を有する BI ツールで、PostgreSQL、MariaDB、excel 等、様々なデータベースが利用可能である。デスクトップ版と携帯版のページを別に作成することが可能で、データ表示範囲の拡大、縮小による傾向の把握が行いやすい。また、報告書を「発行」することで、出先でも確認できるが、複数ユーザでの共有には Pro 版（有償）が必要となる。

PC から LAN 内部にあるサーバのデータを参照するのであればそこまで遅延が大きいとは言えないが、やはりリアルタイムでの監視に使用するには不向きと判断した。

3.1.2.3 Grafana

Grafana は、マルチプラットフォームで動作する視覚化ツールで、PostgreSQL、MariaDB 等、様々なデータベースが利用可能である。様々なサービスの可視化に活用されており、ダッシュボードの表示内容をパネル毎に設定していき、ブラウザ上でその配置や大きさを変更することが可能である。また、ユーザ毎にパスワードを設定し、画面毎に編集や閲覧の権限を管理することができる。

一度システムにインストールをしてしまえば、表示するデータの選択から表示方法の変更、データのエクスポートに至るまで、全てブラウザ上で行うことができる、非常に強力なツールであり、見える化ツールの置き換えに最も適していると考えられる。一方、通知機能も簡易ながら有しているものの、単体で状態監視を行うには機能の不足が感じられる。

3.1.2.4 Zabbix

Zabbix は、世界中で使用されているネットワーク機器の統合監視ツールであり、Zabbix サーバと監視対象に導入する Zabbix エージェントから構成される。Zabbix サーバは指定した時間毎に監視対象のエージェントにデータを要求し取得する。また、WebUI を有し、ブラウザから各種設定が可能で、データの可視化機能も有している。通知の機能が豊富で、データの扱い（保存期間等）も設定できることから、長期間運用する場合に有用である。Zabbix と Grafana を用いた場合のシステム構成図を図4に、作製したダッシュボードを図5に示す。

また、Zabbix Agent2 を導入することで、既存システムが受信するセンサデータを、MQTT Subscriber として受け取ることができ、Python で作成した MQTT で受け取ったデータを MariaDB に保存するプログラムを用いる必要がなくなる。

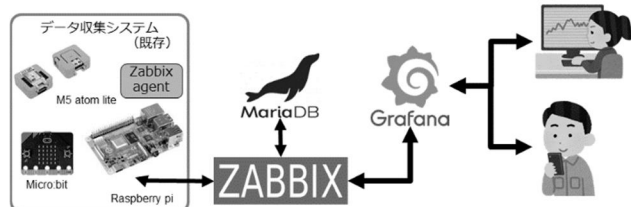


図4 システム構成図



図5 Grafanaを用いたダッシュボード

3. 2 計器読取プログラムの機能向上

3. 2. 1 モデル作成環境の構築

今回、読取対象とする計器は、7 セグメント表示器とアナログメータであり、転移学習のベースモデルに YOLOv5n⁸⁾、VGG19⁹⁾を用いた。

今回のタスクにおける教師データ作成（アノテーション作業）は、画像を見て、その読み値をテキストに保存する単純作業ではあるが、数が多くなると容易ではない。実際に作業を行ってみると、3 桁の 7 セグメント表示器画像にアノテーションツール labeling¹⁰⁾を用いてラベルを振っていく作業には 30 秒/枚程度、画像ファイル一覧を記載したテキストファイルにアナログメータ画像に読み値をラベル付けしていく作業には 20 秒/枚程度を要した。今回の場合、位置が固定なので、7 セグメント表示器の画像についても labeling を使わず、テキストで次々に値を記載し、後で画像毎のデータに変換することで時間を短縮できるが、すべての画像を目視し、その値を入力する作業を計器毎に 100 枚、1000 枚と行うのは、作業時間以上に苦痛を伴う。

そこで、7 セグメント表示器については、各セルと周囲との輝度差を用いて、アナログメータについては、針位置をハフ変換により抽出する手法を用いて読み取るプログラムを構築した。

まず、これらの手法での読取りに必要となる表示器を映すカメラのアドレス、7 セグメント表示器各桁のセルの位置、アナログメータの回転軸と上限、下限の位置、点灯を検出する輝度差などのパラメータを設定するための Web UI を、これまでと同様、PHP で構築した（図 6、図 7）。

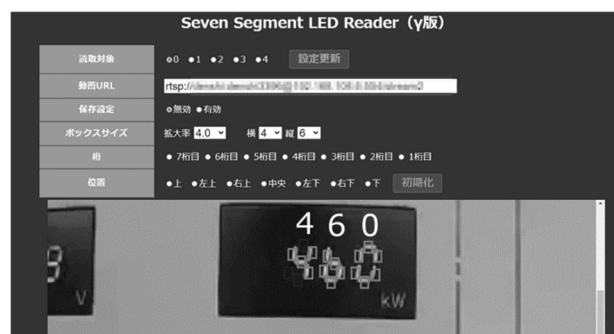


図6 輝度差読取り位置指定 Web UI

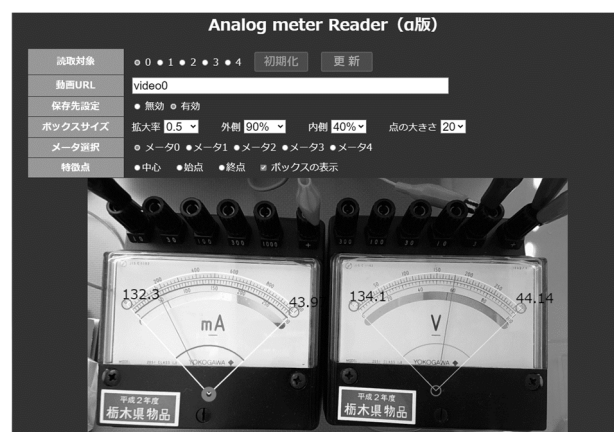


図7 ハフ変換読取り位置指定 Web UI

Web UI で設定された内容を基に、読取りを行うプログラム本体は、Python+OpenCV で構築した。一定時間毎に画像を取得し、読取り結果のテキストを YOLO や VGG19 の転移学習にそのまま用いることのできる形で保存する。

次に、転移学習によりモデルを構築するためのプログラムを python で作成した。YOLO や VGG19 の転移学習は、全ての層の学習を行う事に比べれば低く抑えられるが、計算量が多く、GPU を搭載しない通常の PC では、結果を得るために多くの時間を要する。このため、GPU 搭載 PC を用意することなくモデルの作成と評価を行うため、Google Colaboratory¹¹⁾を用いて転移学習を行うプログラムを作成した。

なお、7 セグメント表示器やアナログメータの画像は、上下左右が反転すると意味が変わるため、画像水増しする際には注意が必要である。

最後に、ブラウザ上から範囲を指定し、カメラ画像から値を読み取るプログラムを作成した（図 8）。

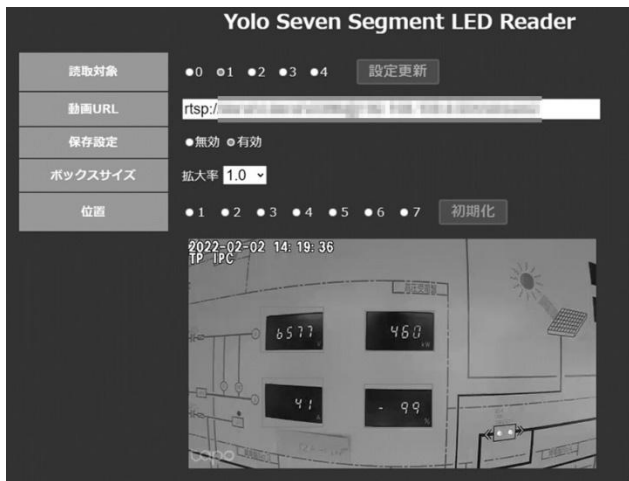


図8 YOLO位置指定Web UI

3. 2. 2 作成したモデルの実タスクへの適用

今回の一連のモデル作成環境を用いて、実際にセンターの消費電力量計（7セグメント表示器）と、アナログ電圧計、電流計を用いて読取りモデルを作成し、モデルの評価を行った。

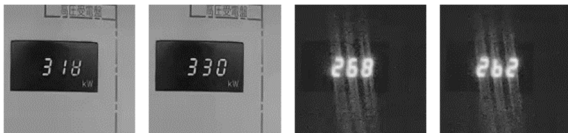


図9 昼間と夜間の電力計の見え方

電力量計は、表示が切り替わる瞬間、読み取れない表示（図9左端）や、本来読み取るべきでない表示となることがある。また、昼間と夜間で見え方が大きく異なり、特に夜間は輝度差での読取りに失敗が多くなる。

今回、従来手法で得た教師データを目視で修正し、読取りモデルを作成した結果、高い精度での読取りが期待できるモデルが得られたことから、実際の現場での利用を想定し、NVIDIA社製のGPU搭載開発ボードJetson Nano上で画像のYOLOv5nによる読取り実行した。読取り結果はMQTT Publisherとして、データ収集システムのMQTT Brokerに送信する。データ収集システム内ではZabbix Agent2がMQTT Subscriberとして、読取り結果をMQTT Brokerから受け取り、Zabbix serverがそれを監視しデータを格納する。その後、格納されたデータを、Grafanaを通じて可視化する一連の動作を確認した。結果を図10に示す。

図10上の従来手法では、夜間の読取りが上手くいかず、途切れたり、同じ値を繰り返したりしているのに対し、図10下のYOLOv5nモデルを用いた手法では、昼夜問わず安定して読み取れている様子がうかがえる。アナログメータについては、メータの最小値を0、最大値を1として、ハフ変換を用いた手法により教師データを作成し、データ水増しの上で転移学習を行い、モデルを生成した。

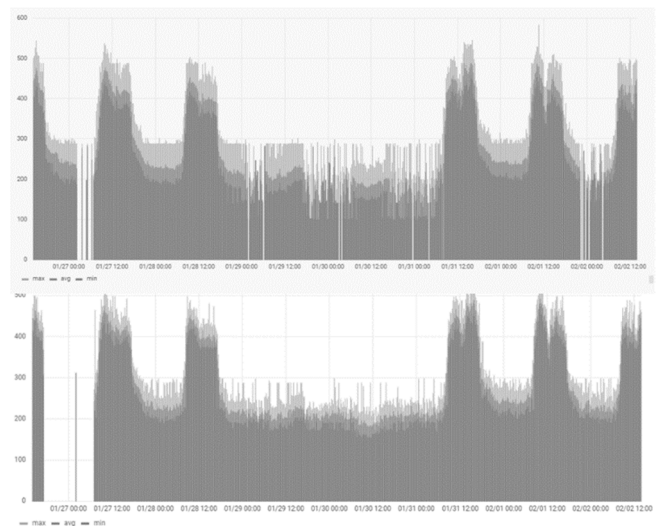


図10 消費電力計の読取り

上が従来手法、下がYOLOv5nモデルを用いた手法ところが、今回生成できた読取りモデルについては、外乱への強さは確認できたものの、目視による読み値とモデル推論値の間に、最大で0.1程度の開きがあり、精度に課題が残った。

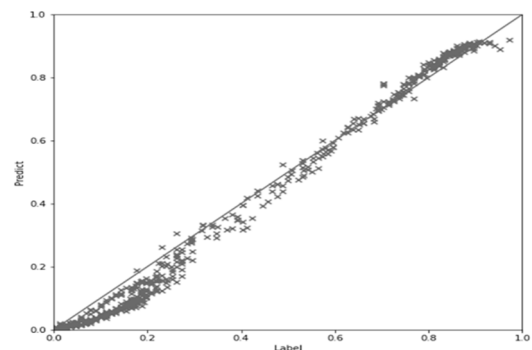


図11 アナログメータ読取りモデルの評価

4 おわりに

今回の研究で以下のことに取り組み、これまでのセンサを用いて収集するものに加え、計器類の画像からデータも収集し、ユーザが表示したいデータを、希望する形式で表示できる環境を構築した。

- (1) オリジナル見える化ツールのダッシュボード表示変更に必要なテキストの編集をブラウザ上から行えるようにすると共に、Grafana, Zabbix等の外部ツールを用いた見える化に取り組み、プログラムレスで必要に応じたデータの表示ができる環境を構築した。
- (2) ブラウザ上からの設定で、従来手法を用いてアンケートンデータを作成するツール、得られたデータからGoogle Colaboratory上で推論モデルを生成するツール、作成したモデルを用いて、画像から値を読み取り、csv形式のファイルやDBにデータ保存するツールを作成した。

- (3) これらのツールを用いて得られたアノテーションデータから、実際にセンターの消費電力量計やアナログメータの読み取りを行うモデルを構築、継続的に値を収集し、その有効性を確認した。

参考文献

- 1) “所内設備の IoT 化に関する研究” 栃木県産業技術センター研究収録, pp. 58-61, 2018.
- 2) “AI 導入に向けたデータ収集システムプロトタイプの開発” 栃木県産業技術センター研究収録, pp. 27-30, 2019.
- 3) “ものづくり現場における AI 活用に向けた分析・解析ツールの開発” 栃木県産業技術センター研究収録, pp. 35-41, 2020.
- 4) Google “Google Data Portal”
<https://marketingplatform.google.com/intl/ja/about/data-studio/>
- 5) Microsoft “Microsoft Power BI Desktop”
<https://powerbi.microsoft.com/ja-jp/>
- 6) Grafana Labs “Grafana”
<https://grafana.com/>
- 7) Zabbix 社 “Zabbix”
<https://www.Zabbix.com/jp>
- 8) ultralytics “Yolo v5”
<https://github.com/ultralytics/yolov5>
- 9) “Keras Documentation”
<https://keras.io/ja/applications>
- 10) “labelimg”
<https://github.com/tzutalin/labelImg>
- 11) Google “Google Colaboratory”
<https://colab.research.google.com/notebooks/welcome.ipynb?hl=ja>

経常研究

スマートグラスを用いた作業支援検証に関する研究

松本 健司*

Verification of Support by Smart Glasses
MATSUMOTO Kenji

ウェアラブル機器の一つであるスマートグラスを活用するシステムを2種類開発し、作業支援用途における実用性を産業技術センターの研修業務にて検証した。

開発したシステムの1つは、遠隔地にいるオペレータとスマートグラスを着用した作業員間で、音声・映像データの通信を可能にするものである。もう一方のシステムは、作業員が操作する機器に関する資料をスマートグラスのディスプレイ上に表示するものである。各システムは、データ提供・AI処理などのサーバPCなどと組み合わせて構築した。サーバ実行環境は、システムの柔軟性を考慮し、仮想コンテナ上に構築した。

Keywords: スマートグラス, WebRTC, AI, コンテナ仮想化

1 はじめに

IoT (Internet of Things) 技術や ICT (Information and Communication Technology) 技術が近年、急速に発展し、分野・経営規模を問わず多くの企業がその活用に関心を寄せている。

企業が抱える経営課題は多岐にわたっており、中でも新型コロナウイルス感染症対策は早急に取り組む必要がある大きな課題である。人と人との接触機会を極力減らす対策には ICT 技術の活用が有効であり、ICT 技術と相性が良いウェアラブル機器の利活用に関心が集まっている。

栃木県産業技術センター（以下、当センター）では感染予防の基本である消毒などの徹底やテレワークの推進などに取り組んでいるが、機器取扱研修など感染リスクを抑えきれない業務も存在する。当該研修は、当センター保有の機器を初めて利用する来所者に対して実施する研修であり、機器の取り扱い方法のみならず専門的内容や安全作業の心得など多くの要素を含んでいる。研修は来所者と職員が長時間立ち会って実施しており、緊急事態宣言下における受付停止や関係者の体調不良による中止など、現状の実施方法だけではサービス維持に課題を抱えている。

本研究は、業務継続性向上を目指し、スマートグラス向け作業支援システムを開発、機器取扱研修業務において実際に使用し、作業支援用途における実用性を検証するものである。

2 研究の方法

2.1 実施方法

システム開発は設計、試作、評価、改善のサイクルで進め、評価においては、動作テスト（単体、結合）・負荷テスト・ユーザーテストを実施する（図1）。すべての評価項目をクリアした後、機器取扱研修の実務へ試験的に導入し、業務に支障がないか、感染症対策として有効であるか、の2点を確認した。

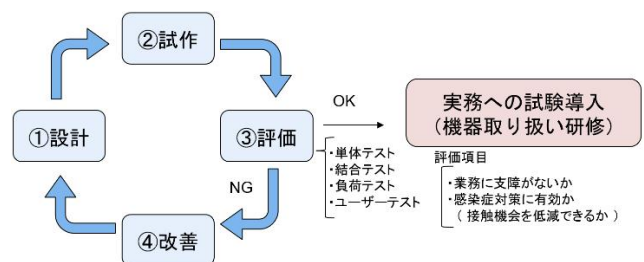


図1 開発の流れ

2.2 使用機器（スマートグラス）

本研究では、EPSON 製 MOVERIO BT-300¹⁾（図2）を使用した。当機種はメガネ型であり、ディスプレイ越しに視界が確保される両眼シースルータイプである。また、コントローラには Android をベースとした OS が搭載されており、Android OS 搭載機向けアプリと同様の環境でアプリを開発できる。

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部



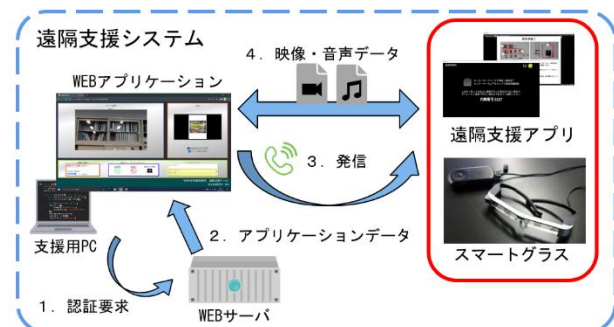
図2 MOVERIO BT-300

2. 3 開発内容

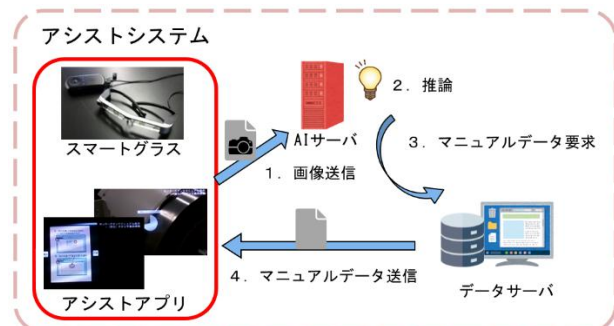
2. 3. 1 システムの概要

開発したシステムの1つは、遠隔地にいるオペレータとスマートグラスを着用した作業者間で、音声・映像データの通信を可能にするシステム（以下、遠隔支援システム）である（図3（a））。

もう一方のシステムは、作業者が操作する機器に関する資料を、スマートグラスのディスプレイ上に表示するシステム（以下、アシストシステム）である（図3（b））。



(a) 遠隔支援システム



(b) アシストシステム

図3 開発システム概要

遠隔支援システムは、来所者がスマートグラスを着用、当センター職員が支援用PCを操作し研修を実施する状況を想定している。

アシストシステムは、研修実施後、利用者が研修内容を振り返りつつ作業を行う場面を想定している。

2. 3. 2 遠隔支援システム

2. 3. 2. 1 システム構成

遠隔支援システムは、遠隔での作業支援を行うための支援用PC、支援用PCの認証やWebアプリケーションの提供などを行うサーバ、遠隔での作業支援を受けるためのスマートグラスから成る（図4）。スマートグラスと支援用PC間には、WebRTC²⁾規格によるP2P通信で映像・音声信号をやり取りする。

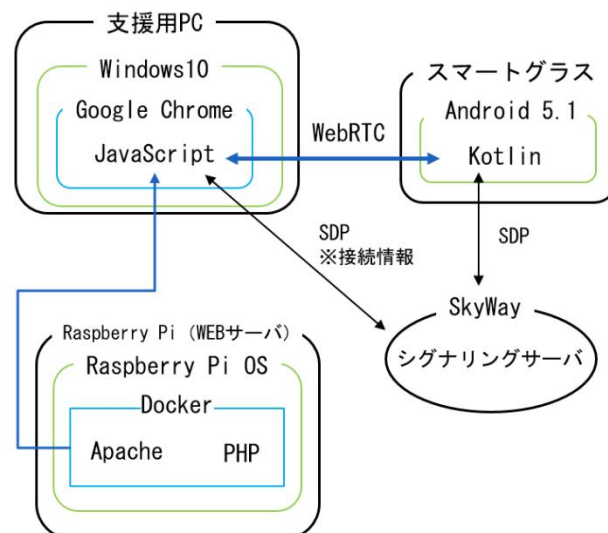


図4 遠隔支援システム構成

WebRTC規格によるP2P通信を開始するためには、接続する機器間で接続情報を交換し、通信経路を確立するシグナリング処理が必要になる。WebRTC規格ではシグナリングの方法は特に指定されていないため、自由に実装することができる。本研究においては、エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社が提供するSkyWay³⁾サービスを利用し、シグナリング処理を実装した。

2. 3. 2. 2 支援用PC

支援用PC上でWebアプリケーションを実行するためのブラウザはGoogle Chromeを使用した。ブラウザからWebサーバへログインし、Webアプリケーションを実行する。

2. 3. 2. 3 サーバ

サーバマシンにはRaspberry Piを使用した。再利用性やメンテナンス性を高めるため、Raspberry PiにDocker⁴⁾環境を導入し、Docker仮想コンテナ上でサーバの構築を行った。

WebアプリケーションはHTML及びJavaScriptで記述し、スマートグラスへの発信機能、スマートグラスからの着信通知機能、映像・音声の送受信機能を実装した。

2. 3. 2. 4 スマートグラス用アプリ

開発したWebアプリケーションはスマートグラス上でも動作するが、スマートグラスの使用に慣れていない来所者による使用を想定し、操作をなるべく簡易にする

ため、スマートグラス用に別途アプリを開発した。

アプリ開発には Kotlin 言語を使用し、開発環境には Android Studio を使用した。アプリには、Web アプリケーションと同様に、発着信機能、映像・音声送受信機能を実装した。

2. 3. 3 アシストシステム

2. 3. 3. 1 システム構成

アシストシステムは、スマートグラス、スマートグラスのカメラ映像から操作中の機器を推論する AI サーバ、AI サーバの推論結果を基に作業に関連したデータを提供するデータサーバから成る（図 5）。アシストシステムは、研修資料などのデータをスマートグラス着用者の視界を妨げないよう AR 表示する。

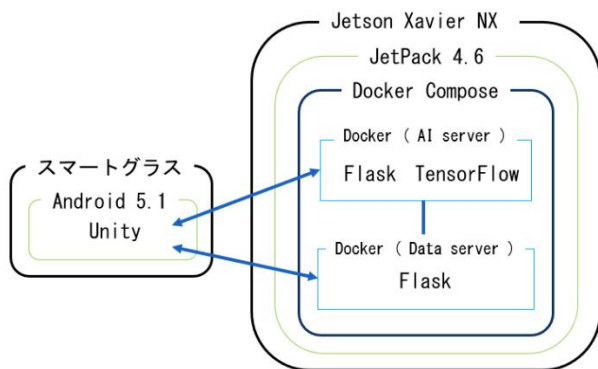


図 5 アシストシステム構成

2. 3. 3. 2 スマートグラス用アプリ

アプリ開発には Unity⁵⁾を使用した。アプリには、スマートグラスの AR 表示、カメラ画像のサーバへの送信、構造化データの受信・再構築処理を実装した。

2. 3. 3. 3 サーバ

サーバマシンには Jetson Xavier NX を使用した。本システムでは、AI 処理を行うサーバとデータの提供を行うデータサーバが動作している。AI 処理を行うサーバでは、カメラ画像の分類処理に TensorFlow⁶⁾フレームワークを用いた。また、各サーバは Python 用ウェブアプリケーションフレームワークである Flask⁷⁾を用いて、WebAPI を提供している。

なお、遠隔支援システムと同様に、各サーバはそれぞれ Docker 仮想コンテナ上に構築した。また、各コンテナは同一マシン上で稼働しており、複数コンテナの実行にあたっては Docker Compose を使用した。

2. 4 実用性検証方法

2. 4. 1 対象業務

複合環境試験装置（振動試験機）の研修を対象とする。現在、当該研修は職員が 2 人一組で業務にあたっており、利用者と当センター職員の接触機会が多くなっている。

2. 4. 2 システム評価方法

各システムは動作テスト・負荷テスト・ユーザーテス

トを通過後、実際の研修業務で活用し、従来通りの業務に支障がないか、感染症対策として有効であるか（不測の事態における業務継続性向上に有効か）の 2 点を評価した。

3 結果及び考察

3. 1 遠隔支援システム

3. 1. 1 開発成果

遠隔支援システム利用時の各端末画面を図 6 に示す。図 6 において、左はスマートグラス着用者の視界イメージ、右は支援者の利用パソコン画面である。

スマートグラスと支援用 PC のそれぞれでアプリを実行後、基本的には支援者側で発信操作を行うことで通信を開始する。通信開始後は、スマートグラス側視界カメラの映像が常に支援者側へ送信される。また、支援者側は必要に応じて画面共有機能によるスマートグラス側との資料共有が可能である。



(a) 通信中



(b) 画面共有時

図 6 遠隔支援システム利用イメージ

3. 1. 2 各種評価

3. 1. 2. 1 動作テスト（単体・結合）

設計仕様に基つきチェックを実施し、すべての項目をクリアした。

3. 1. 2. 2 負荷テスト

各端末でアプリを起動後、長時間の通信や特定の操作が繰り返される状況などにおいて、不具合が発生しないか確認を行った。想定研修業務での稼働時間（約 2 時間）以上の長時間でも安定して通信できることを確認した。

3. 1. 2. 3 ユーザーテスト

本システムの開発に携わっていない当センター職員を 2 人一組とし、当センター利用者（スマートグラスを

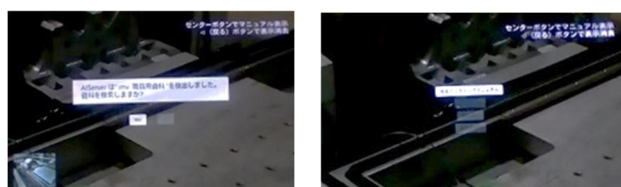
着用し研修を受ける」と、当センター職員（支援用 PC を用いて研修を実施する）の役割に分け、あらかじめ設定したテスト項目に遠隔支援システムを利用して取り組んでもらった。ユーザーテストは計 4 組実施し、遠隔支援システム動作の最終チェックとした。

参加した職員はスマートグラスの利用経験がなかったものの、おおむね各アプリをスムーズに操作でき、遠隔支援システムにも問題は発生しなかった。

3. 2 アシストシステム

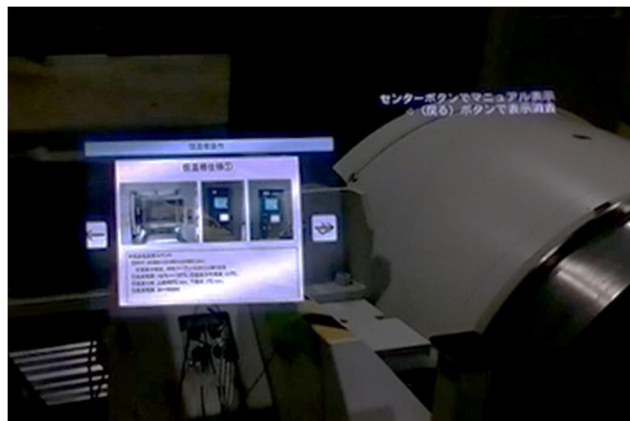
3. 2. 1 開発成果

スマートグラス着用者のデータ要求操作により、アシストシステムはカメラ画像を基に対象機器を推定し、推定結果を着用者に確認する（図 7（a））。着用者の承認後、スマートグラスに対象機器に関するデータのリストが表示される（図 7（b））。リストから必要なデータを選択すると、スマートグラスのディスプレイ上に AR 表示される（図 7（c））。なお、アシストシステムの AR 表示は 3 自由度であり、角度情報のみを使用している。



(a) 機器認識時

(b) リスト表示時



(c) データの AR 表示時

図 7 アシストシステム利用イメージ

3. 2. 2 各種評価

3. 2. 2. 1 動作テスト（単体・結合）

設計仕様に基づきチェックを実施し、すべての項目をクリアした。

3. 2. 2. 2 負荷テスト

アシストシステム利用時のスマートグラス稼働時間が 1 時間程度しか確保できなかった。周囲環境にも依存するが、10 分間のシステム利用でスマートグラスのバッテリーは約 11% 程度消費した。また、発熱の問題もあり、充電しながらの動作は安定しなかった。

スマートグラス上の処理では表示と通信の負荷が大きかった。特に通信については負荷が大きく、AI サーバへ転送するデータ、サーバからダウンロードするデータ、それぞれの容量を適切に調整する必要がある。また、本研究では作業中に必要なデータの更新は多い想定で設計したため、アプリ内部にあらかじめデータを用意するなどの代替手段は実装しなかった。

本研究においては、研修実施には遠隔支援システムの優先度が高く、遠隔支援システムと併せての利用を想定するとバッテリーの持続時間が十分ではないことから、以降に予定していた評価は実施しなかった。

3. 3 実務への試験導入

開発したシステムのうち、各種評価をすべてクリアした遠隔支援システムについて評価を行った。

研修受講希望の当センター利用者（以下、受講者）に協力いただき、受講者がスマートグラスを着用、当センター職員が別室から支援用 PC を用いて、約 1 時間の研修を実施した。

研修後、受講者は複合環境試験装置による振動試験を問題なく実施しており、従来通りの研修効果を確認した。また、研修中の職員と受講者の接触機会は大きく減少しており、感染症予防にも効果があると判断した。

4 おわりに

スマートグラスによる作業支援を目的とした遠隔支援システム及びアシストシステムを開発し、遠隔支援システムによる研修が問題なく実施できることを確認した。なお、当センターにおいては製造工程に相当する業務が存在しないため、作業支援に最も近い業務である研修を対象に実用性の検証を行った。

本研究においては当センター内の別室間の通信であった。当然ではあるが、通信経路が確保できれば外部との通信も可能である。外部との通信が可能になれば、更なる業務継続性改善やユースケース創出につなげられる。

社会全体で DX 推進の機運が高まっており、本研究において開発した各システムのような機能は需要が高いと思われる。また、スマートグラスのようなウェアラブルデバイスの改良は日進月歩で進んでおり、扱えるデータも多様化している。ウェアラブルデバイスは製造業と親和性が高く、各社のデータ資産利用を目的とした導入検討も盛んになっていくと考える。今後は、MR（複合現実）機能を持つデバイスなどを利用したデータ資産の利活用の手法について検討していく。

参考文献

- 1) BT-300 : "https://www.epson.jp/support/portal/support_menu/bt-300.htm", セイコーエプソン(株)
- 2) WebRTC : "<https://webrtc.org/>", Google 社
- 3) SkyWay : "<https://webrtc.ecl.ntt.com/>", エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ(株)
- 4) Docker : "<https://www.docker.com/>", Docker 社
- 5) Unity : "<https://unity.com/>", Unity Technologies 社
- 6) TensorFlow: "<https://www.tensorflow.org/>", Google 社
- 7) Flask: "<https://flask.palletsprojects.com/en/2.0.x/>"

経常研究

生姜辛味成分の簡易分析法の開発

阿久津 知宏* 金井 悠輔*

Development of Simplified Analysis Method for Pungent Components in Ginger

AKUTSU Tomohiro and KANAI Yusuke

生姜の辛味は多すぎるとクレームにつながることもあるため、原料の辛味成分把握は重要である。本研究では、薄層クロマトグラフィー (TLC) 法を活用し、辛味の程度をすぐに判断できる簡易分析法の検討を行った。辛味成分である 6-ジンゲロールの簡易抽出は乳鉢粉碎による抽出が最も抽出効率がよく、ばらつきが小さい方法であった。TLC 分析条件は濃縮ゾーン付の TLC プレートを使用し、スポット量を 2 μ L とする条件が最適であった。確立した条件により、TLC プレート上でクレームとなる可能性がある生姜を判別することができた。

Key words: 生姜, 辛味, 6-ジンゲロール, TLC

1 はじめに

生姜の辛味成分は抗酸化作用などの機能性が知られている一方、多すぎると辛味が増してクレームにつながることもあるため、原料の辛味成分把握は重要である。辛味の評価を官能評価で行う場合、基準合わせも難しく人によるバラツキも大きい。高速液体クロマトグラフィー (HPLC) 法により辛味成分である 6-ジンゲロールの含有量を分析できるが、機器が高価であるため、保有していない企業がほとんどである。さらに、HPLC は操作が煩雑である上、結果が得られるまで時間がかかり、現場ですぐに判断できないという問題がある。

一方、HPLC 法のように高い精度の分析値は得られないものの、おおまかな比較ができる簡易分析の手法として薄層クロマトグラフィー (TLC) 法がある。TLC 法は高価な機器を必要とせず、迅速に分析することが可能である。また、分析結果は呈色することにより目視で容易に確認できる。

本研究では、TLC 法を活用し、辛味の程度を迅速に判断できる簡易分析法の開発を行った。

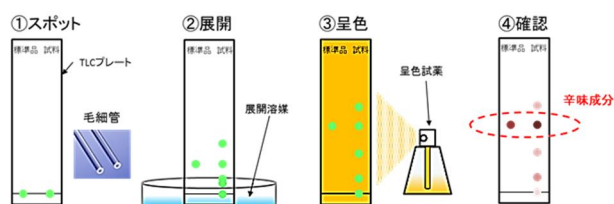


図1 TLC法の概略図

2 研究の方法

2. 1 辛味成分の抽出

2. 1. 1 ミル粉碎による抽出

フードプロセッサーにより粗粉碎した生姜をミル（三洋電機製、SM-KM36 型）により 1 分間粉碎し、エタノールで抽出した。抽出濃度は、生姜 20 g に対して添加エタノール 80 mL (1:4) , 20 mL (1:1) , 添加なしとし抽出した。

2. 1. 2 乳鉢粉碎による抽出

フードプロセッサーにより粗粉碎した生姜を乳鉢（φ 130 mm）により 5 分間粉碎し、前項同様にエタノール抽出した。

2. 1. 3 おろし器粉碎による抽出

生姜をおろし器により粉碎し、同様にエタノール抽出した。

2. 1. 4 従来法による抽出

フードプロセッサーにより粉碎した生姜 2 g にメタノール 25 mL を加え、氷冷下で 3 分間ホモジナイズした。10 分間振とう抽出した後、遠心分離 (10,000 rpm, 10 分間) して上澄みを得た。残留物にメタノール 25 mL を加え、同様の操作を 2 回繰り返した後すべての上澄みを合わせ、100 mL に定容した。

2. 2 TLC 法による辛味成分分析

TLC 法による 6-ジンゲロールの分析は薬用植物データベースの方法¹⁾を参考にした。TLC 法の概略図を図 1 に示す。TLC プレートへ 6-ジンゲロール標準溶液及び試料溶液を毛細管によりスポットし、展開溶媒を約 5 cm 展開した後、TLC プレートを風乾した。これに噴霧用 4-

* 栃木県産業技術センター 食品技術部

ジメチルアミノベンズアルデヒド試液を均等に噴霧し、105℃で5分間加熱した後、放冷した。このとき試料溶液から得たスポットのうち、6-ジングロール標準と等しい位置のスポットについて色の濃淡を確認した。

TLC プレートは TLC シリカゲル 60F₂₅₄ (メルク製) 及び TLC シリカゲル 60F₂₅₄ 濃縮ゾーン付 (メルク製) の 2 種類を使用した。スポット量は 10 μ L, 5 μ L, 2 μ L とした。

展開溶媒はヘキサン/酢酸エチル (1:1), ヘキサン/アセトン (3:2), ヘキサン/ジエチルエーテル (1:4) を使用した。

2. 3 HPLC 法による辛味成分分析

従来法により抽出した試料液 5 mL を分取し、水で 10 mL に定容し、HPLC 用分析試料とした。

簡易的な抽出方法で抽出した試料は水・メタノール混液 (水:メタノール=1:1) で希釈し、HPLC 用分析試料とした。

HPLC 条件は、装置:Nexera X2 (島津製作所製), 検出器:フォトダイオードアレイ検出器, 検出波長:280 nm, カラム:Kinetex C18 2.1 mm I.D.×50 mm (島津ジーエルシー製), カラム温度:35℃, 溶離液 A:水 (0.1%ギ酸含有), 溶離液 B:アセトニトリル (0.1%ギ酸含有), グラジエント条件:溶離液 B30%→90% (5 min), 90% (5 min), 流速:0.3 ml/min とした。

2. 4 官能評価

生姜は山生姜及び新生姜の 2 種類を使用した。辛味の評価は VAS (Visual Analog Scale) 法 (視覚的評価スケール) により, 10 cm のスケール上であてはまる位置に印をつける方法で実施し, スケールの左端から印までの

長さを測定して評価値とした。スケールは左端を「辛くない」とし, 右端を「非常に辛い」とした。

3 結果及び考察

3. 1 辛味成分抽出方法の検討

従来法による 6-ジングロールの抽出はホモジナイザー等の特別な機器を用い, 煩雑な操作を伴う方法である

表 1 抽出率及び相対標準偏差

抽出方法	従来法に対する抽出率 (%)	相対標準偏差 (%)
ミル	17	—
乳鉢	62	3.5
おろし器	44	9.9

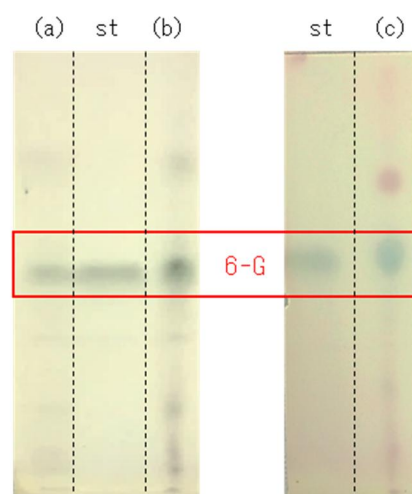


図 2 添加エタノール量の違いによる TLC 分析結果

(a) 1:4, (b) 1:1, (c) 添加なし, st:6-ジングロール標準品 (800ppm), TLC プレート:TLC シリカゲル 60F₂₅₄, 展開溶媒:ヘキサン/酢酸エチル (1:1)。 (a), (b):乳鉢により粉碎した生姜を試料とした。(c):生姜をおろし器により粉碎し,ろ液を試料とした。(6-G:6-ジングロール)

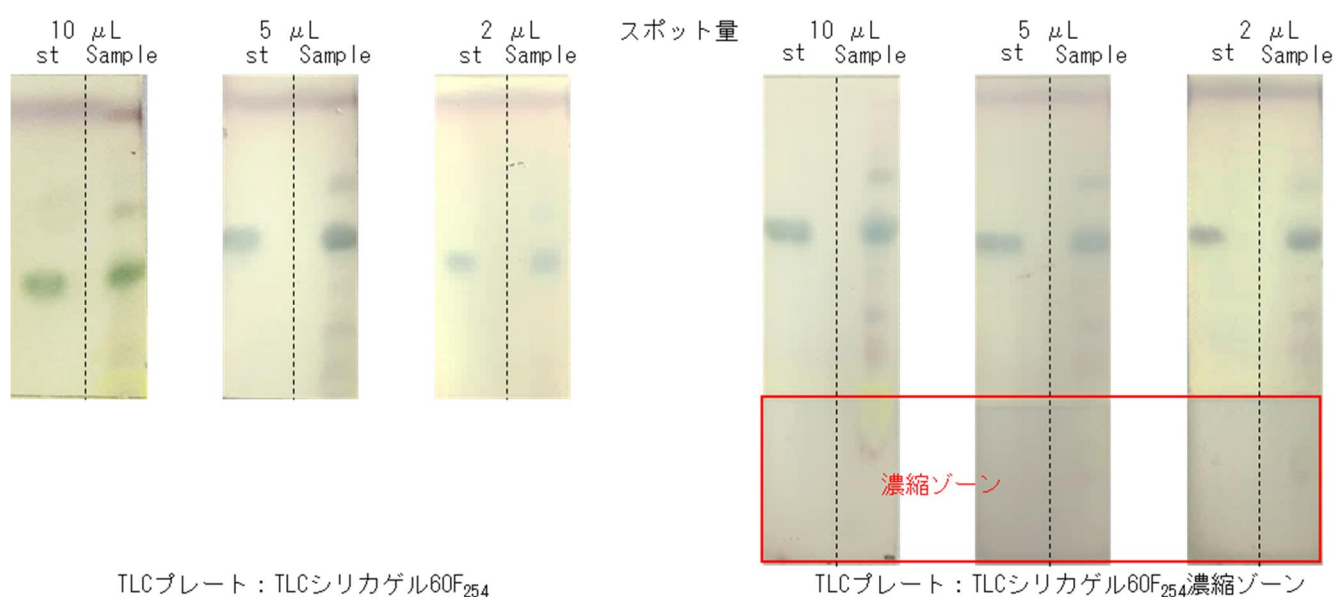


図 3 2 種類の TLC プレートによる TLC 分析結果

展開溶媒:ヘキサン/酢酸エチル (1:1), st:6-ジングロール標準品 (800ppm), Sample:1:1 抽出。

ため、簡易的な抽出方法を検討した。ミル、乳鉢、おろし器により生姜 20 g に対しエタノール 80 mL (1:4) で抽出した試料を HPLC により分析し、得られた分析値から従来法の分析値に対する抽出率を算出した。その結果を表 1 に示す。乳鉢はミル及びおろし器に比べ抽出率が高く、相対標準偏差が小さかった。この結果より、抽出効率がよくばらつきの小さい乳鉢による抽出が最適な簡易抽出方法であると考えられる。

3. 2 辛味成分抽出濃度の検討

添加エタノール量の違いによる TLC 分析結果を図 2 に示す。生姜に対する添加エタノール量を少なくすると 6-ジンゲロールの色が濃くなった。一方、エタノール無添加においても 6-ジンゲロールを確認できたが、毛細管から試料溶液の吐出を十分に行うことができなかった。よって、試料溶液を一定量スポットするためには溶媒を添加する必要がある、その割合は生姜に対して 1:1 が最適であると考えられる。

3. 3 TLC 法による辛味成分分析条件の検討

3. 3. 1 TLC プレートの検討

2 種類の TLC プレートによる TLC 分析結果を図 3 に示す。いずれの TLC プレートにおいてもスポット量を少なくするほど 6-ジンゲロールの色が薄くなる傾向がみられた。TLC シリカゲル 60F₂₅₄ では、2 μ L で 6-ジンゲロールの確認が困難になった。一方、TLC シリカゲル 60F₂₅₄ 濃縮ゾーン付では 2 μ L でも 6-ジンゲロールを確認することが可能であった。これは濃縮ゾーンにより成分の広がりが抑制されたためであると考えられる。この結果より、濃縮ゾーンの有効性が示唆された。作業性については、量が少ないほどスポットが容易であった。よって、濃縮ゾーン付の TLC プレートを、スポット量を 2 μ L とする条件が最適であると考えられる。

3. 3. 2 展開溶媒の検討

薬用植物データベースの方法ではヘキサン/酢酸エチル (1:1) を展開溶媒としているが、酢酸エチルは劇物であるため管理が必要である。そこで、代替可能な溶媒について検討した。代替溶媒 (アセトン、ジエチルエーテル) を使用した TLC 分析結果を図 4 に示す。いずれの溶媒においても TLC プレート上で 6-ジンゲロールを確認可能であった。特にアセトンは酢酸エチルと同等の結果であることから、代替溶媒として最適であると考えられる。

3. 4 官能による辛さと成分含有量との関係

生姜の官能評価結果を表 2 に、HPLC 分析結果を表 3 に、官能による辛さと 6-ジンゲロール含有量の関係を図 5 に示す。図 5 より、官能による辛さと 6-ジンゲロール含有量の間に直線性が見られなかったため、生姜の辛さは 6-ジンゲロール含有量だけではなく、繊維質等、他の要因

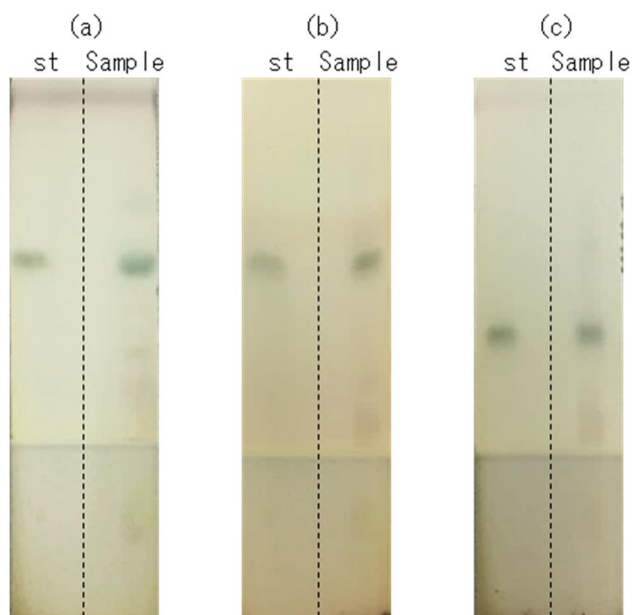


図 4 展開溶媒の違いによる TLC 分析結果

(a) ヘキサン/酢酸エチル (1:1) (b) ヘキサン/アセトン (3:2)
(c) ヘキサン/ジエチルエーテル (1:4), st : 6-ジンゲロール標準品 (800ppm), Sample : 1:1 抽出, TLC プレート : TLC シリカゲル 60F₂₅₄ 濃縮ゾーン付。

表 2 生姜の官能評価結果

種類		評価値 (mm)
山生姜 (n=4)	A	23 $\pm$ 16
	B	42 $\pm$ 25
	C	79 $\pm$ 2
新生姜 (n=9)	A	38 $\pm$ 26
	B	67 $\pm$ 17
	C	70 $\pm$ 24

表 3 生姜の HPLC 分析結果

種類		6-ジンゲロール (ppm)
山生姜	A	725
	B	575
	C	971
新生姜	A	767
	B	888
	C	1320

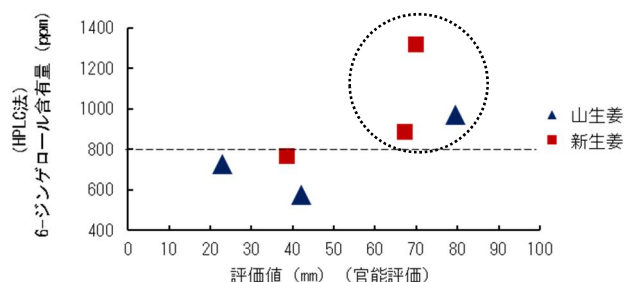


図 5 官能による辛さと 6-ジンゲロール含有量の関係

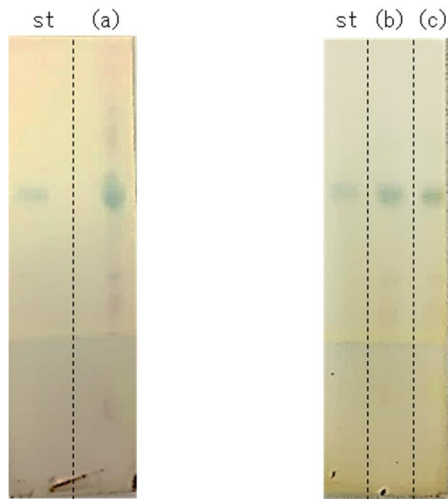


図6 クレームになる可能性がある生姜の TLC 分析結果
(a) 山生姜 C (1:1 抽出), (b) 新生姜 C (1:1 抽出),
(c) 新生姜 B (1:1 抽出), st: 6-ジンゲロール標準品
(800ppm), TLC プレート: TLC シリカゲル 60F₂₅₄ 濃縮ゾーン
付, 展開溶媒: ヘキサン/酢酸エチル (1:1)。

も関係すると考えられる。しかし、官能評価の評価値が高かった生姜（山生姜 C, 新生姜 B, 新生姜 C）は 6-p ジンゲロール含有量が多い傾向にあった。よって、6-ジンゲロールは生姜の辛味の程度を表す指標になると考えられる。

3. 5 クレームになる可能性がある生姜の判別

辛味が強い生姜はクレームになる可能性があることから、官能評価の評価値が高かった生姜を TLC プレート上で判別できるかどうかについて検討した。これらの生姜のうち最も 6-ジンゲロール含有量が少なかった新生姜 B

(888ppm) と、官能評価の評価値が低かった生姜のうち最も 6-ジンゲロール含有量が多かった新生姜 A

(767ppm) との間に判別基準 (800ppm) を設定した。6-ジンゲロール含有量が 800ppm に相当するように調製した 6-ジンゲロール標準品を使用し、色の濃淡を比較することにより判別を試みた。その結果を図 6 に示す。いずれの生姜も 6-ジンゲロール標準品よりも濃い色であった。この結果より、最適化した条件によりクレームになる可能性がある生姜を TLC プレート上で判別できることがわかった。

4 おわりに

生姜の辛味成分である 6-ジンゲロールについて、TLC 法を活用した簡易分析法を開発し、以下の知見を得た。

- (1) 簡易抽出法は抽出効率がよくばらつきの小さい乳鉢により粉碎し、生姜に対して 1:1 でエタノールを添加する条件が最適であった。
- (2) TLC 分析条件は濃縮ゾーン付 TLC プレートを使用し、2 μ L をスポットする条件が最適であった。
- (3) (1), (2) で確立した条件によりクレームになる可能性がある生姜を判別することができた。

今後は本研究の活用により、県内食品メーカーにおける生姜辛味成分の管理精度向上が期待される。

参考文献

- 1) “薬用植物総合情報データベース” (<http://mpdb.nibiohn.go.jp/>), 国立研究開発法人 医薬基盤・健康・栄養研究所薬用植物資源研究センター (2013-) (2022 年 2 月 17 日 (検索日))

経常研究

解し織のデザインと緋の効果に関する研究

佐瀬 文彦* 金子 優* 磯田 政夫*

Research on HOGUSHI-ORI Design and the Effect of KASURI
SASE Fumihiko, KANEKO Masaru and ISODA Masao

銘仙に使用される技法のひとつである解し織において、本織の際、経糸相互のずれによって生じる、緋の程度と柄の印象の変化を、製織前に予見できるようにするため、センターが所有するデザイン資料を活用し、緋による効果をシミュレーションして見本帳を作製するとともに、試織による検証を行った。その結果、緋の効果として柄の結合、消滅、新しい柄の出現の3つの効果が確認できた。また、シミュレーションと実製織の相関を把握でき、シミュレーションが効率的な企画に有効な手段であることを確認した。

Key words: 解し織, 緋, 効果

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、華やかな色使いと緋による独特な模様が特徴で、足利地域でも主に解し織の技法による銘仙が、第二次大戦頃まで盛んに生産されていた。しかしその後の洋装の普及などにより生産量は減少、これに伴い関連する企業数の減少や業態の変化、技術者の高齢化等により、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った。一方で、銘仙の緋模様が与えるレトロモダンな印象は、現在国内外を問わず高い評価を得ており、県内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、海外などから一定の評価を得ているものもある。

このような背景のもと、これまで繊維技術支援センター（以下センター）では、洋装に対応するための解し織の広幅化や、短納期化及びコストダウンを図るための生産体制の確立を目指し、共同研究等による支援に取り組んできた。

企業が解し織を製造する際は、元の図案（柄）に関することは、企画側のデザイナーとの協議によることが多く、製織後に緋によって捺染した元の図案の印象が変わってしまう場合がある（図1参照）。またデザイナーと製造する企業側での緋の生じ方へのイメージにずれがあり、リメイク（やり直し）などが起こることもある。逆に予想以上に緋の効果が現れて高評価に至ることもあるが、偶発的現象に頼った生産はできない。このため

企画の段階で予め企画側と製造側が緋の効果について共通意識を持った上で緋の程度や柄を決定し、製造時に意図的に緋（糸のずれ具合）の程度を制御すれば、緋の効果を最大限に活かした企画提案型の製品開発が可能となる。

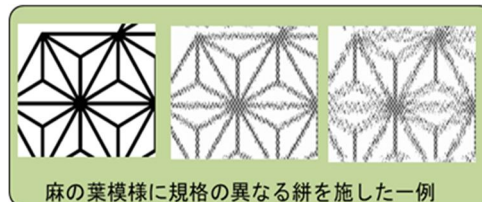


図1 緋による印象の変化（シミュレーション）

しかし、緋の程度とその効果については製織業の経験的部分によるところが大きいため、企画側とのイメージの共有や、初めての柄や緋の程度を正確に推し量ることは難しい。そこで、元の図案に対して緋による効果を事前に明らかにする手法等を示すことで、企業が効率的に差別化製品の企画をする際の一助とする。

2 研究の方法

2.1 デザインの選択と調整

センターが保有するデザイン資料の中から20点を選択し、テキスタイル用の柄として使用できる程度の色まとめや柄の修正・補完など一連の図案調整を行った。

2.2 緋のシミュレーション

2.1で調整した図案に対して、テキスタイルデザインソフト（4DboxPLANS【トヨビシビジネスシステム製】：以下デザインソフト）のオプション機能を使用して緋のシミュレーションを行った。シミュレーションは程度により4段階

* 栃木県産業技術センター 繊維技術支援センター

実施してそれぞれ結果をプリントして緋の見本とした。

また、シミュレーションの結果から柄に対する緋の効果について考察した。

2. 3 試織と検証

シミュレーションに使用した柄から4柄程度を選び実際に解し織を試織して緋を現し、シミュレーション結果との比較検証を行った。

3 結果及び考察

3. 1 デザインの選択と調整

デザイン資料から、令和2年度の研究¹⁾で分類を行った新しい分類(図2参照)毎に、構成する柄の大きさや組み合わせのうち代表的なものを計20柄選択した。経緋を行うため縞柄(特に経縞は変化が無い)や無地に近いものは変化が比較的少ないか、或いは想定しやすいため、今回は対象から除外し、リピート柄、大柄、地紋小紋、抽出柄から選出した。

縞格子柄	単純な縞(たて・よこ)及び格子
大柄	地柄の中に大きな柄が配置されている
リピート柄	大きめの柄が全体に繰り返している
地紋小紋	細かい柄が全体に繰り返している
無地・不完全	無地及び柄の一部分
抽出柄	上記フォルダ内のファイルから単独柄部分を切り出したもの



図2 新しい分類と選出柄の例

デザイン資料のデータは手書の絵をスキャンしたフルカラーであるため、捺染用の製版に使用できるように図案調整を要する。色まとめ・輪郭修正・ゴミ取りなど一連の図案調整作業をデザインソフトや画像編集ソフト(Photoshop Elements [Adobe 社製])を使用して実施した。

3. 2 緋のシミュレーション

調整後の図案についてデザインソフトの緋を使用してシミュレーションを行った。パラメーターを図3に、処理前後の図案の状態の例を図4に示す。

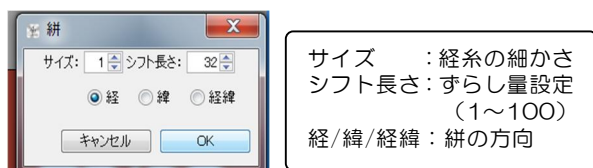


図3 シミュレーションのパラメーター

本研究で設定したパラメーターは、サイズは最も経糸が細い扱いとなる1に固定、シフト長さは4段階程度とするため、16, 32, 64, 90とし、緋の方向は経に固定とした。



図4 シミュレーション例(シフト量32)

シミュレーションの処理により、経糸1本(1ピクセル)毎に、シフト長を最大値とする乱数により経糸が垂直方向(経糸方向)に上下にずれる(下方向の最大値はシフト長-1ピクセル)。さらに平織の緯糸に相当するピクセルが市松模様に加わることで完成する(図5参照)。本研究では緯糸は白色の設定だがこの色は変えることができる。緯糸の挿入によって全体的な色の印象も変化する。

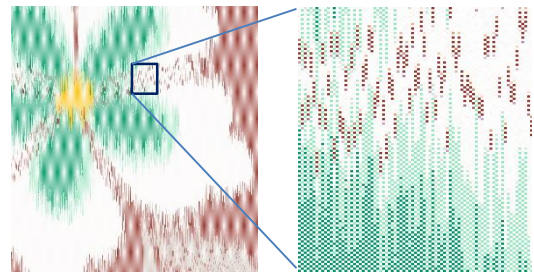


図5 シミュレーションの処理(拡大図)

解し織での緋は柄の印象をある程度保持したままで輪郭がにじむ程度が一般的だが、これは大きく分けて①捺染から本織までの間で行われる処理(蒸し、巻き返し、糸つなぎや引込みなどの機拵え)の間に、経糸相互間で偶発的に生じるずれ。②意図的に経糸相互に生じさせたずれ。の2つに起因して生じ、輪郭がにじむ程度のは①によるものが多く、②による場合はある程度制御された大きなずれを付与できる。緋の手法はいくつかあるため本研究では②の方法は特定せず、製織技術者がそれぞれの手法で意図的にずらすことを想定している。

シミュレーションでは①及び②の場合も含めて大きくずらしたいいわゆる大緋を含む範囲とし、選択した20柄について4パターンのシミュレーション(柄を90度回転させて横方向にしたものも含む)を行い、結果をA4サイズに印刷したものをまとめて見本帳(図6参照)を作製した。印刷の際に各ページには図案の名前にシミュレーション時のシフト量を加えた名称を印字した。

また、見本帳は表紙に元の図案のサムネイルを印刷したものを付けてあるため、利用者は選んだ図案から好み

のシフト量のシミュレーション結果を見ることが出来る。逆にシミュレーション結果の方を見渡して、気に入ったものから元の図案とシフト量を知ることでもある。



図6 見本帳

今回のシミュレーションの結果から考察した紺の効果については、経紺の一般的な効果である柄の輪郭が縦方向ににじむようになる他に、大きく分けて①柄の結合②柄の消滅（分散）③新しい柄の出現が確認できた。

①柄の結合

柄と柄の間の距離程度シフト（糸のずれとしては前後にシフトの約2倍）させると、柄が結合したように見えるようになった。

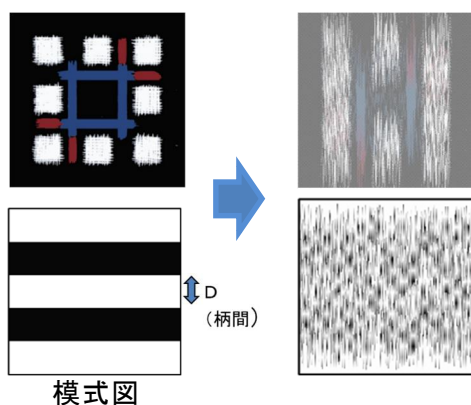


図7 柄の結合例

②柄の消滅

経紺はたて線（経縞）は効果が無いが、よこ線や小さな柄をその縦方向の長さ程度シフトさせると、柄や線としては認識できなくなる場合がある。このため、大きな柄と小さな柄（たて線とよこ線）が混在した場合、紺によって大柄・たて線は残り、或いは強調され、小柄・よこ線は消滅、或いは曖昧になった。

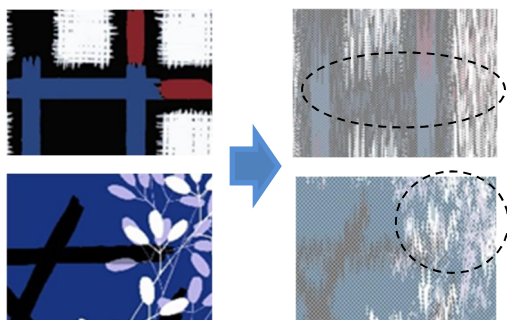


図8 柄の消滅例

③新しい柄の出現

紗綾形文様（卍繋ぎ）や小紋など、一様に線や図形がちりばめられたような柄は、微妙な濃淡のついた地紋のような新たな柄が出現する場合があった。また大きくかすれた結果、隣接した色が細かい線状に混ざることによって混色や通常の染色では表現しにくい細かな線が出現した。

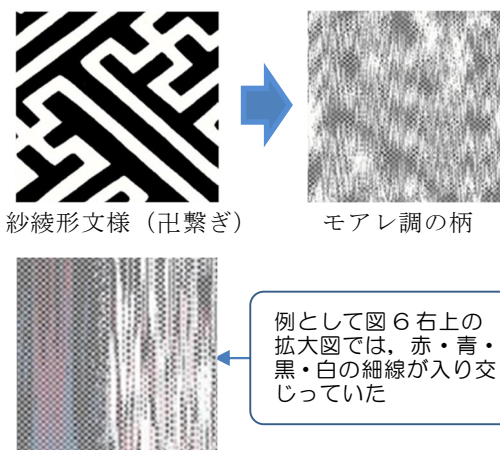


図9 新しい柄の出現例

これらについては、ある程度想像できる場合もあるが、実際のデザインの印象の変化は見本帳（シミュレーション結果）を見れば一目瞭然となる。企画段階での協議あるいは企業側からの提案の際にこれを用いてインスピレーションを高めることができる。また、提案の柄をシミュレーションして活用することもできる。

3.3 試織と検証

シミュレーションと実際の織物との差異を検証するために小幅の解し織を実際に製織した。規格等を表1に示す。

表1 試織の規格等

経糸・緯糸	絹紡糸 (2/120 [約150d])
整経幅	38cm・1204本 (密度 約32本/cm)
整経長	42m
仮織条件	密度 約1本/5cm

経糸への捺染は外注により実施したが、その他の工程はセンターで実施した。本研究では意図的にずらしを加えるためのずらし機を製作して織機に取り付けた。このため織機の間丁（けんちょう）を約30cm延長する改造も行った。本織時の織機改造部分を図10に示す。これにより、偶発的に生じるずれに加えて5段階のずれを生じさせることができる。ずらしの原理を図11に示す。なお、意図的にずらす手法はいくつかあり、このずらし機の原理も昔からあるものである。

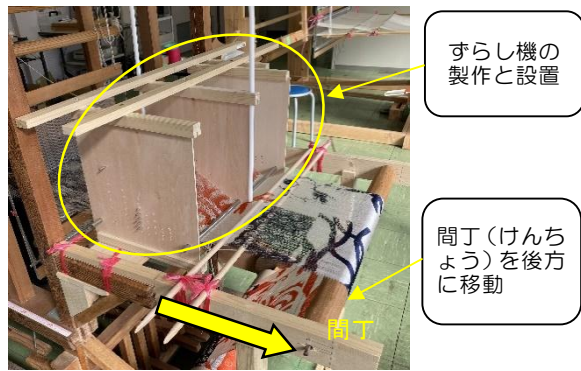


図 10 本織時の織機改造

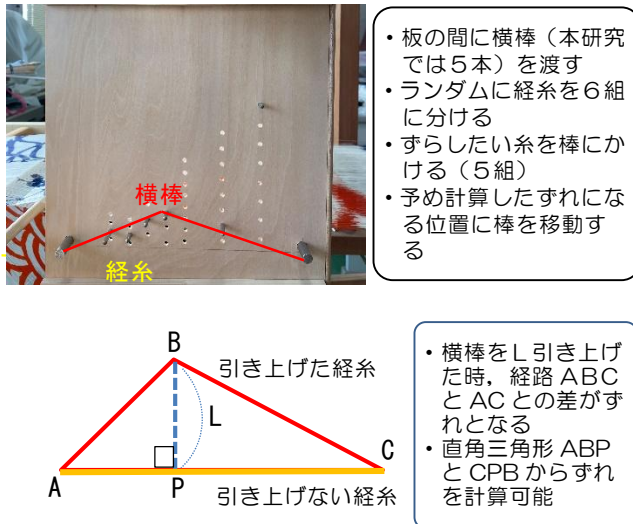


図 11 ずらし機の原理

試織は、まずずらし機を無効にした状態で実施し、その後ずらし機を機能させた。本研究では雰囲気を確認することが目的のため、経糸を引き上げる横棒を5本として、隣り合う数値が異なる0～5の乱数表を作成してどの経糸をどの棒にかけるか決定し、1本ずつ糸を棒にかけていく方法を取った。従って新たにずらしを加えないものも含めて計6パターンの意図的なずれが、偶発的なずれに加わった。

試織とシミュレーションの例を図12に示す。

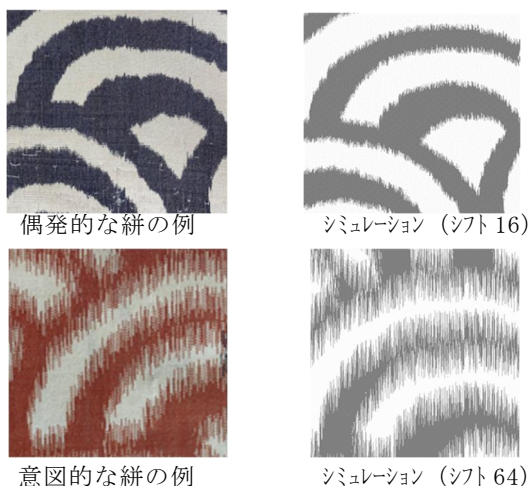


図 12 試織とシミュレーションの例

シミュレーションは画面内で実施し、任意のサイズで印刷するため、実際の柄やシフト量（長さ）に当てはめるには画像に対するシフト量（ピクセル）や印刷時の解像度（dpi）を加味した計算を要するが、例示の試織では偶発的なずれは最大5mm程度で、この場合シミュレーションはシフト量16程度が適応した。また、ずらし機を使用して意図的にずらしを増やした例で最大13mm程度を設定したものでは、実際の織物でも概ね設定値に偶発的なずれを加えたものが生じることと、その際シフト量64程度の雰囲気が適応することを確認した。一方でシミュレーションではシフト値を最大として乱数的にずらししているため、5段階のずれを加えるずらし機では、計6段階の癖が出てしまい、その分雰囲気が若干異なった。

企業においては、生産する解し織での偶発的なずれ方などは規格などに応じて把握しているため見本帳利用の際にはそれに合わせるか、再シミュレーションを行えば良い。また大緋の場合には、各製織技術者の持つ技法や、本研究のようなずらし機であればもっと多い段階にすることで製織すればより自然で、シミュレーションに近いものになると考えられる。

いずれにしても、実製織を行う事無く緋による柄の変化を予測したものを企画の段階から活用できれば、イメージの共有による製織後のリメイクの抑制や、審美性を高めた新たなデザインの提案などが可能となることが示唆された。

4 おわりに

解し織の経緋は偶発的、意図的に糸をずらすことによって生じる昔からの表現方法だが、元の柄が変化するため容易にやり直しが効かない。こうした織物ではシミュレーションは有効な手段であることが明らかとなった。

解し織による銘仙について、産地において地域団体商標「足利銘仙」が登録され、今後益々開発等が進むと思われる中で、企画や生産の効率化及び製品の高感性化に、本研究が一助となることを期待する。

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.18，43-46，(2021)

経常研究

切削条件が透明アクリル樹脂の透明度に及ぼす影響

西宮 紹* 関口 康弘* 岡村 弘太*

Effect of Cutting Conditions on the Transparency of Transparent Acrylic Resin
NISHIMIYA Sho, SEKIGUCHI Yasuhiro and OKAMURA Kota

透明アクリル樹脂は切削加工の際に、加工面が曇るため、切削加工後に仕上げ加工を行っている。加工面の曇りの軽減を図り後工程の短縮化を図るため、実験計画法により、主軸回転数・1刃送り・半径方向切込量の3因子について透明アクリル樹脂の切削条件の検討を行った。透明度の評価は特性値としてヘーズと表面粗さを用いた。

その結果、ヘーズに対して回転数による影響が最も大きかったが、工具推奨条件 (5000min^{-1}) 以下では回転数による影響は小さく、ヘーズはほぼ同じ値を示した。ヘーズと表面粗さには相関性が見られた。回転数と1刃送りを工具推奨条件の 5000 min^{-1} と 0.05 mm/tooth にそれぞれ設定し、最も影響が小さかった切り込み量を増加させた実験を行ったが、ヘーズへの影響は小さく、切り込み量を増やすことで加工速度を早くできる可能性が示唆された。

Key Words : アクリル樹脂, 切削加工, ヘーズ, 表面粗さ

1 はじめに

近年、多くの工業製品において、その構造は複雑化しており、展示会や商談の場において自社の技術や製品の魅力を伝えるために、製造事業者は透明アクリル樹脂を用いた可視化モデルを作製し説明に活用している。また、新製品開発における流動解析や機構動作確認にも内部構造を可視化した透明アクリル樹脂モデルが使用されている。

多くの企業では透明アクリル樹脂のモデルを作製する際、加工形状や嵌合部などを精密に仕上げるため、切削加工を行っているが、加工面が曇るため、切削加工後に仕上げ加工として、薬品や研磨、熱処理などの表面処理によって加工面を平滑にし、曇りを除去している。これら後工程は工程時間の増大や、薬品使用による環境負荷、製品の形状によっては研磨が困難などの課題がある。切削条件を検討することによって、加工面の曇りを軽減できれば、これらの課題を解決できると考えられる。

既往研究としてABS樹脂の切削条件による表面粗さの評価を行った報告¹⁾や透明アクリル樹脂板にブラストショット加工を行い、表面形状とヘーズ及び光沢度の関係性を評価した報告²⁾はあるものの、切削条件がヘーズ及び表面粗さに与える影響を検討した報告は見当たらない。

そこで本研究では、加工面の曇りの軽減を図るため、透明アクリル樹脂の切削条件がヘーズや表面粗さに及ぼす影響や、曇りを軽減し、かつ切削時間を短縮するための適切な切削条件について検討した。

2 研究の方法

2.1 加工機、被削材及び切削工具

加工機はオークマ(株)製のマシニングセンタ (MB-56VA) を用いた。工具は兼房(株)の直径10mm 2枚刃超硬アクリルエンドミル Type2 を使用した。

被削材は(株)クラレ製の透明アクリル樹脂を用い、試験片形状は縦50mm、横25mm、厚さ5mmの短冊状に切断し、未加工の面に対して、エアブロー使用、アップカットの側面削りを行った。

2.2 実験計画法による加工条件

切削条件のうち、主軸回転数、1刃送り、半径方向切込量を因子とし、それぞれの水準を表1に示す2水準とした。主軸回転数及び1刃送り、半径方向切込量は切削工具の推奨条件を基準に2割減を水準Aとし、2割増を水準Bとした。表1の3因子、2水準を、表2に示す実験計画法の2水準型L8直交表に割付け、表3に示す切削条件を設定した。

* 栃木県産業技術センター 県南技術支援センター

表 1 各因子の水準

因子 \ 水準	推奨 条件	水準 A	水準 B
主軸回転数 [min ⁻¹]	5000	4000	6000
1 刃送り [mm/tooth]	0.5	0.04	0.06
半径方向切込量 [mm]	0.1	0.08	0.12

 表 2 L₈直交表

切削 条件	列 1	列 2	列 3	列 4	列 5	列 6	列 7
1	A	A	A	A	A	A	A
2	A	A	A	B	B	B	B
3	A	B	B	A	A	B	B
4	A	B	B	B	B	A	A
5	B	A	B	A	B	A	B
6	B	A	B	B	A	B	A
7	B	B	A	A	B	B	A
8	B	B	A	B	A	A	B

表 3 因子と水準の設定

切削 条件	主軸回転数 [min ⁻¹]	1 刃送り [mm/tooth]	切り込み量 [mm]
1	4000	0.04	0.08
2	4000	0.04	0.12
3	4000	0.06	0.08
4	4000	0.06	0.12
5	6000	0.04	0.08
6	6000	0.04	0.12
7	6000	0.06	0.08
8	6000	0.06	0.12

2. 3 測定方法

加工面の透明度への影響度の指標となる特性値には、ヘーズと表面粗さを用いた。ヘーズの評価については、自記分光光度計(日本分光(株)製 V-670DS)を用いて測定を行い、可視光域(波長 400nm~820nm)の範囲で測定を行った。

使用した被削材の無加工状態でのヘーズは 15% であった。

表面粗さの評価については、表面粗さ測定器(東京精密(株)製 SURFCOM NEX031)を用いて測定を行った。測定距離 4mm で測定を行い、算術平均粗さ(Ra)と最大高さ(Rz)で求めた。

3 結果及び考察

3. 1 ヘーズ測定

表 3 の条件で切削した試料のヘーズの測定結果を図 1 に示す。n = 3 で切削を行い、折れ線グラフで示したものはそれぞれの平均値である。1~4 の 4000 回転で切削を行った試料は他の因子にかかわらず、大きな差は見られなかった。5~8 の 6000 回転で切削を行った試料は 5 から 8 にかけて右上がりの傾向が見られ、6000 回転の場合、1 刃送り及び切り込み量ともに増大するとヘーズが増大することが分かった。

得られたヘーズについて、それぞれの因子ごとの平均値を求めた結果を図 2 に示す。また、回帰分析を行い、各因子の影響の大きさを求めた結果を図 3 に示す。全ての因子で工具推奨条件に対し、2 割減の条件がヘーズが低く、影響の大きさは主軸回転数、1 刃送り、半径方向切込量の順で大きくなった。

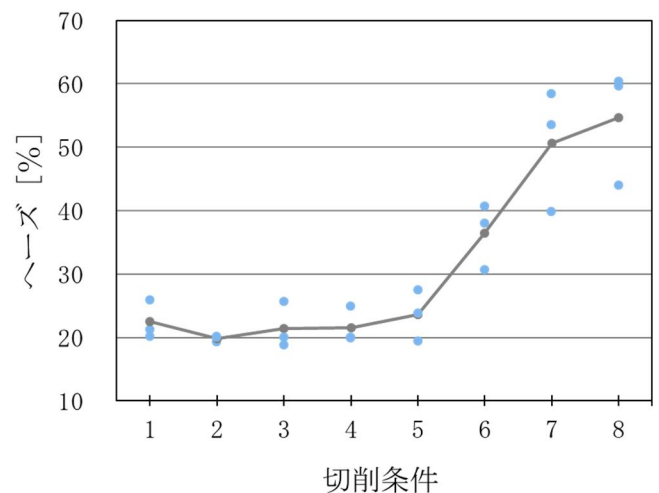


図 1 各水準におけるヘーズと平均値

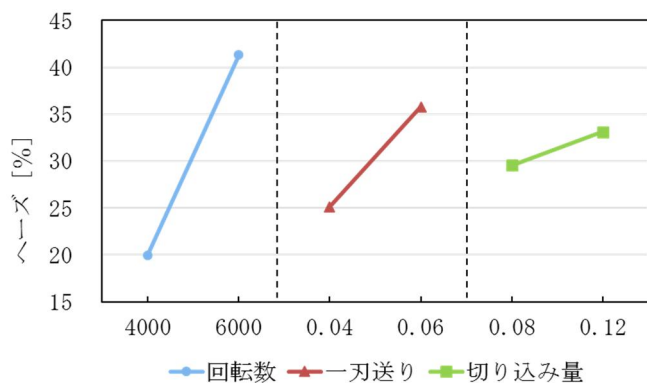


図2 各因子のヘーズの平均

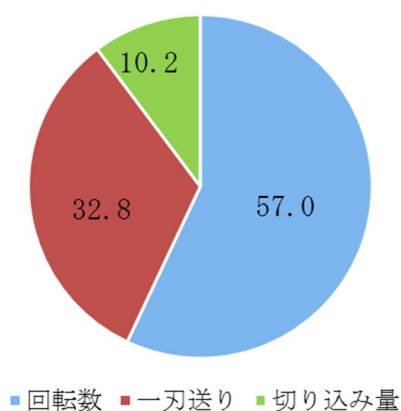


図3 各因子のヘーズに及ぼす影響の割合

3.2 ヘーズと表面粗さの関係

各切削試料の表面粗さ(算術平均粗さ及び最大高さ)とヘーズを図4に示す。表面粗さが増大すると、ヘーズが大きくなり、表面粗さとヘーズには相関関係が認められることが分かった。

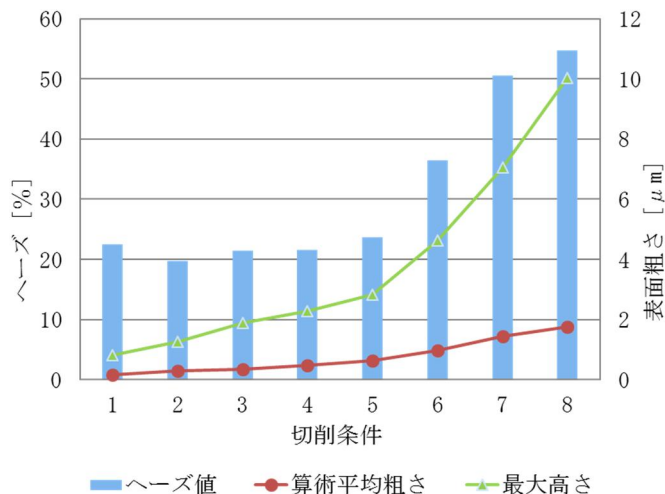


図4 ヘーズの平均と表面粗さの平均

3.3 低回転数の切削

最も影響の大きかった主軸回転数とヘーズの関係を調べるため、より低回転で切削した場合の測定を行った。通常、低回転で切削を行うと切削効率が低下するため、推奨条件の除去体積と同等になるよう条件を定め、実験を実施した。表4に切削条件を示す。

切削加工した試料のヘーズの測定結果を、表1の切削条件の結果と合わせて図5に示す。なお、ヘーズは各主軸回転数の平均値で示している。

これらの結果から、工具推奨条件である5000回転以下であれば、ヘーズに及ぼす影響は微少であり、6000回転になるとヘーズが急に大きくなることが分かった。

表4 工具推奨条件と低回転での切削条件

切削条件	回転数 [min^{-1}]	1刃送り [mm/tooth]	切り込み量 [mm]	除去体積 [cm^3/min]
推奨条件	5000	0.05	0.1	0.5
1-1	3000	0.03	0.17	0.51
1-2		0.048	0.11	0.528
1-3		0.06	0.09	0.54
1-4		0.072	0.07	0.504
1-5		0.02	0.25	0.50
1-6	2000	0.032	0.16	0.512
1-7		0.04	0.13	0.52
1-8		0.048	0.11	0.528

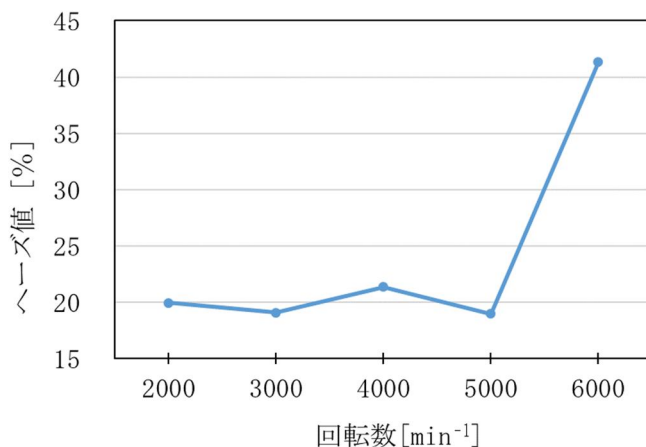


図5 各回転数におけるヘーズの平均

3. 4 半径方向切込量の影響

加工速度の増加を図るため、これまでに得られた結果から、ヘーズに及ぼす影響が最も小さい因子である切り込み量を増加させた実験を行った。主軸回転数・1刃送りは推奨値とし、表5に示す条件で実験を行った。

切削試料のヘーズの測定結果を図6に示す。切り込み量を0.05mmから0.10mmに増加した場合でも、ヘーズは0.5%程度の増加であり、工具の推奨条件より加工速度を早くできる可能性が示唆された。

表5 5000回転での切削条件

切削条件	主軸回転数 [min ⁻¹]	1刃送り [mm/tooth]	切り込み量 [mm]
2-1	5000 (推奨値)	0.1 (推奨値)	0.05(推奨値)
2-2			0.06
2-3			0.07
2-4			0.08
2-5			0.09
2-6			0.1

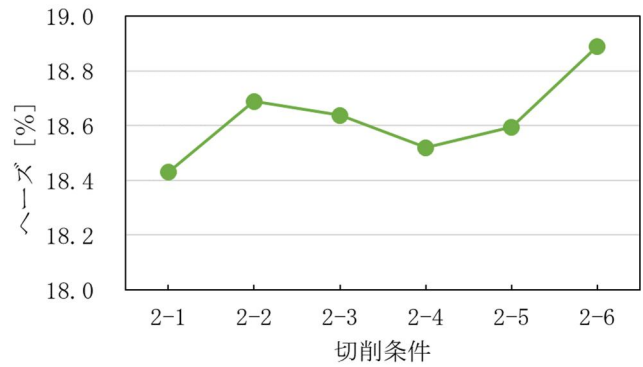


図6 5000回転におけるヘーズ

4 おわりに

切削条件が透明アクリル樹脂の透明度に及ぼす影響について比較・検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) ヘーズの増加は主軸回転数による影響が最も大きいですが、回転数が工具推奨条件(5000回転)以下では回転数による影響が極めて少ない。
- (2) 表面粗さとヘーズには相関性がある。
- (3) 工具推奨回転数では半径方向切込量を増やしてもヘーズに及ぼす影響は微少である。そのため、切り込み量を増やす事で、加工速度を上げることが出来る。

参考文献

- 1) 田中等幸, 横山哲也: "樹脂材料の適正な切削条件に関する研究", (2007)
- 2) 若林祐次, 米原牧子, 山辺秀敏, 吉田瞬, 杉林俊雄: "表面形状がアクリル樹脂板のヘーズと光沢度に与える影響", (2019)
- 3) 佐伯守彦, 安井平司, 近藤純, 川田昌樹, 細川晃: "プラスチックの超精密切削における仕上げ面粗さの実験的検討", (2001)

経常研究

つづれ織り技法による紬織物製品の開発

石井 優利奈* 太田 仁美*

Development of Tsumugi Textile Products by Tapestry Weaving
ISHII Yurina and OTA Hitomi

結城紬の柄の色を鮮明に表現するために、地機織りにつづれ織り技法を取り入れた製品開発に取り組んだ。糸の織度や密度の条件が異なる 42 種類の布地サンプルを製織して評価し、地機と手つむぎ糸を使用した製織につづれ織りを取り入れるための条件を整理した。さらに、求めた製織条件を反映させて、絵柄の試し織り、帯の製織を行い、布地の任意の場所に鮮明な絵柄を表現することができた。

Key words: 結城紬, 手つむぎ糸, つづれ織り

1 はじめに

結城紬では、模様は緋柄により表現されている。緋柄は緻密で繊細な表現が特徴であり、基本的に一定の柄の繰返しにより作成される。緋柄は、結城紬の伝統的な表現技法であり特徴の一つであるが、着尺の特定の場所に模様を配置することが難しく、また、地色（緋箇所以外の色）によって目色（緋の色）や色数がある程度限定されるなど、デザインの種類は制限される。産地では織り方や染色加工技術を工夫することで新たなデザインを取り入れようとする試みもある。

当センターでは令和元年度経常研究¹⁾において、地機織りに縫取り技法を取り入れた帯の製織を行い、製織段階で任意の場所に多くの色を使用した模様を表現することができた。ただし、縫取り技法の場合、模様部分には模様の色を表す縫取り糸だけでなく、地色の経糸・緯糸も表面に現れ、模様部分の色を縫取り糸の色のみで表現することはできないため、鮮明さは不十分であった。

そこで本研究では、結城紬の柄の色を鮮明に表現するために織密度や使用する糸の織度等を検討し、つづれ織りの技法を取り入れ製品開発に取り組んだ。

当センターでは令和2年度経常研究²⁾において、箆密度と糸の織度について試織・検討を行っており、基礎となる技術を蓄積しているが、つづれ織りのように緯糸密度の高い織物についての糸の織度や密度のデータの蓄積は少ない。そこで今回は結城紬の着尺の経糸製織条件になるべく近く、緯糸密度の高い織物の製織を目的とし、糸の織度・密度の条件を変えて複数の布地サンプルの製織及び評価を行った。また、求めた製織条件を反映させて絵柄の製織を行い、任意の場所に柄を織り出した帯の製織に取り組んだ。

2 研究の方法

2. 1 布地サンプル製織

2. 1. 1 経糸密度・緯糸織度の条件を変えたサンプル製織

「つづれ織り」とは、結城紬と同様、平織組織で製織可能な技法である。経糸が見えなくなるよう緯糸を高密度で織り込むため、絵柄を製織するには、模様部分・地部分の、それぞれの箇所に対応する色の緯糸を往復させ製織する必要がある。そこで、まず地機・手つむぎ糸を使用した製織で、緯糸を高密度で織り込むことのできる条件を求めるために、経糸密度・緯糸織度の条件を変えてサンプル製織を行った。

令和2年度に実施した経常研究でも緯糸を高密度で織り込むことが可能な条件はあったが、通常の結城紬着尺の経糸条件（経糸織度 150～180D、箆密度 63 羽/寸(寸=約 3.8 cm)）に比較して経糸織度が高く、箆密度が低い条件であった。今回は最終的に帯の試作品を製織するため、より結城紬着尺に近い経糸条件を求めることとした。また、使用する緯糸の織度によっても緯糸密度が変わるため、経糸の製織条件 4 種類、緯糸織度は 8 種類を使用し、計 32 種類のサンプルを製織した。製織条件を以下に示す。

【製織条件】

- ・経糸条件：表 1 に示す 4 種類、いずれも濃色（紺色）。
通し幅 30cm
整経長 92cm
- ・緯糸条件：100～1902D までの 8 種類、いずれも淡色。

* 栃木県産業技術センター紬織物技術支援センター

表1 経糸の製織条件

No.	使用した筵の密度	1羽あたりの引込数(本)	経糸織度(D)
①	31羽/寸	2	146
②	63羽/寸	1	146
③	40羽/寸	1	333
④	50羽/寸	1	260

2. 1. 2 緯糸織度, 緯糸の色の条件を変えたサンプル製織

2. 1. 1 では, すべてのサンプルで経糸と緯糸の色のトーン差を大きくしていた。そこで, 経糸と緯糸の色のトーン差が小さい場合と, トーン差が大きい場合の緯糸織度を検討した。製織条件を以下に示す。

【製織条件】

- ・経糸条件：筵密度 40 羽/寸, 1 羽あたり 1 本引き込み
淡色（黄色）
織度 [平均 333D]（引き揃え数 2 本）
通し幅 30cm
整経長 2m
- ・緯糸条件：淡色系 412～702D を 4 種類。
濃色系 302～708D を 6 種類用意。

2. 2 絵柄製織

次に, 絵柄を製織するための試し織りを行った。つづれ織り技法で表現できる柄（柄の細かさ）, 異なる 2 色が隣接する部分の柄の出方, 打ち込みや伸子の有無等の製織方法の検討を行うため, 曲線や直線を含む 6 パターンの図案を使用した。使用した図 1 に示す図案は令和元年度経常研究において, 縫い取り技法の試し織りをした際に使用した図案と同様の絵柄を使用した。

布地の製織条件を以下に示す。緯糸織度は 2. 1. 2 で求めた条件を反映させ, 絵柄ごとに 3 種類を用意した。

【製織条件】

- ・経糸条件：筵密度 40 羽/寸, 1 羽あたり 1 本引き込み
淡色（黄色）
織度 [平均 333D]（引き揃え数 2 本）
通し幅 30cm
整経長 2m
- ・緯糸条件：絵柄 1[平均 447D]
絵柄 2[平均 335D]
絵柄 3[平均 284D]

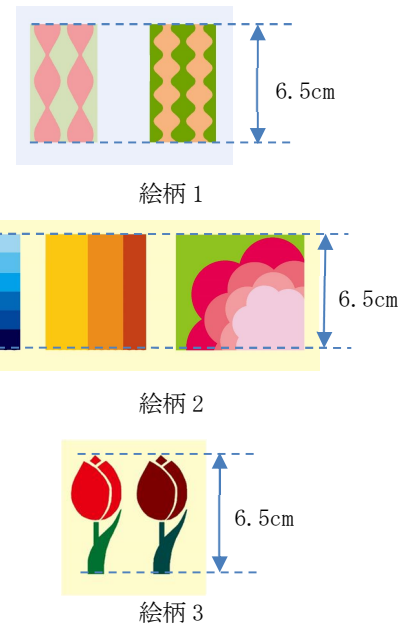


図1 試し織りに使用した図案

2. 3 帯製織

最後に, サンプル製織及び絵柄の製織結果を反映させ, 帯の製織を行った。帯は着用したときに身体の背面（お太鼓部分）のみに柄の出る名古屋帯とした。製織段階で柄を織り出していくため, 計測しながら織り進め, 織り始めてから 3.3m の部分に絵柄を織り出した。帯仕立て後の柄の配置を予想し作成した設計図を図 2 に示す。

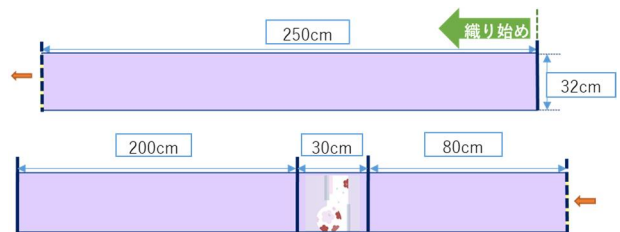


図2 帯製織設計図

帯の製織に使用した図案を図 3 に示す。製織する際に裏面になる方を, 帯を仕立てる際には表として使用するため, 図は左右反転した状態で使用した。

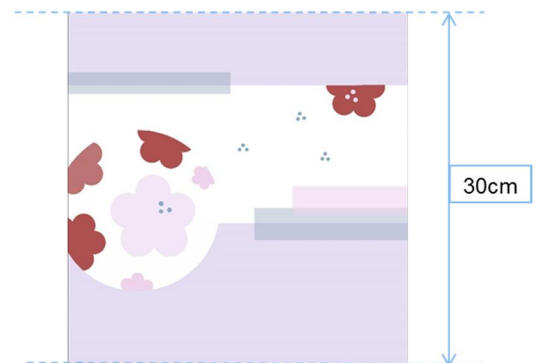


図3 帯に使用した図案

帯の製織条件を以下に示す。緯糸の織度は2種類を用意し、お太鼓部分とそれ以外の部分で糸の織度を変えて製織した。

【製織条件】

- ・経糸条件：箴密度 40 羽/寸，1 羽あたり 1 本引き込み
織度 [平均 321D] (引き揃え数 2 本)
通し幅 32cm
整経長 7.98m
- ・緯糸条件：お太鼓部分 [平均 413D]
お太鼓部分以外 [平均 1012D]

3 結果及び考察

3. 1 布地サンプルの評価

3. 1. 1 経糸密度・緯糸織度の条件を変えた布地サンプルの評価

製織した 32 種類の布地サンプルの製織条件及び結果を表 2 に示す。

表 2 布地サンプル①～④の製織条件及び結果

布地 No.	緯糸 No.	使用した 箴の密度 (羽/寸)	1羽あた りの 引込数 (本)	経糸 織度(D)	緯糸 織度(D)	①経糸 密度 (本/寸)	②緯糸 密度 (本/寸)
①	1	31	2	146	100	66	344
①	2	31	2	146	236	66	168
①	3	31	2	146	412	66	104
①	4	31	2	146	702	66	72
①	5	31	2	146	1008	66	54
①	6	31	2	146	1296	66	46
①	7	31	2	146	1597	66	38
①	8	31	2	146	1918	66	34
②	1	63	1	146	100	68	416
②	2	63	1	146	236	68	182
②	3	63	1	146	412	68	108
②	4	63	1	146	702	68	64
②	5	63	1	146	1008	68	48
②	6	63	1	146	1296	68	46
②	7	63	1	146	1597	68	36
②	8	63	1	146	1918	68	34
③	1	40	1	333	100	44	720
③	2	40	1	333	236	44	304
③	3	40	1	333	412	44	176
③	4	40	1	333	702	44	94
③	5	40	1	333	1008	44	64
③	6	40	1	333	1296	44	54
③	7	40	1	333	1597	44	44
③	8	40	1	333	1918	44	40
④	1	50	1	260	100	54	680
④	2	50	1	260	236	54	184
④	3	50	1	260	412	54	124
④	4	50	1	260	702	54	72
④	5	50	1	260	1008	54	52
④	6	50	1	260	1296	54	46
④	7	50	1	260	1597	54	36
④	8	50	1	260	1918	54	34

製織したサンプルのうち，26 種類のサンプルはその一部を図 4 に示すように緯糸が経糸を覆い隠さず，布地表面には経糸（濃色の糸）が現れた布地となった。No. ①-1，②-1，③-1，③-2，③-3，④-1 の 6 つのサンプルでは緯糸が経糸をほとんど覆い隠し，布表面には経糸が現れなかった。このうち 3 つのサンプルを図 5 に示す。

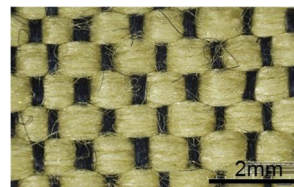
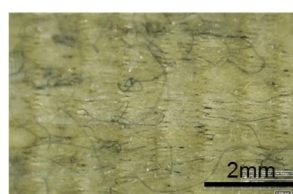
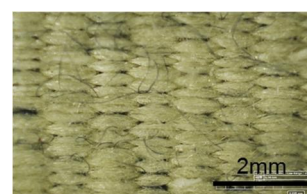


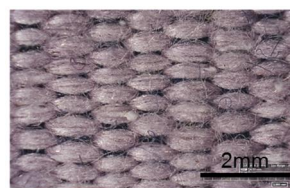
図 4 経糸が隠れなかったサンプル (No. ①-8)



No. ③-1



No. ③-2



No. ③-3

図 5 経糸が隠れたサンプル

各布地サンプルで緯糸織度が最も低い場合には，経糸密度に対して緯糸密度が高くなるため，経糸が隠されたが，緯糸密度が高すぎると箴と杼で打ち込む回数が増えたため，経糸がこすられることにより，毛羽立ちやすくなった。糸が毛羽立つと，布表面に毛羽が残りやすくなるだけでなく，糸が切れやすくなるので製織のしやすさや製織時間にも影響があった。また，布地サンプル①～④は，経糸に濃色（紺色），緯糸に淡色を使用したため，経糸と緯糸で色のトーン差が大きく，経糸が覆い隠されていても経糸の毛羽が布表面に目立ちやすかった。布表面の毛羽を目立たせないようにするには経糸と緯糸の色のトーン差を小さくするなどの改善が必要と考えられた。

このため，緯糸織度が最も低い条件を除き，通常の無地着尺の緯糸密度 (88～100 本/寸) に近い値となったサンプル，また，経糸を覆い隠す密度になったサンプルの条件 (箴密度 40 羽/寸，緯糸織度 236D より高く 702D 程度以下) を使用し，②のサンプル製織を行った。

3. 1. 2 緯糸織度、緯糸の色の条件を変えた布地サンプルの評価

製織した布地サンプルを図6に示す。経糸と緯糸の色のトーン差を小さくして製織した場合、緯糸織度 702D 以下、すべてのサンプルで布表面に現れる経糸の色はほとんど認められず、経糸の毛羽が出ていてもわずかであった。

経糸と緯糸の色のトーン差が大きい場合、緯糸 402D で経糸の色はほとんど認められず、それより高い織度では経糸の毛羽や糸の色が目立った。

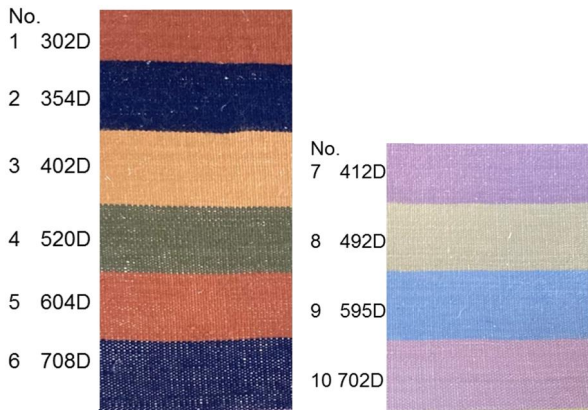


図6 布地サンプル⑤



絵柄 1



絵柄 2



絵柄 3

図7 つづれ織り技法で製織した絵柄



図8 縫い取り技法で製織した絵柄

3. 2 絵柄製織

製織した布地を図7に示す。今回の製織では、予定していた絵柄はすべて製織が可能であった。また、令和元年度に行った縫い取り技法での試し織りの製織結果を図8に示す。2つの製織結果を比較すると、今回製織した布地の絵柄がより鮮明な色で表現できることがわかった。

今回製織した布地では、布幅や緯糸密度に部分的な違いが現れたため、絵柄ごとに製織方法を調整した。

3. 2. 1 たて方向の色の境界部分の製織

隣接する2色の模様を製織する場合、2色の境界線がたて方向の直線である場合には、同じ経糸に緯糸を引っかけて折り返す作業を繰り返すと、経糸が左右に引っ張られて色の境界にたて方向に隙間ができる。これを防ぐため、部分的に2色の緯糸を重ねて挿入した。2色の境界部分を図9に示す。重ねる部分が多くなるとその部分のみがたて方向の山型に盛り上がるため、織り目の様子を見て適宜重ねる回数を間引くことで防止した。

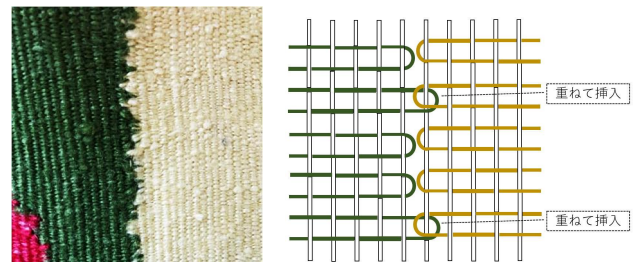


図9 境界線がたて方向の直線である2色の隣接部分
写真(左)と織り込み方(右)

3. 2. 2 打ち込み方法と布幅

絵柄の製織では絵柄の細部を表現するため、緯糸を入れ込む際、図10に示すような櫛や爪を使用した。これらを使用して緯糸を入れ込むと杼で打ち込むより緯糸の張力がゆるくなり、経糸が隠されやすくなった。絵柄1に使用した緯糸は、今回の絵柄製織に使用した中で最も高い緯糸織度[平

均 447D] であったが、経糸は完全に覆い隠され、経糸の毛羽も表面に残らず製織することができた。



図 10 製織に使用した櫛

今回の製織では、通常の結城紬に使用する筵よりも粗い密度の筵を使用しているため、経糸がよこ方向にずれやすくなった。そのため、伸子を使用して製織すると、幅は一定に保ちやすいが製織時によこ方向に伸びやすく、伸子をはずしたあと布が縮んで織りあがりの布地がたるんでしまった。このため、帯では伸子は使用せず製織したが、櫛や爪のみで緯糸を打ち込み続けると、織り進めるにつれ部分的に経糸の幅がつまる箇所ができた。絵柄 2 の製織では緯糸を打ち込む際に筵と杼を使用せず、櫛と爪のみを使用したため、経糸の幅が詰まり、緯糸密度が低下し、布表面に経糸が現れる部分ができた。その部分を図 11 に示す。経糸が完全に覆い隠される部分の緯糸密度が 216 本/寸であるのに対し、経糸の幅が詰まってしまった部分では、90 本/寸となった。また、布全体の幅も図 12 に示すように 3cm 狭くなった。これを防ぐため、絵柄 3 では、櫛・爪に加えて、筵と杼も併用して緯糸を打ち込み製織したところ、図 13 に示すように布幅が一定に保たれた。

3. 3 帯製織

製織した名古屋帯の絵柄を図 14 に示す。予定していた絵

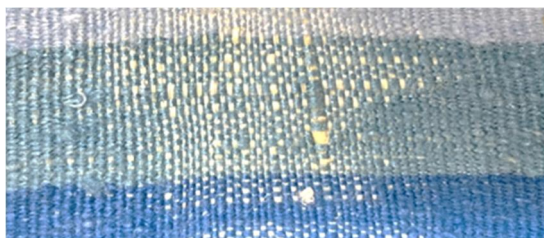


図 11 絵柄 2 緯糸密度が低下し経糸が隠されなかった部分

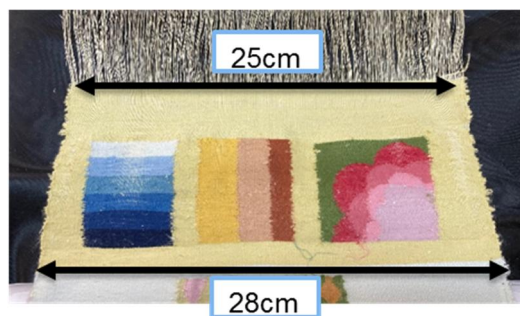


図 12 絵柄 2 布幅が詰まった様子

柄を織り出すことが可能であった。帯製織時には伸子は使用せず、緯糸の打ち込みに筵・杼を使用し、部分的な打ち込みに爪・櫛を併用することで幅を一定に保ち、緯糸密度の高い布地を製織することができた。



図 13 絵柄 3 筵と杼を使用し布幅が保たれた布地



図 14 製織した名古屋帯の絵柄

4 おわりに

糸の織度・織密度の条件を変えることで、地機・手つむぎ糸を使用した製織に、つづれ織り技法を取り入れることができた。また、つづれ織り技法を行う場合の、緯糸の打ち込み方法や伸子の有無等の製織方法を整理することができた。

令和元年度に実施した縫い取り技法での製織は、通常の結城紬着尺の製織条件とほぼ同じ条件で絵柄を製織できるという利点はあったが、絵柄の色を鮮明に表現することが難しい場合があった。それに対し、今回のつづれ織り技法では、適切な製織条件を使用することで、布地の任意の場所により鮮明に絵柄が表現できた。

参考文献

- 1) 石井優利奈ら：「令和元年度栃木県産業技術センター研究報告」, No.17, 53, (2020)
- 2) 石井優利奈ら：「令和2年度栃木県産業技術センター研究報告」, No.18, 55, (2021)

経常研究

陶器成形用石膏型製作の高精度化に関する研究

大和 弘之* 星 佳宏* 磯部 大我* 片岡 智史**

Fabrication of Gypsum Molds for Making Precision Pottery
YAMATO Hiroyuki, HOSHI Yoshihiro, ISOBE Daiga and KATAOKA Satoshi

石膏型とそれを用いて作られた陶器の寸法及び形状の変化を調査した。寸法変化はある程度予想可能であるが、形状変化を定量的に予測することが困難であった。予測可能な寸法変化を見込み、石膏型を CAD で設計し、石膏ブロックを機械加工することで製作した。製作した石膏型を用い、成形時の乾燥管理に注意して陶器を製作したところ、ほぼ設計のと通りの寸法及び形状の陶器を製作することができた。

Key words : 石膏型成形, デジタイザ, CAD/CAM, マシニングセンタ, デジタルものづくり技術

1 はじめに

陶磁器の成形方法の 1 つである石膏型成形は、粘土等で作った陶磁器の原型を石膏で型取り、原型を取り去ってできる空隙に粘土を充填し成形する方法である¹⁾。この方法により作られた製品の寸法や形状について、多少の誤差は手作りの良さとして消費者に受け入れられる一方で、製陶事業者からはデザインどおりの製品をつくりたいとのニーズがある。本手法を用いて製造している製陶事業者の中には成型型を外注している事業者もいるが、県内外注文の廃業による新たな製造委託先の開拓や石膏型製作費用の捻出等に苦慮している。このため、製陶事業者は型の内製化に関心を持っているものの、粘土の乾燥や焼成に伴う収縮や変形等を見込んだ石膏型を製作する技術・ノウハウがなく、内製化に取り組めない業者も少なくない。

そこで本研究では、石膏型成形において生じる成形品の収縮や変形等について、石膏型とそれを用いて成形された陶器との寸法及び形状の変化を調査し、これらを見込んだ石膏型を設計し製作する方法を検討した。ここで、石膏型の製作は、技量によらず設計のと通りの石膏型製作が期待できる機械加工により行った²⁾⁻⁴⁾。また、実際に製作した石膏型を用いて陶器を製作し検証した。

2 研究の方法

2. 1 石膏型成形における成形品の収縮・変形等調査

丸皿、オーバル皿、異形皿（いちご形）及び角皿の 4 種類の石膏型とそれを用いて作られた陶器について、目視及び寸法計測により収縮・変形等を調査した。

* 栃木県産業技術センター窯業技術支援センター

** 栃木県産業技術センター機械電子技術部

また、寸法及び形状に及ぼす粘土の違いや成形品乾燥の影響について、石膏型成形により角皿を製作して調査した。成形に用いた石膏型を図 1 に示す。成形は、益子焼協同組合が製造する益子水簸土及び益子赤土の 2 種類の粘土を用いた。成形品の乾燥は、そのまま手板状で乾燥する方法（以下、通常乾燥）及び発泡スチロール製容器に新聞紙を敷き、その上に 2 個の成形品の縁（フチ）と縁とを合わせて重ねて置き、上に新聞紙を被せて蓋をして乾燥させる方法（以下、管理乾燥）により行った。乾燥後、素焼き、施釉、本焼きをして陶器を製作した。



図 1 角皿石膏型



図 2 製作対象の陶器（角皿）

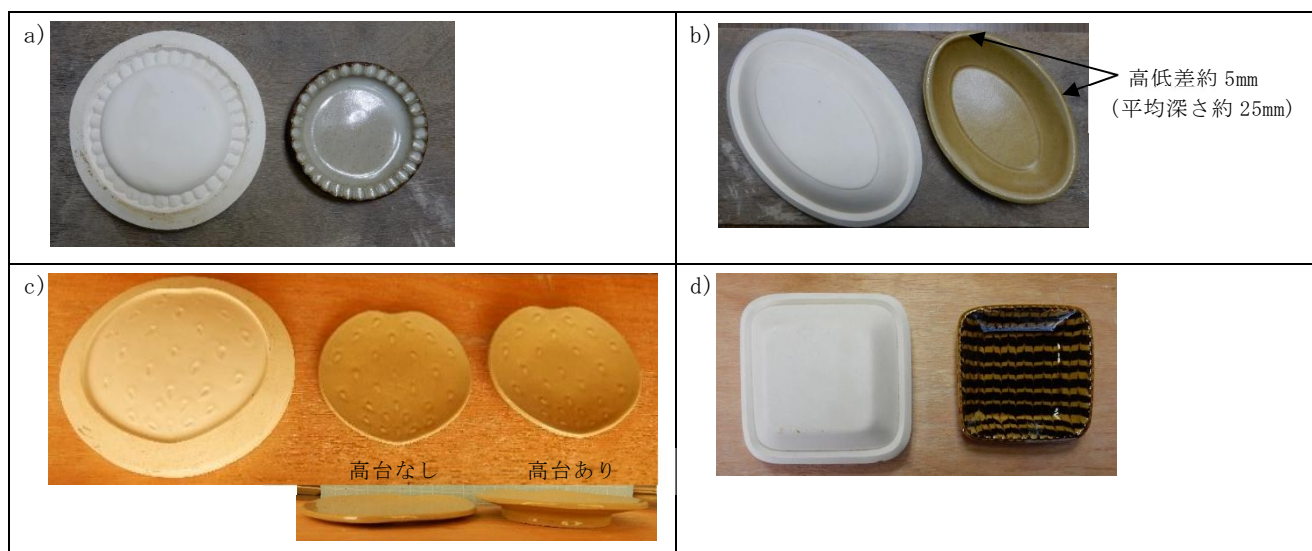


図3 石膏型とそれを用いて作られた陶器

a) 丸皿 b) オーバル皿 c) 異形皿(いちご形) d) 角皿

用いた釉薬は、益子並白釉（益子焼協同組合製造）とした。素焼き、本焼きは、超高速昇温電気炉（㈱モトヤマ、SC-2035D）を用いて焼成した。焼成条件は、素焼き 820℃、本焼き 1,250℃（SK8 相当）酸化焼成とした。石膏型及び製作した陶器の形状測定には、非接触三次元デジタイザ（GOM, ATOSⅢ Triple Scan）を用いた。また、成形に用いた粘土の収縮率は、30mm×60mm×5mm の金型を用いて製作したテストピース 5 個について全収縮率（成形直後から焼成後の収縮）を測定し、その平均値から求めた。なお、収縮率測定は、無釉で行い、焼成条件は角皿と同様とした。

2. 2 石膏型の製作

製作対象の器は、図 2 に示す角皿（サイズ：14.0×14.0cm）とした。製作対象の器の形状をデジタイザにより計測した。取得した器の形状を基に CAD（Geomagic, Design X）により原型データ、石膏型データを作成した。石膏型データの加工パスは、CAM（OPEN MIND, HyperMILL）を用いて作成した。石膏型の加工は、マシニングセンター（オークマ、MB-56VA）を用いて行った。製作過程の詳細は、次項の結果と共に示した。

2. 3 製作した石膏型を用いた陶器の製作

2. 2 により製作した石膏型を用いて次の工程で陶器を作製した。製作方法は、2. 1 の角皿と同様とし、乾燥は、管理乾燥のみで行った。評価は、目視、寸法計測及びデジタイザにより行った。主な製作条件を次に示す。

粘土：益子水簀土，益子赤土

釉薬：益子並白釉

乾燥：管理乾燥

本焼き：1,250℃（SK8 相当）酸化焼成

3 結果及び考察

3. 1 石膏型成形における成形品の収縮・変形等調査

丸皿（φ 9cm），オーバル皿（21×15cm），異形皿（12×11.5cm）及び角皿（12×12cm）の 4 種類について、石膏型とそれを用いて作られた陶器の寸法、形状等を調査した（図 3）。これらは、益子水簀土を用いて製作されており、収縮率は 9～11%程度であった。変形について、丸皿では、大きな形状変化は認められなかった。オーバル皿は、縁（フチ）に歪みが認められ、皿の底から縁まで、最大 5mm 程度の高低差があった（皿の平均深さ約 25mm）。異形皿は、高台の有無により変形に差があり、高台がないものでは縁が落ちて平面に近づくような変形が認められた。角皿では、型と製作品で大きな形状変化は認められなかったが、型の段階で製作者の意図しない設計とのずれが生じていた。陶器の歪みについて、成形後の乾燥工程において、粘土の不均一な乾燥による歪みが生じることが知られている⁵⁾。今回調査した丸皿、異形皿及び角皿は、均一に乾燥しやすい形状で比較的サイズが小さいこともあり、石膏型と陶器との大きな形状変



図4 乾燥条件の比較（益子赤土）
（左：管理乾燥 右：通常乾燥）

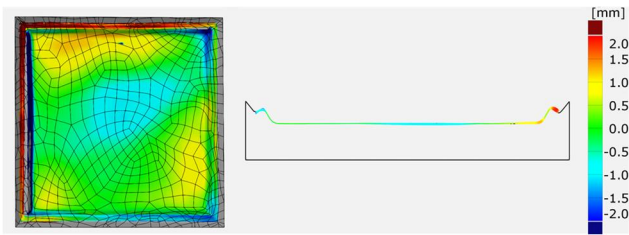


図5 デジタイザによる石膏型と角皿の形状比較

化が見られなかったと考えられる。一方でオーバル皿は、サイズが大きく不均一に乾燥したために変形が生じたと考えられる。

粘土の種類及び成形品乾燥が寸法及び形状に及ぼす影響について、角皿を作製し調査したところ、通常乾燥のものは、粘土の違いによらず大きな形状の歪みが認められており、製作工程における乾燥管理の重要性が改めて確認された(図4)。管理乾燥を行い製作した角皿の収縮率は、益子水簀土で約10%、益子赤土で約11%であり、産地で知られている石膏型によるタタラ成形時の収縮率と同等であった。また、テストピースにより求めた収縮率は、益子水簀土で10.4%、益子赤土で10.0%であり、製作した角皿の収縮率とほぼ同じであった。

デジタイザにより石膏型と製作した角皿の形状測定を行い、両者の差を比較したところ、器の縁(フチ)に形状誤差が認められた(図5)。これは、成形時の土のしまり具合や乾燥状態の微妙な違いなどによると考えられ、形状変化の規則性を定量的に見出すことは困難であったが、粘土の違いによらず実用的に問題のない形状誤差であった。

上述のとおり、変形を定量的に予測することは困難であるが、乾燥管理を適切に行うことで精度良く陶器の製作が見込まれる。このため、3.3の石膏型製作においては、形状変化は考慮しないが、収縮率から予測可能な寸法は考慮して型を設計することとした。

3.2 石膏型の製作

製作対象の器をデジタイザによりスキャンし、形状

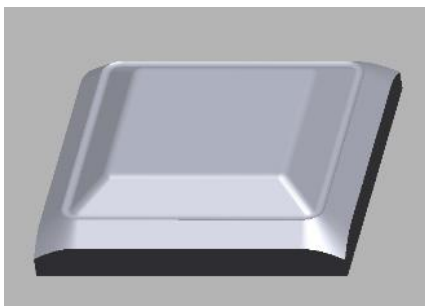


図6 作成した石膏型データ



図7 製作した石膏型

データを取得した。この形状データを基にCADにより石膏型モデルを作成した。ここで、取得した形状データには、器の成形過程における作り手の意図しない形状の歪みを有していたため、そのままの形状を原型(作りたい器のモデル)とすると歪みを反映した石膏型が製作されてしまい、最終的に作られる陶器も歪んでしまうことが懸念される。そこで、形状データを参考にCADにより原型を作成し、型モデルを作成した。型モデルの作成に当たっては、予めテストピースにより求めた収縮率10%を見込んで作成した。作成した原型モデルを図6に示す。この原型モデルからCAMにて加工パスを作成し、マシニングセンタ(オークマMB-56VA)により、φ6mmボールエンドミル、φ3mmボールエンドミルを使用し、予め製作した石膏ブロックから石膏型を製作した(図7)。

3.3 製作した石膏型を用いた陶器の製作

3.2により製作した石膏型を用いて益子水簀土及び益子赤土を用いて成形し、管理乾燥を行い、素焼き、施釉(並白釉)、本焼き(1,250℃(SK8)酸化焼成)して製作した陶器の外観を図8に示す。製作した陶器は、両粘土とも、大きな変形は認められず、ほぼ設計した寸法(14.2×14.2cm)であった。また、図9に示した製作対象の角皿とそれを基に製作した角皿の形状を、デジタイザにより比較した結果のとおり、製作対象とした器とほぼ形状誤差なく製作できた。これらのことから、石膏型の製作



図8 製作した角皿
(左: 益子水簀土 右: 益子赤土)

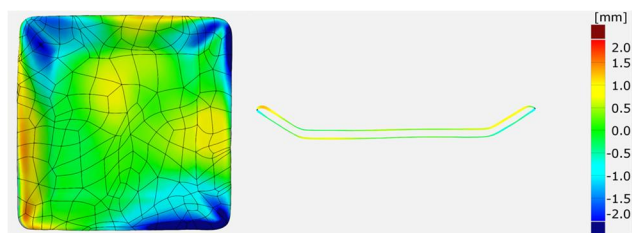


図9 製作対象の器（角皿）とそれを基にした石膏型により製作した角皿のデジタイザによる形状比較



図10 応用試作品（角皿セット）

において機械加工を用いることで、設計のとおり型の製作が可能であり、石膏型成形により精度よく陶器を製作するためには、成形品の乾燥工程の適切な管理が重要であることがわかった。

また、本手法は石膏型設計にCADを用いていることからサイズ変更が容易である。このことを利用し、商品開発の一例としてサイズ違いの型による、スタッキング可能な角皿セットを試作した（図10）。

なお、本研究では石膏ブロックをマシニングセンタで機械加工することで石膏型を製作したが、CADにより作成した原型モデルを3Dプリンタで出力して原型とし、石膏型を製作することも可能である⁶⁾。

4 おわりに

石膏型成形において生じる成形品の収縮や変形等について、石膏型とそれを用いて成形された陶器との寸法及び形状の変化を調査し、これらを見込んだ石膏型の製作を検討した。

石膏型とそれを用いて作られた陶器の寸法及び形状の変化は、成形品の乾燥工程により変形が生じるが、適切な乾燥管理を行うことで変形を抑制できることを改めて確認した。石膏型の設計において、変形の予測は、乾燥など成形工程の影響が大きく難しいが、寸法変化は、成形に用いる粘土の収縮率から予測して、CADにより型を設計し、機械加工により製作した。

製作した石膏型を用い、成形時の乾燥管理に留意して製作した陶器は、設計した寸法とほぼ同等であり、また、製作対象とした器とほぼ形状誤差なく製作できた。

参考文献

- 1) 陶工房編集部編：“やきものの教科書”，誠文堂新光社，（2020）
- 2) 宜保秀一ら：“沖縄県工業技術センター研究報告書 No.15”，47-52，（2013）
- 3) 副島潔ら：“佐賀県窯業技術センター平成30年度研究報告書”，1-5，（2019）
- 4) 林茂雄ら：“三重県工業研究所研究報告 No.43”，153-157，（2019）
- 5) 樋口わかな：“やきものの科学”，誠文堂新光社，（2021）
- 6) 塚本準一ら：“栃木県産業技術センター研究報告 No.2”，130-132，（2005）



令和3（2021）年度

栃木県産業技術センター研究報告

第19号

Reports of Industrial Technology Center of Tochigi Prefecture

No. 19 (2022)

発 行 令和4（2022）年9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