ISSN 1349-2608
No. 18 (2021)

栃木県元気ニコニコ室長
とちまるくん

令和２（2020）年度

# 研　究　報　告

Reports of Industrial Technology Center of Tochigi Prefecture

― 発信します　明日を拓く　確かな技術 ―

## 栃木県産業技術センター

# 目　　次

## Ⅰ　重点共同研究（実施：３テーマ）


- 切削工具摩耗状態判断手法の開発(航空宇宙分野)　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　1
- 生分解性プラスチックの高性能化と射出成形特性の向上(環境分野)　・・・・・・・・・・・・　6
- 海外展開に向けた県産イチゴ製品の色調劣化抑制技術の開発(フードバレーとちぎ)　・・・　12


## Ⅱ　共同研究（実施：２テーマ）


- バレル工具の傾斜角度が仕上げ面粗さと工具寿命に及ぼす影響　・・・・・・・・・・・・・・　19
- シミュレーション技術を活用した軽量化設計による高付加価値製品の開発　・・・・・・・・　24


## Ⅲ　受託研究（実施：２テーマ）


- 動物骨のフッ素アパタイトへの資源化　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　29


非公開：１テーマ

## Ⅳ　重点研究（実施：１テーマ）


- 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　・・・・・・・・・・・・　35

## Ⅴ　経常研究（実施：５テーマ）


- デザイン資料を解析・活用した図案調整とテキスタイル試作　・・・・・・・・・・・・・・・ 43
- DSC を用いた非晶性樹脂成形品の残留応力評価に関する研究　・・・・・・・・・・・・・・ 47
- リバースエンジニアリングのための CAD データ作成に関する研究　・・・・・・・・・・・・ 52
- 引き揃え糸を使用した紬織物製品の開発　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55
- 白化粧の品質に及ぼす化粧掛け条件の影響　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 61


本研究報告における研究区分については、次により分類したものとなっています。

Ⅰ　重点共同研究：県の重点振興産業分野(自動車、航空宇宙、医療機器、光、環境産業)及びフードバレーとちぎプロジェクトの食品産業分野において、企業、大学などと課題を分担して重点的に行うもの。

Ⅱ　共 同 研 究 ：企業、大学などと課題を分担して行うもの。

Ⅲ　受 託 研 究 ：企業や団体などからの委託を受けて行うもの。

Ⅳ　重 点 研 究 ：県内産業の振興のため県が単独で特に重点的に行うもの。

Ⅴ　経 常 研 究 ：上記以外にて実施したもの。

また、知的財産権の保護等の観点から、非公開となっている研究テーマがございますので、御了承ください。

# Contents

## Ⅰ Selected Cooperative Research


- Detection of Tool Wear in End Milling by Machine Learning through Acoustic Emission and Acceleration ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
- Improvement of Physical Characteristics and Injection Molding Property of Biodegradable Plastic ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
- Development of Technology to Suppress Color Deterioration of Strawberry Products Produced in Tochigi Prefecture for Overseas Expansion ・・ 12


## Ⅱ Cooperative Research


- Effect of Lead Angle of Barrel Tool on Finished Surface Roughness and Tool Life ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 19
- Development of Products with High Additional Value by Lightweight Design Utilizing Simulation Technology ・・・・・・・・・・ 24


## Ⅲ Contract Research


- Recycling of Animal Bones to Fluoroapatite ・・・・・・・・・・・・・ 29


## Ⅳ Selected Research


- Development of Analysis Equipment using Machine Learning for Manufacturing SMEs ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 35

## Ⅴ Ordinary Research


- Design Adjustment and Textile Trial Production by Analyzing and Utilizing Design Materials ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 43
- Residual Stress Evaluation of Amorphous Resin Products Using DSC ・・・ 47
- Study on the CAD Data Creation for Reverse Engineering ・・・・・・・・ 52
- Development of Tsumugi Textile Products with Some Yarns Together ・・・ 55
- Effect of Engobe Condition on Quality of White Slip Coat ・・・・・・・ 61

# Ⅰ　重点共同研究

Selected Cooperative Research

重点共同研究（航空宇宙分野）

# 切削工具摩耗状態判断手法の開発

稲澤　勝史*　　近藤　弘康*　　曽田　将来*　　清水　暁*　　島田　智*
松本　義則**　　松本　アサイ**　　松本　知之**

## Detection of Tool Wear in End Milling by Machine Learning through Acoustic Emission and Acceleration

INAZAWA Katsufumi, KONDO Hiroyasu, SOTA Masaki, SHIMIZU Akira, SHIMADA Satoshi,
MATSUMOTO Yoshinori, MATSUMOTO Asai and MATSUMOTO Tomoyuki

本研究では，安価なセンサを用いて工具の摩耗状態を把握するため，AEセンサ及び加速度センサを用いたデータ取得ユニットを試作し，切削時の各センサの信号から工具の摩耗状態を判断する手法を開発した。切削力と各センサの信号との関係性を調査した結果，AEと加速度は切削力と比例関係を示し，工具が終期摩耗に移行する様子を捉えられることを明らかにした。加えて，AE信号と加速度信号を用いた機械学習により，摩耗状態レベルを推定し，その有用性について検討した。

Key words:　工具摩耗，切削力，AEセンサ，加速度センサ，機械学習

## 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。しかしながら，最終製品の安全性確保の観点から，品質の担保は必須であるため，安易な低コスト化を行うことができない。

製品の製造プロセスに目を向けると，例えば切削加工では，生産能率を維持するため，インプロセスでの工具摩耗状態の把握は行われず，十分な余裕をもって工具の交換を行っている。加工に用いられるエンドミルの摩耗進行については，次の3段階に分類できる。まず，①使用開始直後の切れ刃先端が急速に摩耗する初期摩耗状態，さらに，②切削距離の増加に対して1次関数的に摩耗が進行する定常摩耗状態，その後，③急速に摩耗が進行し，切削加工面の品質を低下させる終期摩耗状態の3段階である。現状の航空機業界においては，加工物の品質を担保するため，工具の交換は一定の加工アイテム数または使用時間に達した時点（定常摩耗状態の中期に相当）と定めており，工具コストの増大を招いている。このため，切削工具を終期摩耗状態に移行する直前まで使用できるようにすることで，工具コストの低減を行うことが可能である。それには切削工具の摩耗の進行とともに変化する切削状態を正確に把握し，工具の摩耗状態を判断することが必須となる。

そこで本研究では，切削状態を監視可能なセンサを選定し，切削状態の把握可能なユニットを試作した。さらに取得した切削状態を示すデータの解析により，摩耗状態を判断する手法について検討し，工具交換のタイミングの改善を図ることとした。

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊　株式会社マツモトセイコー

## 2　研究の方法

### 2．1　センサの選定及びデータ取得ユニットの開発

切削工具においては，摩耗の進行とともに切削力も増大することが知られている[1)]。これより，切削力の推移により摩耗状態を把握することは可能である。しかしながら，切削力を測定する動力計は非常に高価であり，また被加工物の形状に制限を受けるため，本研究では動力計の代替となりうる安価なセンサを用いてデータ取得ユニットを開発することとした。

先行研究では,AEセンサを用いて工具欠損を感知できること[1),2)]や，切削時の切削抵抗と加速度センサから得られる信号には関係性があること[3)]が示されている。これより，本研究ではAEセンサ及び加速度センサに着目し，切削動力計を併用することで切削抵抗と各センサの信号との関係性について検討することとした。

以上から，図1に示すデータ取得ユニットを試作した。センサの接触具合により感度が変化すると想定されたため，センサ用被削材に直接AEセンサ（エヌエフ回路設計ブロック　AE-901S）及び加速度センサ（日本キスラー　Type 8776A50）を取り付けられる構造とした。

### ２．２　加工実験

試作したデータ取得ユニットの性能を評価するため，図２のとおり，データ取得ユニットをマシニングセンタに取り付けて加工実験を行った。ユニットを評価するため，AE センサ及び加速度センサから得られる信号と切削力の関係を調べることとし，切削抵抗測定装置（日本キスラー　9265B）の上にデータ取得ユニットを取り付け，表１に示す条件を用いて切削実験を行った。ここで，実験については機差の影響も検討するため，２つの異なる加工機を用いた。それぞれ，加工機１，加工機２と呼称する。

加工は，超硬母材のノンコーティング２枚刃 φ６ mm のスクエアエンドミルを用い，被削材である Ti-6Al-4V に対して側面切削を行った。エンドミルは，切れ刃の振れにより切込み深さが変化しないよう，２枚の切れ刃のうち１枚をグラインダで削り１枚刃とした。実験の手順としては，工具が終期摩耗に至るまで摩耗を促進させ，その間に所定の切削距離ごとに USB カメラによる工具観察（図３）及びデータ取得ユニット被削材の切削加工を行い，切削距離に対する工具摩耗状態と各種センサからのデータを取得した。ここで，切削力の評価は，AE と

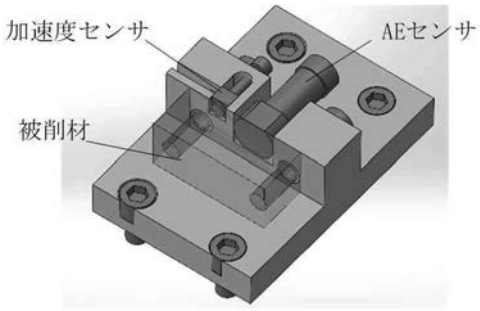



図１　データ取得ユニット

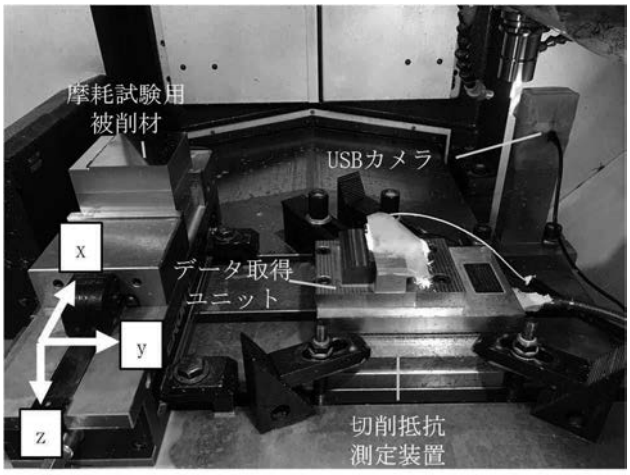



図２　加工時の構成

表１　加工条件

| | |
|---|---|
| 切削速度 Vc | 50，200 m/min |
| １刃送り fz | 0.1 mm/tooth |
| 軸方向切込み深さ ae | 3 mm |
| 半径方向切込み深さ ap | 0.1mm |
| 切削液 | 無，有 |

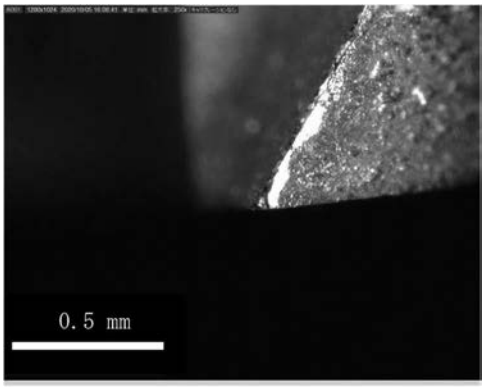



図３　USB カメラを用いた工具観察

の比較に際しては切削抵抗測定装置から得られた信号のうち XY 方向の合成成分の実効値を用い，加速度との比較に際しては，本研究では加速度は y 方向の振動成分に着目していることから，y 成分のピーク平均値を用いた。また AE の評価には，サンプリング周波数を 1 MHz として取得した AE 信号をウェーブレット変換し，変換後の波形の実効値を用いた（以後，AE 値と呼ぶ）。さらに，加速度の評価には，サンプリング周波数を 51,200Hz として取得した加速度センサからの信号をフーリエ変換し，1,850Hz のローパスフィルタ処理を施した後，逆フーリエ変換することで得られた波形のうち一定区間の最大値ピーク平均を用いた（以後，加速度値と呼ぶ）。

## ３　結果及び考察

### ３．１　データ取得ユニットの評価結果

加工機１を用い取得した切削距離に対する切削力と AE 値の関係を図４に示す。同図より，切削距離が長くなると，切削力が大きくなることがわかる。また，切削距離が 110 m を超えると切削距離に対する切削力の増分が大きくなる様子が見られる。USB カメラを用いた刃先観察結果より，切削距離が 110 m を超えると摩耗が一気に進展していく様子が確認できたことから，切削力により工具が終期摩耗に移行する状況が捉えられることが確認できた。これを踏まえて AE 値に着目すると，AE 値も切削距離が長くなると値が大きくなり，その挙動は切削力によく一致していることがわかる。また，同時に取得し

た加速度値についても，切削距離と切削力との関係を図５に示す。加速度値においても，距離に対する切削力の推移とよく一致しており，切削距離が 110 m 以降では大きく変化する様子も確認できた。

以上のことから，AE 値及び加速度値を用いることで，切削力の代替として，工具摩耗の状態を把握できると考えられる。

また，同条件における 3 回の繰り返し試験を行った結果を図６，７に示す。各試験において，切削力と AE 値及び切削力と加速度値は同様の傾向を示しており，データ取得ユニットを用いて再現性のあるデータが取得できることがわかる。しかしながら，各試験における終期摩耗に移行する切削距離が異なっていることもわかる。これは，工具のバラツキや偶発的な刃の損傷によるものと考えられ，切削距離を指標とした工具管理にはこれらの現象を踏まえ，高い安全率が必要と推察できる。一方

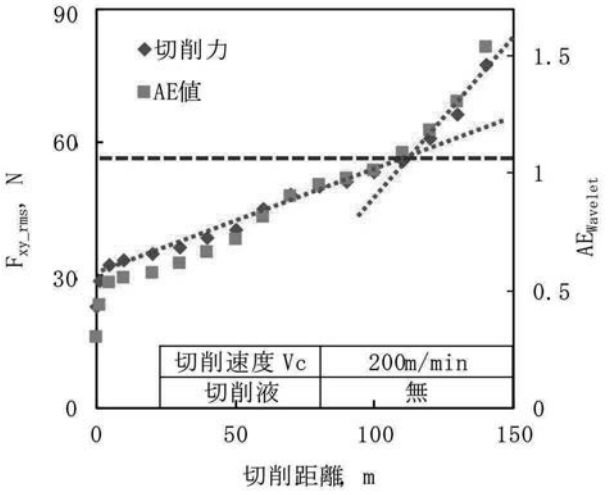



図４　切削距離に対する切削力と AE 値の推移

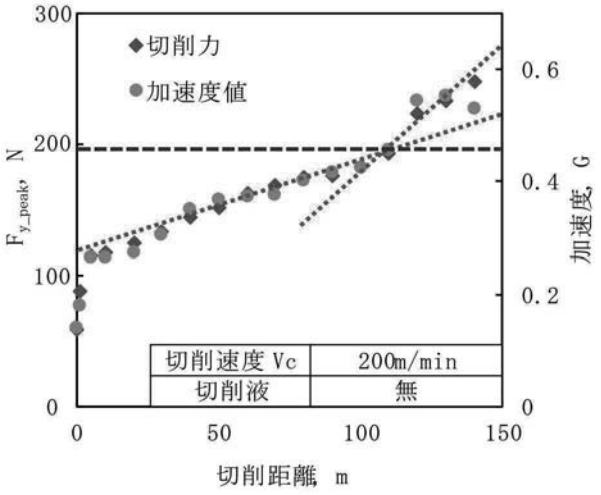



図５　切削距離に対する切削力と加速度値の推移

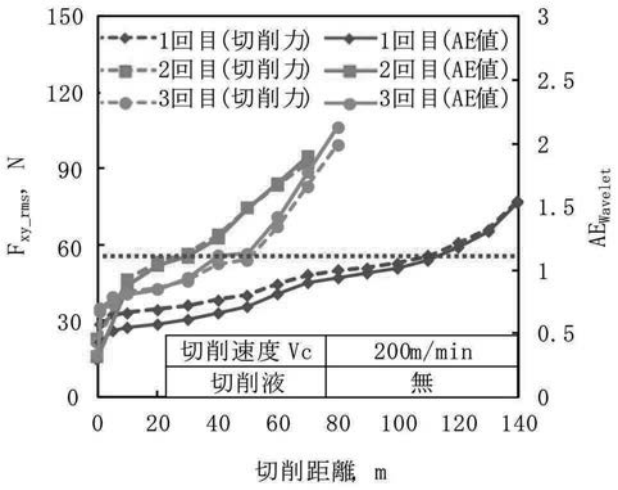



図６　繰り返し試験結果（切削力と AE 値の推移）

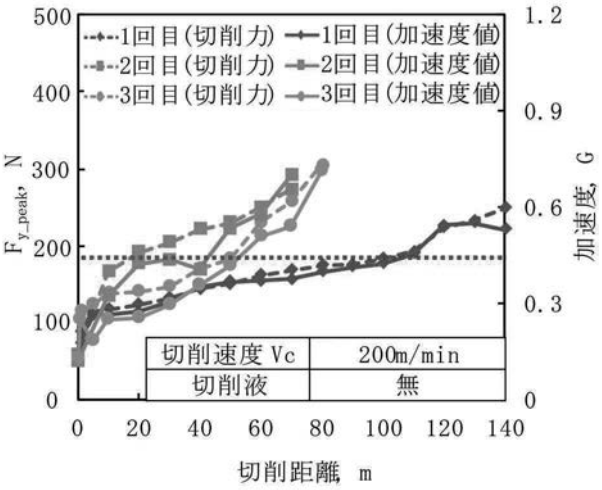



図７　繰り返し試験結果（切削力と加速度値の推移）

で，図中の点線のとおり終期摩耗に移行する際の切削力は同程度の値を示しており，AE 値や加速度値を用いることで，終期摩耗の直前まで工具を使用できると考えられる。

以上のことから，本研究で開発したデータ取得ユニットは，切削抵抗測定装置と同等の傾向を示し，再現性の高いデータを取得できることが確認できた。

### ３．２　加工条件及び機差が各種データに及ぼす影響

表１の各実験条件において取得した各センサの値のうち，切削力と AE 値の関係を図８に，切削力と加速度値の関係を図９に示す。ここで，切削速度 Vc は摩耗試験時の切削速度であり，データ取得ユニット被削材の加工に際しては切削速度を 200 m/min としてデータを取得した。

図８より，切削力と AE 値の関係は比例関係にあり，加工条件によらず一定の傾きを示すことがわかる。特に，切削速度 200 m/min，切削液無の条件においては，機差の影響を受けずに傾きが一致している様子が見られる。AE 信号は，材料の変形・変態，き裂・割れ，接触・衝撃，摩擦・摩耗などにより発生するため[4]，材料の破壊現象などを直接捉えていると考えられる。よって，機差の影響なく，同じ加工条件においては同一の傾きを示したものと考える。一方で，加工機 2 においては，点線囲いで示すとおり，切削液有の条件の一部で線形から外れる結果が得られた。これは切削液を用いた場合に AE の信号に異常な乱れが生じてしまい，この際の AE 値は異常値を示したことに起因したと考える。しかしながら，加工機 1 では切削液を用いた場合も切削力と AE 値は線形性を示しており，加工機 2 においても切削液下の AE 測定について，データ取得ユニットの防水など適切な対策を講じることで同様の結果が得られると考えている。

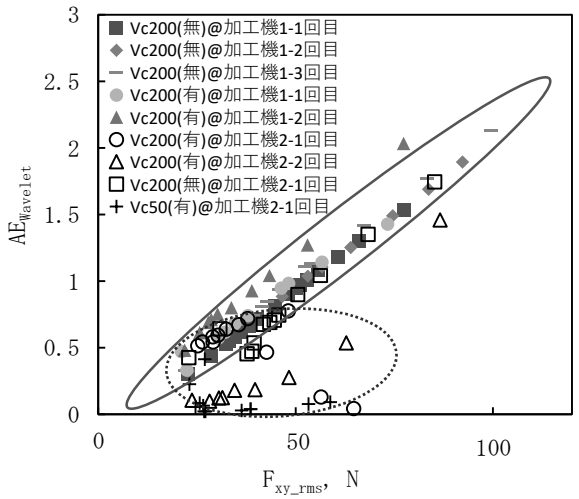



図８　各加工条件における切削力と AE 値の関係
(有)(無)は切削液の有無を示す

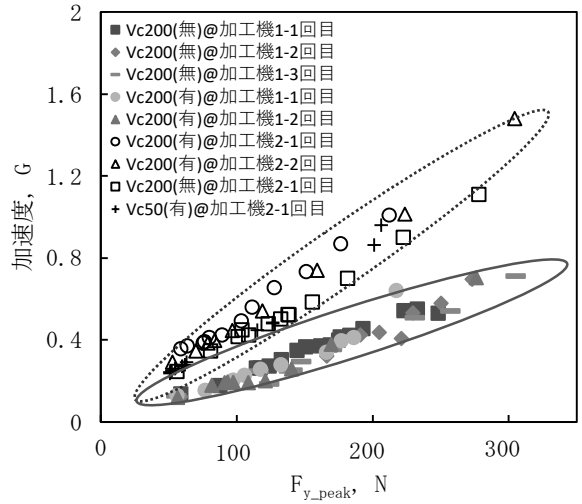



図９　各加工条件における切削力と加速度値の関係

図９より，切削力と加速度値の関係は比例関係にあり，傾きは加工機ごとに分かれていることがわかる。このことから，加速度値の傾きは機械剛性に影響を受けることが考えられる。一方で，同一加工機を用いた場合には，摩耗試験時の加工条件が異なっても，切削力と加速度の傾きは一定であることがわかった。

以上より，AE 値では機差の影響なく切削力と高い関係性を示し，加速度値では加工機ごとに傾きは変化するが，加工条件によらず切削力と高い関係性を示すことが明らかとなった。

### ３．３　工具摩耗診断手法

#### ３．３．１　摩耗診断マップの活用

前述したとおり，データ取得ユニットから得られた各センサの値は切削力と比例関係を示し，かつ同じ条件においては同程度の切削力で終期摩耗に移行することがわかっている。このため，しきい値による摩耗度診断が可能であると考えられる。

例として表 1 に示した加工条件のうち，切削速度 200 m/min，切削液無で行った加工実験を取り上げる。加工時に得られた AE 値と加速度値の関係から，終期摩耗に移行する点の AE 値及び加速度値をしきい値として設定することで，図 10 に示す摩耗診断マップを作成した。同図の左下の領域は，工具が終期摩耗に入る前であることを示しており，それ以外の斜線部は，工具が損傷している恐れがあることを示している。摩耗診断マップを用いることで，加工時の切削力を測定することなく，データ取得ユニットから得られるデータを用いて，工具の使用可否の判断が可能となる。

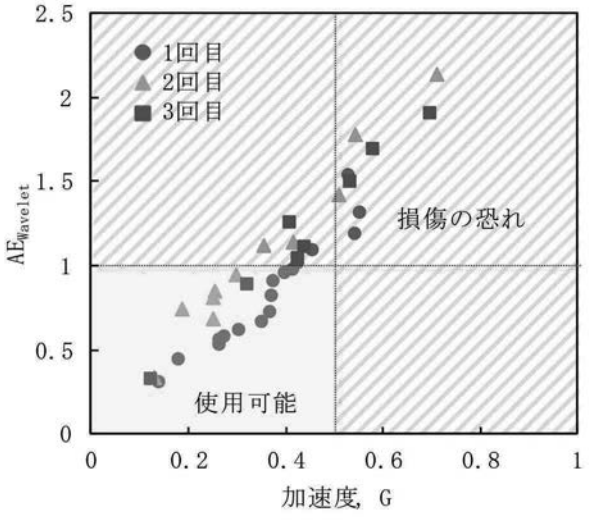
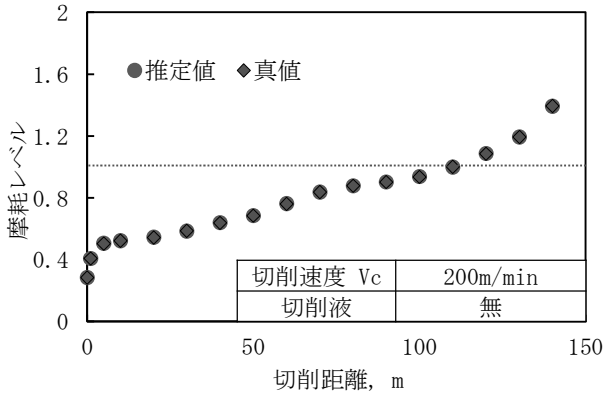



図 10　摩耗診断マップ

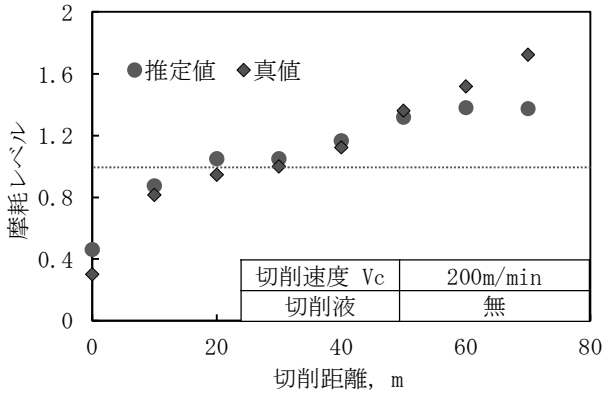
### ３．３．２　機械学習を用いた摩耗レベル検知

機械学習を用いた工具摩耗の検知については，外乱推定理論に基づき，得られた切削力と切削トルクから特徴量を抽出し，機械学習により，クラスタリングと工具摩耗を分類検知するといった方法など[5]，様々な手法が検討されている段階である。

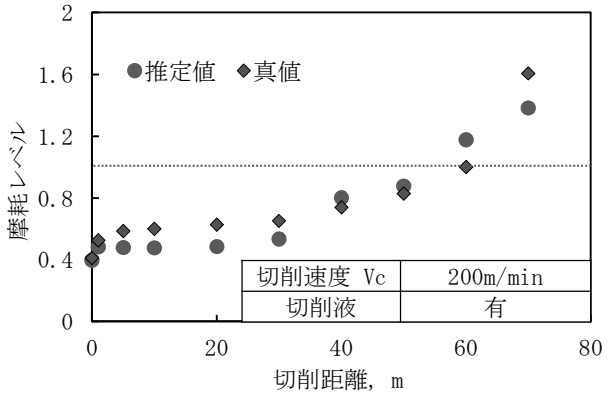
本研究では，勾配ブースティング決定木により，AE 信号と加速度信号から工具の摩耗レベルを推定した。その一例を図 11 に示す。前述したとおり，切削距離に対して切削力と AE 値は同様の挙動を見せるため，AE 値の推移をみることで摩耗の進行を予測可能と考えられる。図 11(a)は，工具が終期摩耗に移行する点における AE 値を１として正規化し，その値に対して AE 信号及び加速度信号から求めた推定切削力が一致するような教師データを作成して適用したものである。つまり，1 を限界値として，現在の摩耗の度合いを示した図となっている。




(a)　Vc200 m/min，切削液無（1 回目）




(b)　Vc200 m/min，切削液無（2 回目）




(c)　Vc200 m/min，切削液有

図 11　機械学習を用いた工具摩耗レベル推定

図 11(a)より，真値と推定値がよく一致していることがわかる。ここで得られた教師データを同条件の加工に適用した結果を図 11(b)に示す。これより，推定値が真値と非常に近い値となっていることがわかる。また，摩耗レベルは 20 m で 1 を超えていることから，真値と比較して 10 m の誤差を生じていることがわかる。図 11(c)に切削液条件を変えた場合に先の教師データを適用した結果を示す。同図においても，真値と推定値が近い値となっており，摩耗レベルは真値と同じく切削距離が 60 m で 1 を超えていることがわかる。

以上の結果より，データ取得ユニットと機械学習を組み合わせることで，加工条件が異なった際も誤差の少ない摩耗レベルを検知できる可能性が見出せたと考える。

## ４　おわりに

本研究では，安価なセンサを用いて工具の摩耗状態を把握するため，AE センサ及び加速度センサを用いたデータ取得ユニットを開発し，切削時の各センサのデータから摩耗状態を判断する手法について検討することで，以下の知見を得た。

(1) データ取得ユニットを用いて得られた AE 値及び加速度値は切削力と比例関係を示し，高い再現性を実現した。

(2) AE 値及び加速度値を用いて，工具が終期摩耗に移行する様子が確認できた。

(3) 摩耗診断マップ及び機械学習を用いることで，工具の摩耗状態を把握することができ，工具交換タイミングの改善に寄与できる。

## 参考文献

1) 古賀 俊彦ほか：〝トライボロジスト〟, 63 (7), 487-498, (2018)

2) 中川 純一ほか:〝電気製鋼:大同特殊鋼技報〟,87(1), 5-12, (2016)

3) 稲崎 一郎：〝日本機械学会論文集 C 編〟, 51(466), 1163-1169, (1985)

4) 長谷 亜蘭:〝精密工学会誌〟,78(10),856-861,(2012)

5) 粕谷 勇太ほか:〝第 26 回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集〟, 13-14, (2019)

重点共同研究（環境分野）

# 生分解性プラスチックの高性能化と射出成形特性の向上

大森　和宏*　　松本　健一*　　小林　愛雲**　　池添　亮***
太田　好和***　　小橋川　浩***　　谷越　健太***　　舩山　智信****

## Improvement of Physical Characteristics and Injection Molding Property of Biodegradable Plastic

OMORI Kazuhiro, MATSUMOTO Kenichi, KOBAYASHI Azumi, IKEZOE Makoto,
OTA Yoshikazu, KOBASHIKAWA Hiroshi, TANIKOSHI Kenta and FUNAYAMA Tomonobu

板状形態を維持した微粉砕タルクを添加したポリ乳酸について，ポリ乳酸の結晶化に及ぼすタルク粒子径の核剤効果，射出成形特性，材料物性を検討した。示差熱分析において，タルクを添加したポリ乳酸では，冷却過程で明確な結晶化由来の発熱ピークが確認され，タルクの平均粒子径が小さく，タルク濃度が高い程，ピークトップは高温側にシフトした。等温結晶化では，タルクの平均粒子径が小さく，タルク濃度が高い程，ポリ乳酸の結晶化度は高くなった。射出成形においては，金型温度は高い程，冷却時間が短縮でき，金型温度 75℃～90℃では，300 秒以内で成形品の取り出しが可能であった。荷重たわみ温度はタルク濃度が高い程，高くなる傾向があり，平均粒子径の影響は見られなかった。衝撃強さは，タルク濃度が低く，平均粒子径が大きい方が高かった。

Key words:　ポリ乳酸，タルク，ビーズミル，結晶化，射出成形

## 1　はじめに

近年のマイクロプラスチック等の環境問題を受け，使い捨てプラスチック成形品の削減が世界的に進められている[1)]。日本においても「プラスチック資源循環戦略」が策定され，使い捨てプラスチックの削減やリサイクル・石油由来プラスチックの生分解性プラスチックを含むバイオマスプラスチックへの切り替えを基本原則としている[2)]。特に生分解性プラスチックにおいては，その機能を活用し，適切な導入支援により利用障壁を引き下げることが重点戦略として挙げられている。さらに，「バイオプラスチック導入ロードマップ」が策定され，2030 年までにバイオプラスチックを約 200 万トン導入することを目標としている[3)]。この様な社会的背景から，今後の生分解性プラスチックをはじめとするバイオプラスチックの利用は増えることが予想される。

現在，生分解性プラスチックの中で，ポリ乳酸（PLA）が最も普及しており，農業用フィルムや包装，レジ袋等に利用されている。一方，PLA は耐熱性を高めるために，射出成形時に金型温度を 100～110℃にして結晶化度を高める必要があり，水媒体の汎用金型温調器を用いた耐熱成形品の成形は困難である。加えて，PLA は耐衝撃性が低いことが課題となっており，射出成形用途での利用は少ない。石油由来プラスチックの代替として PLA を利用するには，一般企業が有する汎用設備で射出成形できることが必要であり，耐熱性・耐衝撃性・成形性の改善が求められる。

PLA の結晶化度を高めるため，PLA に結晶核剤を添加した材料が研究・開発されている。PLA の結晶核剤としては，タルクやモンモリロナイト，脂肪酸アミド，亜鉛化合物等が知られている[4)]が，環境問題を考慮すると，天然物である無機フィラーが適しており，特にタルクは板状形態のため，単位粒子数当りの表面積が大きく，優れた結晶核剤である。射出成形工程において，低い金型温度で結晶化度を高めるには，タルクの結晶核剤効果をより高める必要があると考えられるが，タルクを粉砕して単位体積当たりの表面積を増加させることでその効果が向上することが期待される。他方，樹脂の耐衝撃性は，適した粒径・形状の無機フィラーを添加することで向上するが，高濃度での無機フィラーの添加は脆化を促進させ，衝撃強さは低下する。また，樹脂に無機フィラーを添加すると，添加量や平均粒子径，粒子形状によっては，射出成形性は悪くなることがある。

*　　栃木県産業技術センター 材料技術部
**　　栃木県産業技術センター 県南技術支援センター
***　株式会社サカエ工業
****　アシザワ・ファインテック株式会社

そこで本研究では，板状形態のまま微粉化したタルクを作製し，PLA の結晶核剤としての効果を検討する。また，耐熱性・耐衝撃性の改善及び汎用設備での成形を可能とするため，タルク添加 PLA を調製し，その射出成形特性について検討する。これにより，耐熱性・耐衝撃性を改善した高性能 PLA を作製するとともに，汎用設備で成形できる材料・成形条件を明らかにする。

## 2　研究の方法

### 2．1　タルクの粉砕

タルクは，日本タルク㈱SG-2000（平均粒子径 $d_{50}$＝1μm）を用いた。タルクの粉砕はビーズミルを用いた湿式粉砕により行い，溶媒にはエタノールを用いた。

粉砕タルクの平均粒子径は，粒度分布計（マイクロトラック・ベル㈱MT-3000）により求めた。粉砕タルクの形状は走査型電子顕微鏡（日本電子㈱JSM-7400F）で観察し，結晶構造は X 線回折（理学電機㈱RINT2550H）分析により評価した。

### 2．2　タルクの結晶核剤効果の検討

#### 2．2．1　ポリ乳酸／タルク混合試料の作製

PLA（ユニチカ㈱テラマック TE-2000）40 mgをクロロホルム（関東化学㈱）4ml に溶解し，市販のタルク又は粉砕タルクを PLA に対し 0～30wt%で加え，室温下で攪拌しながら乾燥させることで PLA/タルク混合試料を作製した。市販のタルクは，竹原化学工業㈱TT タルク（$d_{50}$＝10μm），SG-2000（$d_{50}$＝1μm），日本タルク㈱ナノエース D600（$d_{50}$＝0.6μm）を用いた。粉砕タルク（$d_{50}$＝0.47μm）は，エタノール分散液を直接 PLA/クロロホルム溶液中に添加した。以下，各試料を PLA/$d_{50}$ と記載する。

#### 2．2．2　熱分析

PLA の結晶化の評価は，示差熱分析装置（DSC，セイコーインスツルメンツ㈱DSC6220）を用いて行った。冷却過程での結晶化実験では，試料を 200℃で 5 分間保持した後，-10℃/min で 90℃まで冷却する条件で DSC 測定を行った。等温結晶化実験では，DSC 用アルミパンに試料を導入し，200℃に加熱したホットプレート上で 5 分間保持した後，90℃に加熱したホットプレートに移して急冷し，30 秒間保持した。その試料を，40℃から 10℃/min で昇温測定を行った。全ての測定で，試料量は約 4mg とした。

### 2．3　PLA／タルクマスターバッチの作製

#### 2．3．1　PLA／タルクの混練

PLA 及びタルク（$d_{50}$＝1μm 及び $d_{50}$＝0.47μm）を，スーパーミキサー又はタンブラーを用いてドライブレンドし，二軸押出機（東芝機械㈱TEM-26SX）を用いて，シリンダ温度 190℃，スクリュー回転速度 350～370rpm で混練し，水冷後，ペレタイジングしマスターバッチを作製した。マスターバッチのタルク濃度は，PLA/1μm は 30wt%，PLA/0.47μm は 5wt%とした。

### 2．4　PLA/タルク試料の射出成形

PLA/タルクマスターバッチを用い，射出成形により各タルク濃度の試験片を成形した。材料は 80 ℃で 5 時間乾燥後，射出成形した。射出成形機（日精樹脂工業㈱NEX 80Ⅳ-9EG）を用い，シリンダ温度は 190℃，金型温度は固定側のミラープレートに設置した熱電対により計測し，70～90℃に調整した。

また，PLA/1μm（タルク濃度 5wt%又は 10wt%）の流動性評価のため，射出成形機（東洋機械金属㈱SI180-6 又は日精樹脂工業㈱NEX 80Ⅳ-9EG）を用い，シリンダ温度 190℃でスマイルスプーン(株式会社サカエ工業製品)又はダンベル試験片を射出成形した。

### 2．5　物性試験

荷重たわみ温度は，JIS K7191-2 B 法により，荷重たわみ温度試験機（㈱安田精機製作所 No.148-HD-3）を用いて評価した。また、シャルピー衝撃強さは，JIS K7111-1：2012 により，衝撃試験機（㈱東洋精機製作所 IT）を用いて評価した。ハンマーは，2.0J を用いた。

## 3　結果及び考察

### 3．1　タルクの粉砕

タルクは化学式 $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ で表される層状鉱物であり，板状形態を有する。その劈開面は疎水性であり，PLA に対して高い結晶核剤効果を有することが知られている。そのため，板状形態を維持したまま，疎水面の表面積を増加させることが結晶核剤効果の増大につながることが予想される。そこで，ビーズミルを用いて，タルクの板状形態を保ったまま粉砕することを試みた。図１に，SG-2000 を湿式粉砕した際の粉砕時間と粒度分布の関係を示す。粉砕時間の経過とともに平均粒子径は小さくなり，原料の平均粒子径が 1μm であったのに対し，

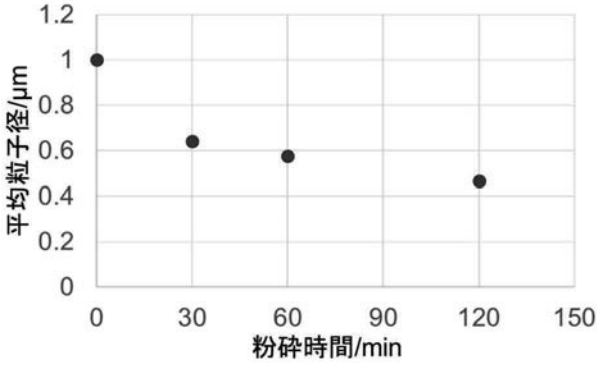



図１　タルクの湿式粉砕時間と平均粒子径の関係

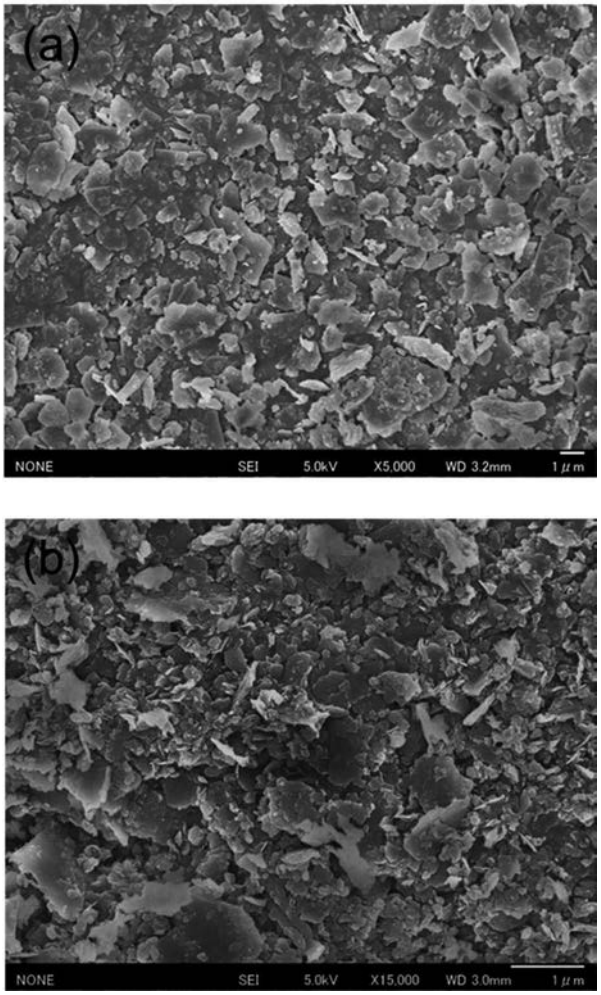



図２　粉砕前後のタルクの電子顕微鏡像；
(a)粉砕前，(b)120 分粉砕後

粉砕時間 30 分で 0.64μm，60 分で 0.58μm，120 分間で 0.47μm となった。粉砕前後のタルクの SEM 像を図２に示すが，粉砕後も板状形態となっていることがわかる。また，図３に粉砕前後のタルクの X 線回折パターンを示すが，粉砕前後でピークに変化はなく，粉砕後もタルクの結晶構造を保っていることがわかった。

### ３．２　PLA に対するタルクの結晶核剤効果

#### ３．２．１　冷却過程での結晶化

図４に，各平均粒子径のタルクを 10wt%添加した PLA の，冷却過程で測定した DSC 曲線を示す。ブランク試料では,約 95℃付近にブロードなピークが現れているのに対し，タルクを添加した PLA では，110℃付近に明瞭なピークが現れ，タルクの添加により結晶化が促進したと考えられる。タルク濃度 10wt%では，結晶化開始温度は，タルクの平均粒子径に関わらず一定であったが，ピークトップ及び結晶化終了温度は，タルク平均粒子径が小さい程高温側にシフトした。タルクの平均粒子径が小さくなるにつれて結晶核となる表面積が増大し，結晶化を促進したことが示唆される。

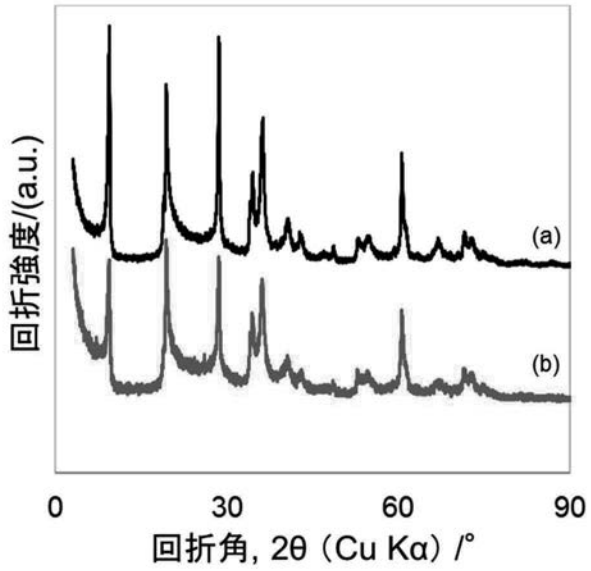



図３　粉砕前後のタルクの X 線回折パターン；
(a)粉砕前，(b)120 分粉砕後

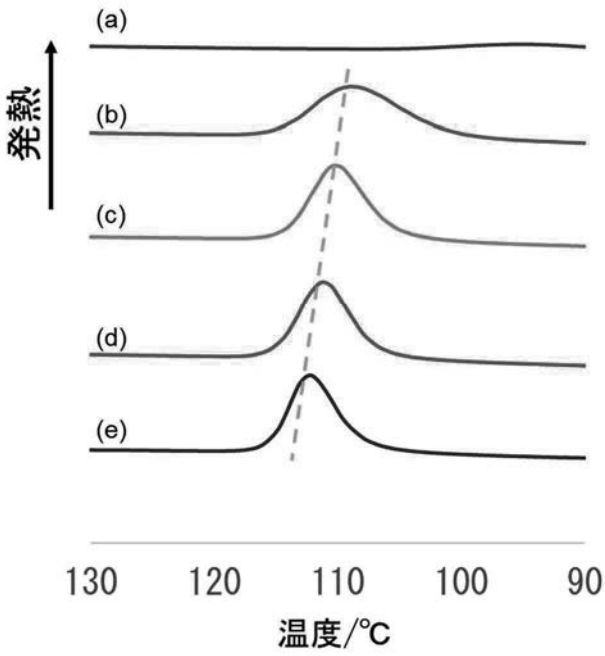



図４　PLA/タルクの DSC 曲線；
(a)ブランク，(b)PLA/10μm，(c)PLA/1μm，
(d)PLA/0.6μm，(e)PLA/0.47μm

#### ３．２．２　等温結晶化

実際の射出成形で，溶融樹脂がシリンダから金型に射出される際に受ける急冷は DSC 測定では再現ができない。そこで，試料を 200℃に加熱したホットプレート上で５分間保持し溶融させた後，90℃に加熱したホットプレートに移して 30 秒間保持し，昇温により DSC 測定を行った。図５(a)及び(b)に，PLA/10μm と PLA/0.6μm の

タルク濃度に対する結晶化熱量及び融解熱量をプロットしたグラフを示す。結晶化熱量は，タルク濃度が増えていくにつれて小さくなり，20wt%以上ではほとんど変化がなかった。タルクの平均粒子径が小さい方が，結晶化熱量は低い結果となった。融解熱量は，タルクの平均粒子径が小さい方が高く，タルク濃度が多くなるにつれて増加した。図５(c)は，融解熱量と結晶化熱量の差を，タルク濃度に対してプロットしたグラフであるが，これが急冷処理での結晶化度と相関があると考えられる。これは，タルクの平均粒子径が小さい程高くなり，タルク濃度の増加とともに高くなった。以上より，射出成形における急冷下での結晶化は，タルクの平均粒子径が小さい方が進みやすいことが示唆された。

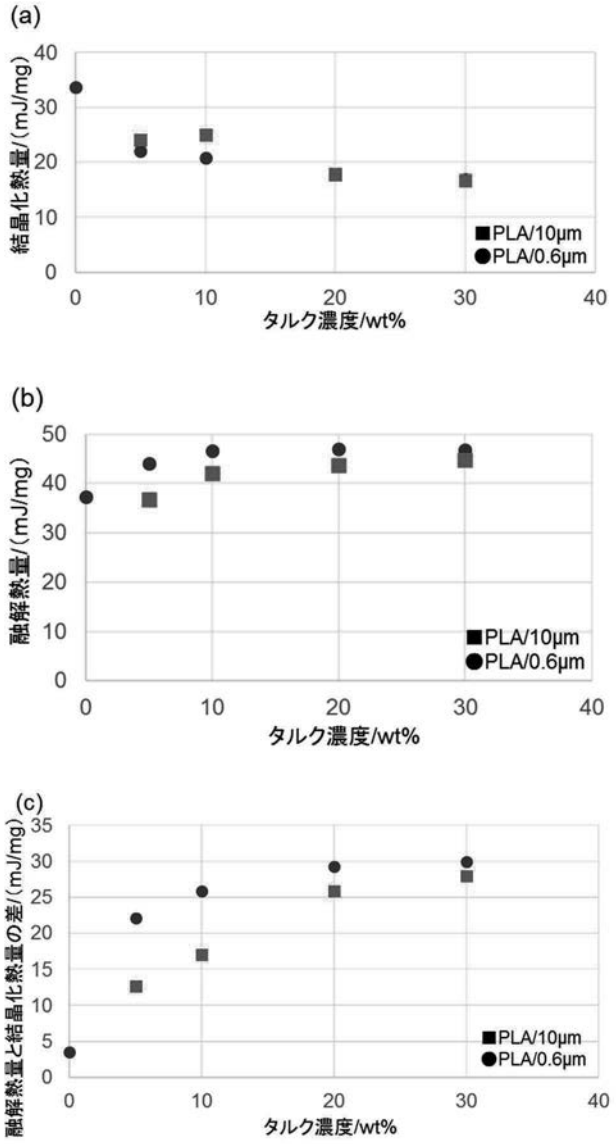



図５　各タルク濃度と熱量の関係；
(a)結晶化熱量，(b)融解熱量，
(c)融解熱量と結晶化熱量の差

### ３．３　PLA／タルクの射出成形

#### ３．３．１　PLA／タルクの射出成形における結晶化

PLA の結晶化速度は，100～110℃で最大になることが知られているが，本研究では，水媒体の金型温調器を用いた場合での射出成形を可能とすることを目的としているため，金型温度は 90℃以下となる。そこで，90℃以下の金型温度での射出成形の可否について調査するため，JIS K7139 のダンベル試験片（Z ランナー）を，金型温度を変えて射出成形した。PLA/1μm(5wt%)の射出成形の結果を図６に示す。金型温度が低下するに従い，成形品の取り出し可能な冷却時間は長くなり，金型温度 90℃では冷却時間が 50 秒で取り出し可能であったのに対し，85℃では 90 秒，80℃では 180 秒であった。金型温度 75℃では冷却時間 300 秒でも成形品が変形することがあった。金型温度 70℃では冷却時間 300 秒でも成形品が固化せず，Z 型スプルーロックピン部が変形し金型可動側に成形品が残らず，固定側に張り付くトラブルが起こった。

各金型温度で成形した射出成形品を DSC 測定した結果を図７に示す。金型温度 75℃～90℃で成形した成形品では、結晶化由来の発熱ピークが確認されなかったのに対し，金型温度 70℃，冷却時間 300 秒の成形品では，発熱ピークが確認された。金型温度 70℃では，PLA の結晶化が十分に進んでいなかったことが明らかになった。

#### ３．３．２　PLA／タルクの流動性

JIS K7139 のダンベル試験片は，ゲートが厚さ 3mm，幅 20mm のフィルムゲートであり，一般的ではない。そこで，一般製品を射出成形し，樹脂充填の可否について検討した。株式会社サカエ工業のスマイルスプーンを，

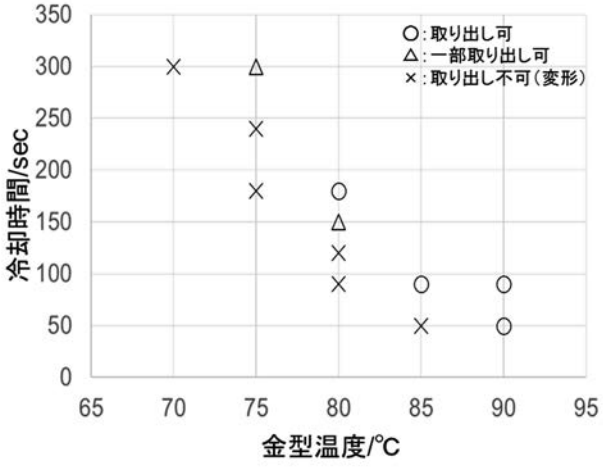



図６　PLA/1μm(5wt%)の各金型温度における成形可否

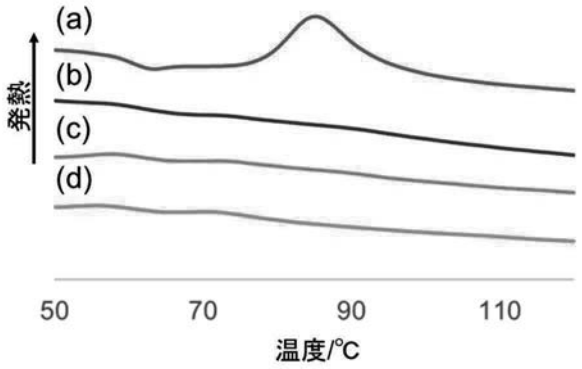



図７　各金型温度及び冷却時間で成形した成形品の DSC 曲線；(a)70℃，300 秒，(b)75℃，300 秒，(c)80℃，180 秒，(d)90℃，90 秒

シリンダ温度 190℃，金型温調器 23℃で射出成形した結果を図８に示す。ゲートはピンゲートで，肉厚は薄肉部で約 1mm，厚肉部で約 6mm と複雑な形状をしているが，末端まで樹脂充填でき，流動性は良好と言える。

一方，PLA／タルクの流動状態に特異な状態が確認された。図９に，ダンベル試験片のショートショット末端の形状を示す。通常，射出成形時の溶融樹脂はファウンテンフローと呼ばれる流動をすることが知られているが，射出速度 30mm/s では，ショートショットの末端が中空になった。射出速度 1mm/s では，ファウンテンフローによる末端形状となった。射出速度によっては，正常なファウンテンフローとならないことがわかった。

### ３．４　PLA／タルクの物性

#### ３．４．１　荷重たわみ温度

PLA/1μm 及び PLA/0.47μm の荷重たわみ温度試験結果をタルク濃度でプロットしたグラフを図 10 に示す。

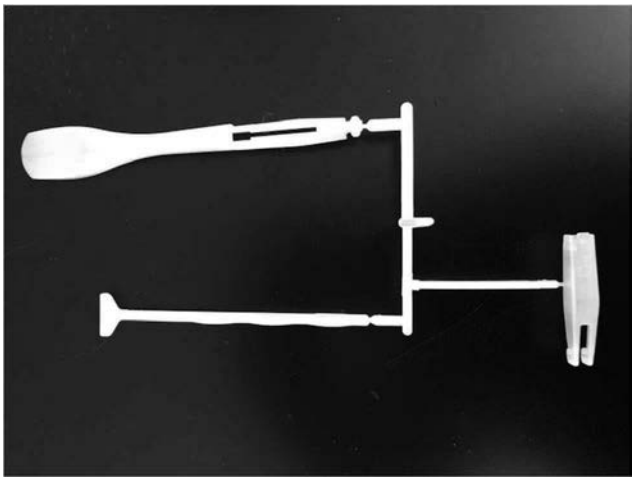


図８　一般射出成形品（スマイルスプーン）の写真

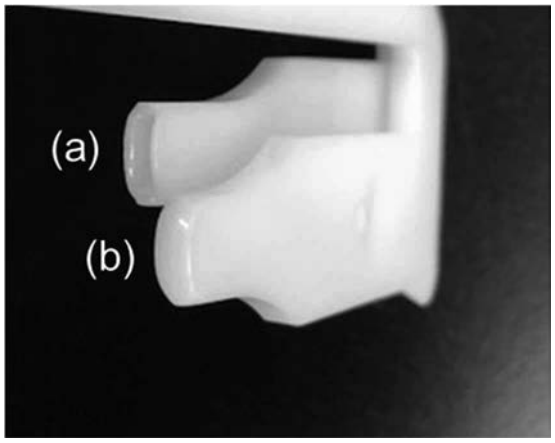



図９　ダンベル試験片のショートショットの写真；(a)30mm/s，(b)1mm/s

荷重たわみ温度は，タルク濃度が高くなるにつれて高くなる傾向があった。タルク濃度が高くなると，弾性率が高くなるため，荷重たわみ温度が高くなったと考えられる。また，PLA/0.47μm では，射出成形時の冷却時間が長い方が，荷重たわみ温度が高くなる傾向があった。タルクの平均粒子径の違いで，荷重たわみ温度の明確な傾向は見られなかった。

#### ３．４．２　シャルピー衝撃試験

図 11 に，各タルク濃度におけるシャルピー衝撃強さのグラフを示す。シャルピー衝撃強さは，タルク濃度が高くなるにつれて低下した。また，タルク粒径が大きい方が，シャルピー衝撃強さが高かった。このことは，タルクが応力集中点となり，衝撃強さが低下したと考えられる。PP/タルクの系では，タルクの微粒子化により衝撃強さが大きく向上することが知られているが[5]，PLA/タルクでは逆に低下することが明らかになった。

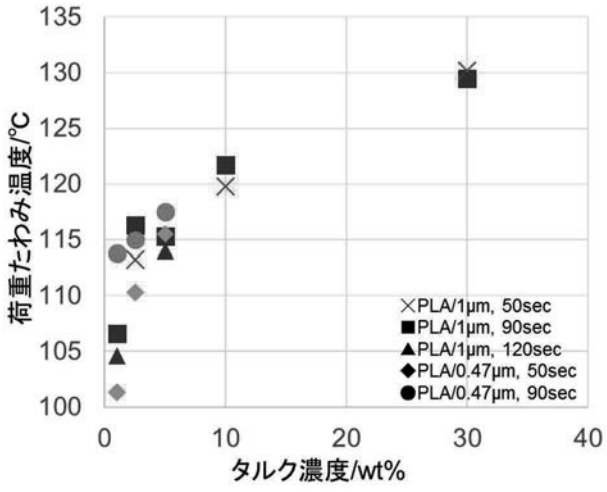



図 10　PLA/タルクのタルク濃度と荷重たわみ温度の関係

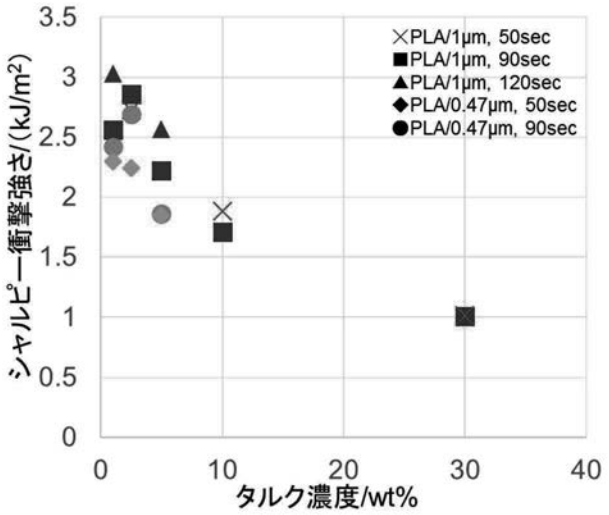



図 11　PLA/タルクのシャルピー衝撃強さ

## 4　おわりに

水媒体の金型温調器を用いた場合でも耐熱ポリ乳酸を射出成形可能とする目的で，タルクを粉砕し，PLA と混合し結晶核剤について調査した。また，PLA／タルクの射出成形特性及び物性について評価した。その結果，以下の知見を得た。

(1) ビーズミルにより，エタノール中で湿式粉砕することで，タルクの板状形状・結晶構造を保ったまま微粉砕することができた。

(2) PLA/タルク試料の DSC 測定では，タルクの平均粒子径が小さい程，結晶化ピークのピークトップが高温側にシフトし，結晶核剤効果が高いことが明らかになった。

(3) PLA/タルクの射出成形では，金型温度が高い程，短い冷却時間で PLA を結晶化させ，成形品の取り出しが可能であった。

(4) 荷重たわみ温度は，タルク濃度が高いほど高い値となった。PLA/0.47μｍでは，射出成形の冷却時間が長い方が，荷重たわみ温度が高くなった。

(5) シャルピー衝撃強さは，タルク濃度が低いほど高い値となった。また，PLA/1μｍの方が，PLA/0.47μｍよりもシャルピー衝撃強さが高くなった。

## 参考文献

1) 山川　肇：″廃棄物資源循環学会誌″，29 (4)，294，(2018)
2) 環境省：″プラスチック資源循環戦略″
3) 環境省：″バイオプラスチック導入ロードマップ″
4) 坪井智也，吉野太基，森雅弘：″成形加工″，24 (10)，612，(2012)
5) 野村学：″高分子″，55 (11)，878，(2006)

重点共同研究（フードバレーとちぎ）

# 海外展開に向けた県産イチゴ製品の色調劣化抑制技術の開発

星　佳宏*　　阿久津　知宏*　　金井　悠輔*　　齋藤　高宏**　　原　百合子***

## Development of Technology to Suppress Color Deterioration of Strawberry Products Produced in Tochigi Prefecture for Overseas Expansion

HOSHI Yoshihiro, AKUTSU Tomohiro, KANAI Yusuke, SAITO Takahiro and HARA Yuriko

海外展開に向けた県産イチゴ製品の長期間の色調保持技術の開発のため，イチゴ原料の冷凍保存条件，冷蔵中のイチゴペースト及びイチゴリキュールの色調劣化抑制条件について検討を行った。その結果，イチゴ原料冷凍保存において糖やクエン酸添加によって色調劣化が抑制可能であること，冷蔵中のイチゴペースト及びイチゴリキュールにおいてカテキンやプロアントシアニジンがイチゴ色素カリステフィンを保持する効果があることが分かった。また，共同研究企業にてカテキンやプロアントシアニジンを添加したイチゴジャム及びイチゴリキュールの試作を行った。

Key Words : イチゴ,カリステフィン,ジャム,リキュール，カテキン，プロアントシアニジン

## 1　はじめに

栃木県は，52年連続イチゴ生果の生産量全国一位であり，ジャム・菓子・ジェラート等様々なイチゴ加工品が製造されている。また，販路を海外に求める企業も増加している。

イチゴの赤色は，カリステフィンを主成分とするアントシアニン色素によるものであるが，アントシアニンは不安定な物質でイチゴ加工品は短期間で退色しやすい。

アントシアニンの退色防止には低ｐH，高糖度，低温保存が有効であり[1]，カテキン[2]やプロアントシアニジン[3]（以下PA）等のポリフェノールの利用により，アントシアニン色素を安定化させ退色を抑制したという報告がある。

また，当センターでは平成23年度フードバレー重点共同研究[4]において，シクロデキストリン及びミョウバンを用いてイチゴ色素であるカリステフィンを安定化させることでイチゴペーストの色調劣化を抑制する技術の開発に取り組んだが，色調がオレンジ色に近くなり，味に影響があるという課題が残されていた。

そこで本研究では，クエン酸や糖の添加による加工用イチゴ原料の冷凍保存条件の検討，カテキン及びPAの添加によるカリステフィンを保持する色調劣化抑制技術の開発を目指した。また，カテキンやPAを用いたジャムやリキュールの試作を併せて行った。

*　栃木県産業技術センター　食品技術部
**　斎藤商事　株式会社
*** 株式会社　栃木リキュール

## 2　研究の方法

### 2．1　原料・試薬

イチゴは，令和2年栃木県産とちおとめを供試した。添加試薬は全て食品添加用を用いた。

### 2．2　測定・評価方法

カリステフィンは阿久津らの方法[5]に従い，分光光度計（UV-2450：（株）島津製作所）を用いて測定した。

色調測定は，分光測色計（CM-5：コニカミノルタジャパン(株)）を用い，光源はD65，表色系はL*a*b*を用いて，赤みを表すa*と黄色みを表すb*により評価した。

味の評価は味覚センサー（TS-5000Z：(株)インテリジェントセンサーテクノロジー）を用いて行った。

香気成分分析は揮発性成分解析システム（Agilent 5977B：アジレント・テクノロジー（株））を用いてダイナミックヘッドスペース-ガスクロマトグラフ質量分析(GC/MS)法[6]により行った。

ポリフェノール量測定は，フォーリン-チオカルト法[7]により，没食子酸相当量として算出した。

### 2．3　保存条件の検討

#### 2．3．1　イチゴ原料の冷凍保存条件の検討

イチゴ原料冷凍保存時の色調劣化抑制に最適な試薬添加条件を検討するため，破砕機・搾汁機によりペーストにした県産とちおとめに対して，クエン酸添加割合4区分，さらに糖の種類及び添加割合を変えた表1の計32試験区を設定し，90日間の冷凍保存試験（－30℃）を行った。

### ２．３．２　イチゴペーストの色調劣化抑制条件の検討

冷蔵中のイチゴペーストの色調劣化抑制条件の検討のため，クエン酸添加割合４区分，さらにカテキン，PA の添加割合を変えた表２の計 28 試験区を設定し，10℃遮光条件下で 90 日間の保存試験を行った。

イチゴペーストは，破砕機・搾汁機によりペーストにした県産とちおとめに対して，試薬（クエン酸，カテキン，PA）添加後，密封して 98℃以上５分間加熱処理し，氷水中で急冷し作製した。

### ２．３．３　イチゴリキュールの色調劣化抑制条件の検討

冷蔵中のイチゴリキュールの色調劣化抑制条件の検討のため，糖２区分（糖添加，糖無添加），さらにカテキン，PA，クエン酸の添加割合を変えた表３の計 20 試験区を設定し，10℃遮光条件下で 90 日間の保存試験を行った。

イチゴリキュールの糖添加試験区は，ホワイトリカー（35%）５Ｌに冷凍イチゴ 2.5ｋｇ，スクロース 1.8ｋｇを加え，２日浸漬後にイチゴをろ別したベースリキュールに対して，試薬（クエン酸，カテキン，PA）を添加し作製した。また，対照区としてスクロース無添加で作製したベースリキュールを用いた糖無添加区も設定した。

なお，全ての保存試験において，無添加（0 日目）の数値をブランクとした。

### ２．４ 試作

イチゴペーストやイチゴリキュールの色調劣化抑制条件の検討結果を参考にし，カテキンや PA を用いて，斎藤商事㈱でイチゴジャム，㈱栃木リキュールにおいてイチゴリキュールを試作した。

イチゴジャムの試作はジャム製造工程の殺菌工程直前にカテキン（2000ppm），PA(1000ppm)となるように添加して試作を行った。

イチゴリキュールの試作は商品製造直後のイチゴリキュールにカテキン（500ppm），PA（500ppm）となるように添加して行った。

これらの試作品の評価は，食品技術部員５人での官能評価，味覚センサー測定，香気成分分析，ポリフェノール量測定により行った。

## ３　結果及び考察

### ３．１　保存条件の検討

### ３．１．１　イチゴ原料の冷凍保存条件の検討

クエン酸添加割合（0%，1%）の糖添加直後（0 日）の色調測定結果（a*，b*）を図１に示す。クエン酸添加直後に色調変化が見られ，クエン酸添加割合が高くなるにつれて a*，b*が高くなり，赤みと黄色みが増した。

表１　イチゴ原料冷凍保存試験区

| | | |
|---|---|---|
| ○クエン酸 | ①無添加 | － |
| ４区分 | ②スクロース | 15 % |
| | ③スクロース | 30 % |
| ①0%（無添加） | ④スクロース | 60 % |
| ②0.25% | ⑤フルクトース | 30 % |
| ③0.5% | ⑥グルコース | 30 % |
| ④1.0% | ⑦マルトース | 30 % |
| | ⑧ソルビトール | 30 % |

クエン酸４区分×８糖添加区　計 32 試験区

表２　イチゴペースト試験区

| | | |
|---|---|---|
| ○クエン酸 | ①無添加 | － |
| ４区分 | ②カテキン | 500 ppm |
| | ③カテキン | 1000 ppm |
| ①0%（無添加） | ④カテキン | 2000 ppm |
| ②0.25% | ⑤PA | 500 ppm |
| ③0.5% | ⑥PA | 1000 ppm |
| ④1.0% | ⑦PA | 2000 ppm |

クエン酸４区分×７試薬添加区　計 28 試験区

表３　イチゴリキュール試験区

| | | |
|---|---|---|
| ○糖添加 | ①無添加 | － |
| ２区分 | ②カテキン | 500 ppm |
| | ③カテキン | 1000 ppm |
| ①糖添加 | ④カテキン | 2000 ppm |
| ②糖無添加 | ⑤PA | 500 ppm |
| | ⑥PA | 1000 ppm |
| | ⑦PA | 2000 ppm |
| | ⑧クエン酸 | 0.25 % |
| | ⑨クエン酸 | 0.5 % |
| | ⑩クエン酸 | 1.0 % |

糖２区分×10 試薬添加区　計 20 試験区

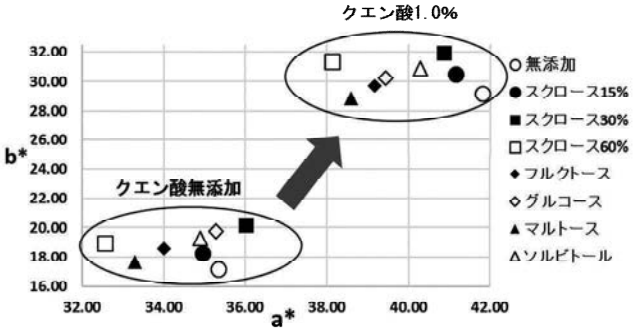



図１　冷凍保存試験の色調測定結果（0 日）

カリステフィンはｐＨを下げることによりa*，b*が高くなることが報告されている[8]。試験区のｐＨはクエン酸0%試験区が3.7付近，クエン酸1.0%試験区が3.0付近であったことから，クエン酸添加による色調変化はｐＨ低下による影響と考えられた。

続いて,各試験区0日を対照としたクエン酸試験区(無添加，0.5%)の90日保存後の色調変化（Δa*，Δb*）を図２，３に示す。

冷凍保存中でa*，b*は低くなる傾向であり，クエン酸添加割合が高いほど，色調変化は小さかった。特にクエン酸を 0.5%以上添加するとΔa*，Δb*が小さくなり，冷凍時にクエン酸添加が有効と考えられた。また，糖類添加によっても保存中のΔa*，Δb*が小さくなり，色調劣化が抑制できた。

以上の結果より，イチゴ原料冷凍保存中の色調変化抑制には酸添加によるｐＨ低下，糖添加は効果があると考えられた。

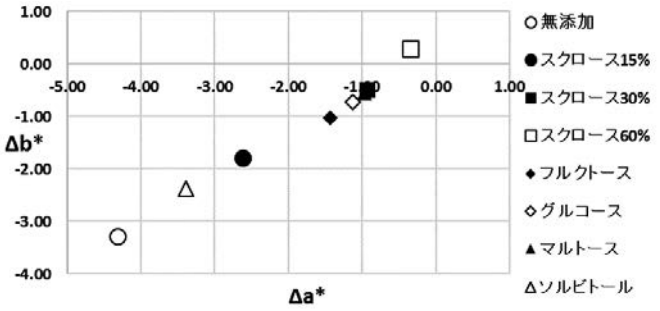



図２　冷凍保存試験のクエン酸無添加試験区の色調変化（90日後）

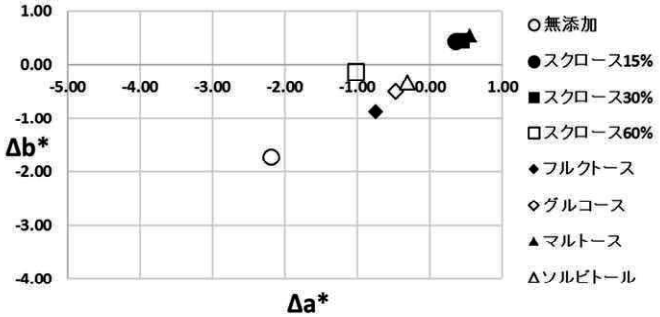



図３　冷凍保存試験のクエン酸0.5%試験区の色調変化（90日後）

### ３．１．２ イチゴペーストの色調劣化抑制条件の検討

イチゴペーストについて,カテキン及びPA添加によるカリステフィン保持の効果を評価するため,90日保存後のカリステフィン残存率測定と色調測定を行った。

保存試験中の各試験区0日のカリステフィン量を100%としたカリステフィン残存率を図４に示す。

イチゴペーストでは56日（8週間）経過でほとんどの試験区が残存率50%を下回ったが，クエン酸無添加のカテキン試験区，PA試験区は残存率50%以上となった。

また，クエン酸添加割合が高くなるにつれ残存率が低くなった。カテキン，PAは添加割合が高くなるにつれて残存率が高くなる傾向であった。

この結果からカテキン,PA添加はイチゴペーストのカリステフィン保持に効果があることが明らかになった。

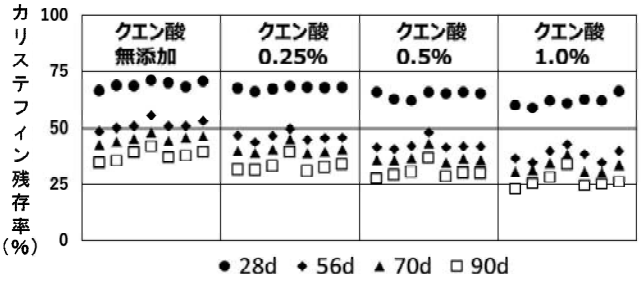



図４　イチゴペーストのカリステフィン残存率

**※各区分　無添加，カテキン（500，1000，2000ppm），PA（500，1000，2000ppm）の順**

次に,各試験区0日を対照とした90日後のクエン酸試験区（無添加，１%)の色調変化（Δa*，Δb*）を図５に示す。イチゴペーストの冷蔵保存ではクエン酸添加割合が高いほど色調変化が大きかった。色調変化は，無添加区＞カテキン区＞PA区の順であり，試薬添加により色調劣化抑制効果があった。

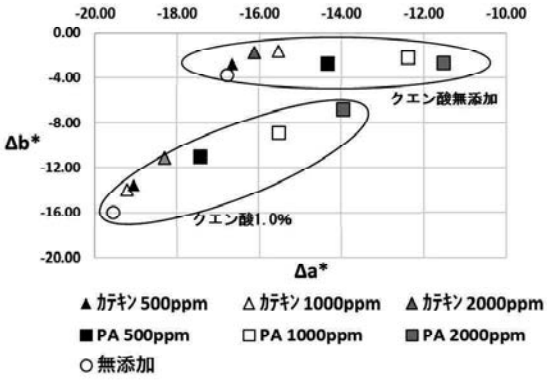



図５　各試験区0日を対照としたイチゴペーストの色調変化（90日後）

さらに,ブランクを対照とした各試験区の90日後の色調変化（Δa*，Δb*）の測定結果を図６に示す。

クエン酸添加割合が高いほどクエン酸添加直後からa*が高くなるため，クエン酸 1.0%試験区の色調がブランクの色調に最も近くなった。

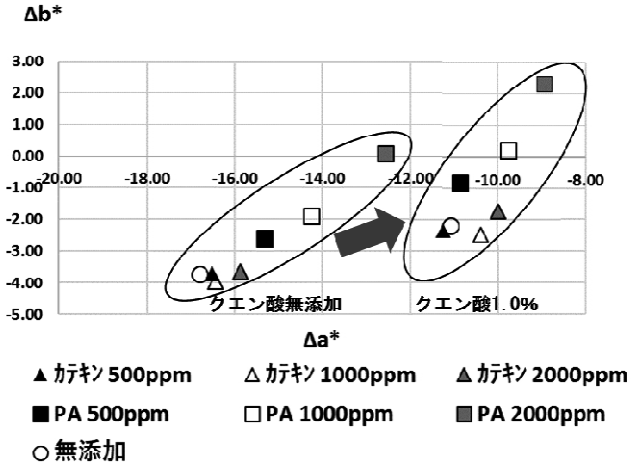



図６　ブランクを対照としたイチゴペーストの色調変化（90 日後）

このブランクを対照とした色調変化とカリステフィン残存率の結果を比べると，クエン酸添加割合が高いほどイチゴペースト中のカリステフィン量は減少しているものの a*は高くなっている。

このことから，イチゴペーストの色調への影響はカリステフィン量減少による a*の低下よりも pH 低下による a*の増加の寄与のほうが大きいと推察された。

### ３．１．３ イチゴリキュールの色調劣化抑制条件の検討

イチゴリキュールについて，カテキン及び PA 添加によるカリステフィン保持の効果を評価するため，90 日保存後のカリステフィン残存率測定と色調測定を行った。

保存試験の各試験区 0 日のカリステフィン量を 100%としたカリステフィン残存率を図７，８に示す。

糖の添加の影響については，糖添加区が糖無添加区よりも高い残存率を示した。また，90 日後のカテキン試験区，PA 試験区ともに残存率 50%以上であった。さらにイチゴリキュールにおいてもイチゴペースト同様にクエン酸添加割合が高くなるにつれて残存率が低くなった。

これらの結果からイチゴリキュールについてもカテキン，PA 添加がカリステフィン保持の効果があることが明らかになった。また糖添加もカリステフィン保持の効果が示された。

次に，各糖添加試験区の 0 日を対照とした 90 日間の色調変化測定結果を図９に示す。イチゴリキュールの冷蔵保存での色調変化については，糖の有無で色調変化の傾向は変わらず，a*はすべての試験区で減少したが，b*は無添加区，カテキン試験区，PA 試験区では増加し，クエン酸試験区は減少した。

色調変化は，クエン酸試験区が最も大きく，PA 試験区は最も色調変化が小さかった。

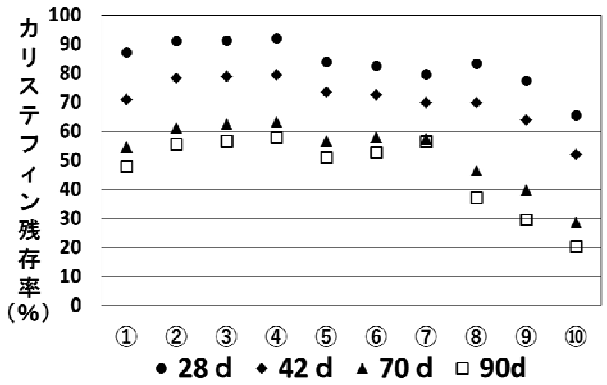



図７　イチゴリキュール（糖無添加）のカリステフィン残存率

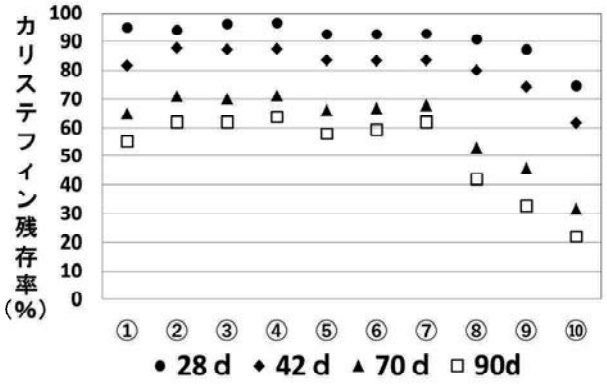



図８　イチゴリキュール（糖添加）のカリステフィン残存率

**※図7，図８共に横軸の数字は下記の試験区**
**①:無添加 ②:カテキン 500 ppm ③:カテキン 1000 ppm**
**④:カテキン 2000 ppm ⑤:PA 500 ppm ⑥:PA 1000 ppm**
**⑦:PA 2000 ppm ⑧:クエン酸 0.25 % ⑨:クエン酸 0.5 %**
**⑩:クエン酸1.0%**

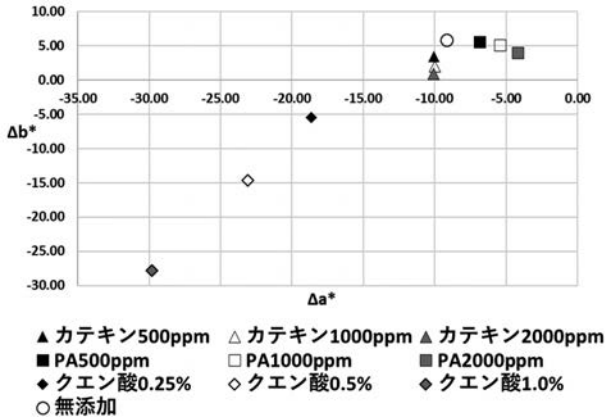



図９　各試験区 0 日を対照としたイチゴリキュール（糖添加）の色調変化（90 日後）

PA 試験区はΔa*が小さくなり色調劣化抑制効果があった。カテキン試験区は無添加区に比べΔb*は小さかったが，Δa*は大きく色調劣化効果があまり見られなかった。

さらに,ブランクを対照とした糖添加試験区の 90 日間の色調変化を図 10 に示す。

クエン酸試験区は保存中に a*，b*が低くなるが，クエン酸添加直後に既に a*，b*が高くなっているため，最終的に 90 日間後の色調はクエン酸試験区が最もブランクに近い色調となった。

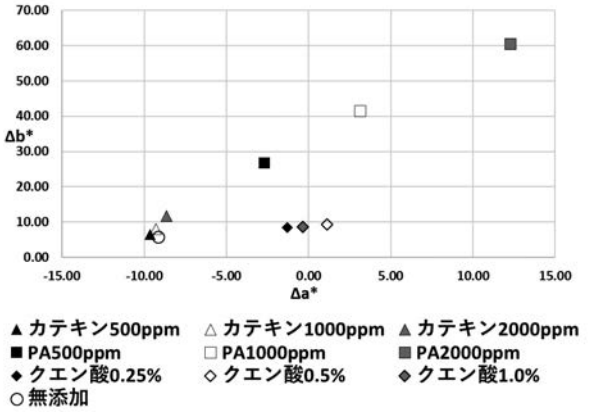



図 10　ブランクを対照としたイチゴリキュール（糖添加）の色調変化（90 日後）

色調測定結果とカリステフィン残存率測定結果を比べると，クエン酸添加割合が高いほどイチゴリキュール中のカリステフィン量は減少しているものの，クエン酸試験区の色調（90 日後）はいずれの試験区でもブランクの色調と近かった。

このことから，リキュールのクエン酸試験区についてもカリステフィン量減少による a*の低下よりもｐH 低下による a*の増加の寄与のほうが大きいと推察された。

### ３．２ カテキンや PA を用いた試作

イチゴジャム試作品の味覚センサー測定結果を図 11 に，イチゴリキュール試作品の味覚センサー測定結果を図 12 に示す。

味覚センサー測定ではどちらもカテキン添加により対照（無添加）に比べて渋味刺激（渋味先味）と渋味（渋味後味）が高くなった。

香気成分分析では，イチゴジャム，イチゴリキュールのすべての試験区でネロリドール（甘い香り），リナロール（スズランの香り），メシフラン（イチゴ特有の香り）等のイチゴに特徴的な成分が検出されたが，無添加，カテキン添加，PA 添加で検出成分の差はなかった。

官能評価結果は，味についてはカテキン試験区でも苦みや渋みの有無は感じられないという評価であった。今回のリキュールやジャム試作品は甘味が強いためかと考えられる。香りについても試験区ごとの違いはないという評価であった。

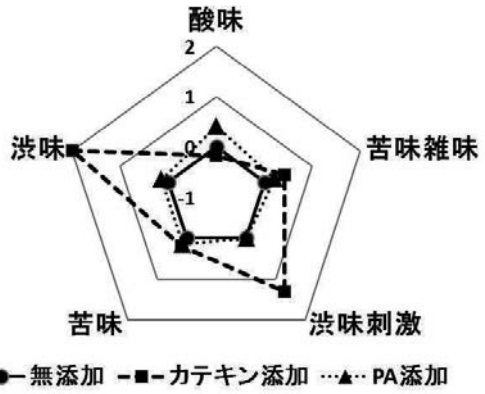



図 11　イチゴジャムの味覚センサー測定結果（無添加対照）

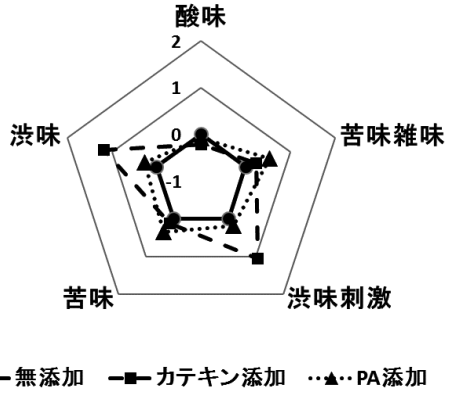



図 12　イチゴリキュールの味覚センサー測定結果（無添加対照）

イチゴジャム試作品のポリフェノール量測定結果を図 13 に，イチゴリキュール試作品のポリフェノール量測定結果を図 14 に示す。

イチゴジャム試作品，イチゴリキュール試作品ともにカテキン添加区や PA 添加区は無添加区に比べてポリフェノール量が多かった。

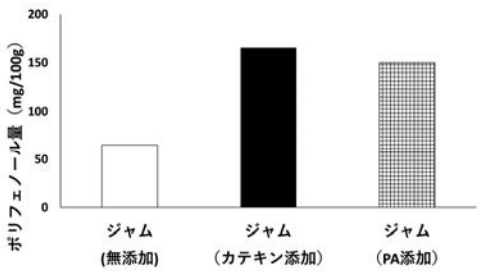



図 13　イチゴジャムのポリフェノール量

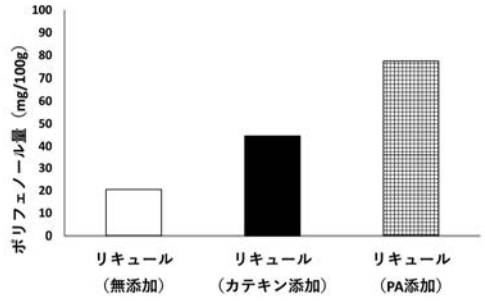



図 14　イチゴリキュールのポリフェノール量

## 4　おわりに

イチゴ原料の冷凍保存条件，冷蔵中のイチゴペースト及びイチゴリキュールの色調劣化抑制条件について検討し，試作を行った。その結果，下記のことが明らかになった。

(1) 酸添加によるｐＨの低下と糖添加はイチゴ原料冷凍保存中の色調変化抑制に効果があった。

(2) カテキンやプロアントシアニジンの添加はイチゴペーストやイチゴリキュールにおいて,イチゴ色素カリステフィンの保持に効果があった。

(3) イチゴペーストやイチゴリキュールの色調については，カリステフィン量減少による a*の低下よりもｐH 低下による a*の増加の寄与のほうが大きいと推察された。

(4) カテキンやPA添加によりポリフェノール量が多いイチゴペーストやイチゴリキュールが試作できた。添加の影響は，香りには特に見られなかった。味覚センサーのデータからはカテキン添加区の渋味増加が確認されたものの,官能評価においては甘味等によりマスキング可能であることが分かった。

カテキン，プロアントシアニジン，クエン酸の添加はイチゴ加工品の色調抑制に効果があることが分かったが，添加量によっては，商品に味や色が付加されるため添加量と色調や味のバランスを考慮する必要がある。

今後，今回の研究で得られた知見を活かし，県産イチゴを用いた加工食品のさらなる高付加価値化や高機能化を図りたい。

## 参考文献

1) 中林敏郎:〃日本食品工業学会誌〃, 24, 530-538,(1977)
2) 北條雅也ら:〃奈良県農業研究開発センター研究報告〃, 51, 9-19, (2020)
3) 有賀敏明ら:〃日本農芸化学会誌〃,74, 1-8, (2000)
4) 伊藤和子ら:〃栃木県産業技術センター研究報告〃, 9, 11-16, (2012)
5) 阿久津智美ら:〃栃木県産業技術センター研究報告〃, 7, 75-79, (2010)
6) 落合伸夫：〃化学と生物〃, 55, 644-650, (2017)
7) 食品機能性評価支援センター 技術普及資料等検討委員会編：〃食品機能性評価マニュアル集第Ⅲ集〃, 1-7, (2009)
8) 壺阪美智子ら:〃甲子園短期大学紀要〃, 10, 3-16, (1991)

# Ⅱ 共同研究

Cooperative Research

共同研究

# バレル工具の傾斜角度が仕上げ面粗さと工具寿命に及ぼす影響

五月女　英平*　　近藤　弘康*　　伊藤　健**

Effect of Lead Angle of Barrel Tool on Finished Surface Roughness and Tool Life

SOTOME Hidehira, KONDO Hiroyasu and ITO Ken

近年，航空機部品の加工現場では，タービンブレード等の曲面形状の同時５軸加工にバレル工具が使われるようになってきた。本研究では，５軸マシニングセンタとバレル工具を活用し，工具傾斜角度（リード角）が表面粗さ及び工具寿命に及ぼす影響について検討した。その結果，バレル工具のリード角を大きくすることで，工具への負荷を小さくすることができた。さらに，工具のリード角を20°以下で使用すればリード角0°と同等の表面粗さを得られ，工具のリード角を10°以上にすることで工具寿命を伸ばせることがわかった。試作品の加工では，リード角を設定して切削速度を上げ，仕上げ加工時間を短縮することができ，製品として求められる表面粗さ及び形状精度の要求基準を満たすことができた。

Key words: 切削加工，バレル工具，析出硬化系ステンレス鋼，工具摩耗

## １　はじめに

近年，航空機部品の加工現場では，タービンブレード等の曲面形状の同時 5 軸加工にバレル工具が使われるようになってきた。バレル工具は，工具径よりも側面刃の曲率半径が大きいため，同じカスプ高さ（理論表面粗さ）であれば，ボールエンドミルに比べて大きなピックフィード（加工間隔）で加工でき，加工時間を短縮することが可能である。

昨年度は，バレル工具による高効率仕上げ加工技術の開発について研究を行い，加工条件の検討，工具寿命等について報告[1)]した。その結果，切削点の違いにより表面粗さが変化し，切削点が工具の側面刃の先端付近になると表面粗さが大きくなる傾向が見られた。

本研究では，５軸マシニングセンタとバレル工具を活用し，工具傾斜角度（リード角）が表面粗さ及び工具寿命に及ぼす影響について検討し，リード角を設定した高効率切削加工技術の獲得を目的とする。

## ２　研究の方法

### ２．１　工具傾斜角度変更試験

リード角が切削抵抗及び表面粗さに与える影響を検討した。５軸加工におけるリード角を図１に示す。被削材は 20mm×90mm×20mm の析出硬化系ステンレス鋼 15-5PH 及びプリハードン鋼 HPM-MAGIC とした。切削加工実験には５軸マシニングセンタ(DMG 森精機　DMF180)を用い，工具は刃先交換式の 2 枚刃のバレル工具(三菱日立ツール ZDHW200-T43R2-50)とした。なお，回転時の振れによる形状誤差の影響をなくすために，湿式ベルト研磨機で１枚刃処理を行った。加工機及び工具の仕様を表１及び表２に示す。チルト角は，-52.49°（切削点：側面刃先端付近)及び-55.93°（切削点:側面刃中央付近)の２水準，リード角は 0°～30°の４水準に設定した。実験の外観を図２，工具傾斜角度変更試験の実験条件を表３に示す。本実験で使用した工具は，切削点で工具径が変わることから，加工位置での切削速度が一定になるように回転数を変更した。切削抵抗の測定は圧電式三成分動力計（日本キスラー㈱ 9257B）を用いた。ツールパスの作成は CAD/CAM(hyperMILL　OPENMIND)を使用し，加工面の面に沿って工具の接触位置が常に一定となる加工(タンジェント加工)で，パスを作成した。

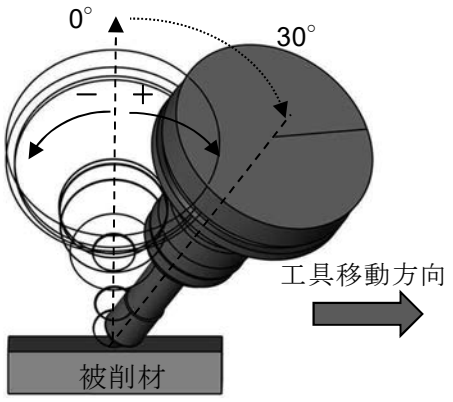



図１　リード角について

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊ 株式会社栃澤金型製作所

表１　５軸マシニングセンタの主な仕様

| | |
|---|---|
| 型式 | DMG 森精機　DMF180 |
| 軸構成 | 同時５軸<br>（X 軸，Y 軸，Z 軸，B 軸，C 軸） |
| 最高回転数 | 15,000min$^{-1}$ |
| 最大切削送り速度 | 40m/min |
| 切削液吐出圧 | スピンドルスルー4MPa |

表２　バレル工具の仕様

| | | |
|---|---|---|
| | 形状等 | テーパーバレル<br>側面 R50，先端 R2<br>三菱日立ツール<br>ZDHW200-T43R2-50 |
| | 工具径[mm] | 20 |
| | 刃数 | 2 枚 |
| | 材質 | 超硬 |
| | コーティング | PN215 |

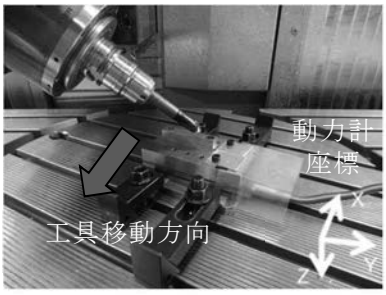



図２　実験外観（リード角 30°）

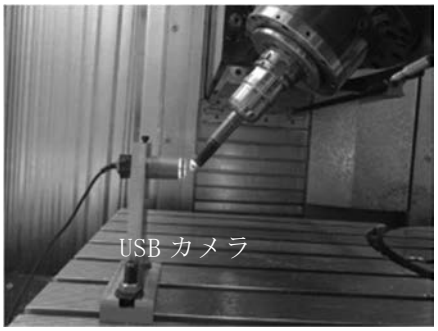
表３ 工具傾斜角度変更試験の実験条件

| 被削材 | 15-5PH | HPM-MAGIC |
|---|---|---|
| チルト角［°］<br>(回転数[min$^{-1}$],<br>送り速度<br>[mm/min]) | ○切削速度 250[m/min]<br>-52.49（8650，1384）<br>-55.93（6360，1011）<br>○切削速度 160[m/min]<br>-52.49（5536，886）<br>-55.93（4042，647）<br>※1 刃あたりの送り量<br>0.16[mm/tooth] | |
| リード角 | 0°,10°,20°,30° | |
| ピックフィード<br>[mm] | 2.0<br>(リード角 0°<br>理論表面粗さ<br>10μm) | 1.0<br>(リード角 0°<br>理論表面粗さ<br>2.5μm) |
| 切込み[mm] | 0.2 | |
| 切削液 | 水溶性切削液 | |
| 工具突き出し<br>長さ[mm] | 100（L/D=5） | |
| 削りの向き | 下向き削り<br>（ダウンカット） | |

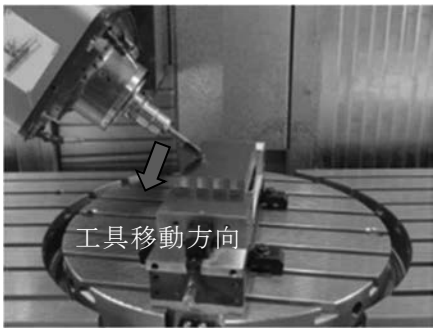
加工面の表面粗さの測定は，触針式表面粗さ測定機（東京精密 SURFCOM NEX031）を用い，測定箇所を変えて３回測定し，その平均を測定値とした。

### ２．２　工具摩耗試験

リード角の違いによる工具寿命及び異常摩耗の有無を観察するため，工具摩耗試験を行った。リード角は 0°，10°，20°の３水準に設定した。実験の外観を図３に示す。5 軸マシニングセンタとバレル工具を用いて，加工機内に被削材(析出硬化系ステンレス鋼 15-5PH 250mm×125mm×90mm)を配置し，一定距離加工後，工具刃先を USB マイクロスコープにより撮影した。逃げ面摩耗量は，２枚刃の逃げ面摩耗量の平均値とした。実験条件を表４に示す。




(a) 刃先観察




(b) 摩耗試験

図３　工具摩耗試験外観

表４　工具摩耗試験の実験条件

| 被削材 | 15-5PH |
|---|---|
| チルト角［°］<br>(回転数[min$^{-1}$],<br>送り速度[mm/min]) | -52.49（8650，2768）<br>※1 刃あたりの送り量<br>0.16[mm/tooth] |
| リード角 | 0°,10°,20° |
| ピックフィード[mm] | 2.0 |
| 切込み[mm] | 0.2 |
| 切削液 | 水溶性切削液 |
| 工具突き出し長さ[mm] | 100（L/D=5） |
| 削りの向き | 下向き削り(ダウンカット) |

### ２．３　試作品による加工実験

5 軸マシニングセンタとバレル工具を用いて製品を切削加工した時の加工面品質を評価するため，自由曲面を有する航空機部品を想定した試作品の切削加工実験を行った。被削材は製品と同じ析出硬化系ステンレス鋼 15-5PH とし，切削加工実験には 5 軸マシニングセンタ（牧野フライス　a61nx-5E）を用いた。ツールパスについては，タンジェント加工で加工面の面沿いに加工するように CAD/CAM を使用して作成した。チルト角については，工具寿命を考慮して加工パス毎に切削点が変わるように-52.49°から-59.24°までの範囲で角度を変更させた。

加工面の表面粗さは，触針式表面粗さ測定機（テーラーホブソン　PGI840）で測定した。形状誤差については，三次元座標測定機（ミツトヨ　Bright　Apex）で形状を測定し，加工面の削り残しが正の値を＋とし，狙い値からの最大差で評価した。

## ３　結果及び考察

### ３．１　切削抵抗

図４に，工具傾斜角度変更試験で使用した試験片を示す。図５に，切削抵抗の比較結果を示す。リード角が大きくなると工具移動方向と工具の回転方向の関係が変化するため，X 方向（工具移動方向）の切削抵抗 Fx の最大値が小さくなり，Y 方向の切削抵抗 Fy の最小値が小さくなった。Z 方向の切削抵抗 Fz の最大値は，リード角の変化による大きな差異は見られなかった。

リード角による工具への負荷の違いを比較するため，切削抵抗 Fz の最大値が同等の波形について，切削抵抗の積算値の計算を行った（式１）。比較結果を図６に示す。リード角を大きくすると，切削抵抗の積算値が小さくなり，工具への負荷が小さくなることがわかった。一方，切削速度の違いによる影響は見られなかった。

### ３．２　表面粗さ

工具傾斜角度変更試験の試験片について，触針式表面粗さ測定機を用い，工具移動方向に対して直角方向の表面粗さを測定し，カスプ高さで評価した。カスプ高さとリード角の関係を図７及び図８に示す。図７の 15-5PH の加工では，リード角 10°でカスプ高さが小さくなる傾向が見られ，チルト角-52.49°（側面刃先端付近)のリード角 30°で 12.5μｍを超えた。図８(a)の HPM-MAGIC のチルト角-52.49°での加工では，リード角による影響は見られなかった。一方，図８(b)のチルト角 -55.93°（側面刃中央付近)において，リード角 10°から 20°でカスプ高さが小さくなる傾向が見られた。理論表面粗さよりも加工面のカスプ高さが大きくなる

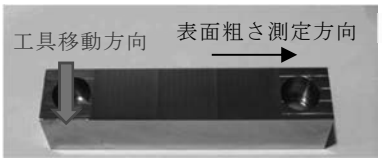
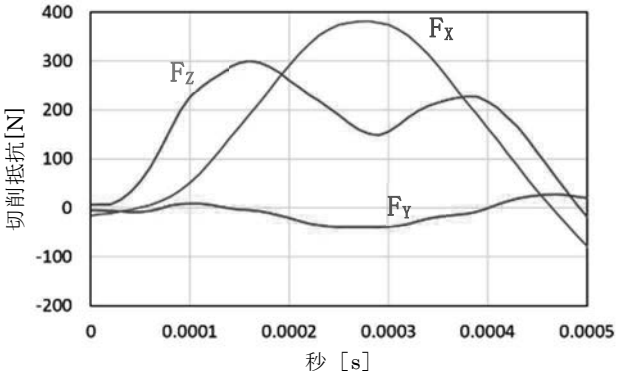
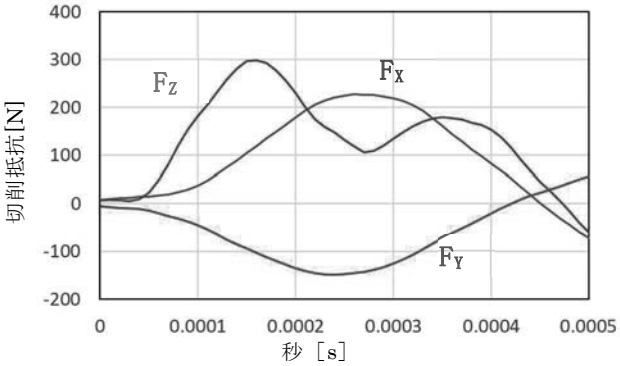



図４　試験片




(a)　　リード角 0°




(b)　リード角 30°

図５　切削抵抗の比較（15-5PH)
（切削速度 250m/min，チルト角-52.49°）

切削抵抗（合力）の積算値 $= \int F(t)\,dt$　・・・式１

合力：$F(t)=\sqrt{Fx^2+Fy^2+Fz^2}$

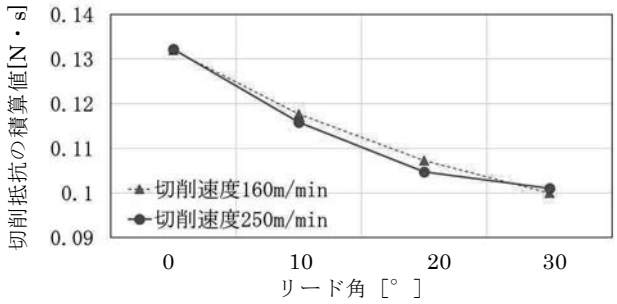
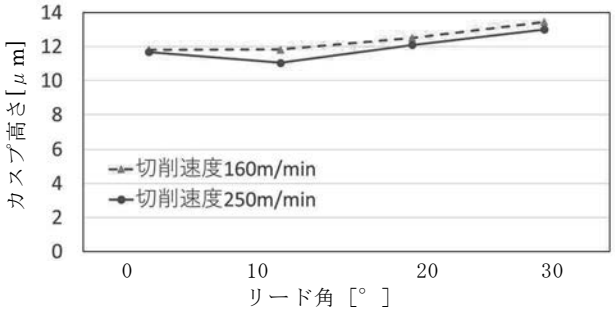
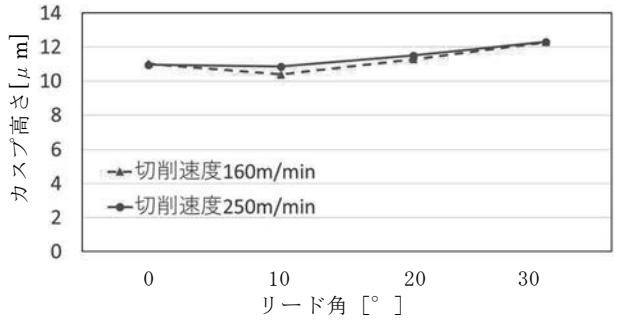



図６　切削抵抗の積算値とリード角の関係
（15-5PH，チルト角-52.49°）

理由として工具の振れや工具の刃の表面の凹凸が影響しているという報告[2)]があり，本実験でも同様の傾向が見られた。また，リード角を大きくすると加工面の曲率半径が小さくなるため，リード角 30°以上ではカスプ高さが大きくなっている。したがって，リード角を 20°

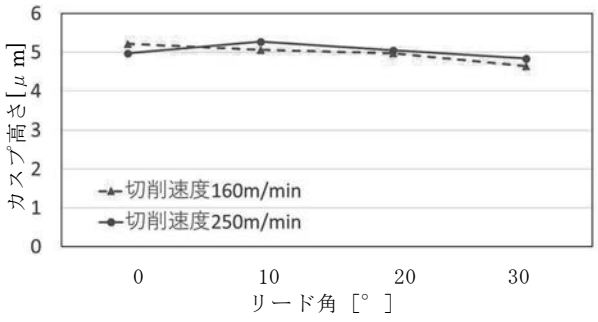



(a)　チルト角-52.49°（側面刃先端付近）

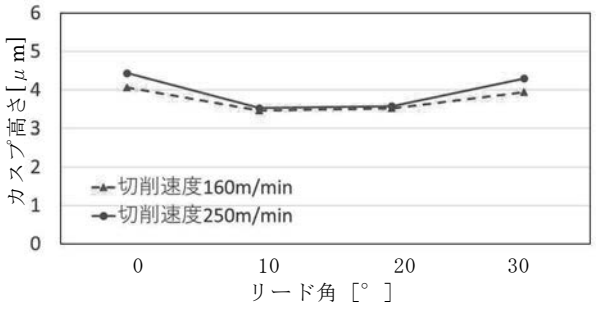



(b)　チルト角-55.93°（側面刃中央付近）

図７　カスプ高さとリード角の関係(15-5PH))




(a)　チルト角-52.49°（側面刃先端付近）




(b)　チルト角-55.93°（側面刃中央付近）

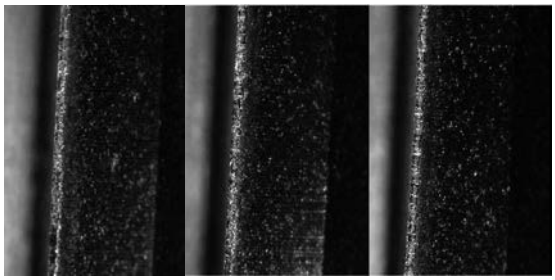
図８ カスプ高さとリード角の関係(HPM-MAGIC)

以下で使用すれば，加工面の曲率半径が変化する影響を小さくできることがわかった。一方，切削速度によるカスプ高さの優位な差異は見られなかった。

### ３．３　工具摩耗試験

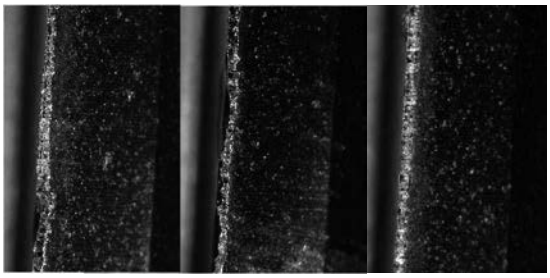
逃げ面の観察結果を図９及び図 10 に示す。図９(a)のリード角 0°切削距離 300m において，工具のすくい面に剥離が生じ始めた。図 10(b)のリード角 10°切削距離 450m において工具のすくい面に剥離が生じていたが，図 10(c)のリード角 20°ではすくい面の剥離が確認できなかった。リード角を大きくすると，加工時の切削抵抗が小さくなり，工具への負荷が小さくなることで，すくい面の損傷を抑えられたと考えられる。

次に工具の逃げ面摩耗量と切削距離の関係を図 11 に示す。摩耗試験開始から切削距離 75m まで，逃げ面摩耗量が急増する初期摩耗が進行した。その後，摩耗量がほぼ一定の割合で増加する定常摩耗を示した。リード角 0°に比べ，リード角 10°及び 20°の逃げ面摩耗量は小さかった。リード角を 10°以上にすることで，工具寿命が伸びることがわかった。



(a)リード角 0°　(b)リード角 10°　(c)リード角 20°

図９ 切削距離　300m の逃げ面観察結果



(a)リード角 0°　(b)リード角 10°　(c)リード角 20°

図 10 切削距離　450m の逃げ面観察結果

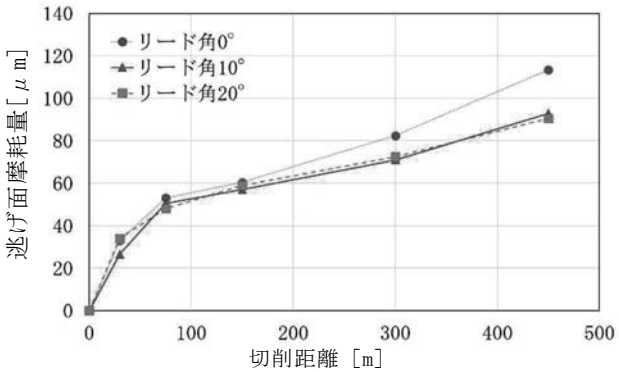
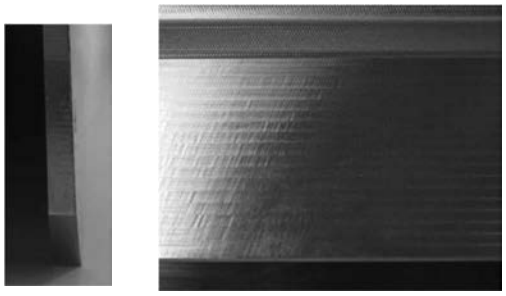



図 11　逃げ面摩耗量と切削距離

### ３．４　試作品による加工実験

航空機部品の形状を想定し，自由曲面の切削加工実験を行った。一般的に，加工時間を短縮するために切削速度を上げると工具寿命が短くなってしまう。リード角を設定することで工具寿命を伸ばせるため，リード角 0°での加工条件よりも切削速度を大きくし，切削加工時間を短縮できた。加工面の外観を図 12，デジタル顕微鏡による加工面の観察結果を図 13 に示す。加工面を評価した結果，製品として求められる表面粗さ及び形状精度の要求基準を満たすことができた。



(a)側面　　(b)加工面

図 12　試作品の外観

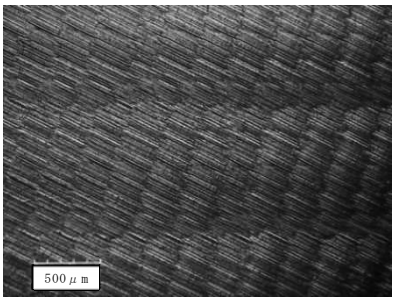



図 13　加工面の観察結果

### ４　おわりに

バレル工具の傾斜角度による表面粗さ及び工具寿命に及ぼす影響について検討した結果，次の結論を得た。

(1) 切削抵抗を測定した結果，工具のリード角を大きくすることで，工具への負荷を小さくできることがわかった。

(2) 工具のリード角が表面粗さに与える影響を検討した結果，工具のリード角を 20°以下で使用すれば，加工面の曲率半径が変化する影響を小さくできることがわかった。

(3) 工具摩耗試験を行った結果，工具のリード角を 10°以上にすることで，工具寿命を伸ばすことができた。

(4) 試作品による加工実験を行い，リード角を設定して切削速度を上げ，仕上げ加工時間を短縮できた。加工面を評価した結果，製品として求められる表面粗さ及び形状精度の要求基準を満たすことができた。

### 参考文献

1) 五月女英平，近藤弘康，伊藤健：〝栃木県産業技術センター研究報告〟，17，1-6，(2020)

2) 越井 亮一，笹原 博之，遠藤 健：〝第 25 回精密工学会 学生会員卒業研究発表講演会論文集〟，(2018)，102-102

共同研究

# シミュレーション技術を活用した軽量化設計による高付加価値製品の開発

髙岩　徳寿*　　内藤　恭平*　　松永　成晃**

Development of Products with High Additional Value by Lightweight Design Utilizing Simulation Technology

TAKAIWA Norihisa, NAITO Kyohei and MATSUNAGA Shigeaki

近年，シミュレーション技術を活用した構造最適化により，剛性を保持したままで，軽量化を達成できる製品形状の設計が可能となっている。本研究では，医療用プライヤーを例にトポロジー最適化及び形状最適化技術を用いることで，現行品と同等程度の剛性を持ち軽量化したサンプルの作製を試み，構造最適化技術を活用した高付加価値製品の開発が可能か検討した。その結果，従来の機械加工で作製可能な形状を導き出すことができ，作製した軽量化試作品が実使用に耐えうることが分かった。

Key words:　シミュレーション，軽量化，高付加価値，3D プリンタ，金属積層造形

## 1　はじめに

近年，シミュレーション技術の発展により，構造最適化を活用したものづくりが注目されている。構造最適化とは，体積や質量などにいくつかの制約を与えた状態で，目的の性能を最大限発揮できるような形状構造を数学的に求める方法である[1)]。構造最適化技術を活用することにより，剛性を保持したまま軽量化した設計が可能となるため，環境負荷低減や燃費向上への要求が厳しい自動車・航空機業界等において活用に向けた研究が盛んに行われている[2),3)]。また，当該技術は，機械的な構造のみならず熱，流体，電磁気分野でも活用可能であり，機械産業を中心に様々な産業で広く利用されることが期待されている[4)]。

本研究では，医療機器分野に用いられるプライヤーを例に取り，構造最適化を適用することで既存品に比べて十分な剛性を持ったまま軽量化した試作品を作製し，新たな付加価値を創出できるか検討した。

## 2　研究の方法

### 2．1　軽量化設計の提案・検討

本研究で構造最適化を実施するプライヤーの現行形状を図１に示す。今回は製品展開を考慮して，先端部及び軸部について加工前の形状とした。まず，図１の形状を CAD ソフト（Dassault Systèmes SOLIDWORKS）によって 3D モデリングした。次に，作成した 3D モデルについて，解析ソフト（Dassault Systèmes SOLIDWORKS Simulation）を用いて構造解析を実施し，現行品にかかるミーゼス応力を確認した。構造解析を実施するにあたり，プライヤーの材質は焼き入れ焼き戻し後の SUS420J2（JIS G4303）とし，持ち手部分に 200N の力がかかっているものとした。

図１　最適化実施形状

最適化については以下の３パターンを実施することとした。

①現行形状のトポロジー最適化

②新規持ち手形状のトポロジー最適化

③持ち手裏面の削除領域の寸法最適化

トポロジー最適化及び持ち手裏面の削除領域の寸法最適化については，解析ソフト（Dassault Systèmes SOLIDWORKS Simulation）を用いて実施した。トポロジー最適化のゴールは，解析後の形状においてプライヤーにかかるミーゼス応力が現行品以下となり，かつ最も軽量になるものとした。このとき，トポロジー最適化によって形状が崩れないように，先端部，軸部，持ち手部は形状が変更されないように制限をかけた。

### 2．2　製造に向けた軽量化モデルの再設計

トポロジー最適化により得られた解析メッシュから

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊　株式会社シオダ

ポリゴンを出力する際に，解析メッシュの粗さ等の影響により若干形状が変化するため，リバースエンジニアリングソフト（3DSystems　GeomagicDesignX）を用いてポリゴンを修正するとともにソリッド化した。その後，構造解析を実施し軽量化後の各形状にかかるミーゼス応力を算出した。

### ２．３　3D プリンタによる試作

構造最適化により得られた形状について，図２に示す金属 3D プリンタ（ソディック　OPM250L）を用いて試作した。材質はマルエージング鋼とし，レーザ焼結条件は，レーザスポット径 0.2mm，レーザ出力 420W，走査速度 1400mm/s，走査ピッチ 0.08mm，積層厚さ 0.04mm とした。造形後はマシニングセンタ等により軸部，先端部を加工し，刃先に超硬のチップを取り付け，ワイヤ等を切るカッティングプライヤーを作製した。作製した試作品について，外観や強度及び機能性を検証した。

図２　金属 3D プリンタ
（ソディック　OPM250L）

### ２．４　現行の加工法での試作品作製

現行の生産設備で加工可能であるかを確認するため，量産品のプライヤーをマシニングセンタ等による加工機を用いて最適化形状になるよう加工し，刃先に超硬のチップを取り付け，カッティングプライヤーを作製した。作製した試作品について，外観，強度，機能性及び耐食性を評価した。

## ３　結果及び考察

### ３．１　軽量化設計の提案・検討

２．１で示した３パターンの最適化について，①と③は図１に示す形状を基に実施した。②については，これまでにない形状の提案をするために，図３に示すような持ち手に余肉を付けた状態でトポロジー最適化を実施した。③の持ち手裏面の削除領域については，図４に示すように裏面を半円状に削除する形状で検討した。削除領域の形状は切り込みの深さ，抜け開始位置，抜け角度の３つのパラメータで定義し，表１の数値範囲で全 1260 パターンすべてを構造解析して最適寸法を導き出した。

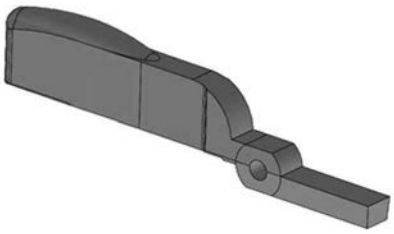


図３　②における最適化実施前形状

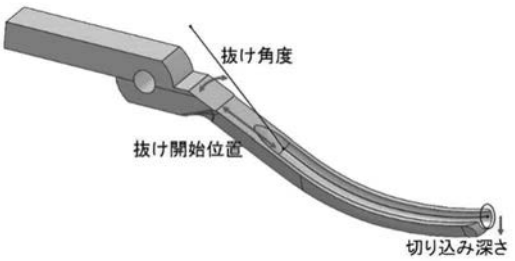



図４　裏面削除領域の形状

表１　裏面削除形状の検討範囲

| 切り込み深さ (mm) | 抜け開始位置(mm) | 抜け角度(°) |
|---|---|---|
| 1～4 (0.5mm 刻み) | 2～30 (2mm 刻み) | 5～60 (5° 刻み) |

上記の条件で，トポロジー最適化及び寸法最適化を実施した結果を図５に示す。また，③の最適化結果より導き出された各パラメータの数値を表２に示す。①の形状は③と同様に裏面が削除されている体積が大きいが，③には無い側面の穴が形成されていることが分かる。②については，①や③の形状とは全く異なる新規の形状が作成されていることが分かった。

（ａ）①現行形状のトポロジー最適化

（ｂ）②新規持ち手形状のトポロジー最適化

図５　①及び②の最適化後のメッシュ形状

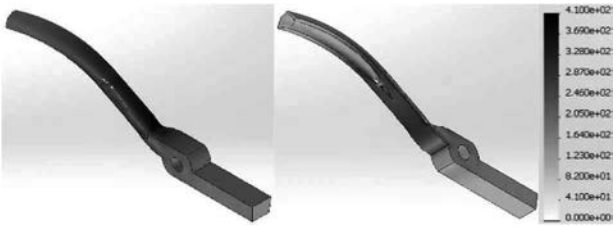
表２　③裏面削除形状の最適化結果

| 切り込み深さ (mm) | 抜け開始位置(mm) | 抜け角度(°) |
|---|---|---|
| 3 | 16 | 20 |

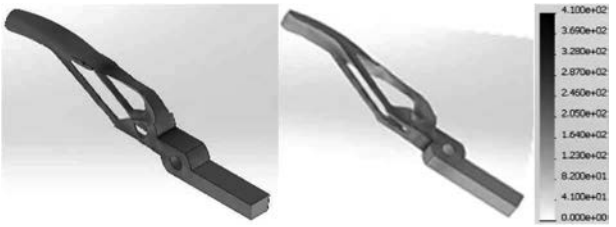
### ３．２　製造に向けた軽量化モデルの再設計

３．１にて導き出した各最適化形状について，メッシュ修正及びソリッド化を実施し，構造解析により導き出された各形状にかかるミーゼス応力を図６に，各形状での質量と最大ミーゼス応力の値を表３に示す。３パターンとも最大ミーゼス応力が現行品より小さく，かつ軽量化が可能であることが分かった。

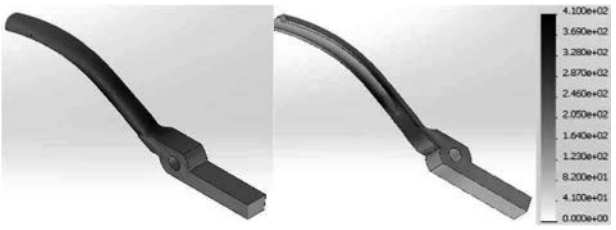
ただし，導き出した最適化形状について，①と②については洗浄・滅菌がしづらい形状であり，実用上において医療用途では不適切であることが分かった。また，量産を見据えた場合に，①と②の形状では鍛造やマシニングセンタによる機械加工等の現行の加工法では加工しづらい形状であり，生産性が劣ることが分かった。そのため，3D プリンタによる試作及び現行の加工法での試作については，③の形状で実施することとした。



（ａ）①現行形状のトポロジー最適化



（ｂ）②新規持ち手形状のトポロジー最適化



（ｃ）③持ち手裏面の削除領域の最適化

図６　各形状でのミーゼス応力の分布

表３　各形状での最大ミーゼス応力の値

| | 質量（g） | 最大ミーゼス応力（MPa） |
|---|---|---|
| 現行 | 54.84 | 407.7 |
| ① | 48.00 | 401.4 |
| ② | 51.23 | 350.0 |
| ③ | 47.87 | 395.7 |

### ３．３　3D プリンタによる試作

③の形状を基に 3D プリンタで造形した試作品を図７に示す。また，後加工及び組立後の試作品を図８に示す。組立後の 3D プリンタ試作品について，外観，強度，機能性を評価した。外観については図８のとおり，後加工によって平滑になっており，キズ・バリ等も見られず問題ないことが分かった。強度については，図９に示すようにステンレスワイヤー(直径 0.5mm を２回,直径 0.2mm 及び撚線 0.25mm を５回）及びラバーチェーン（５回）を切断し，刃先に欠けが無いことを確認した。機能性については，ジョイント部のがたつき，開閉のスムーズさ，カットしたワイヤの飛び方を評価し，いずれも問題が無いことが分かった。以上より，3D プリンタで作製した試作品は，形状や意匠性及び機能性等を評価するという目的において，十分に活用可能なことが分かった。

図７　3D プリンタで造形した試作品

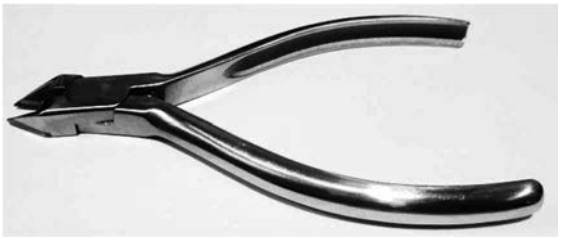


図８　後加工及び組立後の 3D プリンタ試作品

図９　強度試験の様子

### ３．４　現行の加工法での試作品作製

量産品を③の形状に機械加工し作製した軽量化試作品を図 10 に示す（以下，量産試作品とする）。量産試作品も 3D プリンタの試作品と同様に外観，強度，機能性を評価し，問題が無いことを確認した。また，量産試作品については，通常の量産品と同様に洗浄滅菌処理による耐食性も評価した。洗浄工程はジェットウォッシャーを用いて 93℃の強アルカリで 111 分，滅菌工程はオートクレーブ装置を用いて 132℃で 30 分間実施した。洗浄滅菌後に外観検査を実施し，錆の発生は無く軽量化形状への変更が耐食性に悪影響を及ぼすことが無いことを確認した。

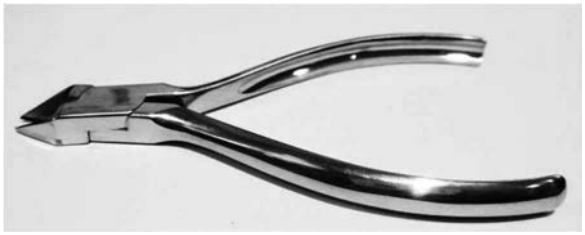


図 10　量産品の裏面加工品

## ４　おわりに

シミュレーション技術を活用し歯科用プライヤーの軽量化を実施し次の結論が得られた。

(1) トポロジー最適化及び寸法最適化を活用し，3 パターンの軽量化形状を作成した。

(2) 3 パターンの軽量化形状の質量は現行品より軽くなっており，構造解析により最大ミーゼス応力は現行品より小さくなっていることが分かった。

(3) トポロジー最適化により導き出した軽量化形状は，医療用途としての実用性及び従来の機械加工による生産性に難があることが分かった。

(4) 3D プリンタで作製した軽量化試作品は，外観，強度，機能性に問題が無く，形状や意匠性及び機能性を評価する事が可能であることが分かった。

(5) 量産品を機械加工し作製した軽量化試作品は，外観，強度，機能性，耐食性に問題が無く，実使用に耐えうることが分かった。

## 参考文献

1) 西脇眞二：〝精密工学会誌〟,vol.86 No.1,4-7,(2020)

2) 岩野吉宏,YuqingZhou,田仲正明,和田敦,吉川勝治,川本敦史,野村壮史：〝自動車技術会論文集〟,vol.52 No.1，51-57，(2021)

3) 相澤淳平，風間武，神戸博之，羽生田豪太：〝長野県工技センター研報〟，No.14，M22-M26，(2019)

4) 西脇眞二：〝精密工学会誌〟,vol.86 No.6,391-394,(2020)

# Ⅲ 受託研究

Contract Research

受託研究

# 動物骨のフッ素アパタイトへの資源化

山畑　雅之*　　永島　彩乃*

Recycling of Animal Bones to Fluoroapatite

YAMAHATA Masayuki and NAGASHIMA Ayano

食品製造時に排出される動物骨(骨粉)由来水酸アパタイト(骨 HAp)からフッ素アパタイト(FAp)を作製するために，骨粉の加熱処理による有機物除去条件，骨 HAp とフッ化カルシウム($CaF_2$)の混合粉砕条件(粉砕時間)，粉砕試料の焼成条件(焼成温度・時間)を検討した。その結果，300℃・2 時間の予備灰化と 800℃・1 時間の灰化処理で，骨粉から有機物を除去できた。また，ボールミルによる混合粉砕と 900℃・10 分間以上の焼成で，F 置換率 70%を超える FAp を作製することができた。作製した FAp は，塩酸水溶液(pH3)に対して骨 HAp よりも高い耐酸性を有していた。

Key words:　動物骨，水酸アパタイト，フッ素アパタイト，混合粉砕

## 1　はじめに

食品製造時に排出される動物骨は，乾燥後に粉砕されて家畜用飼料や農業用肥料としてリサイクルされている。近年，石灰石等の無機肥料への代替や農家の減少による肥料消費量の減少により，動物骨由来肥料の需要減少が進むと予測されている。動物骨がリサイクルされない場合，産業廃棄物として処理する必要があるため，動物骨の新用途開発が求められている。

動物骨は，水酸アパタイト(HAp：$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$)とタンパク質等有機物から構成されている。HAp は，生体親和性，イオン交換性，吸着性等の多様な特性を有しており，人工骨等の生体材料，重金属イオン吸着材料，カラムクロマトグラフィー用充填剤など機能性材料として使用されている[1)]。しかし，HAp は耐酸性が低いため，酸性環境で使用するには耐久性に問題がある。HAp の水酸基をフッ素(F)で置換したフッ素アパタイト(FAp：$Ca_{10}(PO_4)_6F_2$)は，HAp と類似した特性を有し，HAp よりも耐酸性に優れているため，HAp の代替物として期待されている[2)]。FAp は，試薬からの合成の報告はみられるものの，動物骨由来 HAp(骨 HAp)を原料とし，FAp を作製した事例はほとんどない。

そこで本研究では，骨 HAp から FAp 作製条件の確立を目的とし，食品製造後の動物骨を乾燥後に粉砕して得た骨粉を原料に用いて，骨粉中の有機物除去条件，骨 HAp とフッ化カルシウム($CaF_2$)の混合粉砕条件(粉砕時間)，及び粉砕試料の焼成条件(焼成温度・時間)を検討した。また，得られた FAp の耐酸性を評価した。

＊　栃木県産業技術センター　　材料技術部

## 2　研究の方法

### 2．1　試料

試料は，食品製造時に排出される鶏・豚骨を乾燥後に粉砕して得た鶏豚混合蒸製骨粉(㈱ジャパンエコロジーシンキング)を用いた。また，フッ素原料には，$CaF_2$(富士フイルム和光純薬㈱)を用いた。

### 2．2　骨粉の有機物除去

骨粉中の有機物の除去は，加熱処理により行った。加熱は，電気マッフル炉(㈱東洋製作所　FUW232PA)を用いて大気雰囲気下で行った。加熱処理後の骨粉の化学構造は，フーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR，日本分光㈱FT/IR-4600)により評価した。また，骨粉の熱特性を熱重量示差熱分析装置(TG-DTA，㈱マック・サイエンス　TG-DTA2000S)により評価した。

### 2．3　FAp の作製

FAp 作製方法を図 1 に示す。FAp は，骨 HAp と $CaF_2$ を混合粉砕後，焼成することにより作製した。混合粉砕は，PP 製容器(250ml)にアルミナボール(φ10mm)100 個，骨 HAp2.0g(2mmol)，$CaF_2$0.3g(4mmol)を加え，ボールミル(㈱伊藤製作所　PSL-1M)を用いて行った。混合粉砕後，純水を用いて試料とボールをふるい分けすることで試料を回収し，乾燥機(110℃)で 2 日間乾燥させて粉砕試料を得た。さらに，粉砕試料を電気マッフル炉を用いて大気雰囲気下で焼成し，FAp を得た。

### 2．4　粉砕試料の評価

粉砕試料の粒子径測定は，レーザー回折式粒度分布測定装置(㈱堀場製作所　LA-960V2)を用いた。元素マッピングは，走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分析

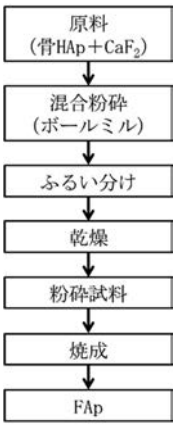



図１　FAp 作製方法フローチャート

装置(SEM-EDS，日本電子㈱ JSM-6010PLUS/LA)を用いた。

### ２．５　FAp の評価

FAp の結晶構造評価と格子定数の測定は，X 線回折装置（XRD，理学電機㈱ RINT2550H）を用いて行った。また，FAp の F 置換率は，骨 HAp のフッ素化(F 化)に伴う格子定数の変化から算出した[3)]。

### ２．６　FAp の耐酸性評価

骨 HAp 及び FAp0.5g に，塩酸水溶液(pH3)50ml を加えて，24 時間浸漬した。浸漬後，各試料をろ紙でろ過した。ろ液中のリン(P)濃度を高周波誘導結合プラズマ発光分光分析装置(㈱島津製作所 ICPS-8100CL)で測定し，試料からの P 溶出量を算出した。また，耐酸性試験前後の FAp の結晶構造を XRD により評価した。

## ３　結果及び考察

### ３．１　骨粉の加熱処理による有機物除去

骨粉の熱特性を調べるために TG-DTA を測定した。結果を図２に示す。

TG 曲線における重量減少開始温度は約 300℃であった。また，約 600℃で重量減少の勾配が緩やかになった。DTA 曲線から 338℃と 445℃をピークトップとする発熱ピークが確認されたことから，重量減少の原因は，骨粉中の有機物の燃焼によるものであると考えられる。

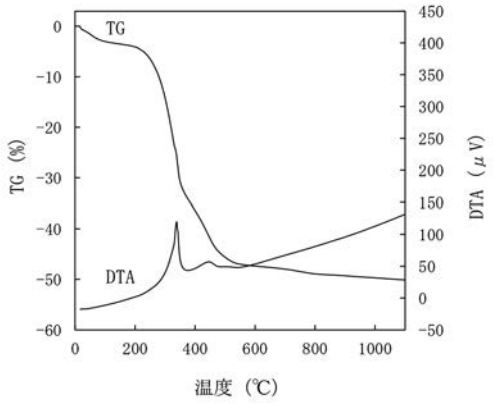



図２　骨粉の TG-DTA 曲線

この結果を踏まえ，有機物を炭化するための予備灰化条件を検討した。200℃，250℃，300℃の各温度で 2 時間加熱処理した後の骨粉の FT-IR スペクトルを図３に示す。

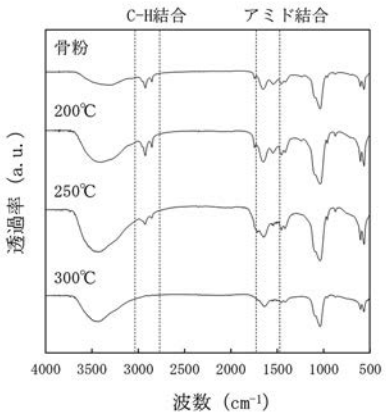



図３　加熱処理後の骨粉の FT-IR スペクトル

300℃・2 時間の加熱処理で有機物由来の C-H 結合とアミド結合のピークの消失がみられた。また，250℃・4 時間と 300℃・1 時間の加熱処理も検討したところ，C-H 結合とアミド結合の存在が認められたことから，本条件が予備灰化に適していると考えられる。

次に，予備灰化試料の炭化物をガス化して除去するための灰化条件を検討した。灰化条件の検討は，温度と時間を変えて強熱減量を評価することで行った。骨粉の灰化条件と重量減少率を表１に示す。炭素の燃焼開始温度である 600℃で 5 時間加熱処理後の試料を 800℃・1 時間加熱処理した場合(No.2)の重量減少率は 2.7%であり，600℃加熱処理では，炭化物が残留していることが示唆された。さらに 1000℃で 1 時間加熱処理した場合(No.3)の重量減少率は 0.2%であり，重量減少はほとんど起こらなかった。このことから，灰化温度は 800℃が適していると考えられる。

表１　骨粉の灰化条件と重量減少率

| No | 加熱処理条件 | 重量減少率 (%) |
|---|---|---|
| 1 | 600℃・5 時間加熱処理※ | 45.3 |
| 2 | No.1 試料を 800℃・1 時間加熱処理 | 2.7 |
| 3 | No.2 試料を 1000℃・1 時間加熱処理 | 0.2 |

※予備灰化(300℃・2 時間)後に処理

そこで，灰化温度 800℃における処理条件と重量減少率を検討した。結果を表２に示す。800℃・1 時間加熱処理後の試料を，さらに 800℃・1 時間加熱した場合(No. 2)の重量減少率は 0.01%であり，1 時間の加熱処理で炭化物を除去できることが分かった。

表２　灰化温度 800℃における処理条件と重量減少率

| No | 加熱処理条件 | 重量減少率 (%) |
|---|---|---|
| 1 | 800℃・1 時間加熱処理※ | 46.1 |
| 2 | No. 1 試料を 800℃・1 時間加熱処理 | 0.01 |

※予備灰化(300℃・2 時間)後に処理

以上の結果から，骨粉から有機物を除去するには 300℃・2 時間の予備灰化と 800℃・1 時間の灰化処理が適していると考えられる。

### ３．２　FAp 作製条件の検討

#### ３．２．１　骨 HAp と $CaF_2$ の混合粉砕条件の検討

骨 HAp と $CaF_2$ を 3，6，12 時間混合粉砕を行った後，900℃で 1 時間焼成した。3 時間混合粉砕試料から得た生成物の XRD パターンを図４に示す。XRD パターンから，FAp が生成していることが確認された。また，副生成物である酸化カルシウム(CaO)の回折ピークも検出された。

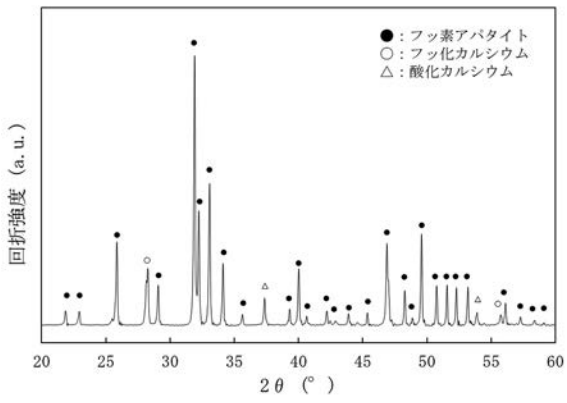



図４　生成物の XRD パターン

3，6，12 時間混合粉砕を行い，900℃で 1 時間焼成した試料の F 置換率を算出した。粉砕時間と F 置換率の関係を図５に示す。なお，アルミナボールを加えず 1 時間混合撹拌した後，焼成した試料を粉砕 0 時間試料(混合試料)とした。粉砕試料からは F 置換率 70%以上の FAp が得られた。しかしながら，粉砕時間の増大による F 置換率の増大は認められず，このことから，混合粉砕は短時間で効果があることが示唆された。

#### ３．２．２　粉砕試料の評価

混合粉砕による粒子径の変化を調べるために，原料と粉砕試料の粒子径を測定した。分散媒には 0.2%ヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液を用いた。なお，粒子径分布の計算には体積基準を採用し，骨 HAp の屈折率は 1.630，$CaF_2$ の屈折率は 1.430 とした。結果を表３に示す。混合粉砕前後において，粒子径に大きな変化は確認されなかった。

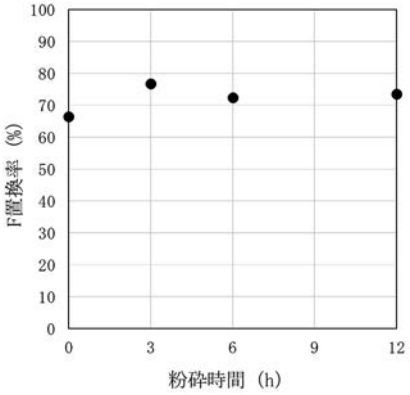



図５　粉砕時間と F 置換率の関係(900℃・1 時間焼成)

表３　原料及び粉砕試料の粒子径

| 試料名 | メジアン径(μm) |
|---|---|
| 骨 HAp(原料) | 0.13 |
| $CaF_2$(原料) | 10.1 |
| 粉砕 0 時間試料 (骨 HAp＋$CaF_2$) | 0.15 |
| 粉砕試料(3 時間) | 0.13 |
| 粉砕試料(6 時間) | 0.13 |
| 粉砕試料(12 時間) | 0.12 |

900℃焼成前の混合試料と粉砕試料中の骨 HAp と $CaF_2$ の分布を調べるために，P(骨 HAp 由来)と F($CaF_2$ 由来)の元素マッピングを SEM-EDS で行った。結果を図６に示す。P と F の分布から，混合試料中の骨 HAp と $CaF_2$ は不均一に分布しており，骨 HAp 表面に $CaF_2$ の分布が少ないことが確認された。一方，粉砕試料では，微細化された $CaF_2$ が均一に分布しており，骨 HAp 表面が $CaF_2$ で覆われていることが確認された。また，骨 HAp 粒子の大きさに混合試料と粉砕試料で違いが見られないことから，混合粉砕では $CaF_2$ が選択的に粉砕されていることが示唆された。この $CaF_2$ の微細化が F 置換率の増大に寄与していると考えられる。また，骨 HAp は，粉砕時間の増大によってもほとんど変化がなく，このことが粉砕時間によらず F 置換率がほぼ一定の値となった理由であると考えられる。

### ３．２．３　混合粉砕が骨 HAp の F 化に及ぼす影響

#### ３．２．３．１　焼成時間の検討

混合粉砕が骨 HAp の F 化に及ぼす影響を調べるために，混合試料と粉砕試料の反応性を比較した。混合試料及び粉砕試料の焼成時間と F 置換率の関係を図７に示す。なお，各試料を昇温速度 10℃/min で加熱し，900℃到達後徐冷した試料を焼成 0 時間試料とした。

混合試料と粉砕試料の F 化は，焼成時間 10 分でほぼ終了した。FAp の F 置換率は，混合試料よりも粉砕試料の方が高くなる傾向がみられた。また，混合試料は F 置換率のばらつきが大きくなり，粉砕試料は F 置換率のばらつきが小さくなった。SEM-EDS の結果(図６)より，混合試料中の骨 HAp と $CaF_2$ は不均一に分布しているため，F 置換率が低くばらつきは大きくなり，粉砕試料では $CaF_2$ が骨 HAp 表面に均一に分布しているため，F 置換率が高くばらつきも小さくなったと考えられる。以上のことから，混合粉砕は原料の微細化のほかに，F 置換率の再現性向上に効果があることが示唆された。なお，今回の条件では，F 置換率 100%の FAp を作製することはできなかった。門間ら[4]の報告によると，反応で生成した FAp が試料表面をち密に被覆することで，それ以降の反応が妨げられると考えられている。このことから，F 置換率が 100%にならない理由は，反応初期に骨 HAp 表面で F 化反応が進行し FAp 層が形成されることで，それ以降の反応が FAp 層に妨げられているためと推察される。

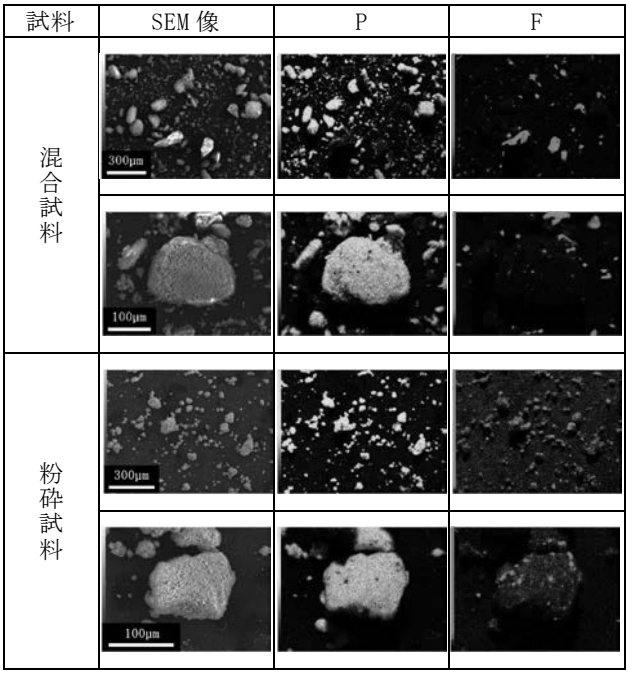



図６　SEM-EDS による元素マッピング結果

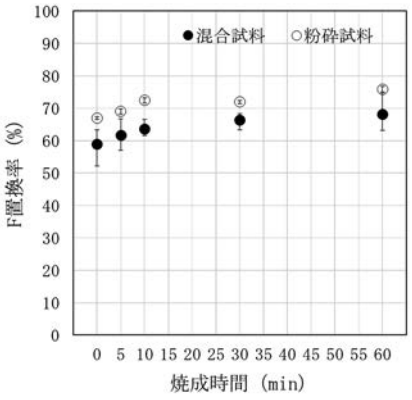



図７　混合試料及び粉砕試料の焼成時間と F 置換率の関係(焼成温度 900℃)

#### ３．２．３．２　焼成温度の検討

3 時間混合粉砕を行った粉砕試料について，所定温度で１時間焼成して作製した FAp の F 置換率を算出した。焼成温度と F 置換率の関係を図８に示す。焼成温度 900℃で F 置換率 70%を超える FAp が得られた。このことから，焼成温度は 900℃が適していることが示唆された。

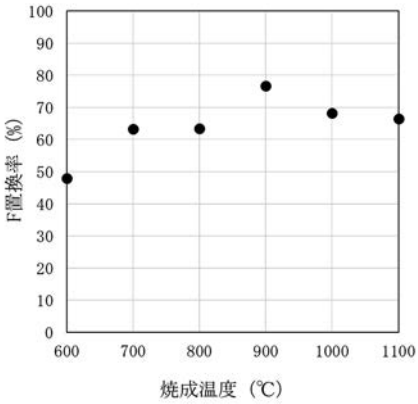



図８　粉砕試料の焼成温度と F 置換率の関係

### ３．３　FAp の耐酸性評価

表４に骨 HAp と FAp(F 置換率 77%)からの P 溶出量を示す。骨 HAp からの P 溶出量は 0.75wt%であるのに対し，FAp からの P 溶出量は 0.004wt%未満であった。このことから，骨 HAp の F 化によって酸に対する耐久性が向上したと考えられる。

表４　骨 HAp と FAp の P 溶出量

| 試料名 | P 溶出量(wt%)※ |
|---|---|
| 骨 HAp | 0.75 |
| FAp | 0.004 未満 |

※試料の単位質量あたりの P 溶出量

図９に耐酸性試験前後の FAp の XRD パターンを示す。耐酸性試験前後で FAp の XRD パターンに変化は確認できないため，結晶構造は変化していないと考えられる。以上のことから，作製した FAp は骨 HAp よりも高い耐酸性を有していることが確認できた。

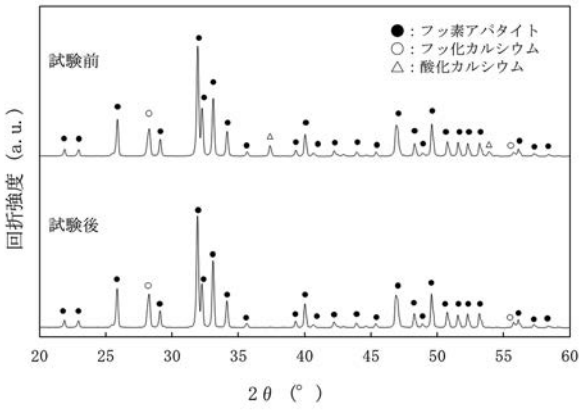



図９　耐酸性試験前後の FAp の XRD パターン

## ４　おわりに

動物骨(骨粉)由来 HAp から FAp を作製するために，骨粉の加熱処理による有機物除去条件，骨 HAp と $CaF_2$ の混合粉砕条件(粉砕時間)，粉砕試料の焼成条件(焼成温度・時間)の検討を行った。また，作製した FAp の耐酸性評価を行い，以下の知見を得た。

(1) 300℃・2 時間の予備灰化後，800℃・1 時間の灰化処理で骨粉中の有機物を取り除くことができた。

(2) ボールミルを用いた骨 HAp と $CaF_2$ の混合粉砕では $CaF_2$ が選択的に粉砕されていた。

(3) 骨 HAp の F 化において，粉砕時間の影響は確認できず，混合粉砕は短時間で効果があった。

(4) 混合粉砕は，$CaF_2$ の微細化と F 置換率の再現性向上に効果があった。

(5) 粉砕試料を 900℃で 10 分間以上焼成することで F 置換率 70%を超える FAp が得られた。

(6) 作製した FAp は，塩酸水溶液(pH3)に対して骨 HAp よりも高い耐酸性を有していた。

## 参考文献

1) 青木 秀希，矢嶋 龍彦，小山 利幸：〝表面技術〟，58，744-750，(2007)

2) 小林伸太郎：〝ハロゲン置換方法およびハロゲンアパタイト〟，ペンタックス株式会社，特開 2004-331439，(2004)

3) 南澤宏瑚：〝超音波照射を用いて合成した超微細水酸アパタイトの材料化学的研究〟，日本大学博士論文，(2020)

4) 門間英毅，上野精一：〝石膏と石灰〟，163，226-232，(1979)

# Ⅳ 重点研究

Selected Research

重点研究

# 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

島田　智*　　清水　暁*　　八木澤　秀人*　　石川　信幸*

Development of Analysis Equipment using Machine Learning for Manufacturing SMEs

SHIMADA Satoshi, SHIMIZU Akira, YAGISAWA Hideto and ISHIKAWA Nobuyuki

昨年度までに開発したIoT稼働状況監視システムの機能を拡張し，ホコリや振動といった，ものづくり現場で継続して監視する必要のあるデータの見える化に対応した。また，機械学習を用いた作業分析や，製品の外観，振動の異常を判定するための解析ツールを構築した。さらに，webアプリケーションとしてブラウザ上で稼働するIoT稼働状況監視システムから，随時解析結果を確認できるようサーバ側プログラムを実装し，構築したシステムが問題なく稼働することを確認した。

Key words:　IoT，可視化，センシング，遠隔監視

## 1　はじめに

近年，気象情報等を用いた電力需要や，商品・在庫管理をはじめ，自動車の自動運転，インフラの維持管理，限られたリソースの最適配置，医療における画像診断等，様々な分野でAIの利活用が研究されている。特にIoT関連技術が発展し，安価で高機能なデバイスが普及するようになり，様々なデータを瞬時に，大量に集められるようになったことで，そのデータの処理にAIは不可欠なものとなりつつある。

ものづくりの現場においても，設計，工程管理，外観検査や設備の予知保全等，各社からAI活用のメリットをうたう様々な製品が投入されており，大企業を中心に活用が広がりつつある。

一方，ものづくり中小企業が抱える課題は，材料，製品，顧客により多種多様であり，製品サイクルの短寿命化や小ロット化により，IoTやAIを活用した効果の大きいシステムを一度構築すれば，それを長期間に渡って使い続け，生産性，競争力を維持できるという状況にない。課題に合わせたモデルの選択や構築，出力結果の加工・処理方法の変更等を絶えず行っていく必要がある。

そこで，本研究では，県内ものづくり企業からのAI利活用に関する相談に素早く対応するため，昨年度までに構築した，IoT稼働状況監視システムを拡張するとともに，様々なニーズを想定しつつ，現場で簡単に試せるAIを用いた分析・解析ツールを構築した。

## 2　研究の方法

### 2．1　IoT稼働状況監視システムの拡充

#### 2．1．1　IoT稼働状況監視システムの概要

センターでは，平成30年度から，Raspberry Piやmicro:bit，ESP32等のデバイス，Bluetooth Low Energy(BLE)やTCP/IP等のプロトコルを用いて，情報収集を行うIoT稼働状況監視システムの開発を行ってきた[1),2)]。この中では，IPカメラ等の画像や温湿度，気圧，電圧，電流等，様々な物理量と，これらの情報から推定される稼働状況の表示に対応した。また，ものづくり現場での使用を考慮し，ネットワーク接続環境が整備されていない状況でも，データの取得，表示が行えるよう，データの収集，蓄積，表示に係る全てをRaspberry Pi一つにまとめ，システムを運用してきた。このシステムの構成図を（図１）に示す。

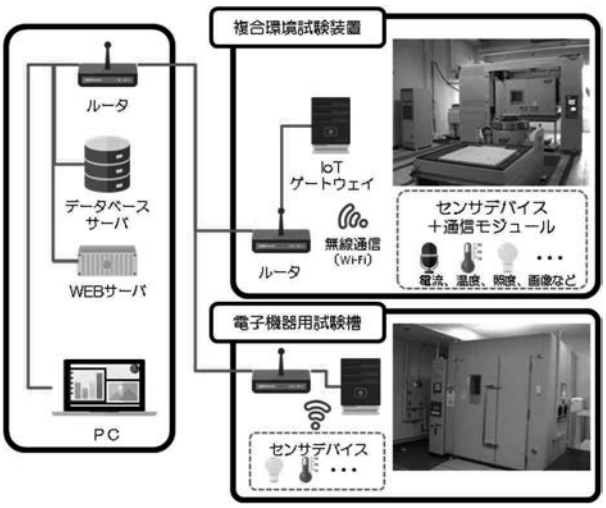



図１　IoT稼働状況監視システム構成図

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部

### ２．１．２　データ取得・可視化対象の拡張

生産現場において，製品の品質を管理，安定させるためには，温湿度や電圧，電流値の他に，作業環境のホコリ，装置から生じる音振動等を継続的にセンシングし，随時監視する必要がある。そこで，IoT 稼働状況監視システムの機能を拡張するため，本研究では，これらのデータ取得と保管，見える化の手法について仕様の検討と実装を行った。

### ２．１．３　ユーザインタフェイスの拡張

IoT 稼働状況監視システムのグラフの表示には chart.js[3]を用いているが，テキストで書かれた設定ファイル（表１）を編集することで，表示するデータの選択や，表示方法の変更が可能である。しかし，センサの追加や変更等により，表示方法を変更する際，システムの運用に不慣れなユーザには，この編集は困難である。そこで，グラフ表示方法を web 上から円滑に変更できるよう GUI を整備した。

表１　グラフ設定ファイル

```
[chart0]
title=温度グラフ
height=480
term_select=2
data1=020100,冷蔵庫上,255,0,128,1,1,1,1
data2=010000,zero_w,255,0,255,0,1,1,1
data3=000300,bit 屋外,0,128,255,1,1,1,1
data4=020000,屋外,255,0,0,1,2,1,1
data5=000200,esp32,194,94,0,1,2,1,1
data6=000100,廊下,0,255,0,1,1,1,1
data7=030100,研究員室,174,0,255,0,0,1,1
data8=060000,機械精密,255,128,0,0,1,1,1
```

1 つのグラフに 8 つまでデータを記載でき，カンマ区切りで，対象データ（6 桁），表示名，描画色 R，G，B，透過度，太さ，表示軸，グラフ種類（棒グラフか折れ線か）を意味している。

## ２．２　現場で試せる AI ツールの開発

### ２．２．１　AI ツール開発の必要性

昨今，Deep Leaning に関しては，特に画像処理の分野で目覚ましい発展を遂げてきており，物体検出の Yolo[4),5),6)]や，姿勢推定の OpenPose[7)]等，様々な目的で，モデルが開発，公開されている。また，単にサンプルコードを動かす場合であれば，クラウド上の実行環境で，ボタンを押すのみで動作確認できるモデルも多くなってきている。

しかし，中小企業が抱える個別課題の解決には，これらの用意されたモデルを単に動かすだけではなく，データを継続して大量に取得し，使用するモデルの入力に合わせて変換，モデルの再学習，ニーズに合わせた出力結果の加工や編集を行う必要がある。

そこで企業個別の具体的ニーズに即応するため，センターでは製品の外観検査を想定した良否判定，加速度センサから得られる振動からの異常検知，及び行動の解析について，モデルを動作させ，結果を IoT 稼働状況監視システムと連携し，可視化させることに取り組んだ。

### ２．２．２　画像を用いた良否判定

ものづくりの現場において，生産にかかる作業の多くは機械化，自動化が進められており，生産ラインに寸法測定等の検査装置を導入している企業も多い。一方，寸法に現れない外観の検査には，多くの時間と人員，コストが割かれている。しかし，ヒトの目に頼った検査にはコストや時間に加えて，見落としや個人，体調等による試験品質のバラつきといった問題がある。

そこで MVTec Software GmbH 社が公開している不良品検知用のデータセット「MVTecAD[8)]」に含まれる 15 種類の対象物（図２）についての，良品，不良品の画像を用いて，各種良否判定モデルの評価を行うと共に，実際の外観検査を想定し，ベルトコンベア上を流れるフェライトコア（図３）の外観良否判定の試験をした。なお，良否判定の目標値は，モデルの汎用性を重視し，15+1 種類，全ての対象物で AUC0.9 以上とした。

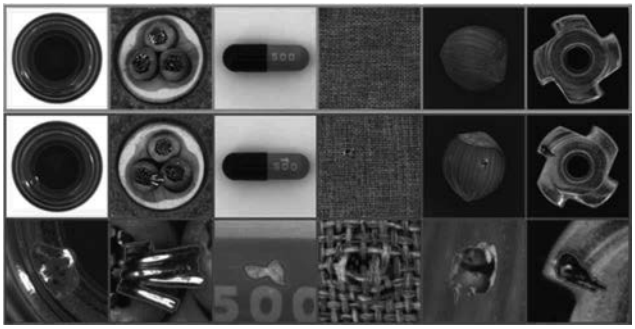
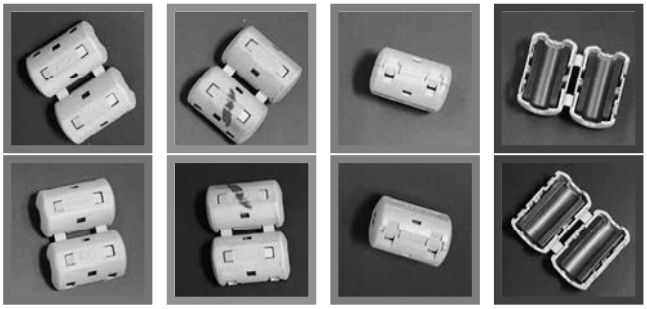


図２　MVTecAD の画像例



正常　　汚れ　　変形　　裏返し

図３　試験に用いたフェライトコアの画像（例）

正常品と，意図的に汚れ，変形，裏返し等の異常を加え，不良品に見立てたフェライトコアをベルトコンベアで流し，ビデオ撮影した。その後，フェライトコア画像で再学習させた Yolo v5 で切り抜き，正常品画像（215 枚）と不良品としての画像である，汚れ（71 枚），変形（6 枚），裏返し（24 枚）に分類した。

### ２．２．３　振動からの異常検知

生産現場において熟練技能者は，装置の致命的な損傷，製品の異常が発生するより前に，温度やにおい，煙，

音や振動等，五感を最大限に活用して，設備の異常を検知している場合がある。こうしたノウハウのシステム化が，様々な分野で進められている。安価な加速度取得モジュールと組み合わせ，簡単な方法で異常を検出する手法の開発を行った。

### ２．２．４　作業員の行動解析

IoT の活用により，設備やセンサからデータを取得，蓄積して見える化し，稼働状況の把握や，異常の検知等を行うことは可能である。一方，設備が停止した際，その原因を突き止めるには，設備側がこれに該当する情報をアウトプットしない限り，作業員からの作業日報に頼らざるを得ない。また，作業員がどんな作業に，どれだけの時間を要したかを把握するにも，作業日報や作業の録画結果を人が解析する手法が一般的だが，日常的に，継続的に，低遅延でこれを把握するのは困難である。

そこで，カメラ画像を Openpose 等のモデルを用いて解析し，作業の可視化を行うと共に，これにより得られたデータから，カメラに映った作業員の行動履歴を作成するシステムを開発した。

## ３　結果及び考察

### ３．１　IoT 稼働状況監視システムの拡充

### ３．１．１　データ取得・可視化対象の拡張

今回，産業技術センター内で環境を継続して監視する対象は，寸法測定結果に影響を及ぼすことから常に温湿度を一定に保ち，フィルタで微粒子を取り除いている機械精密測定室とした。

ここに，Wi-Fi と Bluetooth の双方に対応する演算・通信モジュール（Atom lite）に，ダストセンサモジュール（PPD42NS）と，温湿度気圧センサモジュール（bme280）を接続し，作製したモジュール（図４）を用いて，毎分粒子数と温湿度を取得した。なお，IoT 稼働状況監視システムが稼働する Raspberry Pi は別室にあるため，センター内の LAN を経由し，データの収集を行った。8 月 1 日と 10 月 1 日から 7 日間収集したデータを図５に示す。なお，この装置を用いて，この期間を含め，設置した 5 月から測定室改修のため取り外した 11 月まで，モジュールには手を加えることなく，安定してデータの収集を続けることができた。

この結果から，8 月に比して 10 月は，測定室の改修を前に特に湿度のコントロールに異常をきたしており，人の出入りが無い状態では 8 月には 52.5±0.5%の範囲で推移していたものが，48±3%程度まで悪化していたことが分かる。

機械精密測定室はその後，改修工事を行ったが，今後も継続してデータを収集，監視することで，環境制御機能の劣化をいち早く捉えることができると考えられる。

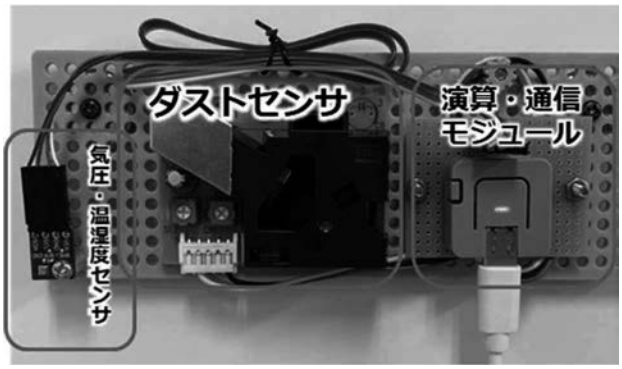



図４　作成した環境情報取得モジュール

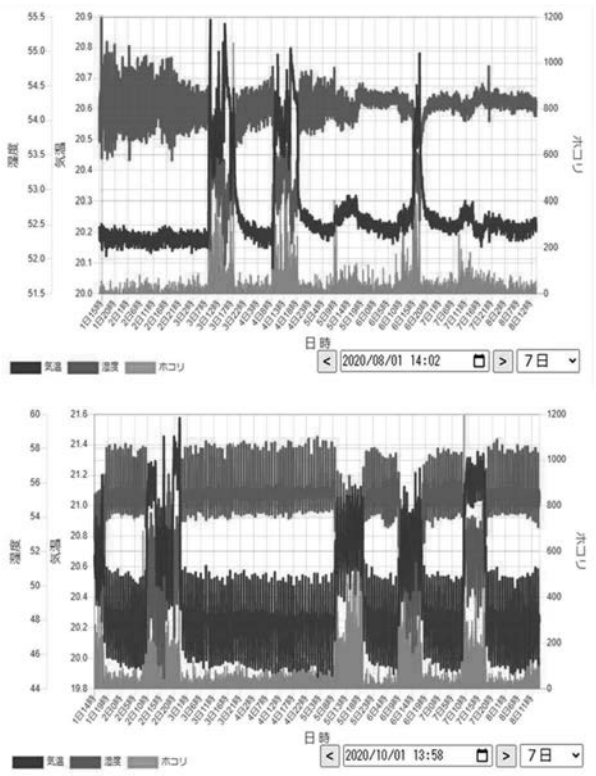



図５　機械精密測定室内の温湿度と粒子数

一方，音・振動の監視については，多くのものづくり企業で使用されており，その稼働状況，負荷の監視や予知保全にニーズがあると思われるコンプレッサとした。

振動取得のため，Wi-Fi と Bluetooth に加え，加速度センサ（MPU6886）も内蔵する Atom matrix を用いて，Raspberry Pi 側からの要求に応じて，一定時間の加速度を取得・送信するモジュールを作製した（図６左）。このモジュールを振動試験機で，周波数を 1-400Hz の間で変化させてデータを収集し，FFT にかけた結果を図７に示す。

しかし，結果的に，ここで作製したモジュールをそのままコンプレッサに取り付けることはできなかった。コンプレッサの設置場所は，AC 電源を取ることが困難なだけでなく，コンクリートと金属製の扉に囲まれた

中では，無線 LAN や Bluetooth，4G による通信も困難であり，通信によるデータの継続取得はできないと判断した。これは導入を検討する企業においても起こりうる課題であり，今回はデータを micro SDXC に取り貯めるモジュールを m5Stack GRAY（図６右）を用いて開発し，解決した。加速度データは，10 秒毎に，3 軸分を 1ksps（1 μs毎）で 5120 点（約 5 秒）取得した。このうち Z 軸（装置の上下方向）について 128 点シフトしながら 512 点毎に FFT をかけ，取得した周波数解析結果を図８に示す。

この結果から，このコンプレッサは,データを取り始めて 20 分後頃から,2～3 分程度のサイクルで間欠運転を行っており,運転時の振動は 100Hz 付近に強いピークが見られることが分かる。

こうしたデータを長期間にわたり収集，比較することで，普段との違いを見つけ，高度なノウハウが無くても，異常を早期に検知できる可能性がある。また，別に記載する統計処理や機械学習と組み合わせることで，異常の検知を自動化することもできると考えられる。

(a)通信型（左）と(b)蓄積型（右）

図６　作製した振動取得モジュール

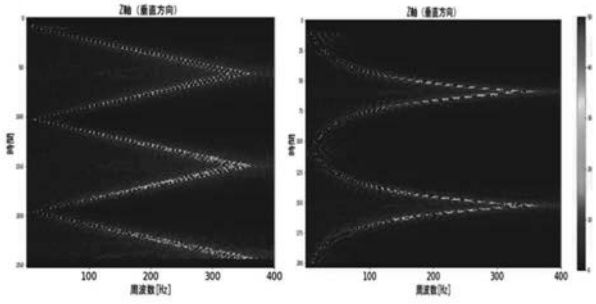



図７　モジュールの性能評価

### ３．１．２　ユーザインタフェイスの拡張

データの蓄積には，複数の Raspberry Pi からデータを収集することを想定し，Raspberry Pi 毎に割り当てる GW_No,それに繋がる BLE 等のデバイス毎に割り当てる Dev_No，それぞれのデバイスが有するセンサ毎に割り当てることを想定した Ch_No の 3 つの整数を用いている。しかし，センサデバイスの数が増えると，何処

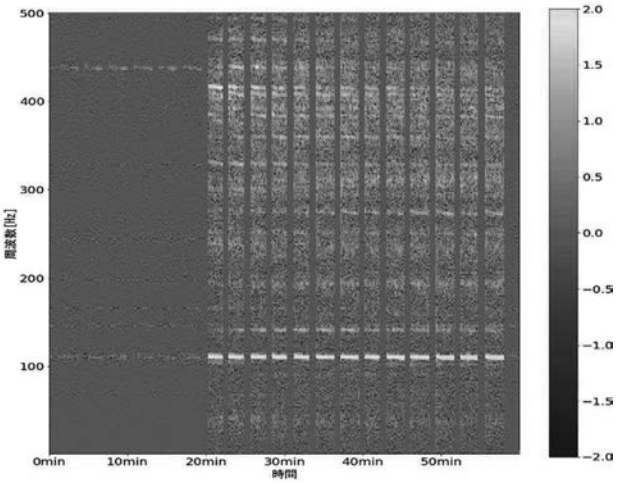



図８　コンプレッサの振動解析結果

にどのデータが格納されているのかを把握することが難しくなる。

そこでまず，データベースにどの組み合わせのアドレスにデータが存在しているかを確認し，リスト化するスクリプトを作成した。次に，このリストを基に，データが格納されているアドレスのみを階層的に選択できるプログラムを作成した。これにより，データ選択をユーザが簡単に行えると共に，アドレスの選択ミスを避けることができる。

また，データ毎の表示方法（色，ラインの太さ，透過度，軸），表示する順番等もボタンやセレクトボックスから選ぶことができるようにすることで，設定ファイルを直接編集することなく，表示内容を変えることができるようにした。作成した設定画面を図９に示す。

図９　グラフ設定画面

### ３．２　現場で試せる AI ツールの開発

### ３．２．１　画像を用いた良否判定

製造業の外観検査では，良品の数に比して，不良品の数が非常に少ない。このため，良品，不良品にラベル付けを行い，単純な教師ありの分類問題として解くことは困難である。こうしたデータから良否判定を行う手法として，自己符号機（auto encoder）を用いて正常品の特徴を学習し，試験品の画像がうまく decode できるかを

評価する手法や，正常品の画像に意図的に欠陥を加え（図 10 右），正常品との距離を大きくするよう学習を進める手法等がある。

図 10　正常品画像から不良画像を作り出した例
ランダムラインを正常品に加え，意図的に不良品画像を生成している。位置や色をランダムに変えることで，様々な不良に対応しようとしたもの。

実際にこれらの手法を試してみると，対象物によって得意不得意があり，異常画像の作りこみを行えば，AUC0.9 以上を達成できるものもあるが，同一の手法により，すべての対象で AUC 0.9 以上を達成することはできなかった。

こうした中，画像分類の分野で高い成績を示す EfficientNet を使って，正常品画像の特徴を抽出し，試験対象物の画像を入力した際の特徴との距離から，良否判定を行う手法が MVTecAD において AUC 0.95 以上の高い性能を発揮することが発表された[9]。そこで，この手法を用いて，正常品画像を特徴抽出用 128 枚とテスト用 87 枚に分け，特徴抽出後に，不良品を混ぜた画像で正常品との距離を計算した。結果を図 11 に示す。

この結果から，横軸の距離の閾値を適切に設定することで，異常の有無を正確に分離できる（AUC=1.0）だけでなく，異常の種類についても分離に成功していることが分かる。

この手法は，特徴を抽出するモデルのサイズ以外のパラメータが存在しないにも関わらず，多くの対象物において有効性が確認されたことに加え，モデルの再学習が不要であり，既存モデルを用いて良品の特徴量を抽出するだけで済むことから，計算量が極めて小さく，Raspberry Pi のような GPU を搭載しないマイコンにも実装が可能である。今後，企業からの画像良否判定のニーズについては，まずこの手法を試すことが考えられる。

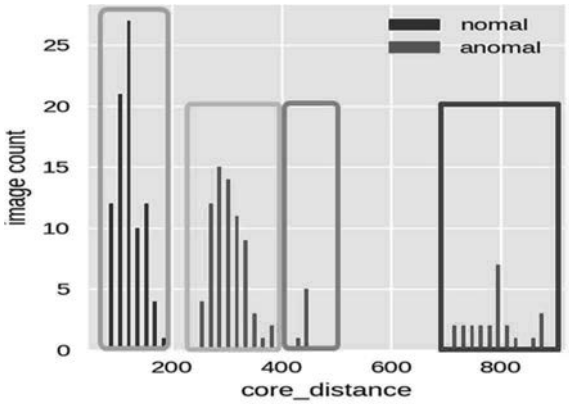



図 11　EfficientNet を用いた良否判定結果
左から順に正常品，汚れ，変形，裏返しがクラスタを形成している。

### ３．２．２　振動からの異常検知

短期間で異常検出の確認を行うため，対象を NAS（ネットワーク接続型ストレージ）として実験を行った。通信型のセンサを NAS にセンサ背面にねじ止めした磁石で取り付け，5 秒間の加速度データ取得を 5 分毎に行い，取得したデータを FFT で処理した結果を図 12 に示す。この結果を見ると，120Hz 付近にピークが見られ，内蔵されているのが 7200rpm の HDD であることが分かる。

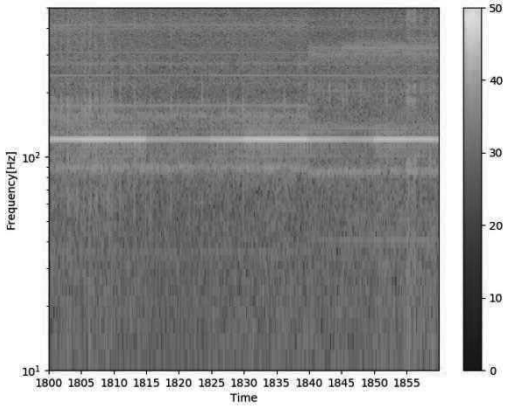



図 12　NAS の振動を可視化した結果

この状態で主成分分析を行い，固有ベクトルを求めた。その後，この状態から，NAS の上部に置かれたバックアップ用 HDD を下ろしたり，測定中に HDD 周辺に衝撃を与えたり，逆にセンサを抑え込んだ際のデータを作成し，第二成分までをプロットしたものを図 13 に，横軸に時間を取り，原点からの距離を縦軸に取ったものを図 14 に示す。この結果，異常を与えたデータ群を正確に切り分けできた一方，バックアップ用 HDD を下す前と戻した後でも振動が変化し，見た目で場所を戻しても，完全には戻らなかったことが分かる。

今回は極めて簡易な方法で切り分けを行うことができたが，より複雑な判定を要する場合，外観検査同様，FFT の結果を画像として，画像の異常判定手法を使う方法も考えられる。

### ３．２．３　作業員の行動解析

行動可視化のため，作業の映像を収めた動画ファイルから，Openpose を用いて関節座標を割り出し，その軌跡から，作業の分析を行うツールを開発した。このツール

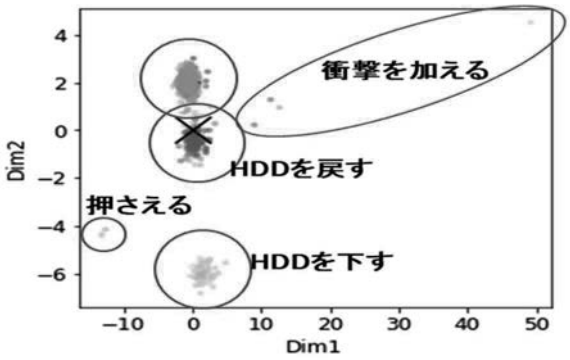



図 13　振動データの主成分分析結果

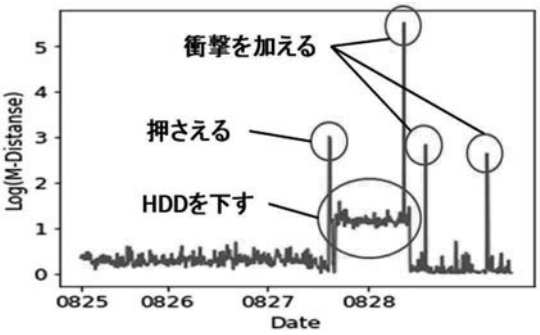



図 14　原点からの距離

の画面を図 15 に示す。このツールを用いることで，実際の映像を見ることなく，どんな作業をどのくらいの時間で行っているかを把握することができる。また，こうした座標の情報を基に，今後作業の自動クラスタリングに繋げられる可能性もある。

また，足の関節位置を用いることで，人の歩いた軌跡を記録することもでき，作業員がどんな作業を行っていたのかを知る手がかりとすることができる。しかし，この手法で移動の軌跡を把握するためには,Openpose が返すのが，二次元画像上の座標であるため，座標を変換する必要がある。また，足元まで映っている映像である必要があり，固定したカメラで，周りに視界を遮る障害物の無い場所での使用に限られるといった問題がある。

### ３．２．４　推論結果の見える化

Yolo や Openpose 等を用いて作成した推論結果を，これまで作成した IoT 稼働状況監視システムで表示するため，python の bottle フレームワークを用いて，Motion JPEG に変換するプログラムを作成した。システムの構成を図 16 に示す。この構成であれば，複数のカメラ画像を一つの GPU マシンで処理したり，負荷を分散するためにエッジで処理したり，様々な構成を取ることができる。ブラウザに複数の推論結果をまとめて表示した結果を図 17 に示す。

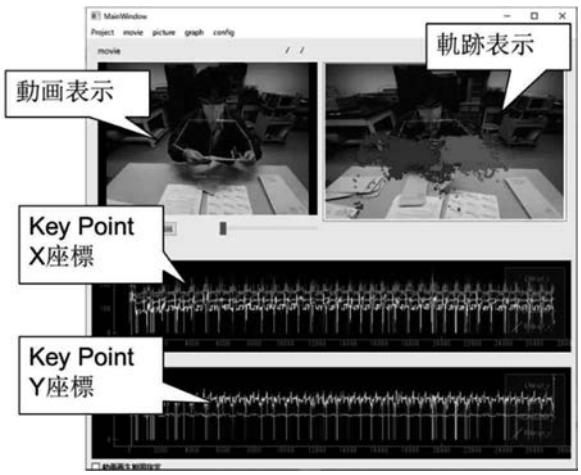



図 15　行動解析ツール画面

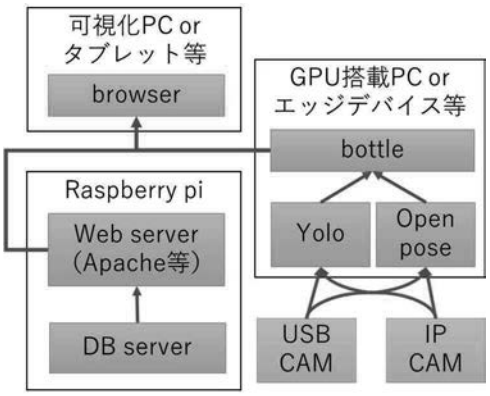



図 16　推論結果可視化のシステム構成

図 17　推論結果の表示

3 台のカメラ画像を GPU 搭載マシンに集めて YOLO で物体認識を行い，結果をブラウザで表示している。

## ４　おわりに

M5stack と Atom matrix，Atom lite，ダストセンサ等を用いて，IoT 稼働状況監視システムの機能を拡張し，振動やダスト等の見える化に対応した。また，作成したセンサモジュールで取得した振動を分析し，異常度の判定をプログラムや，mvtec AD 及び独自のデータセットを用いた画像による製品の良・不良判別プログラム，作業

の可視化のツールを実装し，併せてこれらの推論結果をIoT稼働状況監視システムで可視化を行った。

今後は，システムの安定性を高め，ユーザインタフェイスの改良を行いながら，県内企業からのIoT・AIの利活用に関する相談に活用していく。

## 参考文献


1) 八木澤秀人ら：″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，58-61，(2018)
2) 八木澤秀人ら：″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，27-30，(2019)
3) ″Chart.js″ https://www.chartjs.org/
4) Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi, ″Look Once: Unified, Real-Time Object Detection″, 2016. https://arxiv.org/abs/1506.02640
5) Joseph Redmon, Ali Farhadi, ″YOLOv3: An Incremental Improvement″ 2018. https://arxiv.org/abs/1804.02767
6) ultralytics ″Yolo v5″ https://github.com/ultralytics/yolov5
7) Zhe Cao, Gines Hidalgo, Tomas Simon, Shih-En Wei, Yaser Sheikh, ″OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields″ 2016. https://arxiv.org/abs/1611.08050
8) MVTec Software GmbH, ″MVTEC AD″ https://www.mvtec.com/company/research/datasets/mvtec-ad/.
9) Oliver Rippel, Patrick Mertens, Dorit Merhof, ″Modeling the Distribution of Normal Data in Pre-Trained Deep Features for Anomaly Detection″ 2020. https://arxiv.org/abs/2005.14140.

# V 経常研究

Ordinary Research

経常研究

# デザイン資料を解析・活用した図案調整とテキスタイル試作

佐瀬　文彦*　　吉葉　光雄*　　磯田　政夫*

## Design Adjustment and Textile Trial Production by Analyzing and Utilizing Design Materials

SASE Fumihiko, YOSHIBA Mitsuo and ISODA Masao

銘仙等に使用する図案の参考として，収集されたデザイン資料の活用促進を図るため，改めて資料の解析や整理を行った。さらに，これらの資料をテキスタイルデザインとして使用可能とするため，前処理や編集処理の手順などを試行し、デザイン資料利活用者向けのマニュアルを作成した。また，選抜して調整した図案を使用して広幅の解し織の生地を製織し，テキスタイル（洋装品）を試作し，地域内での一貫生産の先導事例とした。

Key words: 解し織，図案調整，試作

## 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，華やかな色使いと絣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，現在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，銘仙の絣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 活動により，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，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，共同研究等による支援に取り組んできた。しかし，新たな織物や工程の導入について企業が取り組む際には，参考となる事例を示すなどして導入障壁を低くする必要がある。また，センターには創設時に併合された「栃木県図案調整所」からのデザイン資料（足利銘仙が隆盛であった頃のデザインを含む主にテキスタイル向けのデザイン）が保管されており，初代図案調整所長である近藤徳太郎（足利工業高等学校初代校長）らは，地域の織物業者等に対して図案を提供・調整（元図を参考にするなどして書き直すこと）したとされている[1),2)]。

資料の中にはレトロモダンなものから現代にも通用するような図案も含まれている。センターでは，歴史的にも実用的にも価値があると考えられる図案や生地サンプルをデジタル化すると共に，平成 27 年度に地域の繊維関連企業による活用を促進するための研究会を組織して活動してきた。しかし，デジタル化されているとは言え，製品に使用できるデザイン案を得るためには，デザインデータのノイズ除去や色まとめなどの前処理の後，再配置やリピート（生地全体の中で境目が目立たないように連続させる処理），色の変更・調整などが必要である。さらにアレンジ（複数の柄を組み合わせること，デザインを描き加えるなどにより原図と異なる新たなデザインを創ること）によって独自性が付与され，デザインの利活用の可能性がさらに広がるが，元の図案を示すのみではデザインの可能性を企業に伝えきれない。

そこで，この 2 つの課題について，センターが主体となって広幅化した解し織による銘仙の試作に取り組み，昔のようにデザインから仮織，捺染，本織までの工程の殆どについて，地域内での再構築（特に仮織工程の内製化）促進と，繊維関連企業における解し織の試作開発及びデザイン資料の利活用促進の一助とする。

## 2　研究の方法

### 2．1　デザイン資料解析

デジタル化されたデザイン資料は，元の簿冊に振られた管理番号をフォルダ名，簿冊のページ数をファイル名として管理している。デザイン資料の利用者は，このフォルダを順番に開き，閲覧することでファイル

＊　栃木県産業技術センター　繊維技術支援センター

を選出していく。しかし，簿冊の中には柄の性格別にまとまっているものもあるが，どの簿冊にどのような性格の柄が収納されているかは不明なため，柄を見ながら検索するためには全てのフォルダを一通り見渡す必要がある。

そこで，デザイン資料全体を改めて解析し，柄の性格（雰囲気）毎に適宜フォルダ名を設定して再分配することで，利用者の検索効率の向上を図った。

### ２．２　図案調整

収集されたデザイン資料の図案を基に，目的に応じて使用するデザインに作り直す行為を図案調整という。「栃木県図案調整所」では，技術者が元の図案を見ながら，依頼者の要望に合わせて，手書きで新たなデザイン画を描いていたが，本研究では，図面や生地からデジタル化したデザイン資料に対し，ＰＣ（ソフト）を用いて，大まかに以下の2つのプロセスを経ることが図案調整となる。

① データは手書き，或いは生地からの撮影データであるため，まず画像の色むらや汚れ，欠損やゆがみ等を修正してデータを整える。

② ①の結果を基に変形，切り抜き，合成などのソフトの機能を駆使して新たなデザインを作成する。

デザイン資料の利用者は，利用目的やＰＣ（ソフト）に関するスキルも様々であり，利用の際には相談・指導等により支援しているものの，目的やスキルに応じたガイドのようなものが有れば，利用者の利便性を高めることができる。また，指導者側にも，段階的な指導を行う際の目安となる。

そこで，これまでの研究等で確立した図案調整手順を再検証し，段階的な指導に資するパターンを見いだし，マニュアル化した。

### ２．３　製織

これまでの研究成果を基に，図案調整（デザイン）からテキスタイル（試作品）製作までを一貫して行い，仮織を含む地域内での一貫生産の可能性を模索するため，２．２までの過程で得る調整後のデザインを使用して，解し織により生地の製織を行った。全体の工程概要を図１，各工程での使用装置の概要を表１に示す。

なお，捺染及び試作品の製作は外注とした。

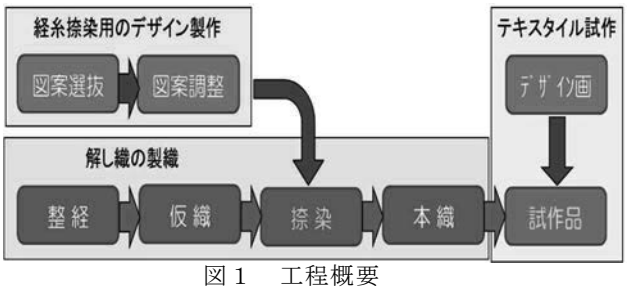



図１　工程概要

表１　各工程における使用装置概要

| | |
|---|---|
| 図案調整 | コンピュータグラフィックス〔ﾄﾖｼﾏﾋﾞｼﾞﾈｽｼｽﾃﾑ製〕 |
| 整　経 | サンプル整経機（NAS-7型）〔ｽｽﾞｷﾜｰﾊﾟｰ製〕 |
| 仮　織 | 試製仮織用織機〔平成30年度共同研究成果品〕 |
| 本　織 | 〃 |

### ２．４　テキスタイル試作

２．３で得られた生地を使用した洋装品の試作を行った。

## ３　結果及び考察

### ３．１　デザイン資料の解析

デザイン資料のうち，製織用データとして利用できる可能性が高いと思われる約 4500 点（112 フォルダ）のデザインを解析した結果，検索を想定した柄の性格・種類別に新たな名称のフォルダを設定し，ファイルの再分配を行った。なお，ファイル名にはフォルダ番号も付いているため，元に戻すことも可能である。また，解析の過程で特に大柄のデザインを中心に，主要な柄部分のみを取り出してその柄名称をファイル名に付けることが，検索や効率的な利活用の一助となると考え，新たに「抽出柄」として１フォルダ追加し，ここに他のフォルダ内のファイルから特徴的な大柄部分のみ約300枚を切り出して収めた。概要を図２に，新たなフォルダ名を表２に示す。

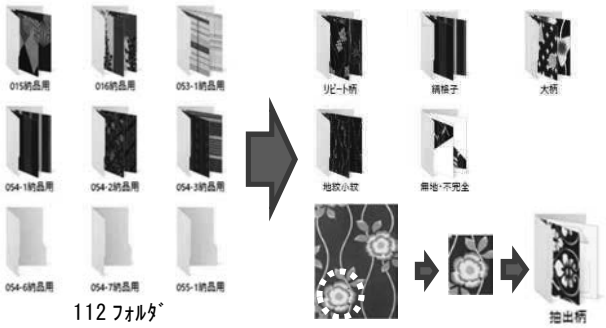



図２　フォルダ構成の再構築

表２　新たなフォルダ名

| | |
|---|---|
| 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 |

### ３．２　図案調整

これまで蓄積した図案調整の手順をモジュール（小さくまとめた工程）として分類し，利用者のスキルに応じて，3 段階（初心者用，中級者用，上級者用）に設定し

て，手順例をマニュアル化した。初心者用はデジタル画像編集未経験者等に，基本操作を一通り指導する場合を想定したものである。中級者用は，調整経験者がデザイン資料を活用する際に２画像で１デザインとなっているものを扱う方法について指導する場合，上級者用は多くの元図を選んで複合させて合成する場合を想定したものである。これにより利用者は段階的に調整方法を習得できる。例示として初心者用の手順概要を図３に示す。

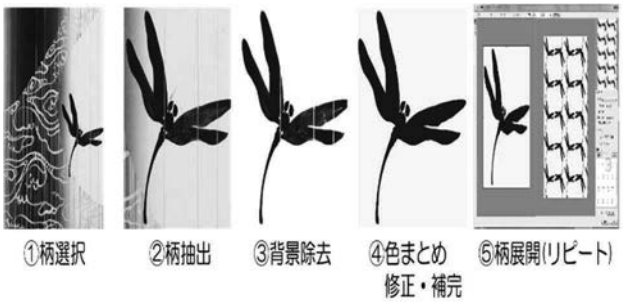



図３　初心者用手順概要

### ３．３　製織

捺染前の工程である整経と仮織を行った。整経時の条件を表３，仮織時の規格を表４に，機上での仮織の状態を図４に示す。

表３　整経条件

| | |
|---|---|
| 素　材 | 絹紡糸 |
| 織　度 | 2/120〔約150ｄ〕 |
| 密　度 | 32本/cm（幅120cm） |
| 総本数 | 3,840本 |
| 整経長 | 21m |

表４　仮織の規格

| | |
|---|---|
| 筬 | 16羽/cm（２本入） |
| 緯糸 | ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ（約65ｄ） |
| 密度 | 約５本/尺 |

※経糸の規格は整経条件と同じ

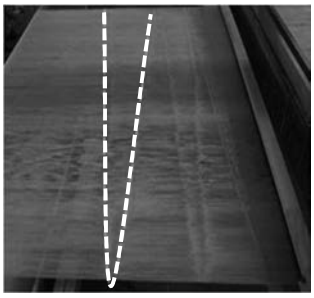


図４　仮織の様子

仮織の緯密度は先の共同研究[3]の結果から約５本/尺程度とした。広幅でこのような規格での仮織は通常の力織機では困難であり，広幅の解し織を生産する際には，仮織用に設計した力織機の導入が望ましい。なお，図４の点線部分が緯糸で，経糸が乱れない程度に粗くかつ，経糸捺染時及び本織時に仕上がりや作業性に影響を与えない程度に密に打ち込んだ。

また，今回最終製品の試作を行うにあたり，次のとおりコンセプトを設定した。

① 国内外で評価を受けているとされるレトロモダンなデザイン（和柄）
② ストーリー性
③ 和装の要素を取り入れた洋装品

コンセプトの基本として，洋装に適する広幅の解し織を企画する場合の一案として，海外でもいわゆる和柄が見直されている中で，比較的大きな柄で和柄とわかりやすいものを，複数選抜することとした。また解し織は一般的に経絣であることから，試験的に，絣の方向に合わせて縦方向に流れの感じられるもの，多方向性のものを組み合わせ，性質の異なる柄を組み合わせることで，製織後の印象に違いが生まれるように設計した。ストーリー性としては，模様銘仙の流行にまつわる話を採用した。銘仙には元々縞や無地に近いような柄が多かったが，華やかな模様銘仙が生まれるきっかけは，乃木希典（当時学習院院長）により，学習院の女学生の服装規範に銘仙程度という例示がされたことからとされ[4),5)]，その後当時の活動的な女性の象徴的衣装にもなった。そこで模様銘仙のルーツに戻るというストーリーに設定した。なお，色については JAFCA〔(一社)日本流行色協会〕による 2021 春夏レディースウェアのトレンドカラー[6)]を参考として，高彩度色（赤，黄，青，緑，黒，紫に近い彩度の高いグループ）から柄と併せて赤，青，紫系の色を選択した。

これらのコンセプトを基に選んだデザイン資料(計 10 枚）と図案調整の概要を図５，調整等を行った結果完成した経糸捺染用のデザインを図６に示す。

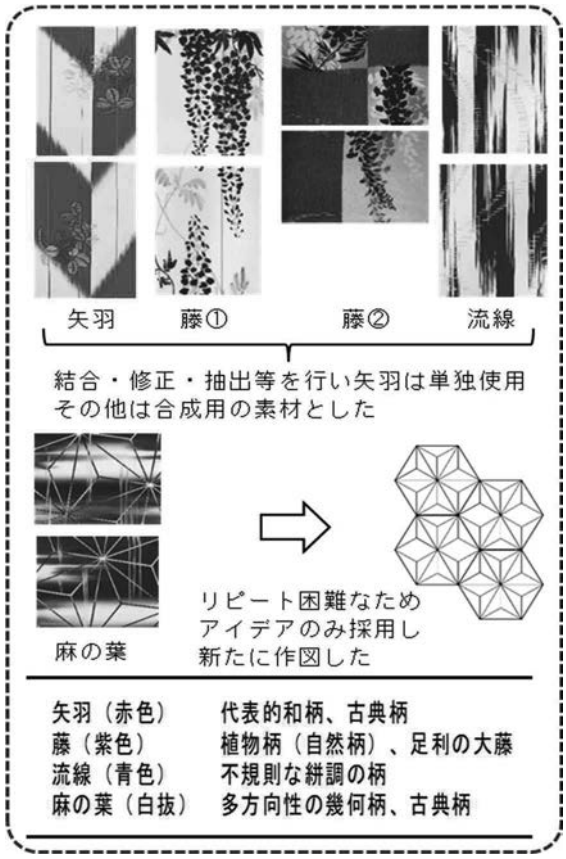



図５　選抜図案及び図案調整の概要

経糸への柄付けはスクリーン捺染で行うため，使用色分の版が必要となるが，今回は色数を３色として図案を

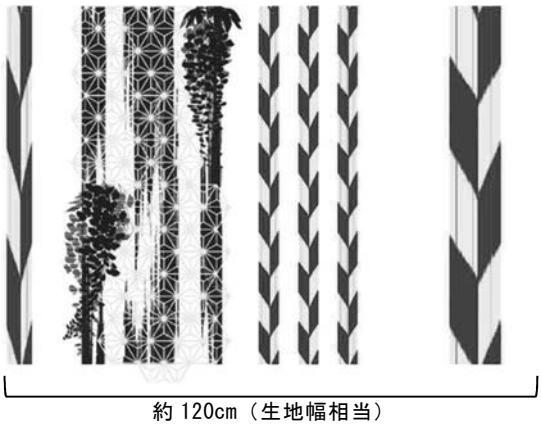



図６　経糸捺染用のデザイン

調整し，これを基にした3枚の版（田辺スクリン型工業（株）製）を使用し，仮織した経糸に捺染した。捺染後の経糸の様子を図７に示す。スクリーン捺染は，広幅の解し織の開発経験のある企業に委託し，解し織に適した版や経糸の乱れや染料の裏通りが均一な，捺染結果が得られた。

図７　捺染直後の経糸

次に，捺染を行った経糸を，約2時間のスチーミングにより染料を定着させた後，織機につないで仮織の糸を解しながら本織用の緯糸を打ち込むが，規格の関係で本織も仮織時と同じ織機を使用して約8mの解し織の生地を得た。なお，本織で使用する緯糸は経糸と同じもので，製織後に確認した緯密度は約11本/cmだった。本織時の様子を図８に示す。

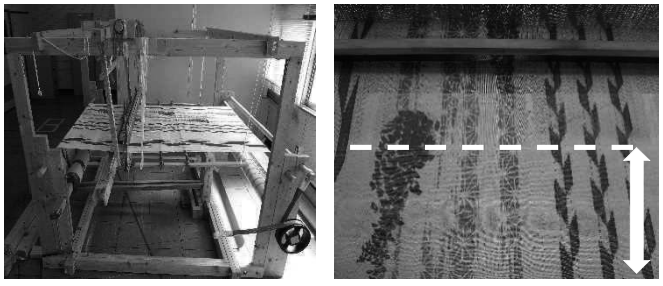


図８　本織時の織機（左）及び製織部分※（右）

※製織時は点線部で経糸に緯糸が打ち込まれ、上から下に経糸が移動していく。矢印部分は生地になった所

### ３．４　テキスタイル試作

３．３で示したコンセプトに従い，明治～大正時代に模様銘仙と共に女学生に流行したいわゆる行灯袴の着物をシルエットに残した洋装品としてデザイン案を図９のとおり作成した。これを基に，型紙用のデザイン修正及びパターニング・裁断・縫製は，（学）大貫学園（足利コミュニティカレッジ）に委託した。着物風の印象を残すため，伊達襟や右前の合わせを採用した。試作品を図10に示す。

図９　デザイン画

図10　試作品

### ４　おわりに

平成26年度に図案（デザイン資料の基となったもの）の調査研究からスタートし，広幅化した解し織の仮織に関する研究等を経て，地域で困難となった解し織の一貫生産について，「栃木県図案調整所」を併合して「栃木県工業試験場」としてスタートしたセンターの歴史等を踏まえ，本研究ではその集大成として，近年の解し織の製造工程を再構築する先導的取組を行った。

その結果経糸捺染や試作品製作は外部に委託したが，センターを主体に足利市内での一貫生産を達成した。実用化の際には品質面や生産性に改善の余地を残すが，一貫生産実現の際の大きな課題となる仮織に関する技術や知見の蓄積が図れたことで，今後地域で解し織に関する取組が進む際の支援や気運醸成に，本研究がその一助となることを期待する。

### 謝　辞

本研究の試作を行うにあたり，御協力・御助言をいただいた，田辺スクリン型工業(株)，鶴貝捺染工業(有)，(学)大貫学園に感謝の意を表します。

### 参考文献

1）日下部高明：〝京都、リヨン、そして足利〟，随想舎，(2001)
2）前澤輝政:〝近藤徳太郎〟、中央公論事業出版、(2005)
3）佐瀬文彦ら：〝栃木県産業技術センター研究報告〟，№16，41-44，(2019)
4）足利銘仙の歴史：https://orimono-densyokan.com/entry9.html
5）伊勢崎銘仙アーカイブス：http://iga.justhpbs.jp/episode.html
6）2021年春夏JAFCAレディスウェアカラー:https://www.jafca.org/colortrend/ladieswear/2021SS.html

経常研究

# DSC を用いた非晶性樹脂成形品の残留応力評価に関する研究

小林　愛雲*　　渡辺　克人*　　加藤　栄*

Residual Stress Evaluation of Amorphous Resin Products Using DSC

KOBAYASHI Azumi, WATANABE Katsuto and KATO Sakae

射出成形条件（保圧，金型温度），アニール処理の有無を変えてポリカーボネート（PC）のダンベル型引張試験片を作製し，試験片の残留応力を溶剤浸漬法により測定した。また示差走査熱量計（DSC）の測定により検出されるエンタルピー緩和由来のピーク面積（ΔH）について，試験片の表面と内部の差を算出し，残留応力との関係を調査した。試験片の残留応力は，射出成形時の保圧が高いほど大きく，アニール処理により減少した。またΔH 差は保圧が高いほど大きく，アニール処理により小さくなる傾向が見られた。試験片の残留応力が大きいほど，ΔH 差は大きくなる傾向が見られた。

Key words:　ポリカーボネート，射出成形，残留応力，エンタルピー緩和，示差走査熱量計

## 1　はじめに

樹脂製品製造業においては，高品質なものづくりが求められている。高品質な樹脂成形品には，安定した寸法や使用中にトラブルがないことが要求されるが，樹脂成形品には成形工程中に生じる残留応力が存在しており，残留応力は成形品の変形・破壊等の原因となっている。特に，ポリカーボネート（PC）等の非晶性樹脂においては，残留応力及び溶剤（油や接着剤等）の影響により破壊が起こるソルベントクラックが大きな問題となっており，対策が求められている。成形品の残留応力低減対策として，成形時に徐冷することや熱によるアニール処理を施すこと等が行われているが，必要以上の熱処理は生産性低下のみならず，物性低下につながることが知られている[1)]。以上のことから，高品質な成形品の製造，品質管理，成形・アニール処理条件の確立には，成形品の残留応力を評価することが必要である。しかし，既存の主な残留応力測定方法には，有害な有機溶剤を使用することや，成形品形状に制限があること等の課題がある。そのため，測定が簡単で，成形品形状による制限がない残留応力測定方法の開発が求められている。

成形品の残留応力は，成形の冷却工程や，保圧工程で生じる体積収縮率の差によって生じる歪みが原因であると言われている[1)]。したがって，成形品の体積収縮率を検出できれば，残留応力を評価できることになる。成形品の体積収縮率は，加熱により起こる体積緩和現象（ガラス転移直後に起こる体積変化）により評価できると考えられる。さらに体積緩和は，示差走査熱量計(DSC)の測定によりエンタルピー緩和現象として検出できる。よって，エンタルピー緩和と残留応力の関係を明らかにできれば，操作が比較的簡単な DSC により残留応力評価が可能になると考えられる。本研究では，DSC 測定により検出されるエンタルピー緩和と残留応力の関係について調べ，DSC を用いた残留応力評価の実現可能性を検証したので報告する。

＊　栃木県産業技術センター　県南技術支援センター

## 2　研究の方法

### 2．1　試験片の作製

PC ペレット（三菱エンジニアリングプラスチックス(株) ノバレックス 7025R）を箱形乾燥機（(株)松井製作所製 PO-50SH-J）で 120 ℃，5 h 予備乾燥した後，射出成形機（日精樹脂工業(株) 製 NEX 80Ⅳ-9EG）を用いて次の条件で成形し，JIS K7139：2009 のダンベル型引張試験片タイプ A1（2 個取り：以下成形品）を得た。

成形条件

(1)シリンダー温度：280℃

(2)射出速度：$v_1$=40，$v_2$=20 mm/min（速度切替位置：ゲート付近）

(3)保圧：130，110，70 MPa

(4)保圧時間：50 s

(5)金型温度：固定側ミラープレートの熱電対により計測し 75±1℃に調整（保圧 110MPa のみ 75，28±1℃の 2 条件で成形）

成形品を成形後直ちに 23℃，湿度 50%の恒温恒湿装置（(株)東洋製作所製 AGX-326）に入れ，1 週間後に樹脂用丸のこ盤（(株)東洋精機製作所製 S）を用いてゲート

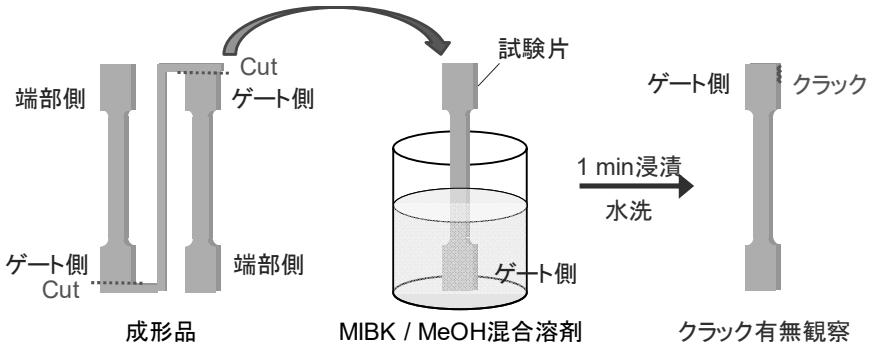



図１　PCの残留応力測定（溶剤浸漬法）

表１　PCの残留応力測定（溶剤浸漬法）における混合溶剤組成と検出応力

| MIBK/MeOH混合割合（MIBKの割合） | 検出応力[MPa] | 評価 *) |
|---|---|---|
| 0 / 1 (0 vol%) | 21 | 実使用時にクラックが発生する可能性有。 |
| 1 / 7 (12.5%) | 17 | |
| 1 / 3 (25 %) | 13 | 組立品やインサート品のチェックに適す。 |
| 1 / 2 (33 %) | 8.3 | 成形品が単体での歪みチェックに適す。 |
| 1 / 1 (50 %) | 3.9 | 歪み軽減のための成形・アニール処理条件の検討に適す。 |

*）参考文献2)より一部抜粋

カットして試験片を作製し，残留応力測定，DSC 測定に供した。

また，同様に成形した保圧 130 MPa の成形品を樹脂用丸のこ盤を用いてゲートカットして試験片を作製した後，箱形乾燥機で 120℃，3 h アニール処理した。アニール処理した試験片を 23℃，湿度 50%の恒温恒湿装置に入れ，1 週間後に残留応力測定，DSC 測定に供した。

### ２．２　試験片の残留応力測定

残留応力測定は，溶剤浸漬法（参考：三菱エンジニアリングプラスチックス(株)技術資料 [2]）により，次のとおり行った。4-メチル-2-ペンタノン（メチルイソブチルケトン：MIBK）（関東化学(株)）とメタノール（MeOH）（関東化学(株)）の割合を変えた各種混合溶剤 400 ml（MIBK/MeOH（検出応力[MPa]）=0/1（21），1/7（17），1/3（13），1/2（8.3），1/1（3.9）；液温：23℃）に試験片をゲート側から浸漬した。1 min 後，試験片を溶剤から取り出して水洗した後，目視によりクラック発生の有無を確認した（図１，表１）。試験は 1 種類の試験片につき 5 回以上行った。

### ２．３　DSC 測定

DSC 測定条件の検討は，示差走査熱量計（(株)日立ハイテクサイエンス製 DSC7020）を用いて，窒素雰囲気下で行った。

エンタルピー緩和由来ピークの冷却速度依存性を調査するため，PC ペレット 10 mg を 50℃から 200℃まで 100℃/min で昇温（1st run）して一定の熱履歴にした後，60℃以下まで冷却（冷却速度：急冷，10℃/min，1℃/min）し，200℃まで 20℃/min で再昇温（2nd run）した。

同様に昇温速度依存性を調査するため，PC ペレット 10 mg を 50℃から 200℃まで 100℃/min で昇温（1st run）して一定の熱履歴にした後，60℃以下まで冷却（冷却速度：1℃/min）し，200℃まで 2，5，10，20℃/min で再昇温（2nd run）した。

試験片の DSC 測定は，示差走査熱量計（セイコーインスツルメンツ(株)製 DSC6220）を用いて，窒素雰囲気下，測定温度 50～250℃で行った。

試験片のゲート側側面（残留応力測定でクラックが発生した箇所）の表面から約 1 mm カットしてサンプル(外)とした。サンプル（外）を採取後，さらに試験片を約 2 mm カットし，金型近傍の層（スキン層）1 mm を除去してサンプル（内）とした（図 2）。得られたサンプル（外），サンプル（内）10 mg について DSC 測定を行い，エンタルピー緩和由来のピーク面積（ΔH）を解析し，次式（1）によりΔH 差を算出した。

$$\Delta H\text{ 差} = |\Delta H_{外} - \Delta H_{内}| \qquad (1)$$

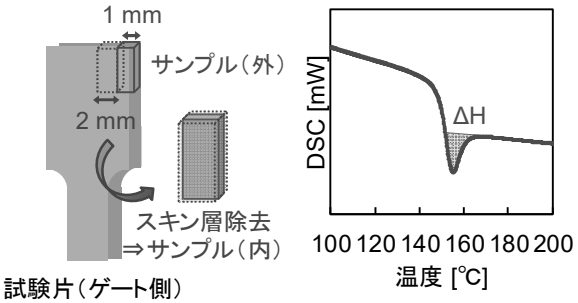



図２　試験片のDSC測定

## 3　結果及び考察

### 3．1　エンタルピー緩和の冷却・昇温速度依存性

エンタルピー緩和由来ピークの冷却速度依存性を図3に示す。冷却速度が大きくなるにつれて，エンタルピー緩和由来ピークは小さくなった。樹脂のエンタルピー緩和由来ピークは，ガラス転移温度（PC では 130～155℃[3]）を通過する際の冷却速度が大きいほど，小さくなることが知られており[4]，本測定においても同様の結果が得られた。

エンタルピー緩和由来ピークの昇温速度依存性を図4に示す。2nd run の昇温速度が大きくなるにつれて，エンタルピー緩和由来ピークは大きくなった。

PCの射出成形における一般的なシリンダー温度は260～320℃，金型温度は 70～120℃であることから[2]，成形品の冷却速度は大きく，図3からエンタルピー緩和由来ピークは小さいと推測される。また，本測定で使用した DSC の温度追従制御範囲は 0.01～20℃/min（室温～725℃）であり，昇温速度が 20℃/min より大きい場合，データの再現性が得られないと予想される。よって成形品のΔHを感度,精度良く算出するため,昇温速度を20℃/min とし，以降の DSC 測定を行った。

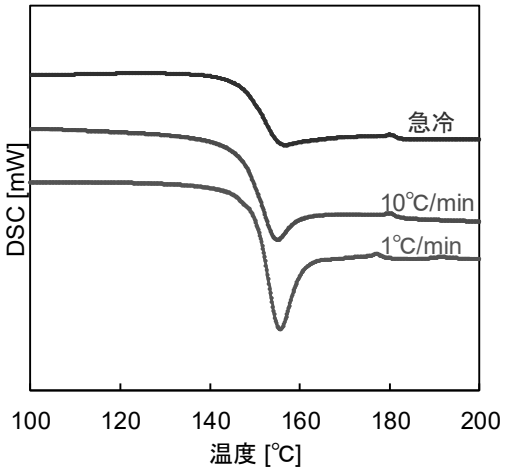



図3　PCのエンタルピー緩和の冷却速度依存性

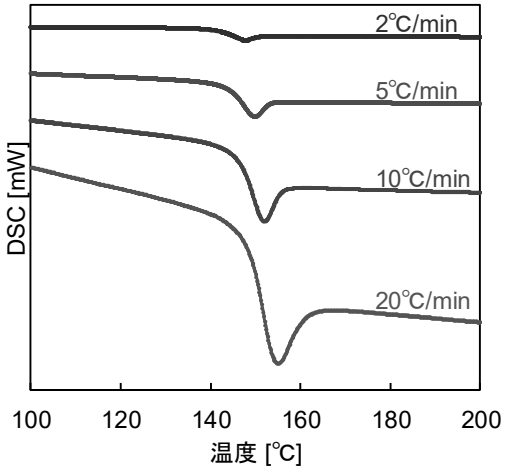



図4　PCのエンタルピー緩和の昇温速度依存性

### 3．2　試験片の残留応力

残留応力測定（溶剤浸漬法）の結果を表2に示す。保圧が高いほど，試験片の残留応力は大きくなった。これは成形品の表面が急冷されるのに対し，保圧が高いほど内部に多くの溶融樹脂が入り，表面と内部の密度差，すなわち体積収縮率の差が大きくなったためと考えられる。またアニール処理により，成形品の残留応力は減少することが確認された。

成形時の金型温度が高いと，発生した歪みを型内で緩和できるため，残留応力は小さくなることが知られている[1]。しかし本測定において，金型温度の違いによる試験片の残留応力の差は見られなかった。これは 75℃も 28℃も PC のガラス転移温度より十分低いため，発生する歪みに大きな差が得られなかったことによると考えられる。

なお本測定において，クラックはゲート側の側面に発生する傾向が見られたことから,試験片のDSC測定では,ゲート側側面をサンプリング箇所とした。

### 3．3　試験片の DSC 測定

試験片のΔH差と保圧の関係を図5に，アニール処理の関係を図6に，金型温度の関係を図7に示す。ΔH差は保圧が高いほど大きく，アニール処理により小さくなる傾向が見られた。またΔH差には，金型温度の違いによる明らかな差は見られなかった。

同条件で作製した試験片において，ΔH差のばらつきが見られた。射出成形においては,同条件で成形しても,ショット毎に溶融樹脂温度や射出圧力等が若干異なることから，僅かではあるが成形品の品質にばらつきがあると考えられる。特に，今回は残留応力を発生させるために保圧時間を 50 s にする等，過酷な条件で成形を行ったため，成形品の品質により大きなばらつきがあったと推察される。実際に，保圧 70 MPa におけるクッショ

表2　PC試験片の残留応力測定結果

| 試験片の作製条件 | | | 検出応力 [MPa] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 保圧 [MPa] | 金型温度 [℃] | アニール処理 | 21 | 17 | 13 | 8.3 | 3.9 |
| 130 | 75 | 無 | | △ | ◎ | | |
| 110 | | | | × | ○ | | |
| 70 | | | | | × | ○ | |
| 130 | | 有 | | | | | △ |
| 110 | 28 | 無 | | × | ○ | | |

◎:大きなクラック有　○:クラック有　△:微小クラック有　×:クラック無

ン量に着目すると，本研究の成形品の標準的な保圧時間 10 s で成形した際のばらつきが 0.09 mm であるのに対し，50 s では 0.29 mm であり，ショット毎のばらつきが大きくなる傾向が見られた。また今回作製した試験片は

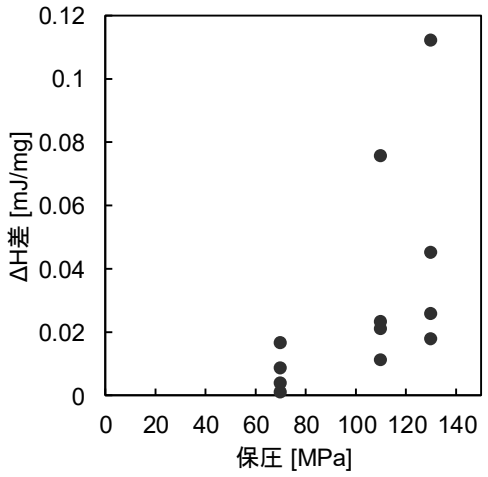



図５　PC試験片の保圧とΔH差の関係

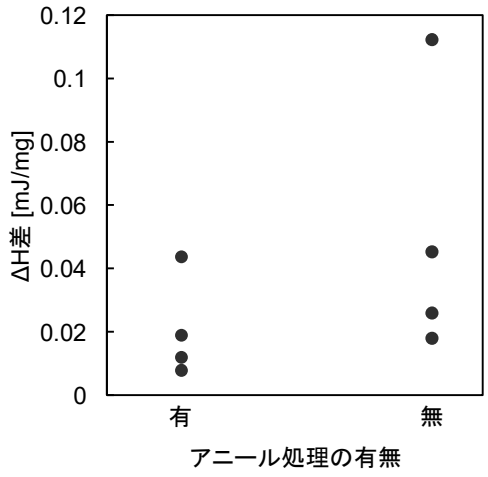



図６　PC試験片（保圧：130 MPa）のアニール処理とΔH差の関係

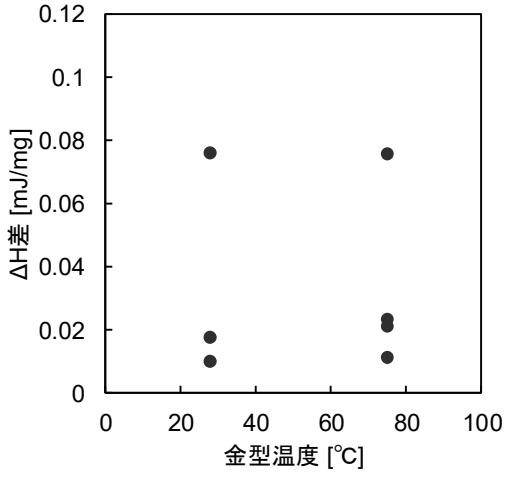



図７　PC試験片（保圧：110 MPa）の金型温度とΔH差の関係

ΔH が小さいため，読み取り誤差が大きいこともΔH 差のばらつきの原因と推察される。したがって成形条件を再検討して成形品のばらつきを低減すること，加えて DSC の測定数を増やすことにより，精確さを向上することが必要と考えられる。

### ３．４　エンタルピー緩和と残留応力の関係

試験片の残留応力（表２）とΔH 差（図５～７）の関係をまとめたものを図８に示す。ばらつきは大きいが，残留応力が大きいほど，ΔH 差は大きくなる傾向が見られた。よって，ΔH 差の精確性を向上することで，DSC を用いた残留応力評価は可能と期待される。

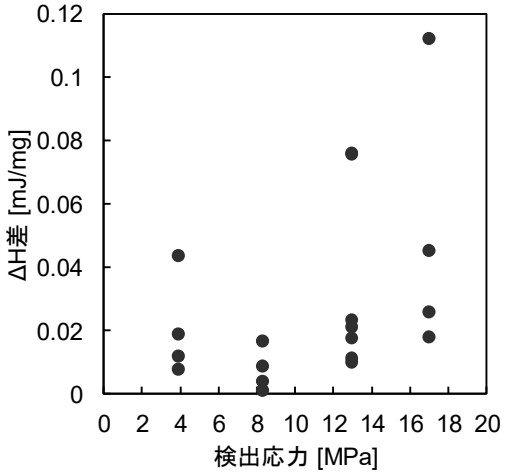



図８　PC試験片の残留応力とΔH差の関係

## ４　おわりに

示差走査熱量計（DSC）を用いた残留応力評価の実現可能性を検証するため，射出成形条件（保圧，金型温度），アニール処理の有無を変えてポリカーボネート（PC）のダンベル型引張試験片を作製し，試験片の残留応力と，DSC 測定により検出されるエンタルピー緩和由来ピーク面積（ΔH）の表面と内部の差について関係を調査した。その結果，以下の知見を得た。

(1) DSC 測定における冷却速度が小さくなるほど，また昇温速度が大きくなるほど，PC ペレットのエンタルピー緩和由来ピークは大きくなった。

(2) 試験片の残留応力は，保圧が高いほど大きく，またアニール処理により減少した。金型温度の違いによる試験片の残留応力の差は見られなかった。

(3) ΔH 差は保圧が高いほど大きく，アニール処理により小さくなる傾向が見られた。またΔH 差には，金型温度の違いによる明らかな差は見られなかった。

(4) 試験片の残留応力が大きいほど，ΔH 差は大きくなる傾向が見られた。

**謝　　辞**

本事業で用いた測定機の一部は公益財団法人 JKA の補助事業によるものであり，競輪マークを記して謝意を表する。

**参考文献**

1) 本間精一：″プラスチック製品の強度設計とトラブル対策″，エヌ・ティー・エス，(2018)
2) 三菱エンジニアリングプラスチックス(株)：″技術資料　ユーピロン／ノバレックスー成形編ー″，A-2，18-21，(2010)
3) 三菱エンジニアリングプラスチックス(株)：″技術資料　ユーピロン／ノバレックスー物性編ー″，A-3，55，(2009)
4) (株)日立ハイテクサイエンス：″熱分析スクール″，43-44，(2016)

KEIRIN

本研究は，公益財団法人 JKA 補助事業により整備した機器を活用して実施しました。

経常研究

# リバースエンジニアリングのためのCADデータ作成に関する研究

植竹　大輔*　　阿部　雅*

Study on the CAD Data Creation for Reverse Engineering

UETAKE Daisuke and ABE Masashi

図面や三次元CADデータが存在しない現物の見本品のみからの金型を製作する場合，リバースエンジニアリングとして三次元デジタイザなどを用いて見本品の形状を計測し，加工のための図面や三次元CADデータを作成する。しかし，三次元デジタイザから得られるデータは面数が多すぎるため，そのまま用いることができず，熟練の作業者が時間を掛け面の張り直しを行い，加工に適した三次元CADデータへと修正する必要があり，コスト増の原因の一つとなっている。本研究では，人手による面の張り直し作業の省力化のために，三次元デジタイザと三次元座標測定機による計測データを活用することで，元の形状を維持したままポリゴン削減を行い，加工に適した三次元CADデータ作成プログラムを開発した。その結果，QEM法によるポリゴン削減を行った場合と比較して，CAMにより出力した加工データによるシミュレーションにおいて，大きく加工時間を削減できることが分かった。

Key Words : 三次元デジタイザ，三次元CADデータ，三次元座標測定機

## 1　はじめに

金型製造現場において，図面や三次元CADデータが存在しない現物の見本品のみから金型を製作する場合は，リバースエンジニアリングとして，三次元デジタイザなどを用いて見本品を計測し，図面や三次元CADデータを作成することになる。

具体的には，三次元デジタイザを用いて見本品の三次元CADデータを作成し，そのデータを基にCAMで作成した加工プログラムにより,NC加工機で金型作製を行うことになる。しかし，得られた三次元CADデータを，そのままCAMを通しNC加工機に掛けてしまうと，面数が過剰となり，加工時間の増加や仕上がり形状の悪化による品質の低下，場合によってはCAMからの出力ができなくなる等の問題を引き起こすことが多い。そのため，得られた三次元CADデータを，NC加工機に用いることができる程度にデータの品質を向上させるため，熟練CAD技術者が2，3日費やしながら手直しをしている現状がある。

そこで，本研究では，加工に適したデータ作成の自動化を実現するため，三次元デジタイザと三次元座標測定機から得られる計測データを用い，それぞれのデータの特徴を生かすことで，三次元デジタイザから得られる三次元形状データを実際の加工に適した三次元CADデータに変換するソフトウェアを開発した。

＊　栃木県産業技術センター　県南技術支援センター

## 2　研究の方法

### 2．1　測定モデルの検討と作成

基準とする測定モデルについて，測定や加工，適用するアルゴリズムなどの視点から最適な材質・形状を検討し，その三次元CADデータを作成した。その後マシニングセンタで加工を行い，測定モデルを作製した。

一般的なポリゴン削減アルゴリズムであるQEM法を適用することを前提に，QEM法が不利に働く自由曲面や狭まる形状を持つ三次元形状をCADで設計した。CADはFreeCADを用いた。

また，サイズは縦100mm×横100mm，材質はケミカルウッドとし，マシニングセンタ（オークマ㈱MB-56VA）を用いて加工を行った。作製した測定モデルを図1に示す。

### 2．2　三次元デジタイザと三次元座標測定機による計測

作製した測定モデルについて三次元デジタイザ（GOM社ATOSⅢ Triple Scan）で形状を計測し，三次元CADデータとして取得した（図2）。

また，補正データとして用いるため，三次元座標測定機（㈱ミツトヨ製LEGEX776）で輪郭形状を計測した。測定ピッチは0.2mm，倣い速度は8mm/sとし，計測困難な箇所を除き5mm間隔のメッシュ状に倣い測定を行った。得られたデータを図3に示す。

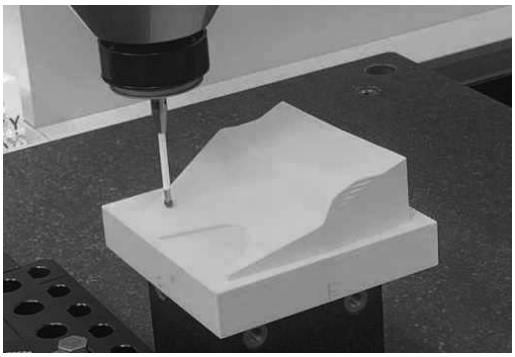


図１　測定モデル

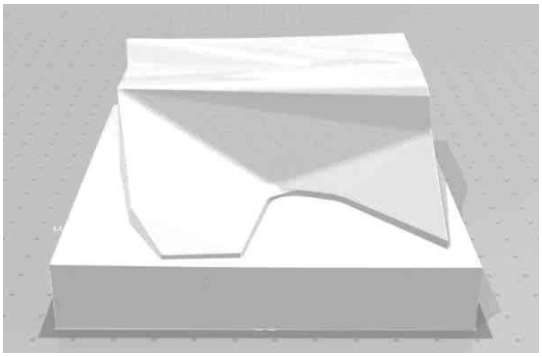


図２　三次元デジタイザで取得した形状

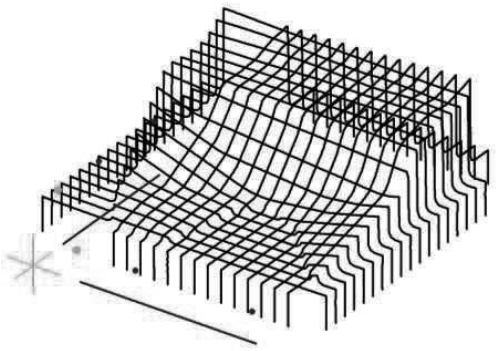


図３　三次元座標測定機による計測データ

## ２．３　最適化アルゴリズムの検討とソフトウェアの開発

三次元デジタイザから出力される三次元形状と三次元座標測定機から出力される測定データ（測定点がテキストで記載されたもの）を読み込み[1)]，最適化を施し三次元 CAD データで出力するプログラムを作成した。開発環境は Mingw64 の C++，ライブラリは SDL と OpenGL[2)]を用いた。

プログラム実行時には，画面に読み込んだ STL ファイルの形状と三次元座標測定機の測定データが図４のとおり表示される。これらは重なっていると見えづらくなるため，三次元座標測定機の測定データを上方にオフセットして表示することとした。

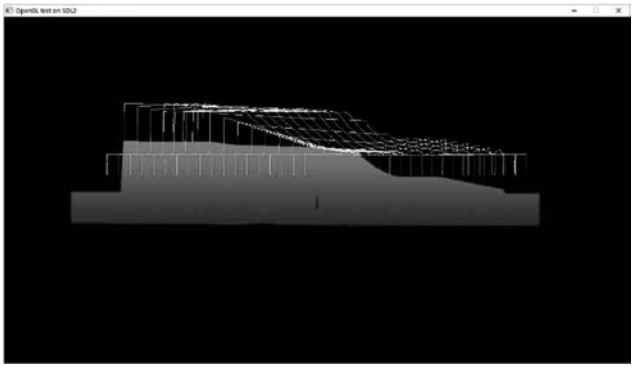


図４　開発したソフトウェアの実行画面

### ２．３．１　QEM 法

ポリゴンモデルの簡略化に使われる手法のうち，最も一般的なものとして QEM（Quadric Error Metrics）法が挙げられる。

QEM は，2 つの頂点を縮約することで頂点数を減らしていくアルゴリズムである。縮約する両頂点の隣接面群との距離の二乗和が最小になる位置を縮約した頂点とするものである。

今回実装した QEM 法は，すべての頂点を調べ，最も距離の小さい 2 点を上述の方法で縮約し，指定された面数になるまで繰り返すものとした。

### ２．３．２　本研究での最適化手法

本研究では，三次元デジタイザとは別に三次元座標測定機で計測したデータを用いることにより，モデルの形状を保ったまま面数を削減するアルゴリズムを考案した。

具体的な方法を以下に記す。QEM 法と同様に縮約する 2 点を決め，三次元座標測定機で計測したデータの中でこれら 2 点と距離が最も近い（距離の 2 乗和が小さい）点の座標値を基準座標値とする。基準座標値からの距離の二乗和が近傍面群において最も変化量が小さくなる点を新しい頂点として縮約する。なお，今回の実装においては，三次元座標測定機の球状スタイラスで測定することが困難な凹角等の形状を除いて実施することとした。

## ２．４　最適化した三次元 CAD データの検証

三次元デジタイザで得られたデータ（面数 149,954）に対して，QEM 法と本研究での最適化手法をそれぞれ用いて、面数の縮約を行った。測定モデルの面数（1,486）と同程度とするため，縮約後の面数は 1,500 とした。それぞれの方法で得られた結果を比較した。

## 3　結果及び考察

### 3．1　形状の比較

QEM 法を適用し，1,500 まで面数削減を行った形状を図５に示す。図５から，明らかに面数削減前の元の形状を保持できていないことがわかる。

また，本研究での最適化手法により 1,500 まで面数削減を行った形状を図６に示す。こちらは形状を保っており，すべての頂点において，元になった三次元デジタイザの形状から 50μm 以下に収まっていることが確認できた。

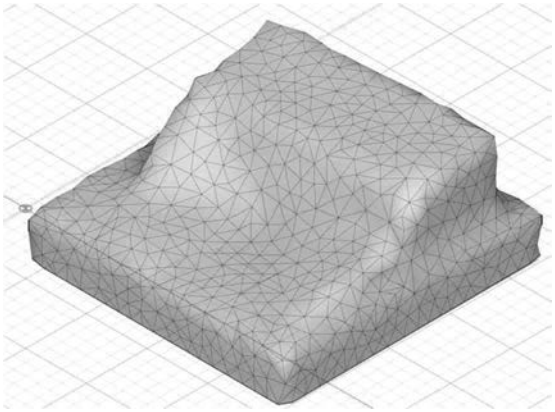


図５　QEM 法による面数削減後の形状

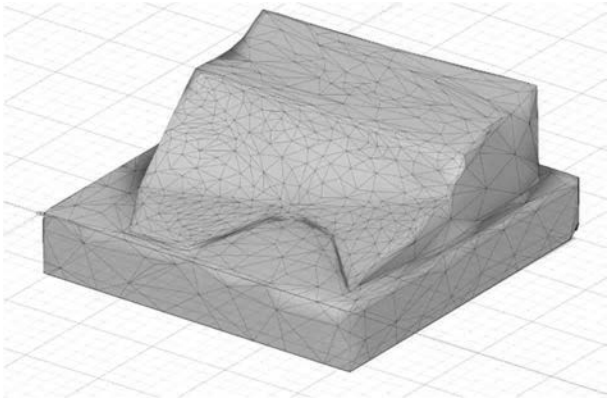


図６　本研究での最適化手法による面数削減後の形状

ただし，これは測定モデルが 100mm×100mm の場合の数値であり，これは対象物が大きくなれば，誤差も大きくなることが想定される。実際に現場で用いるためには現時点では対象サイズに留意が必要である。

### 3．2　CAM およびシミュレータによる比較

本研究の目標である，人の手による面の張り直しを要しない加工を実現するため，CAM により加工データを作成し，シミュレータで加工時間の比較を行った。FUSION360 の CAM と加工シミュレータを用い，条件はアルミ加工の粗加工で，同じエンドミルを用いて同一条件で自動パスを作成させ，シミュレータで想定加工時間を算出させた。

QEM 法で得られたデータは元の形を保てていないため，単純な比較とはならないが，QEM 法を用いたデータでの加工時間 11 時間 48 分に対し，本研究での最適化を用いたデータでの加工時間は 5 時間 33 分と半分以下で，大幅な加工時間の削減が期待できる。

一方で，人の手により張り直しを行ったデータとの比較のため，測定モデルの設計データを同条件での加工シミュレータを適用したところ，加工時間は 3 時間 25 分と最適化手法よりさらに半分近くまで短くなった。本研究の手法は，人手で作成した CAD データには品質が及ばず，実際の現場で省力化として加工を行うためには，更に最適化の性能を高める必要がある。

## 4　おわりに

三次元デジタイザで計測したデータを，人の手を介さずに加工に適するデータとして最適化する手法を提案し，以下の結論を得た。

(1) ポリゴン削減後の形状維持については，提案手法を用いた場合,QEM 法を用いた場合と比べ目視で分かるほど優れていた。

(2) 提案手法を用いた場合，QEM 法を用いた場合と比べ，加工シミュレータにより計算した加工時間は大幅に短かった。


## 謝　辞

本事業で用いた測定機の一部は公益財団法人 JKA の補助事業によるものであり，競輪マークを記して謝意を表する。


## 参考文献


1) 鳥谷浩志　他：″三次元 CAD の基礎と応用″，共立出版，(1991)

2) デーブシュライナー 他：″OpenGL プログラミングガイド原著第５版″，ピアソンエデュケーション，(2006)



KEIRIN

本研究は，公益財団法人 JKA 補助事業により整備した機器を活用して実施しました。

経常研究

# 引き揃え糸を使用した紬織物製品の開発

石井　優利奈*　　太田　仁美*

Development of Tsumugi Textile Products with Some Yarns Together

ISHII Yurina and OTA Hitomi

本研究では，繊度や強度が均一でないために反物に使用できない手つむぎ糸を複数本引き揃えることで改善して結城紬製品に活用するため，地機による製織において経糸・緯糸に引き揃え糸を使用した場合の適切な糸の繊度や密度の条件を検討した。糸の繊度や密度の条件が異なる 48 種類の布地サンプルを製織し，各製織条件における布地の状態を評価することで，経糸と緯糸が表面に出る割合を同程度にする条件を見い出した。さらに、求めた製織条件を反映させて，3 種類の布地を製織し，小物製品を試作した。

Key words:　結城紬，手つむぎ糸，引き揃え糸

## 1　はじめに

結城紬は真綿から手でつむぐことにより作られる「手つむぎ糸」を原料として生産される。産地では生産者の高齢化等の理由により糸つむぎ従事者が減少しており，手つむぎ糸が不足している。手つむぎ糸不足の解消を図るため，県や市をはじめ結城紬関連組合では後継者の育成に取り組んでいるが，製品として使用できる糸つむぎの技術の習得には長期間を要する。そのため，技術の習得過程で製作された糸は繊度や強度が均一でない糸もあり，反物としては使用できず在庫として抱えるケースが多い。原料としている真綿の価格も高騰しており，産地組合や生産者への費用負担が大きい。

本研究では反物に使用できない手つむぎ糸を活用した製品を作ることを目的とし，地機での製織条件を検討した。具体的には，繊度や強度が不均一な糸を製織できる状態にするため，複数の糸を引き揃えた糸にして製織に使用した。最終的には地機で製織可能な平織組織でできる模様織りを生かした布地を製織し，経糸・緯糸に引き揃え糸を使用した場合の適切な糸の繊度や織密度を検討した。さらに求めた製織条件を反映させて 3 種類の布地を製織し，小物製品を試作した。

当センターでは経糸・緯糸に引き揃え糸を使用した帯等の試作は行っていたが，糸の繊度や密度についてのデータの蓄積は少ない。そこで今回は糸の繊度・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い，条件と模様の関係をまとめた。

＊　栃木県産業技術センター紬織物技術支援センター

## 2　研究の方法

### 2．1　布地サンプルの製織

#### 2．1．1　単糸及び 2～3 本程度(420D 以下)の引き揃え糸による模様織りの製織

本研究における「模様織り」とは，色糸の並べ方を変えることにより模様をつくる織り方のことである。まず，模様織りの製織条件を整理するため，下記 2 条件で千鳥格子と網代柄（4 くずし）の 2 種類を製織した。

(1)　通常の着尺とほぼ同じ密度で単糸(115D～210D)を使用。［サンプル No.1，No.3］

(2)　筬密度を通常の着尺より 2 倍ほど粗くし，115D～210D の単糸を 2～3 本の引き揃え糸にして使用。［サンプル No.2，No.4 ］

サンプル No.1～4 の製織条件を表 1 に示す。製織したそれぞれのサンプルについて,経糸密度と緯糸密度を計測し，経糸密度に対する緯糸密度の割合を算出した。この結果より模様織りの製織条件を整理し，次に行う布地サンプルの選定や評価の基準とした。

表 1　No.1～4 の製織条件

| | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 |
|---|---|---|---|---|
| 製織した模様 | 千鳥格子 | | 網代柄（4くずし模様） | |
| 経糸　平均繊度(D) | 183 | 366 | 206 | 412 |
| 経糸　引き揃え数（本） | - | 2 | - | 2 |
| 緯糸　平均繊度(D) | 115 | 345 | 210 | 420 |
| 緯糸　引き揃え数（本） | - | 3 | - | 2 |
| 筬密度（羽/寸） | 58 | 30 | 58 | 30 |
| 1羽あたりの引込数（本） | 2 | | | |
| 整経長(cm) | 90 | | | |
| 通し幅(cm) | 10 | | | |

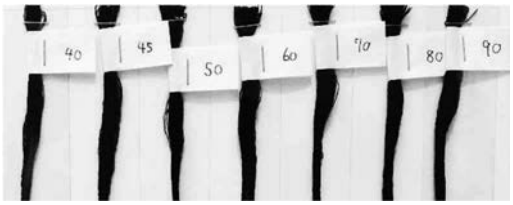
（長さの基準は鯨尺 1 寸＝約 3.78cm）

### ２．１．２　繊度の高い引き揃え糸（10170D～565D 程度の糸）を使用した布地サンプル製織

サンプル No.1～4 よりも繊度の高い引き揃え糸を使用した布地サンプルを製織するため，使用する筬密度，経糸・緯糸繊度について基準とする条件を設定した。

筬は通常の結城紬着尺の製織に使用するものより密度が粗い 3 種類（表２）を選定した。糸の繊度は，基準となるサンプルを作製し，サンプルの繊度に合わせて糸の引き揃え数を調整した。作製した糸サンプルを図１に示す。糸サンプルには単糸の状態で平均繊度 113D の手つむぎ糸を使用し，5 本から 90 本までの 14 種類を作製した。

5 本（左）～35 本（右）までの引き揃え糸




40 本（左）～90 本（右）までの引き揃え糸

図１　糸サンプル

この糸サンプルを使用し，選定した 3 種類の筬それぞれに引き揃え糸を通して，引っ掛かりがなく通る糸の繊度を，各筬を使用した製織における経糸の最高繊度として設定した。使用した筬の密度と各筬に対する最高繊度を表２に示す。

表２　筬の密度と最高繊度

| 筬の密度（羽/寸） | 最高繊度(D) |
|---|---|
| 30 | 2260 |
| 19(５羽/cm) | 4520 |
| 11(３羽/cm) | 10170 |

布地サンプルは上記で設定した条件を基準に製織条件（筬の密度，1 羽当たりの経糸引込本数，及び経糸・緯糸繊度）を変えて，計 44 種類のサンプルを製作した。サンプル No.1～4 と同様に，サンプルはすべて整経長 90cm，通し幅 10cm で整経した。

それぞれのサンプルについて経糸密度と緯糸密度を計測し，経糸密度に対する緯糸密度の割合を算出した。サンプル No.　1～4 の製織結果を参考に，製織条件や布地を評価した。

模様織りに使用できる条件のサンプルを選定するため，算出した密度の割合が適当な数値となった 6 つのサンプルについては，布地の表面に現れる経糸面積の割合を算出し，各布地サンプルを比較，評価した。経糸面積の割合は，デジタルマイクロスコープ（HIROX）で撮影した画像を，Adobe Photoshop において全体のピクセル数に占める経糸のピクセル数を計測し算出した。

### ２．２　小物用布地の製織

布地サンプルの製織で求めた製織条件を反映し，小物製品を試作するための布地を地機により 3 種類製織した。使用した手つむぎ糸の綛ごとの長さと繊度を表３に示す。

表３　小物用布地に使用した手つむぎ糸

| No. | 長さ(m) | 緯度(D) | 布地番号 | No. | 長さ(m) | 緯度(D) | 布地番号 | No. | 長さ(m) | 緯度(D) | 布地番号 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2125 | 106 | ③ | 11 | 858 | 231 | ③ | 21 | 578 | 148 | ③ |
| 2 | 1521 | 130 | ② | 12 | 984 | 174 | ③ | 22 | 936 | 163 | ② |
| 3 | 1384 | 150 | ② | 13 | 1278 | 162 | ② | 23 | 1573 | 137 | ② |
| 4 | 1852 | 83 | ③ | 14 | 369 | 146 | ② | 24 | 923 | 126 | ③ |
| 5 | 2314 | 93 | ② | 15 | 364 | 123 | ③ | 25 | 1391 | 172 | ① |
| 6 | 1514 | 137 | ① | 16 | 195 | 92 | ② | 26 | 1504 | 180 | ① |
| 7 | 1833 | 128 | ③ | 17 | 377 | 95 | ② | 27 | 431 | 180 | ③ |
| 8 | 1855 | 121 | ③ | 18 | 494 | 219 | ③ | 28 | 1504 | 161 | ③ |
| 9 | 2223 | 130 | ② | 19 | 422 | 171 | ② | 29 | 854 | 161 | ② |
| 10 | 1748 | 134 | ① | 20 | 1604 | 90 | ② | 30 | 3056 | 121 | ③ |
| | | | | | | | | 31 | 613 | 205 | ③ |

小物用の布地には，当センター主催の糸つむぎ講習会で受講者が製作した手つむぎ糸及び小山市が主催の糸つむぎ講習会で，受講者が小山市産繭から製作した手つむぎ糸を使用した。手つむぎ糸は，糸のつむぎ手，おおよその繊度ごとに分け，ボッチ揚げ（管巻き・綛揚げ）を行った。

小物用布地の製織条件（筬密度，１羽あたりの引込数，整経長，通し幅）を表４に示す。

表４　小物用布地の製織条件

| | ①千鳥格子 | ②くずし | ③白×ベージュ |
|---|---|---|---|
| 筬密度（羽/寸） | 30 | 30 | 19(5羽/cm) |
| 1羽あたりの引込数（本） | 2 | 1 | 1 |
| 整経長(cm) | 200 | 200 | 200 |
| 通し幅(cm) | 38 | 34 | 40 |

織物設計については 4DboxPLANS（トヨシマビジネスシステム）を使用し，製織した布地サンプルの糸繊度や織密度のデータを入力して小物用布地のシミュレーションを行った。シミュレーション結果と布地サンプルを参考に，糸の引き揃え本数・必要糸長を計算し，手つむぎ糸を小物用布地 3 種類にそれぞれ振り分けた。

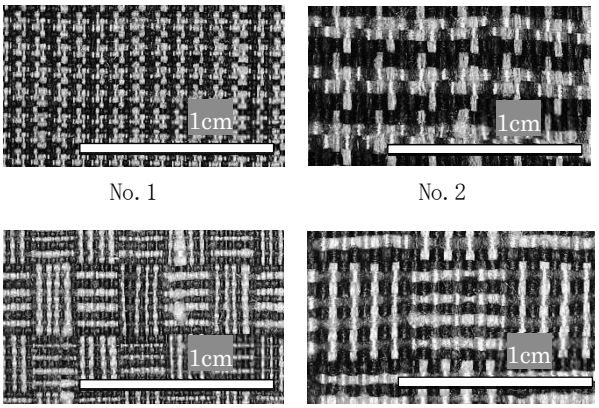
3 種類の布地について，経糸密度と緯糸密度を計測し，シミュレーションで設定した密度と比較し評価を行った。また，製織した布地を使用し小物製品を試作した。

## ３　結果及び考察

### ３．１　布地サンプルの評価

#### ３．１．１　単糸及び 2～3 本程度(420D 以下)の引き揃え糸による布地サンプルの評価

製織した No.1～4 の布地サンプルを図２に示す。また，計測した各サンプルの織密度と算出した経緯の割合を表５に示す。




No.1　　No.2

No.3　　No.4

図２　布地サンプル

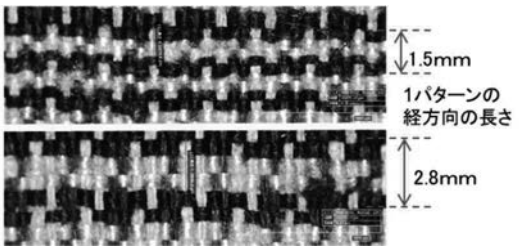
表５　No.1～4 の織密度と割合

| No. | ①経糸密度（本/寸） | ②緯糸密度（本/寸） | ②/①*100（%） |
|---|---|---|---|
| 1 | 144 | 120 | 83.3 |
| 2 | 68 | 52 | 76.5 |
| 3 | 144 | 86 | 59.7 |
| 4 | 70 | 62 | 88.6 |

製織したサンプルのうち No.1 と No.4 は経糸密度に対して緯糸密度の割合が 80%以上であり見た目も良好であった。No.1 は通常の結城紬着尺と同程度の筬密度と経糸繊度の条件で製織しており，経糸繊度に比較して低い繊度の緯糸を使用していた。一方 No.4 の製織では，筬密度を通常の着尺より 2 倍ほど粗くし，引き揃え糸を使用していたが，この場合は経糸と緯糸は同程度の繊度であった。

上記のことから，No.1 と No.4 をこの後行う繊度の高い引き揃え糸を使用した布地サンプルの選定や評価の基準にした。

No.2 は経糸密度に対する緯糸密度の割合が 80%に近い値であったが，経緯比が同程度になるよう緯糸を織り込む際に打ち込みを弱くしていた。打ち込む強さを調整する(弱くする）と，製織個所によって緯糸密度のばらつきが生じやすくなった。図３に示すように，打ち込む強さを調整しない場合には，おおよそ倍の緯糸密度になることがわかった。経糸繊度に比較して緯糸繊度が低いと考えられ，緯糸密度が高くなると布地表面に占める緯糸の面積が多くなり，千鳥格子柄がつぶれている様子がわかる。




上：従来通り打ち込み，柄がつぶれた部分

下：打ち込む力を弱くした部分

図３　打ち込みの力加減と緯糸密度

No.1～4 の製織結果より，模様織りで 1 パターンの経緯比を同率に近づけるためには，布表面に現れる経糸の面積と緯糸の面積を同程度にする必要があると分かった。地機の製織においてこの条件を達成するため，下記 2 つの条件を整理し，サンプルの選定や評価の基準とした。

(1) 経糸の密度（使用する筬等によって決まる）と緯糸の密度(同寸間の打ち込み本数)が近い数値であること。（ただし，(2)の条件を考慮する必要があり，経糸・緯糸の繊度によっては同数にならない場合がある。）

(2) 一定の強さで緯糸を打ち込むことができること。（地機は地の締まった布地の製織に向いているため，均等な織目を作るには，地機織りの杼を使用した打ち込み強さでつぶれない程度の糸の繊度にする必要がある。）

#### ３．１．２　繊度の高い引き揃え糸（10170D～565D 程度の糸）を使用した布地サンプルの評価

##### ３．１．２．１　各布地サンプルの織密度

各布地サンプルの製織条件（筬の密度，1 羽当たりの経糸引込本数及び経糸・緯糸繊度）と製織結果（経糸・緯糸密度及びその割合）を表６に示す。

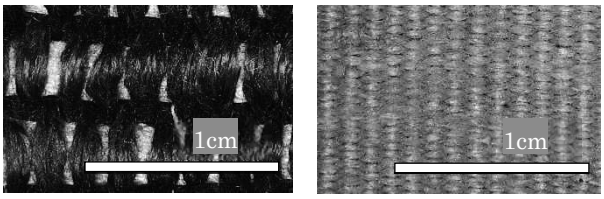
最終的に製作する布地は模様織りに対応できる条件にするため，見た目の経糸と緯糸の表面に出る色の割合が同程度のものについて選定することにした。そこで，まず製織した布地サンプルを経糸密度(本/寸)に対する緯糸密度(本/寸）の割合で比較した。No.5～48 の製織では，経糸に濃色の糸，緯糸に淡色の糸を使用している。

布地サンプルの一部を抜粋して図４に示す。今回製織した布地サンプルのうち,最も割合が低かった(26.3%)No.37 では，経糸が緯糸をほぼ覆い隠し，緯糸の色がほとんど見えなくなった。割合が最も高かった（541.2%）No.41 では経糸は全く見えず，緯糸で経糸が覆い隠された。

表６　No.5～48 の製織条件と製織結果

| No. | 使用した筬の密度 | 1羽引込数（本） | 経糸1種類目繊度(D) | 経糸2種類目繊度(D) | 緯糸繊度(D) | ①経糸密度（本/寸） | ②緯糸密度（本/寸） | ②/①*100（%） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 3羽/cm | 1 | 10197 | - | 2160 | 14 | 20 | 142.9 |
| 6 | 3羽/cm | 1 | 10197 | - | 4560 | 14 | 16 | 114.3 |
| 7 | 3羽/cm | 1 | 10197 | - | 10192 | 12 | 10 | 83.3 |
| 8 | 5羽/cm | 1 | 4532 | - | 2160 | 22 | 20 | 90.9 |
| 9 | 5羽/cm | 1 | 4532 | - | 4560 | 20 | 16 | 80.0 |
| 10 | 5羽/cm | 1 | 4532 | - | 10192 | 20 | 10 | 50.0 |
| 11 | 30羽/寸 | 1 | 2260 | - | 2160 | 32 | 26 | 81.3 |
| 12 | 30羽/寸 | 1 | 2260 | - | 4560 | 32 | 18 | 56.3 |
| 13 | 30羽/寸 | 1 | 2260 | - | 10192 | 30 | 10 | 33.3 |
| 14 | 30羽/寸 | 1 | 2226 | 1113 | 2160 | 34 | 24 | 70.6 |
| 15 | 30羽/寸 | 1 | 2226 | 1113 | 4560 | 32 | 16 | 50.0 |
| 16 | 30羽/寸 | 1 | 2226 | 1113 | 10192 | 32 | 10 | 31.3 |
| 17 | 30羽/寸 | 1 | 1071 | 2142 | 2200 | 34 | 24 | 70.6 |
| 18 | 30羽/寸 | 1 | 1071 | 2142 | 4560 | 32 | 14 | 43.8 |
| 19 | 30羽/寸 | 1 | 1071 | 2142 | 10192 | 32 | 10 | 31.3 |
| 20 | 30羽/寸 | 1 | 459 | 2142 | 2200 | 32 | 22 | 68.8 |
| 21 | 30羽/寸 | 1 | 459 | 2142 | 4560 | 34 | 14 | 41.2 |
| 22 | 30羽/寸 | 1 | 459 | 2142 | 10192 | 32 | 10 | 31.3 |
| 23 | 3羽/cm | 2 | 2184 | - | 2160 | 26 | 18 | 69.2 |
| 24 | 3羽/cm | 2 | 2184 | - | 4560 | 24 | 14 | 58.3 |
| 25 | 3羽/cm | 2 | 2184 | - | 10192 | 24 | 10 | 41.7 |
| 26 | 3羽/cm | 1 | 2226 | - | 2160 | 14 | 20 | 142.9 |
| 27 | 3羽/cm | 1 | 2226 | - | 4560 | 14 | 14 | 100.0 |
| 28 | 3羽/cm | 1 | 2226 | - | 10192 | 14 | 10 | 71.4 |
| 29 | 3羽/cm | 2 | 4464 | - | 2160 | 26 | 18 | 69.2 |
| 30 | 3羽/cm | 2 | 4464 | - | 4560 | 24 | 12 | 50.0 |
| 31 | 3羽/cm | 2 | 4464 | - | 10192 | 24 | 8 | 33.3 |
| 32 | 3羽/cm | 1 | 4452 | - | 2160 | 14 | 20 | 142.9 |
| 33 | 3羽/cm | 1 | 4452 | - | 4560 | 12 | 14 | 116.7 |
| 34 | 3羽/cm | 1 | 4452 | - | 10192 | 12 | 10 | 83.3 |
| 35 | 5羽/cm | 2 | 2184 | - | 2160 | 40 | 16 | 40.0 |
| 36 | 5羽/cm | 2 | 2184 | - | 4560 | 40 | 12 | 30.0 |
| 37 | 5羽/cm | 2 | 2184 | - | 10192 | 38 | 10 | 26.3 |
| 38 | 5羽/cm | 1 | 2226 | - | 2160 | 21 | 24 | 114.3 |
| 39 | 5羽/cm | 1 | 2226 | - | 4560 | 20 | 16 | 80.0 |
| 40 | 5羽/cm | 1 | 2226 | - | 10192 | 20 | 10 | 50.0 |
| 41 | 30羽/寸 | 1 | 559 | - | 558 | 34 | 184 | 541.2 |
| 42 | 30羽/寸 | 1 | 559 | - | 1127 | 34 | 152 | 447.1 |
| 43 | 30羽/寸 | 1 | 559 | - | 2200 | 34 | 62 | 182.4 |
| 44 | 30羽/寸 | 1 | 559 | - | 4598 | 34 | 32 | 94.1 |
| 45 | 30羽/寸 | 1 | 1118 | - | 558 | 34 | 156 | 458.8 |
| 46 | 30羽/寸 | 1 | 1118 | - | 1127 | 34 | 104 | 305.9 |
| 47 | 30羽/寸 | 1 | 1118 | - | 2200 | 34 | 38 | 111.8 |
| 48 | 30羽/寸 | 1 | 1118 | - | 4598 | 34 | 20 | 58.8 |

（長さの基準は鯨尺 1 寸＝約 3.78cm）



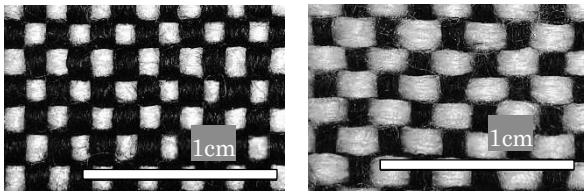

No. 37　　No. 41

図４　布地サンプル（経糸・緯糸密度の割合が不均一）

### ３．１．２．２　経糸・緯糸が同繊度の場合の評価

まず，No. 1～4 の製織結果を参考に，経糸と緯糸を同繊度で製織した布地サンプルを評価した。経糸密度に対する緯糸密度の割合が 80～120%の布地は 14 パターンあり，このうち，経糸と緯糸が同繊度のものは 5 パターンあった。最も割合が 100%に近いサンプルは No. 38 であった。

No. 11 は No. 38 と同程度の繊度の経糸・緯糸を使用しており，密度の割合も 100%に近かったため，No. 11 と No. 38 について，布表面に現れる経糸面積を比較した。No. 11 と No. 38 のサンプルを図５に示す。



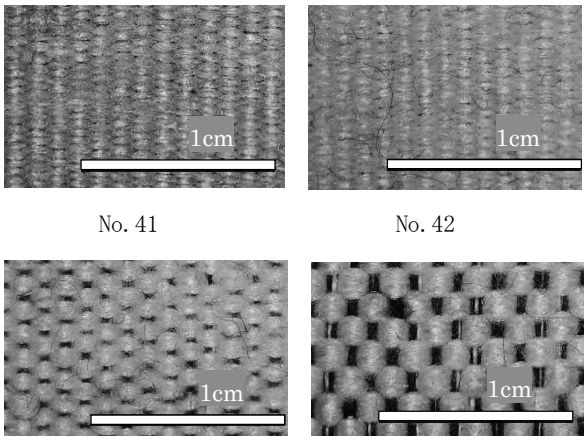

No. 11　　No. 38

図５　布地サンプル（経糸・緯糸が同繊度）

画像全体に占める経糸面積の割合は，No. 11 が 65%，No. 38 が 40%であり，No. 38 のほうが 50%に近く，かつ経糸の割合が低かった。製織した布地サンプルは，通し幅を 10 cmに設定していたが，小物用布地の製織で通し幅が広くなると，打ち込みにかかる力が分散され緯糸密度がさらに低くなることが予想される。そのため，経糸の割合が高い No. 11 の条件よりも No. 38 の条件のほうが幅の広い布地の製織に適していると考えられる。

### ３．１．２．３　経糸・緯糸が異なる繊度の場合の評価

次に，経糸と緯糸に異なる繊度の糸を混ぜて挿入した場合の布地サンプルを評価した。No. 41～44 のサンプルの写真を図６に示す。




No. 41　　No. 42

No. 43　　No. 44

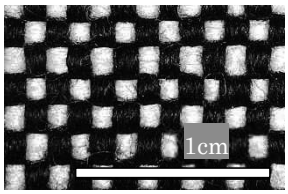
図６　布地サンプル（経糸繊度が同じで，緯糸繊度が異なる）

前述したように，No. 41 では経糸が緯糸に覆い隠されほとんど見えない状態だった。同様の経糸の繊度・密度の条件で緯糸の繊度を変えた場合，緯糸の繊度を高くすることで経糸が布表面に現れるようになった。No. 42 も No. 41 と同様に経糸がほとんど覆い隠されたが，No. 43 では経糸が完全に隠されることはなく，No. 44 では経糸がはっきりと表面に現れた。

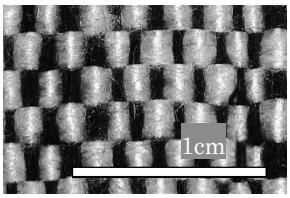
最後に，低い繊度の経糸に高い繊度の経糸を等間隔に混ぜて挿入し製織した場合について，No. 11，No. 20，No. 17，No. 43，No. 47 の 5 つのサンプルを図７に示す。

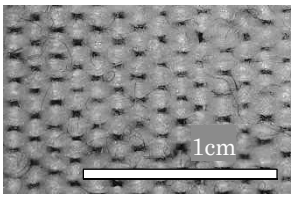
No.11は,経糸繊度を2260Dのみで構成しており,No.43, No.47,はNo.11より低い繊度の経糸のみを使用した。No.20, No.17, では，No.11の経糸2本とNo.43，No.47で使用した低い繊度の経糸8本を交互に混ぜて挿入した。5つのサンプルの緯糸はすべて同程度の繊度（No.11のみ2160D，他すべて2200D）を使用した。No.43，No.47はNo.11に比較して緯糸密度が高くなったが，No.20，No.17は，No.11の値と大きな差はなく，緯糸密度は経糸繊度の高いほうの密度に影響された値になった。繊度の違う糸を経糸に挿入したNo.20，No.17の場合でも布地には隙間ができず，地機用の杼を用いた製織でも一定の強さで打ち込み製織することができた。

No.11，No.17，No.20について，布表面に現れる経糸面積を比較した。No.17，No.20では繊度の低い経糸が多くなる分，布表面に現れる経糸の面積の割合が少なくなり，3つサンプルの中ではNo.17が最も50%に近い値になった。

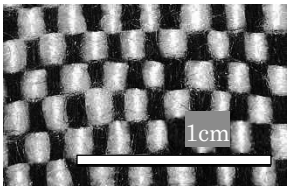


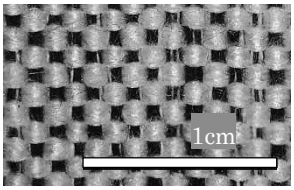

No.11（経糸：2260Dのみ）




No.20（経糸：459Dと2142D）　No.43（経糸：559Dのみ）




No.17（経糸：1130Dと2142D）No.47（経糸：1118Dのみ）

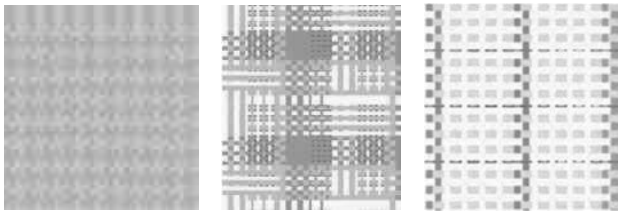
図７　布地サンプル（緯糸繊度が同じで，経糸繊度が異なる）

### ３．２　小物用布地の製織

#### ３．２．１　小物用布地３種類の製織・試作

布地サンプルの製織結果より条件を反映させ，図８に示すような3種類の小物用布地のシミュレーションを行った。また，このシミュレーション結果と布地サンプルを参考に設定した糸繊度の条件を表７～９に示す。

製織した小物用布地の写真を図９に，製織した布地を使用して試作したハンドバッグを図10に示す。



小物用布地①　小物用布地②　小物用布地③

図８　小物用布地のシミュレーション画像

表７　小物用布地①　糸繊度

| | 経糸 | | 緯糸 | |
|---|---|---|---|---|
| | ピンク | ベージュ | ピンク | ベージュ |
| 引き揃え数（本） | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 糸1本の繊度（D） | 172 | 180 | 134 | 137 |
| 合計繊度（D） | 344 | 360 | 402 | 411 |

表８　小物用布地②　糸繊度

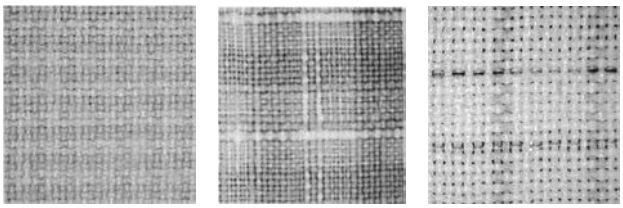
| | 経糸 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 白（太） | 白（細） | 水色（太） | 水色（細） | グレー（太） | グレー（細） |
| 引き揃え数（本） | 15 | 3 | 16 | 3 | 17 | 3 |
| 糸1本の繊度（D） | 150 | 150 | 130(×10)<br>162(×6) | 130(×1)<br>162(×2) | 130(×16)<br>171(×1) | 130(×1)<br>146(×1)<br>171(×1) |
| 合計繊度（D） | 2250 | 450 | 2272 | 454 | 2251 | 447 |

| | 緯糸 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 白（太） | 白（細） | 水色（太） | 水色（細） | グレー |
| 引き揃え数（本） | 28 | 3 | 24 | 8 | 12 |
| 糸1本の繊度（D） | 163 | 161 | 90 | 137 | 93 |
| 合計繊度（D） | 4564 | 483 | 2160 | 1096 | 1116 |

表９　小物用布地③　糸繊度

| | 経糸 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 白 | ピンク | 水色 | 緑 | ベージュ |
| 引き揃え数（本） | 17 | 18 | 10 | 11 | 15 |
| 糸1本の繊度（D） | 161(×4)<br>121(×13) | 123 | 219 | 205 | 148 |
| 合計繊度（D） | 2217 | 2214 | 2190 | 2255 | 2220 |

| | 緯糸 | | |
|---|---|---|---|
| | 白 | ベージュ | 色糸 |
| 引き揃え数（本） | 16 | 15 | 3 |
| 糸1本の繊度（D） | 106(×10)<br>126(×2)<br>231(×4) | 174(×7)<br>128(×8) | 126(×2)<br>173(×1) |
| 繊度（D） | 2236 | 2242 | 425 |



小物用布地①　　小物用布地②　　小物用布地③

図９　製織した３種類の布地

図 10　試作したハンドバッグ

### ３．２．２　小物用布地の評価

製織した 3 種類の布地の経糸・緯糸密度のシミュレーションで設定した値と織り上がった布地の 3 か所の平均密度を表 10，表 11 に示す。

経糸密度については①②③はいずれも設定値と大きな差はなく，計画したとおりに製織することができた。

緯糸密度について設定値と比較すると，①は設定値より高い値になり，②③は設定値より低い値になった。製織した布地の緯糸密度と経糸密度を比較すると，どれも値に大きな差はなく，③は同じ値になった。

①では布地サンプル No.4 を参考にシミュレーションの条件を設定し，経糸と緯糸に同程度の繊度の糸を使用したが，No.4 より低い繊度の緯糸を使用したため密度が高くなった。経糸密度と比較した場合，値にほとんど差はなく，当初の目的どおり 1 パターンの縦横比が同程度の布地を製織することができた。

表 10　経糸密度の比較（本/inch）

| 小物用布地番号 | ①4Dbox | ②織り上がり | ①−② |
|---|---|---|---|
| ① | 45.00 | 44.12 | 0.88 |
| ② | 21.00 | 21.39 | 0.39 |
| ③ | 15.00 | 14.71 | -0.29 |

表 11　緯糸密度の比較（本/inch）

| 小物用布地番号 | ①4Dbox | ②織り上がり | ①−② |
|---|---|---|---|
| ① | 40.00 | 45.01 | 5.01 |
| ② | 23.09 | 20.50 | -2.59 |
| ③ | 18.89 | 14.71 | -4.18 |

（1 inch=2.54cm）

②では緯糸密度は設定値より低くなった。緯糸におおよそ 3 種類の繊度を使用しているため，測定した箇所によって値にばらつきがあったが，図 11 に示すように，シミュレーションした画像と布地の 1 パターンの大きさを比較すると製織した布地のほうが経方向に長く，シミュレーションで設定した値より緯糸密度が低いことが確認できた。

③では参考とした布地サンプル No.38 に使用した緯糸に加えて，低い繊度の緯糸も織り込まれているが，緯糸密度は設定値より低くなった。②③の緯糸密度が低くなったのは，布地サンプルの製織結果で予想したように，布地サンプルに比較して通し幅が 3 倍ほど広くなったことが一因と考えられた。

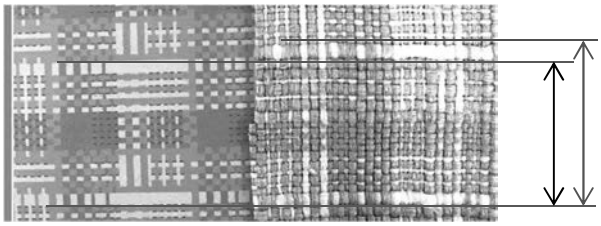


図 11　小物用布地②のシミュレーション画像（左）と製織した布地（右）の比較

## ４　おわりに

引き揃え糸を経糸及び緯糸として使用した場合の地機での製織について，糸の繊度や密度等，製織における各条件を比較し，傾向を把握してデータを蓄積することができた。また，引き揃え糸のサンプル及び布地サンプルを製作したことで，4DboxPLANS（トヨシマビジネスシステム）に糸データ・密度等の入力ができ，手つむぎ糸を引き揃え糸として使用し，地機で製織する場合においてのより正確なシミュレーションが可能になった。

今回は経糸と緯糸の布表面に現れる面積が同程度になる布地の製織を目的として評価を行ったが，経糸もしくは緯糸のどちらかの面積が高い場合の布地についても，今回とは異なるデザインでの製織が考えられるため，製織条件について引き続き検討していきたい。

経常研究

# 白化粧の品質に及ぼす化粧掛け条件の影響

山ノ井　翼*　　大和　弘之*　　塚本　準一*

Effect of Engobe Condition on Quality of White Slip Coat

YAMANOI Tsubasa, YAMATO Hiroyuki and TSUKAMOTO Junichi

化粧掛けは器の代表的な加飾技法の一つであり，素朴で生地の質感が活かされた，市場でも人気のあるデザインの一つである。しかし，白化粧の質感を高めるために化粧泥の濃度を高くすると，生地と化粧泥の収縮率の違いなどにより剥離やヒビが発生する事例があり，製陶事業者からは，白化粧の質感を保ちつつ実用的な濃度範囲を把握し，剥離やヒビを生じさせない白化粧掛け条件の確立が求められている。本研究では，化粧泥の濃度や焼成温度等の条件が，剥離やヒビなど器への白化粧の品質に及ぼす影響について調べるとともに，白化粧の急激な熱変化に対する耐性を確認した。その結果，化粧泥濃度については濃度が濃くなると剥離，ヒビ等の発生が認められ，実用的な濃度範囲をボーメ度を指標として数値化し，良好な化粧掛け条件を明らかにした。また，白化粧の熱衝撃特性を評価し一般的な食器としての使用には問題ないことを示した。

Key words：化粧掛け，白化粧，化粧泥濃度，ボーメ度，熱衝撃特性

## 1　はじめに

化粧掛けは器の代表的な加飾技法の一つである。主な手法は粉引き（こひき）や刷毛目（はけめ）であり，益子焼においては，下地に鉄分の多い赤土等を用い，その上に白化粧をする場合が多い。化粧掛けで加飾された器は，素朴で生地の質感が活かされた，市場でも人気のあるデザインの一つである。しかし，白化粧の質感を高めるために化粧泥の濃度を高くすると，生地と化粧泥の収縮率の違いにより剥離やヒビが発生する事例があり，各製陶事業者は，経験に基づいて新商品開発を行う等，対応に苦慮している。そのため、当該業者からは，白化粧の質感を保ちつつ実用的な濃度範囲を把握し，剥離やヒビを生じさせない白化粧掛け条件の確立が求められている。

そこで，本研究では県内陶磁器業界でよく使用されている2種類の粘土（益子水簸土及び益子赤土）で製作した陶器への化粧掛けについて，化粧泥の濃度や焼成温度等の条件が，剥離やヒビなど器への白化粧の品質に及ぼす影響を調べるとともに，白化粧の急激な熱変化に対する耐性について検討した。具体的には，試験体による白化粧の外観評価，熱衝撃特性評価を行った。

＊　栃木県産業技術センター窯業技術支援センター

## 2　研究の方法

### 2．1　各種条件による白化粧の外観評価

本研究で用いる粘土は，益子水簸土及び益子赤土（いずれも益子焼協同組合が製造）の2種類とした。化粧掛けする試験体は，高さ 80㎜×横幅 50㎜×厚さ 5㎜ で先端を器のフチを模した形状とし，石膏型を用いて成形した。この試験体を同じく石膏型で成形した土台に立て，浸し掛けで化粧掛けを行った。化粧泥は，組合白泥（益子焼協同組合が製造）及び蛙目粘土泥（蛙目粘土をポットミルで 3 時間調製）を用い，「薄い」「普通」「濃い」「特濃」と 4 種類の濃度の化粧泥となるようそれぞれ水分量を調整した。これらの濃度はボーメ比重計により比重（ボーメ度）を測定した。ただし，特濃は比重が測定不能であったため，一般的なロクロ成形における「手泥」相当の濃度とした。本焼成条件は，益子焼で最も多く用いられる条件である 1280℃還元焼成及び，本焼成温度の影響を調べるため 1280℃と 1200℃（共に酸化焼成）の 3 条件とした。作製した試験体は，自然乾燥後，素焼後，本焼成後に目視による外観評価を行い，剥離やヒビの有無を確認した。表１に化粧掛け条件を，図１に試験体作製及び評価手順を示す。

また，この試験体における生地及び化粧泥の収縮率を測定した。成形した生地及び化粧掛けした生地に 30㎜ 幅の痕を付け，素焼後の寸法変化を計測し収縮率とした。

なお，試験体は，素焼及び酸化焼成を超高速昇温電気

炉（㈱モトヤマ SC-2035D）で，還元焼成をガス窯（0.2 ㎥，㈲益子窯炉）で行った。

表１　化粧掛け条件

| | |
|---|---|
| 生地 | 益子水簸土、益子赤土（共に益子焼協同組合製） |
| 化粧泥 | 組合白泥、蛙目粘土泥 |
| 化粧泥濃度 | 薄い（35）、普通（55）、濃い（70）、特濃（−）<br>※カッコ内はボーメ度（特濃は測定不能） |
| 本焼成条件 | 1280℃（酸化、還元）、1200℃（酸化） |

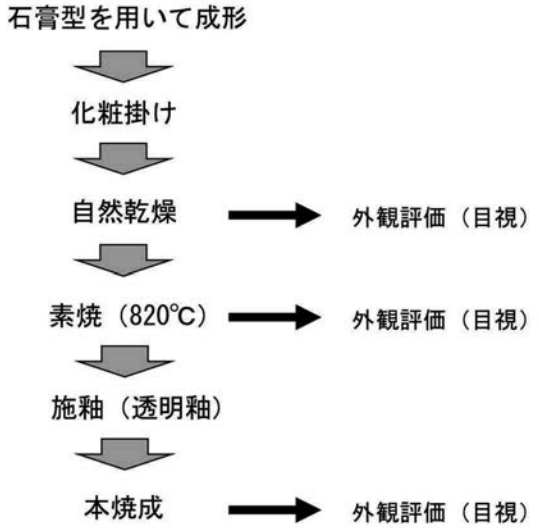



図１　試験体製作手順及び評価手順

## ２．２　熱衝撃特性評価

本焼成後の各試験体について，JIS S2400 の試験方法に基づく熱衝撃試験を行った。主に一般的な食器での評価に用いられる試験温度差（120～128℃：天火用（200℃以下））で行った。図２に試験手順を示す。

図２　熱衝撃試験手順

## ３　結果及び考察

### ３．１　各種条件による白化粧の外観評価

表２に化粧掛けした試験体の焼成結果を，図３に本焼成後の試験体を示す。化粧掛け条件により，素焼後に剥離やヒビの発生が認められた。これらは本焼成後も剥離やヒビの状態に変化は見られなかった。組合白泥では化粧泥濃度が「特濃」において 1280℃酸化焼成の条件のみヒビが発生し，他の焼成条件ではヒビが発生しなかったが，「特濃」は濃度が高く化粧掛け時における作業条件の制御が困難であったことが要因の一つとして考えられる。組合白泥の配合の詳細は公開されていないが，陶石やカオリン等を主原料として一般的に安定した品質の化粧泥として作られていることが想定されるため，実用的な濃度においては剥離やヒビが発生しなかったと考えられる。

表２　試験体の焼成結果

| 生地 | 化粧泥 | 濃度（ボーメ度） | 本焼成条件 | 外観（本焼成後） | 状態 |
|---|---|---|---|---|---|
| 益子水簸土 | 組合白泥 | 薄い（35） | 1280℃酸化 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | |
| | | 濃い（70） | | ○ | |
| | | 特濃（−） | | × | ヒビ |
| | | 薄い（35） | 1280℃還元 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | |
| | | 濃い（70） | | ○ | |
| | | 特濃（−） | | ○ | |
| | | 薄い（35） | 1200℃酸化 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | |
| | | 濃い（70） | | ○ | |
| | | 特濃（−） | | ○ | |
| | 蛙目粘土泥 | 薄い（35） | 1280℃酸化 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | ヒビ化粧 |
| | | 濃い（70） | | × | ヒビ |
| | | 特濃（−） | | × | 剥離 |
| | | 薄い（35） | 1280℃還元 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | ヒビ化粧 |
| | | 濃い（70） | | × | ヒビ |
| | | 特濃（−） | | × | 剥離 |
| | | 薄い（35） | 1200℃酸化 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | ヒビ化粧 |
| | | 濃い（70） | | × | ヒビ |
| | | 特濃（−） | | × | 剥離 |
| 益子赤土 | 組合白泥 | 薄い（35） | 1280℃酸化 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | |
| | | 濃い（70） | | ○ | |
| | | 特濃（−） | | × | ヒビ |
| | | 薄い（35） | 1280℃還元 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | |
| | | 濃い（70） | | ○ | |
| | | 特濃（−） | | ○ | |
| | | 薄い（35） | 1200℃酸化 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | |
| | | 濃い（70） | | ○ | |
| | | 特濃（−） | | ○ | |
| | 蛙目粘土泥 | 薄い（35） | 1280℃酸化 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | ヒビ化粧 |
| | | 濃い（70） | | × | ヒビ |
| | | 特濃（−） | | × | 剥離 |
| | | 薄い（35） | 1280℃還元 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | ヒビ化粧 |
| | | 濃い（70） | | × | ヒビ |
| | | 特濃（−） | | × | 剥離 |
| | | 薄い（35） | 1200℃酸化 | ○ | |
| | | 普通（55） | | ○ | ヒビ化粧 |
| | | 濃い（70） | | × | ヒビ |
| | | 特濃（−） | | × | 剥離 |

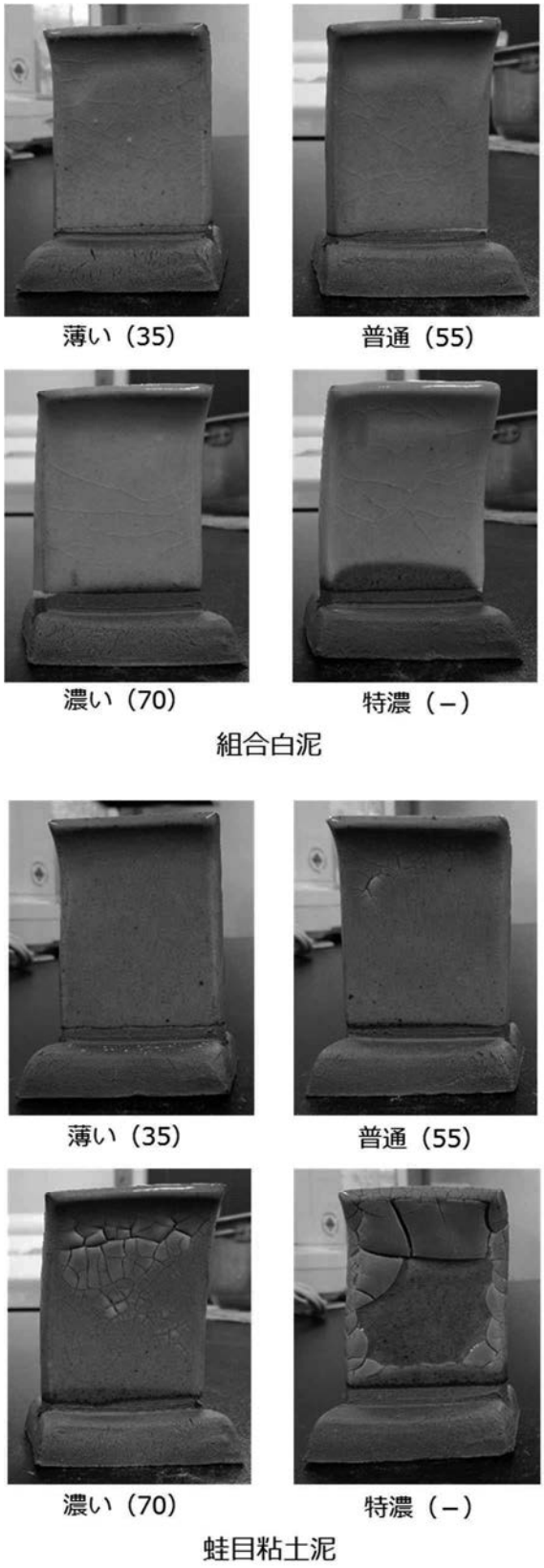



図３　本焼成後の試験体
（益子赤土、1280℃、還元焼成）

一方，蛙目粘土泥では化粧泥濃度が「普通」，「濃い」でヒビが，「特濃」で剥離が発生したが，「普通」でのヒビは，薄いヒビを敢えて見せる蛙目粘土泥特有の「ヒビ化粧」となった。蛙目粘土泥は粘土単体の化粧泥であるため，安定性が低く組合白泥と比べて剥離やヒビが発生しやすい結果となったと考えられるが，蛙目粘土泥は「ヒビ化粧」の質感が特徴であることから，他原料を加えて安定化を図ることは行わずに，実用的な濃度範囲で用いることが適切であると考えられる。

また，形状的に試験体先端のフチ内側部に化粧泥が濃く掛かり，ヒビが発生しやすくなったことから，実際の器に化粧掛けする際は，その点を考慮した化粧泥の濃度調整が必要である。

次に，生地と化粧泥について素焼での収縮率を測定した結果を表３に示す。益子水簸土が 5.8%，益子赤土が 6.2%となり，化粧泥は濃度により組合白泥が 4.1%～5.0%，蛙目粘土泥が 4.0%～5.1%の値となったが，剥離やヒビが発生する濃度と収縮率との間に相関関係は見られなかった。一般的に，吸水の大きい原料を多く含むほど収縮率は大きくなり，乾燥・焼成時の変形が大きくなるため，生地と化粧泥の収縮率の差が大きいと，両者の変形量の差によりヒビや剥離が発生する。ただし，化粧泥の濃度が濃いと化粧泥の層が厚くなり，収縮率に関わらず乾燥・焼成時の変形が大きくなるため，ヒビや剥離が発生しやすいとされていることから[1)]，今回の化粧泥濃度が「濃い」及び「特濃」の試料に関する結果においても，乾燥・焼成時の変形が要因であると考えられる。

表３　生地及び化粧泥の収縮率

| 生地 | 化粧泥 | 濃度（ボーメ度） | 収縮率［%］ | 生地のみとの差［%］ |
|---|---|---|---|---|
| 益子水簸土 | 生地のみ | | 5.8 | － |
| | 組合白泥 | 薄い（35） | 4.7 | 1.1 |
| | | 普通（55） | 5.0 | 0.8 |
| | | 濃い（70） | 5.0 | 0.8 |
| | | 特濃（－） | 4.2 | 1.6 |
| | 蛙目粘土泥 | 薄い（35） | 4.0 | 1.8 |
| | | 普通（55） | 4.2 | 1.6 |
| | | 濃い（70） | 4.5 | 1.3 |
| | | 特濃（－） | 4.5 | 1.3 |
| 益子赤土 | 生地のみ | | 6.2 | － |
| | 組合白泥 | 薄い（35） | 4.7 | 1.5 |
| | | 普通（55） | 4.6 | 1.6 |
| | | 濃い（70） | 4.7 | 1.5 |
| | | 特濃（－） | 4.2 | 2.0 |
| | 蛙目粘土泥 | 薄い（35） | 4.8 | 1.4 |
| | | 普通（55） | 4.5 | 1.7 |
| | | 濃い（70） | 5.1 | 1.1 |
| | | 特濃（－） | 4.2 | 2.0 |

### ３．２　熱衝撃特性評価

２．２に示した方法にて，熱衝撃試験を行った結果，全ての試験体において試験の前後でヒビ等の外観の変化は認められなかった。

ただし，本研究で実施した試験条件は JIS 規格の中で

最も緩い条件であり，また試験温度差が 200℃を超えると，その後の曲げ強度が低下することが報告されていることから[2)]，より厳しい条件で検証していくことも必要であると考えられる。

## 4　おわりに

白化粧の品質に及ぼす化粧掛け条件について，生地，化粧泥，化粧泥濃度，本焼成条件を変えた試験体を作製して検討した。その結果，生地，本焼成条件は影響が認められなかった。化粧泥濃度については濃度が濃くなると剥離，ヒビ等の発生が認められ，実用的な濃度範囲をボーメ度を指標として数値化し，良好な化粧掛け条件を明らかにすることができた。また，白化粧の熱衝撃特性について，一般的な食器としての使用には問題ないことが示された。

## 参考文献

1) https://www.aitohko.com/manual/toki/t21.html
2) 西川孝ら：″三重県工業研究所研究報告 No.37″，96-99，(2013)

令和２（2020）年度

# 栃木県産業技術センター研究報告

第１８号

Reports of Industrial Technology Center of Tochigi Prefecture

No.18 (2021)

発　行　　令和３（2021）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

ＴＥＬ（028）670-3391

ＦＡＸ（028）667-9430

VERY GOOD LOCAL

とちぎ