



栃木県元気ニコニコ室長
とちまるくん

ISSN 1349-2608
No. 19 (2022)

令和3（2021）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)

- 難削材のエンドミル加工へのMQLの適用(航空宇宙分野) 1
- 射出成形におけるランナーの工程内リサイクルに関する研究(自動車分野) 6
- 「夢ささら」の原料米特性に関する研究(フードバレーとちぎ) 11

II 共同研究 (実施：1テーマ)

- 米菓の食感改質技術に関する研究 15

III 受託研究 (実施：10テーマ)

- 県産トウガラシのおいしさの見える化に向けた前処理法・測定条件の確立 19
- 二軸オープンロール機を用いて作製したセルロースナノファイバーマスターバッチの性能
評価 24

非公開：8テーマ

IV 重点研究 (実施：2テーマ)

- 金属3Dプリンタ造形品の構造部材適用に向けた耐久性、信頼性に関する研究 31
- 超高分子量ポリエチレン配向フィルムの積層成形による高弾性率プラスチック成形体作製技術の
開発 35

V 経常研究（実施：9テーマ）

| | |
|---------------------------|----|
| ● 加速度センサを用いた工具摩耗推定方法の開発 | 39 |
| ● 測定手法の違いによる円筒内形状測定結果への影響 | 45 |
| ● データ収集・解析システムの機能拡張 | 51 |
| ● スマートグラスを用いた作業支援検証に関する研究 | 57 |
| ● 生姜辛味成分の簡易分析法の開発 | 62 |
| ● 解し織のデザインと緋の効果に関する研究 | 66 |
| ● 切削条件が透明アクリル樹脂の透明度に及ぼす影響 | 70 |
| ● つづれ織り技法による紬織物製品の開発 | 74 |
| ● 陶器成形用石膏型製作の高精度化に関する研究 | 79 |

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：戦略3産業（自動車、航空宇宙、医療福祉機器産業）、未来3技術（AI・IoT・ロボット、光学、環境・新素材技術）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

- Application of Minimum Quantity Lubrication to End Milling of Difficult-to-Cut Materials 1
- Study on In-Process Recycling of Runner in Injection Molding 6
- Research on the Characteristics of Rice "Yumesasara" for Sake Brewing Developed by Tochigi Prefecture 11

II Cooperative Research

- Research on Texture Modification Technology for Rice Crackers 15

III Contract Research

- Establishment of the Pretreatment Method and the Measurement Condition for Visualization of the Taste of *Capsicum Annum* from Tochigi Prefecture 19
- Evaluation of Cellulose Nanofiber/Polypropylene Master Batches Compounded using Open Roll Continuous Kneader 24

IV Selected Research

- Study on Durability and Reliability for Application to Structural Members of Metal 3D Printer 31
- Development of High Elastic Modulus Plastic by Lamination Molding of Ultra-High Molecular Weight of Polyethylene Drawn Film 35

V Ordinary Research

- Development of in-Process Tool Wear Monitoring Method by using Accelerometer 39
- Effect of Differences in Measurement Methods on Results of Measuring the Shape of the Inside of a Cylinder 45
- Enhancements in the Data Collection / Analysis System 51
- Verification of Support by Smart Glasses 57
- Development of Simplified Analysis Method for Pungent Components in Ginger 62
- Research on HOGUSHI-ORI Design and the Effect of KASURI 66
- Effect of Cutting Conditions on the Transparency of Transparent Acrylic Resin 70
- Development of Tsumugi Textile Products by Tapestry Weaving 74
- Fabrication of Gypsum Molds for Making Precision Pottery 79

I 重点共同研究

Selected Cooperative Research

重点共同研究（航空宇宙分野）

難削材のエンドミル加工への MQL の適用

近藤 弘康* 稲澤 勝史* 曾田 将来*
高野 直史** 小嶋 広光** 小松 弘樹**

Application of Minimum Quantity Lubrication
to End Milling of Difficult-to-Cut Materials
KONDO Hiroyasu, INAZAWA Katsufumi, SOTA Masaki,
TAKANO Naofumi, KOJIMA Hiromitsu and KOMATSU Hiroki

本研究では、MQL を用いてチタン合金のエンドミル加工における工具の長寿命化を実現するため、エンドミルとノズルの距離や切削方向に対するノズルの方向が工具寿命に及ぼす影響を調査した。その結果、一定以上ノズル距離が長くなるとオイルミストの効果が損なわれ急激に摩耗が進行することや、刃先が被削材から離脱してからオイルミストが作用するまでの時間が長いノズル方向ではオイルミストの効果が低減することが明らかになった。そして、航空機部品の実加工を想定した加工モデルに対して MQL の適用を行った結果、加工機の差異に関係なく高圧クーラントに比べ 10 倍以上の長寿命を実現した。

Key words: MQL, エンドミル加工, チタン合金, 工具摩耗, 航空機部品

1 はじめに

ボーイング 787, エアバス 350 等の新型航空機では、CFRP の利用増に伴い、熱膨張率や電蝕の問題から CFRP と接する金属部材にチタン合金が多用されている。

チタン合金やステンレス鋼などに代表される難削材は熱伝導率が小さく、刃先温度が高温になる等の要因のため、工具寿命が著しく短く、部品製造コストにおける工具費の割合が高くなっており、工具の長寿命化によるコスト低減が求められている。

航空機部品サプライヤが難削材の切削加工を行う際、切りくず排出や冷却を目的として高圧クーラントを用いた加工が行われているが、更なる工具の長寿命化のため、微量の切削剤を圧縮空気とともにオイルミストとして供給する MQL (Minimal Quantity Lubrication) 加工が着目されている。これまで MQL の作用メカニズムや難削材に対する適用例が報告され、チタン合金を対象としたエンドミル加工において、MQL 加工が水溶性油剤による湿式加工よりも長寿命である結果¹⁾が得られており、有効性が期待できる。

しかしながら、高圧クーラントと MQL を比較した報告や、オイルミストノズル（以下、ノズル）の設置条件と工具寿命の関係を調査した報告は少なく、MQL 導入効果や現場における段取り方法が不明であるため、県内中小

企業における難削材への MQL の適用は一部の加工に留まっている。

そこで本研究では、MQL におけるエンドミルとノズルの距離（以下、ノズル距離）や切削方向に対するノズルの方向（以下、ノズル方向）が工具寿命に与える影響を実験的に明らかにすることで、MQL を現場に適用する方法を検討し、チタン合金のエンドミル加工における工具の長寿命化を目指した。

2 研究の方法

2.1 ノズル距離と油付着量

エンドミル加工に外部給油方式の MQL を適用する場合、加工機の主軸にノズルを設置し、エンドミルから一定程度離れた位置からオイルミストを供給する方法が想定される。

その場合、オイルミストの効果を高めるためにはノズル距離を可能な限り近づけることが望ましいが、ノズル距離が短くなると部品へのノズルの干渉や自動工具交換装置(ATC)を用いた際の衝突が懸念される。そこで、ノズル距離を変えた際の油の付着量を把握するため、ろ紙と精密はかりを用いた油付着量計測を実施した。

オイルミスト装置(フジ BC 技研 Bluebe Model FK)を用いて、圧縮空気流量 100L/min, エアー圧力 0.6MPa, 供給油量 30mL/h の条件で、ノズル距離を 10mm から 150mm まで 20mm 間隔で変え、φ6mm のろ紙に 3 秒間オイルミ

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

** 東都工業株式会社

ストを吐出させた際のろ紙の重量変化を測定した。

なお、ろ紙はアドバンテック東洋 定量ろ紙 No. 5C, 精密はかりはメトラー・トレド AT400 を用いた。

2. 2 ノズル設置条件と工具寿命

部品のエンドミル加工を行う際、部品形状に伴って様々な方向から切削を行う必要があるため、外部給油方式のMQLを適用する場合、加工パスに応じてオイルミストの供給方向が変化することが考えられる。

そのため、ノズル距離及びノズル方向を変えた際の工具寿命を把握するため、5軸マシニングセンタ (DMG 森精機 DMF180) を用いて、64チタン圧延材 (AMS4911) の摩耗試験を実施し、摩耗幅と切削力を評価した。

工具・切削条件については航空機部品の中仕上げ加工を想定して表1のとおりとし、MQLのノズル距離は50mm, 90mm, 120mm, 150mmの4条件で試験を行った。ノズル方向は図1のとおり、エンドミルの進行方向に対して前方からオイルミストを当てる方向を0°として、0°, 180°, 270°の3条件で試験を行った。

また、ノズル角度は図2のとおり30°とし、前項と同様に圧縮空気流量100L/min, エアー圧力0.6MPa, 供給油量30mL/hの条件で、オイルミストを供給した。

なお、摩耗幅はマシニングセンタ内に固定したカメラを用い、各切削距離の刃先の定点観察像から算出した。

表1 工具・切削条件

| | | |
|------|---------|-----------------|
| 工具 | 径 | 10mm |
| | 形状 | ラジアスエンドミル(R1.0) |
| | コーティング | TiAlN |
| | 母材 | 超硬 |
| | 刃数 | 2枚刃 |
| 切削条件 | 切削速度 | 100mm/min |
| | 1刃切込み | 0.1mm/tooth |
| | 軸方向切込み | 3.0mm |
| | 半径方向切込み | 1.0mm |
| | 給油方法 | MQL, 高圧クーラント |

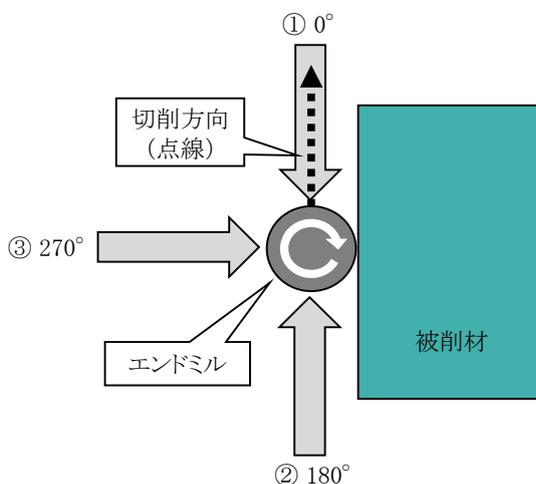


図1 ノズル方向

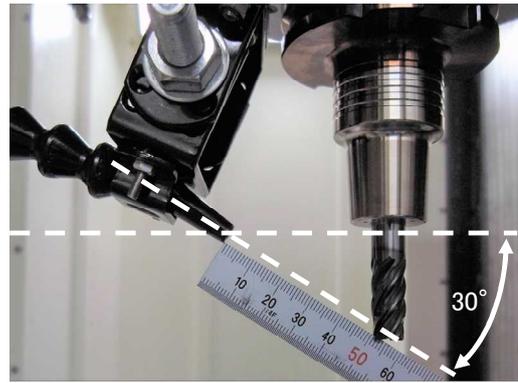


図2 ノズル角度

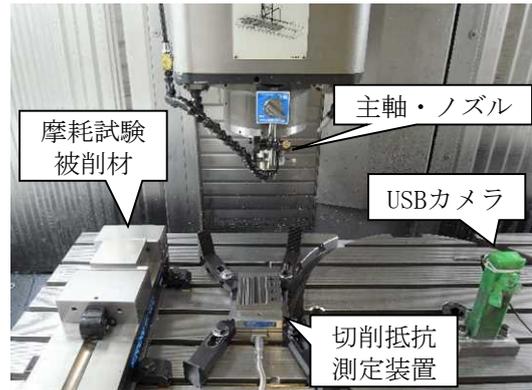


図3 摩耗試験時の構成

切削力は切削抵抗測定装置 (日本キスラー 9257B) を用いて測定した。加工機上における摩耗試験時の構成を図3に示す。

2. 3 MQLの現場適用方法の検討

航空機部品の実加工を想定し、図4に示す加工モデルに対して、高圧クーラントよりも長寿命が期待できるノズル設置条件 (ノズル距離・ノズル方向) について検討を行った。

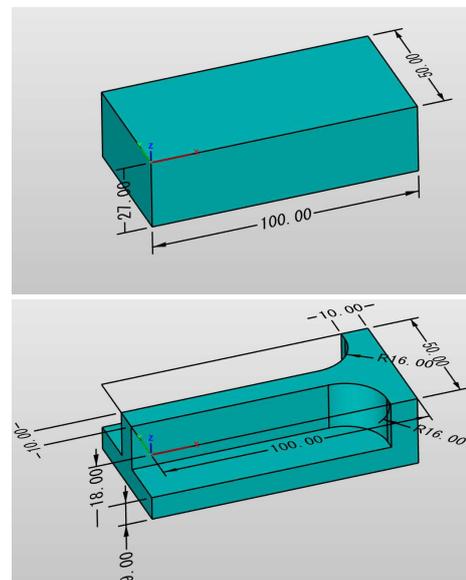


図4 MQL適用対象の加工モデル (上: 被削材, 下: 加工モデル)

2. 4 実証試験

前項で検討したノズル設置条件のMQL加工の効果を確認するため、マシニングセンタを用いて、図4の加工モデルを多数個切削し、摩耗幅の測定を行った。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 (DMG 森精機 DMF180, 牧野フライス a61nx) を用いた。それぞれ、加工機 1, 加工機 2 と呼称する。

加工パスについては、図5のとおり輪郭加工のオフセットを20回行うとともに、軸方向切込み3mmを6段行うことで、側面切削の中仕上げ加工を繰り返し行うパスを用いた。なお、切削長については、加工モデル1個につき20.2mの長さとなる。

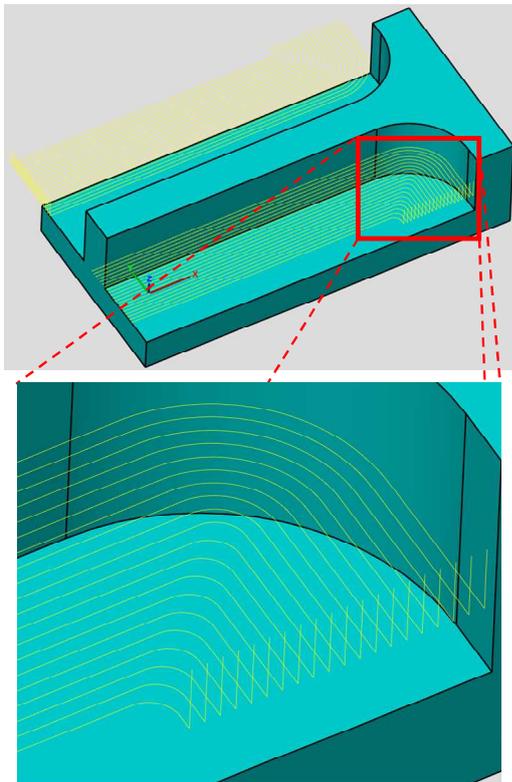


図5 実証試験加工パス 1 段階
(上：全体，下：拡大)

また、被削材は64チタン圧延材 (AMS4911) とし、工具・切削条件については表1のとおりとし、ノズル距離は50mm、ノズル角度は30°とした。なお、オイルミスト供給条件及び摩耗幅の算出については2.2と同様の条件・手法を用いた。

3 結果及び考察

3. 1 ノズル距離と油付着量

ノズル距離と油付着量の関係を図6に示す。ノズル距離10mmと30mmでは殆ど付着量は変わらない一方、50mm以降は大きく低下する結果となった。これは、ノズル距離が遠くなるにつれて、オイルミストが円錐状に広がる

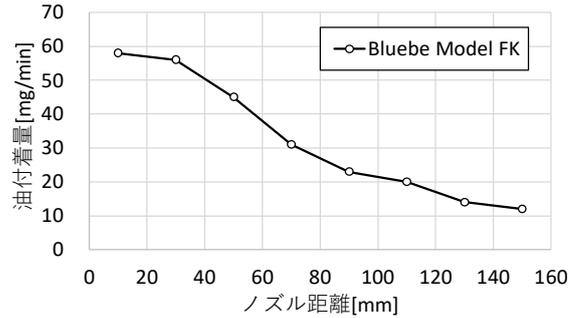


図6 ノズル距離と油付着量の関係

ことに伴い、単位面積あたりの油量が低下したものと考えられる。

以上のことから、ノズル方向10mm・30mmに比べて油付着量が低下する50mm以降を工具寿命の調査対象とした。

3. 2 ノズル設置条件と工具寿命

ノズル方向180°における切削距離に対するノズル距離と摩耗幅の関係を図7、ノズル距離と切削力の関係を図8に示す。ノズル距離50mm・90mmは切削長10m以降、摩耗の進行が抑制され、高圧クーラントに比べて摩耗幅が小さい傾向を示した一方、120mm・150mmは早期に摩耗が進行し、試験継続が困難になった。この結果から、オイルミストの効果を得られる場合は摩耗進行を大幅に抑制するものの、一定以上ノズル距離が長くなると、オ

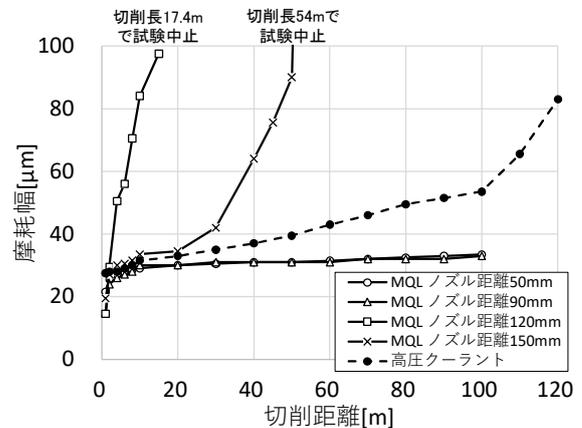


図7 ノズル距離と摩耗幅 (ノズル方向180°)

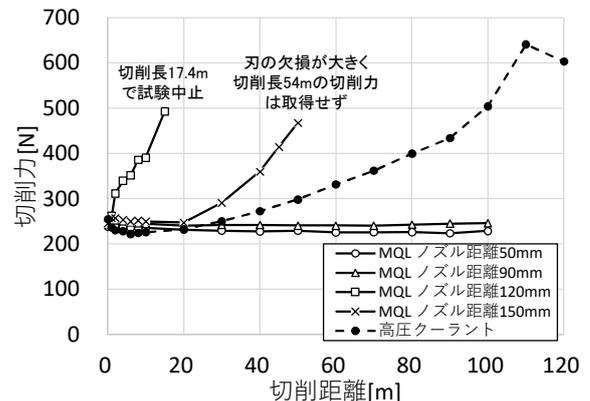


図8 ノズル距離と切削力 (ノズル方向180°)

イルミストの効果が損なわれ、急激に摩耗が進行することが伺える。

次に、ノズル方向 180° にてオイルミストの効果が得られたノズル距離 50mm と 90mm において、ノズル方向を比較した結果を図 9～12 に示す。ノズル距離 50mm の場合、すべての方向で切削長 10m 以降摩耗の進行が抑制され高圧クーラントに比べ摩耗幅が小さい傾向を示した。一方、ノズル距離 90mm の場合、ノズル方向 180°、270° は摩耗の進行が抑制されたが、0° は早期に摩耗が進行する結果となった。

笹原らは、刃先が被削材から離脱した直後の位置で圧縮空気を噴射すると、切削で生じた凝着物が温度低下により固着する前に除去が可能であると推測しており²⁾、今回の試験において、刃先が被削材から離脱した後、オイルミストが作用するまでの時間が長いノズル方向 0° では、凝着物を除去できず、工具と切りくず、被削材間に凝着物がかみ込み、摩耗を促進した可能性が考えられる。

なお、ノズル距離 50mm においてノズル方向 0° で摩耗の進行が抑制されている点については、90mm に比べてノズル距離が近くなることで、単位面積あたりの油供給量が多く、かつエアーストが大きいいため、刃先の温度が一定程度低下し、効果的に凝着物を除去できたものと考えられる。

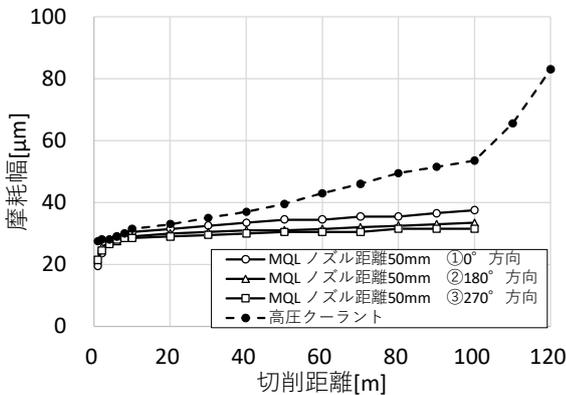


図 9 ノズル方向と摩耗幅 (ノズル距離 50mm)

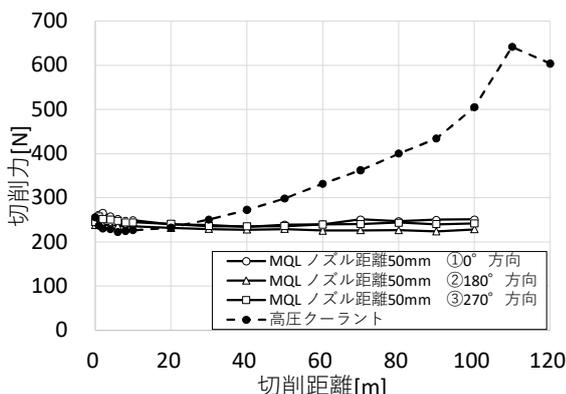


図 10 ノズル方向と切削力 (ノズル距離 50mm)

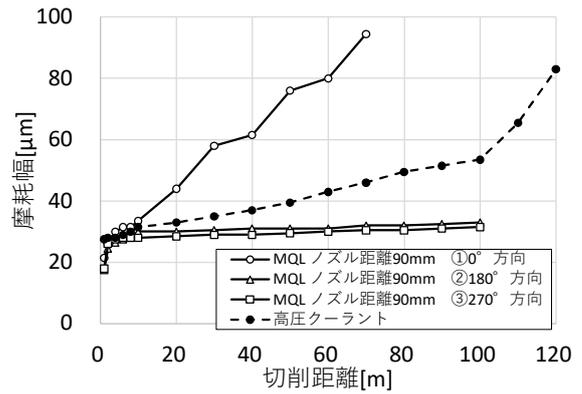


図 11 ノズル方向と摩耗幅 (ノズル距離 90mm)

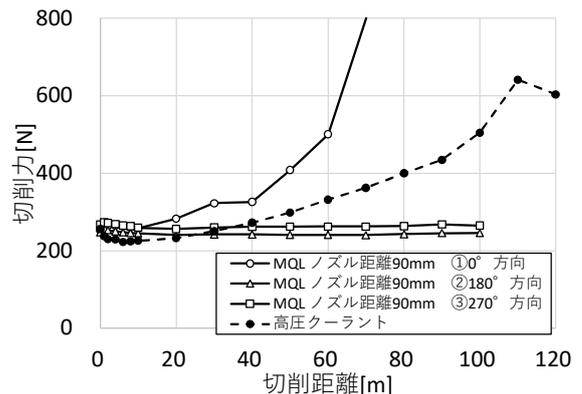


図 12 ノズル方向と切削力 (ノズル距離 90mm)

3. 3 MQL の現場適用方法の検討

図 4 に示す加工モデルに対して MQL を適用する場合、モデルの立壁によりオイルミストが遮られる可能性が考えられる。このモデルをすべてダウンカットで加工を行い、ノズル 1 本でオイルミストを供給する場合、図 13 のとおりモデルの左側にノズルを設置することで、立壁にオイルミストが遮られることなく、概ね図 1 の 0°、180°、270° の 3 方向で加工が可能と考えられる。

また 3. 2 の結果から、ノズル距離を 50mm にすることで、従来手法である高圧クーラントよりも大幅に寿命を延ばすことが期待できる。

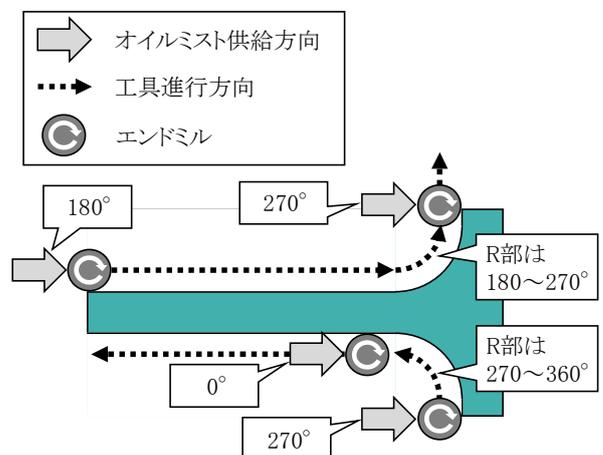


図 13 工具進行方向とノズル方向

3. 4 実証試験

加工機 1・2 を用い取得した切削距離に対する摩耗幅の推移を図 14 に示す。どちらの加工機においても MQL は摩耗の進行が緩やかであり、高圧クーラントに比べて摩耗幅が小さいことが伺える。

切削したモデルの個数と摩耗幅の関係に着目すると、高圧クーラントは加工機 1 では 3 個 (切削長 60.6m) , 加工機 2 では 1.5 個 (30.3m) で摩耗幅が 50 μ m を超えているもの、MQL は加工機 1・2 ともに 8 個 (切削長 161.6m) において摩耗幅は 40 μ m 以下に留まっている。

ここで、工具の摩耗幅が 50 μ m を超えた場合、摩耗が急激に進行することがわかる。これより、各条件の摩耗幅の直線部データから近似直線を作成し、近似直線が 50 μ m を超えた切削長を推定工具寿命とした。その結果、推定工具寿命は表 2 のとおりとなり、加工機の差異に関係なく高圧クーラントに比べ 10 倍以上の長寿命を実現した。

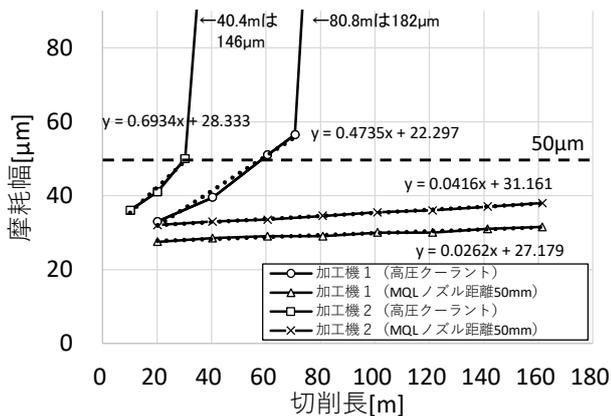


図 14 実証試験結果

表 2 推定工具寿命

| | 給油方法 | 推定工具寿命 [m] |
|------|---------------|------------------|
| 加工機1 | 高圧クーラント | 58.5 |
| | MQL ノズル距離50mm | 871.0 (14.9倍) |
| 加工機2 | 高圧クーラント | 31.2 |
| | MQL ノズル距離50mm | 452.9 (14.5倍) |

4 おわりに

本研究では、MQL を用いてチタン合金のエンドミル加工における工具の長寿命化を実現するため、エンドミルとノズルの距離や切削方向に対するノズルの方向が工具寿命に与える影響を調査し、航空機部品の実加工を想定した加工モデルに対してノズル設置条件を検討することで、以下の知見を得た。

- (1) 一定以上ノズル距離が長くなると、オイルミストの効果が損なわれ、急激に摩耗が進行する。
- (2) 刃先が被削材から離脱してからオイルミストが作用するまでの時間が長いノズル方向では、オイルミスト効果が低減する。
- (3) 航空機部品の実加工を想定した加工モデルに対して MQL の適用を行った結果、加工機の差異に関係なく高圧クーラントに比べ 10 倍以上の長寿命を実現した。

参考文献

- 1) 藤原順介ほか：“日本機械学会論文集”，82 (835), pp.15-00556, (2016)
- 2) 笹原弘之ほか：“精密工学会誌”，66 (1), pp.80-84, (2000)

重点共同研究（自動車分野）

射出成形におけるランナーの工程内リサイクルに関する研究

大森 和宏* 男澤 嶺* 益子 朱音* 渡辺 克人** 八丁 佳功**
池添 亮*** 太田 好和*** 小橋川 浩*** 谷越 健太***

Study on In-Process Recycling of Runner in Injection Molding
OMORI Kazuhiro, OTOKOZAWA Ryo, MASHIKO Akane, WATANABE Katsuto, HATCHO Yoshinaru,
IKEZOE Makoto, OTA Yoshikazu, KOBASHIKAWA Hiroshi and TANIKOSHI Kenta

様々な射出成形条件で成形したランナーから圧縮成形により作製した試験片を用いて引張試験を行い、射出成形条件におけるランナーの劣化要因を調査した。バージン材とランナーを比較すると、ランナーでは引張ひずみの低下が起り、シリンダ温度が低く、射出速度が速いほどひずみの低下が顕著に現れた。保圧、金型温度は影響がなかった。低温・高速及び高温・低速の射出成形条件で作製したランナーを、リサイクル率 50%で射出成形した場合、バージン材と比較し、引張強さは同等であったが、シャルピー衝撃強さ及び引張弾性率は若干増加した。

Key words: 射出成形, ランナー, リサイクル

1 はじめに

近年の環境問題やプラスチック材料価格の高騰により、プラスチックのマテリアルリサイクルの重要性が高まっている。プラスチック成形の主流である射出成形では、生産時に金型の流路内で樹脂が固化されてきたランナーが排出されることから、粉碎したランナーを一定量バージン材と混合して製品を製造する工程内リサイクルが行われている。しかし、一度成形工程を経たランナーは、熱や流れの影響により劣化していると言われており、成形不良や破壊等のトラブルが発生することがあるため、一般的にランナー粉碎材のリサイクル率は30wt%が上限とされていることが多い。

成形工程におけるプラスチックの劣化要因としては、熱等の影響による分子鎖切断や酸化による化学劣化が主流とされてきたが、近年の研究で、成形に伴うせん断等による内部構造変化等による物理劣化要因の影響が大きいことが報告された¹⁾。射出成形工程では、金型内を流れる熔融樹脂の、厚さ方向における流速分布によりせん断応力が生じていることが知られており²⁾、ランナーはこの影響を受け劣化していると考えられる。ランナーの射出成形工程内リサイクルにおける高品質化やリサイクル率向上のためには、各射出成形条件でのランナーの劣化状況の把握や、リサイクル成形品の物性の調査

が重要である。一方、ランナーの工程内リサイクルに関する先行研究はあるものの、物理劣化に着目して行われた研究事例は少なく³⁾⁻⁵⁾、ランナーの物理劣化を評価したデータや、リサイクル射出成形の適切な条件等に関する情報が求められている。

そこで本研究では、各射出成形条件で成形したランナーの劣化状況を調べ、ランナーの劣化要因を明らかにする。また、ランナーの射出成形工程内リサイクルを行い、射出成形条件の物性に対する影響を検討したので報告する。

2 研究の方法

2.1 ランナーの劣化評価

ランナー粉碎材は、ポリプロピレン (PP) バージン材 (サンアロマー(株)製 PM600A) を用いて表 1 の成形条件で射出成形 (ダンベル試験片: 日精樹脂工業(株)製 NEX 80IV-9EG, 製品: 東洋機械金属(株)製 Si-180-6S) した後、成形品を除去し、プラスチックカッティングミル (大阪ケミカル(株)製) を用いてスプルーごと粉碎することで作製した。また、比較のため、ペレットを直接粉碎し、バージン粉碎材を作製した。

各粉碎材は、ミニテストプレス (株) 東洋精機製作所製) を用いて 180℃で 5 分間熔融させ、90℃~120℃に加熱した熱板で挟んで 5 分間保持し等温結晶化させた後、室温まで空冷し、100mm×100mm×t0.5mm のシートとした。そのシートから、試験片打抜機 (高分子計器(株)製) を用

* 栃木県産業技術センター 材料技術部

** 県南技術支援センター

*** 株式会社サカエ工業

表1 ランナー成形条件

| No | 成形品 | シリンダ温度 (°C) | 射出速度 (mm/sec) | 保圧 (MPa) | 金型温度 (°C) |
|----|------|-------------|---------------|----------|-----------|
| 1 | ダンベル | 190 | 10 | 17 | 40 |
| 2 | ダンベル | 210 | 10 | 17 | 40 |
| 3 | ダンベル | 230 | 10 | 17 | 40 |
| 4 | ダンベル | 210 | 100 | 17 | 40 |
| 5 | ダンベル | 210 | 1 | 17 | 40 |
| 6 | ダンベル | 210 | 10 | 36 | 40 |
| 7 | ダンベル | 210 | 10 | 17 | 80 |
| 8 | 製品 | 230 | 5~20 | 78 | 制御なし |

表2 一次射出成形条件

| No | 成形品 | シリンダ温度 (°C) | 射出速度 (mm/sec) | 保圧 (MPa) | 金型温度 (°C) |
|----|------|-------------|---------------|----------|-----------|
| 9 | ダンベル | 230 | 5 | 17 | 40 |
| 10 | ダンベル | 190 | 100 | 17 | 40 |

表3 二次射出成形条件

| No | ランナー粉砕材の成形条件 | シリンダ温度 (°C) | 射出速度 (mm/sec) | 背圧 (MPa) | クッション量 (mm) |
|----|--------------|-------------|---------------|----------|-------------|
| 11 | No.9 | 230 | 5 | 9 | 3 |
| 12 | No.10 | 190 | 100 | 9 | 5 |
| 13 | No.10 | 230 | 5 | 9 | 48 |
| 14 | No.10 | 230 | 5 | 18 | 7 |
| 15 | No.10 | 230 | 5 | 4.5 | 3 |
| 16 | No.10 | 230 | 5 | 9 | 3 |

いて小型ダンベル試験片を作製し、万能材料試験機（株式会社島津製作所製 AG-50KNI M2）を用いて、試験速度 10mm/min で引張試験を行った。

2.2 ランナーの工程内リサイクル

PP バージン材（サンアロマー製 PM600A）を用いて表 2 の成形条件でダンベル試験片を一次射出成形した後、成形品を除去し、粉砕機（日本化工製 SA-24）を用いてスプルーごとランナーを粉砕し、バージン材と重量比 1 : 1 で混合後、表 3 の成形条件で二次射出成形を行った。得られたランナーについては再度粉砕し、二次射出成形条件と同じ条件で三次射出成形を行った。

各射出成形で得られたダンベル試験片を用いて、引張試験及びシャルピー衝撃試験を行った。引張試験は、万能材料試験機（株式会社島津製作所製 AG-M1）を用い、引張弾性率は試験速度 0.5mm/min で、引張強さは試験速度 10mm/min で測定した。シャルピー衝撃強さは、衝撃試験機（株式会社東洋精機製作所製 IT）で、ひょう量 2J のハンマーを用いて測定した。結晶構造評価は、X 線回折装置（株式会社リガク製 RINT RAPID）を用いて、透過法で測定を行った。

3 結果及び考察

3.1 ランナーの劣化評価

ランナーの劣化評価を行うため、バージン材を用いて

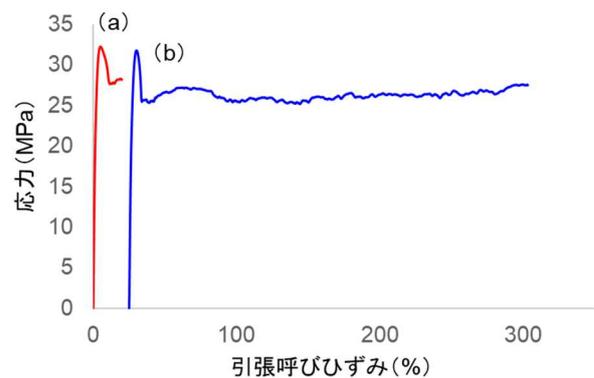


図1 各等温結晶化温度で作製したバージン試験片の引張試験結果；(a)120°C，(b)110°C。

等温結晶化温度について検討した。図 1 に 110°C 及び 120°C で等温結晶化して作製したシートの引張試験結果を示す。等温結晶化温度 110°C で成形した試験片では、降伏後大きく伸びたのに対し、120°C 以上で成形した試験片では低ひずみで破断した。先行研究において、リサイクル材の物理劣化現象として伸びの低下が確認されていることから⁶⁾、以降の実験では等温結晶化温度を 110°C とした。

図 2 に、バージン材とランナー（成形条件：No.2）の引張試験結果を示す。既報の結果と同様に、バージン材と比較し、ランナーは試験片の伸びが著しく低下した。

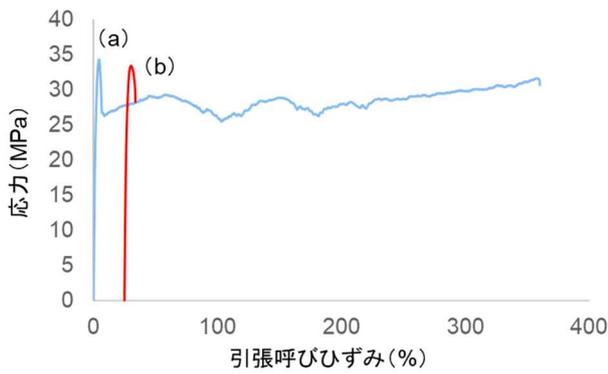


図2 バージン材(a)及びランナー粉砕材(b)から作製した試験片の引張試験結果.

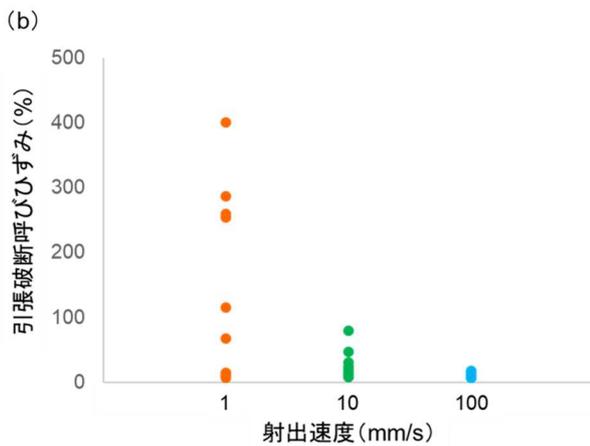
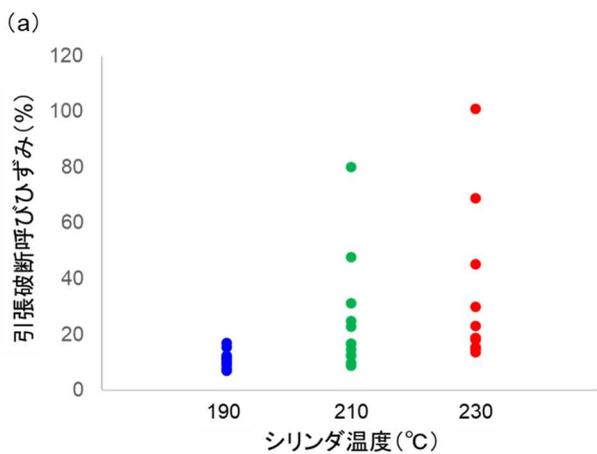


図3 各成形条件と引張破断呼びひずみの関係；
(a) シリンダ温度（射出速度：10mm/min），
(b) 射出速度（シリンダ温度：210℃）.

以上より、この圧縮成形・等温結晶化条件でランナーの物理劣化を評価することが可能であることが示された。

各成形条件と引張破断呼びひずみの関係のグラフを図3に示す。本結果は、引張破断呼びひずみのばらつきが大きかったため、n=10で試験を行った全結果を図示し

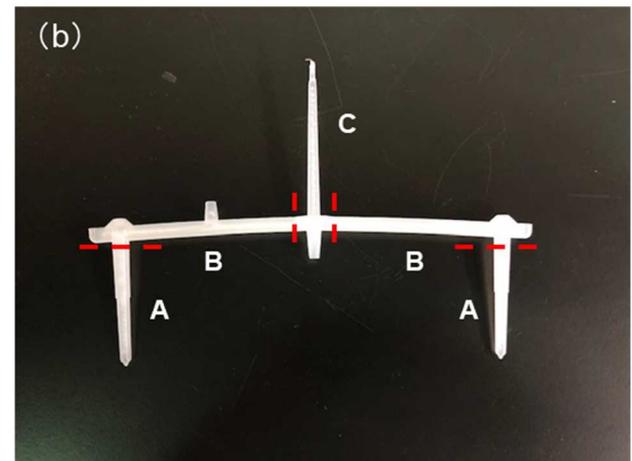
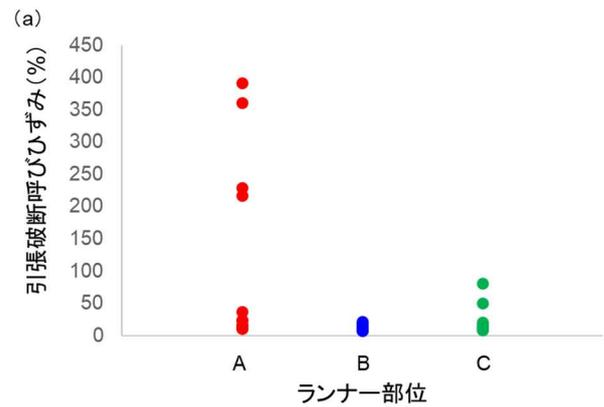


図4 (a) ランナー部位と引張破断呼びひずみの関係及び(b) ランナーの写真

ている。ランナー成形時のシリンダ温度が低いほど、また射出速度が速いほど、試験片の伸びが低下する傾向が見られた。シリンダ温度が低く、射出速度が速いほど、ランナーが受けるせん断応力が高くなり、劣化が進んだと考えられる。なお、保圧及び金型温度の影響は、本研究の範囲内では見られなかった。

また、ランナーの劣化状況の詳細な影響を検討するため、No.8(表1)のランナーを各部位ごとに分割し、引張試験を行った。結果を図4に示す。ここで、図4(b)の「C」がスプルー、「A」の先端がゲートであり、射出された熔融樹脂はC→B→Aの順に流れている。評価したランナーの中では、「B」の引張破断呼びひずみが明らかに低く、「A」は高いものが多かった。図3の実験で得られた結果から考察すると、「B」は直線部分であり熔融樹脂が流れやすいため射出速度の影響を受けやすかったのに対し、「A」はゲートが狭いために熔融樹脂が滞留し、射出速度の影響を受けにくかったことが考えられる。この結果から、ランナーの形状や部位により劣化状況が異なることが明らかになった。加えて、射出成形品は厚さ方向にスキン層、せん断層、コア層が形成されていること

が知られており、各層が受けるせん断応力が異なることから劣化状況は厚さ方向で異なることが推察される。図3や図4の結果ではばらつきが大きかった原因は、ランナー部位や厚さ方向で劣化状況が異なることによるのではないかと考えている。

以上より、射出成形におけるランナーの劣化要因は、シリンダ温度と射出速度であることが明らかになった。また、ランナー形状にも影響があり、ランナーの部位ご

とに劣化状況が異なることが示された。

3. 2 ランナーの工程内リサイクル

表2及び表3の条件で成形した一次成形品（バージン）及び二次（リサイクル1回目）・三次（リサイクル2回目）成形品の試験片の各物性を図5に示す。バージン材から成形したNo.9、No.10を比較すると、全ての物性値でNo.10の方が高くなった。No.9及びNo.10の試験片の二次元X線回折像を図6に示す。両者とも、アーチ状の回折像が見られるが、No.10は赤道方向の回折スポットが若干濃く現れている。No.10はシリンダ温度が低く、射出速度が速い射出成形条件であったため高いせん断応力を受け、No.9と比較し高度に分子配向した結果物性が高くなったと考えられる。

No.9、No.10のランナー粉砕材をそれぞれ同条件でリサイクルした試験片（No.11、No.12）は、バージン材（No.9、No.10）と比較して、引張強さは変わらなかったが、弾性率及びシャルピー衝撃強さが高くなった。また、

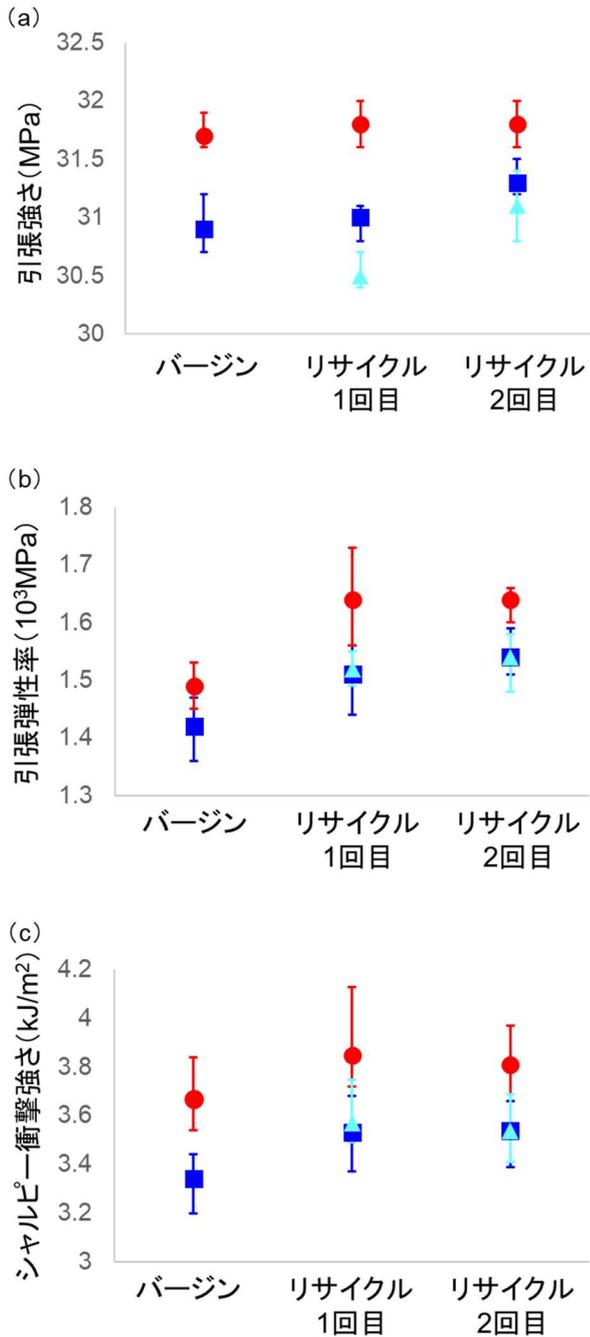


図5 一次成形品（バージン）及び二次・三次成形品（リサイクル）の試験片の物性；
(a)引張強さ、(b)引張弾性率、(c)シャルピー衝撃強さ。
成形条件：■No.9・No.11、●No.10、No.12、▲No.16。

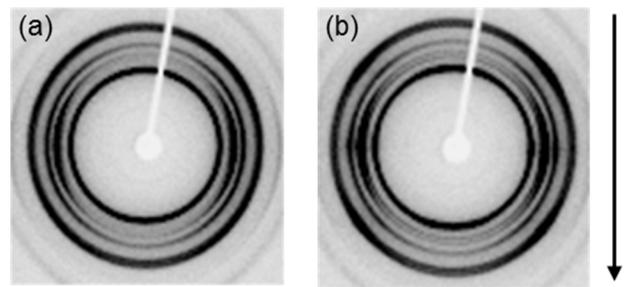


図6 一次成形品（バージン）の二次元X線回折像；(a)No.9、(b)No.10、矢印は樹脂の流れ方向を示す。

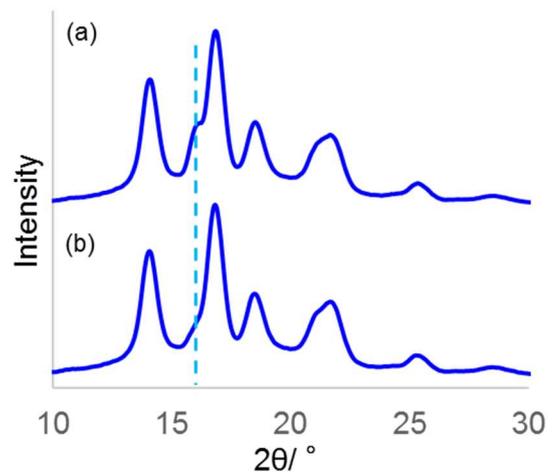


図7 一次成形品（バージン）及び二次成形品（リサイクル1回目）試験片のX線回折パターン。データは、二次元X線回折像を一次元に圧縮；
(a)No.9、(b)No.11。

No. 10 のランナー粉砕材を, No. 9 の成形条件で射出成形した場合 (No. 16), No. 11 とほぼ同等の物性値となった。結果は記載していないが, 背圧 (No. 14~16), クッション量 (No. 13, No. 16) の違いによる明確な影響は見られなかった。以上の結果は, リサイクル率 50%の成形品の物性は, バージン材を射出成形した際に起こるランナーの劣化の影響よりも, リサイクル材を射出成形した際のシリンダ温度・射出速度の影響を強く受けることを示していると考えられる。

バージン・リサイクル成形品の比較のため, 各試料の X 線回折パターンを確認すると, No. 9 (図 7 (a)) と比較し No. 11 (図 7 (b)), 13~No. 16 の方が β 晶由来のピークが小さくなっていた (図 7 (a), (b) の破線) が, 他のピーク強度に大きな違いはなく, この結果だけではシャルピー衝撃強さと引張弾性率の両方が上昇したことは説明できない。他方, 成形履歴を受けた材料ではメソ構造に変化が現れるとの報告があり^{1), 5), 7)}, 本研究においても長周期的な構造の変化がバージン・リサイクルの物性変化の原因なのではないかと推察している。

ランナーは一次射出成形によりせん断応力を受け物理劣化していることが本研究結果で示されているが, 射出成形したリサイクル成形品で物性低下がなかった原因は, 射出成形工程では熔融樹脂が金型内で急冷されるためと考えられる⁶⁾。一般的な PP の射出成形条件からは外れるが, 金型温度が 110℃近くであるならば, 図 2 で示したとおり物性値に影響が出る可能性がある。図 1 の実験を別のグレードの PP バージン材で行った場合, 本研究で用いた PM600A よりも低い等温結晶化温度で伸びの低下が見られており, また図 2 と同様のランナー劣化が確認されている。ランナーのリサイクルを行う場合は, 材料の種類やグレード, 金型ごとにリサイクル成形品の品質確認が必要になるとと思われる。

4 おわりに

様々な射出成形条件で作製したランナーから圧縮成形により作製した試験片を用いて引張試験を行い, 射出成形条件におけるランナーの劣化要因を推定した。また, 低温・高速及び高温・低速の射出成形条件で作製したランナーを, リサイクル率 50%で射出成形し, 物性評価し, 以下の知見を得た。

- (1) バージン材と比較し, ランナーのリサイクル材は引張破断伸びが低下し, 射出成形時のシリンダ温度が低いほど, また射出速度が速いほど, 引張破断伸びの低下が顕著であった。
- (2) ランナーの部位ごとに引張破断伸びの低下が異なることが明らかになった。
- (3) リサイクル率 50%のリサイクル成形品の引張強さは, バージン材とほぼ変わらなかった。シャルピー衝撃強さ及び引張弾性率は, バージン材と比較し, 若干上昇した。

参考文献

- 1) 八尾滋, パントンパチャ: “高分子”, 69 (11), 575, (2020)
- 2) 瀬戸雅宏, 田中克, 佐藤和人, 山部昌: “成形加工”, 14 (10), 671, (2002)
- 3) 飯島義彦, 小松崎和久, 安藤亮, 飯村修志, 石渡恭之, 小島均: “茨城県工業技術センター研究報告”, (43), (2014)
- 4) 安藤亮, 飯島義彦, 千葉頭一郎, 飯村修志: “茨城県工業技術センター研究報告”, (44), (2015)
- 5) 安藤亮, 谷萩雄一郎, 千葉頭一郎, 飯村修志: “茨城県工業技術センター研究報告”, (45), (2016)
- 6) 富永亜矢, 関口博史, 中野涼子, 八尾滋, 高取永一: “高分子論文集”, 70 (12), 712, (2013)
- 7) 富永亜矢, 関口博史, 中野涼子, 八尾滋, 高取永一: “高分子論文集”, 74 (3), 225, (2017)

重点共同研究（フードバレーとちぎ）

「夢ささら」の原料米特性に関する研究

筒井 達也* 佐々木 隆浩* 斎藤 綾子**

Research on the Characteristics of Rice "Yumesasara" for Sake Brewing Developed
by Tochigi Prefecture

TSUTSUI Tatsuya, SASAKI Takahiro and SAITO Ayako

「夢ささら」の原料米特性を把握するため酒米分析や小仕込み試験を行った。「夢ささら」は「山田錦」よりも粗蛋白質が高く、消化性試験ではアミノ酸度も高かった。製成酒は酢酸イソアミルの濃度が高く、官能評価では旨味や酸味が特徴的であり、味覚センサーによる分析でも旨味値が高かった。アミノ酸分析ではグルタミン酸やアスパラギン酸といった旨味系アミノ酸やバリンやロイシンと言った分岐鎖アミノ酸の割合が高かった。低精白ほど旨味が強く、酢酸イソアミルが高い傾向が見られ、「夢ささら」の特徴が出やすいことが分かった。

Key words: 酒米, 夢ささら, 酒米分析, 小仕込み試験

1 はじめに

「夢ささら」は本県オリジナルの酒造好適米として平成30年2月に出願公表された。これを用いた清酒は、全国新酒鑑評会での金賞やIWCでメダルを獲得するなど国内外のコンテストで一定の評価を受け、今後の需要拡大が期待される品種である。

一方で、本県清酒の平均精米歩合は67%と米の旨味を特徴とする純米系統が多い特徴があり、多くの蔵元からは「夢ささら」をレギュラー純米酒などの各社の主力商品にも利用したいとの要望が高まっている。

「夢ささら」は吟醸酒向きの酒造好適米として開発されたが、これまでの研究から「山田錦」と比べるとアミノ酸度が高い傾向が見られる¹⁾。この特徴は原料米蛋白質の消化産物によるものと推察される。

そこで本研究では、「夢ささら」の精米歩合毎の蛋白質や脂質の含有量を、「山田錦」、「五百万石」と比較し、酒質設計に有用なデータを得ることを目的とし検討を行ったので報告する。

2 研究の方法

2.1 原料米

分析には令和2年度、令和3年度に生産された栃木県産「夢ささら」、「五百万石」及び兵庫県産「山田錦」の玄米と精米歩合85%、70%、55%の白米を使用した。発酵試験には令和2年産精米歩合85%、70%、55%の麴米、掛米を使用した。

* 栃木県産業技術センター 食品技術部

** 栃木県酒造組合

2.2 原料米の分析

原料米の分析は国税庁所定分析法²⁾及び酒造用原料米全国統一分析法³⁾によった。粗蛋白質は住化分析センターSUMIGRAPHを用いて燃焼法（改良デュマ法）により分析を行った。

2.3 精米試験

精米歩合の違いによる形状、成分、醸造特性への影響を明らかにするため、県内酒造場にて精米試料を調製した。醸造用精米機はNF-26（新中野工業株式会社）を使用した。試料は各歩留まり時（精米歩合85[%]、70[%]、55[%]）に採取した。

2.4 小仕込試験

令和2年度産「夢ささら」、「山田錦」、「五百万石」について総米150gの小仕込み試験を行った。仕込み配合を表1に示す。麴米は種麴にかおりを使用し、同一の精米歩合で製麴をしたものを使用した。仕込みは酵母仕込み（酵母：協会901）の3段仕込みで踊りは2日間とした。発酵温度は15℃一定とし留仕込後、経時的に重量を計量し積算減少量50g前後に到達、もしくは発酵力の低下が生じた時に遠心分離により上槽を行い製成酒を得た。

2.5 製成酒の分析

製成酒の一般成分は国税庁所定分析法²⁾に従って行った。香気成分の定量はガスクロマトグラフ（島津製作所GC-2010 plus）を用いてヘッドスペース法⁴⁾により分析した。アミノ酸は高速アミノ酸分析計（日本電子JLC-500V）により分析した。

2. 6 官能評価

製成酒の官能評価は当センター職員4名で5点法(1:優⇔5:劣)により行った。各精米歩合ごとに五百万石を基準(3.0点)とした。

2. 7 味覚センサー

味覚センサー分析にはインテリジェントセンサーテクノロジー社製S-5000Zを用いた。センサーには食品用5種(旨味AAE, 塩味CT0, 酸味CA0, 苦味C00, 渋味AE1)を用いた。評価項目は、先味(口に入れた瞬間の味わい)の「旨味」, 「塩味」, 「酸味」, 「苦味雑味」, 「渋味刺激」の合計5項目について評価した。測定は同一試料に対して4回行い、最初の1回目を除いた3回分の平均を各試料のセンサー測定値とした。データ解析用に、分析試料とは別にコントロール試料(蒸留水)を調製し、測定ごとにコントロール試料を第1サンプルに置いて測定を行った。補正処理は、センサーのドリフト(センサー出力の変動)を加味して、得られたコントロール試料の出力値を基準に各試料の出力値の差分を求める方法(補間差分)で補正した。

表1 小仕込試験配合

| | 添 | 仲 | 留 | 計 |
|--------|----|----|-----|-----|
| 総米(g) | 30 | 50 | 70 | 150 |
| 掛米(g) | 20 | 40 | 60 | 120 |
| 麴米(g) | 10 | 10 | 10 | 30 |
| 汲水(mL) | 45 | 55 | 110 | 210 |

3 結果及び考察

3. 1 原料米の分析

表2に「夢ささら」, 「五百万石」, 「山田錦」の原料米

表2 原料米分析結果

| 品種 | 精米歩合(%) | 千粒重(g) | 真精米歩合(%) | 無効精米歩合(%) | 碎米率(%) | 吸水率(%) | 消化性 | | 粗蛋白質(%) | 粗脂肪(%) | カリウム(ppm) |
|------|---------|--------|----------|-----------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|-----------|
| | | | | | | | Brix(%) | F-N(mL) | | | |
| 夢ささら | 100 | 25.7 | 100.0 | 0.0 | 0.4 | - | - | - | 6.8 | 3.1 | 1890 |
| 夢ささら | 85 | 22.0 | 85.7 | 0.7 | 0.6 | 29.1 | 9.5 | 1.02 | 5.0 | 1.1 | 593 |
| 夢ささら | 70 | 18.9 | 73.8 | 3.8 | 2.2 | 30.8 | 10.3 | 0.98 | 4.1 | 0.6 | 403 |
| 夢ささら | 55 | 15.2 | 59.1 | 4.1 | 3.5 | 31.9 | 10.9 | 0.90 | 3.5 | 0.5 | 397 |
| 山田錦 | 100 | 27.1 | 100.0 | 0.0 | 0.3 | - | - | - | 6.3 | 3.2 | 1761 |
| 山田錦 | 85 | 22.6 | 85.5 | 0.5 | 1.3 | 30.1 | 9.8 | 0.93 | 4.6 | 1.1 | 433 |
| 山田錦 | 70 | 19.4 | 71.7 | 1.7 | 2.3 | 32.9 | 10.8 | 0.88 | 3.8 | 0.7 | 308 |
| 山田錦 | 55 | 15.6 | 57.7 | 2.7 | 7.4 | 34.7 | 11.2 | 0.85 | 3.3 | 0.6 | 322 |
| 五百万石 | 100 | 25.5 | 100.0 | 0.0 | 0.5 | - | - | - | 6.9 | 3.9 | 2322 |
| 五百万石 | 85 | 21.5 | 85.2 | 0.2 | 1.5 | 28.6 | 8.4 | 1.07 | 5.5 | 1.1 | 669 |
| 五百万石 | 70 | 18.6 | 72.8 | 2.8 | 2.2 | 30.3 | 9.8 | 1.00 | 4.6 | 0.7 | 390 |
| 五百万石 | 55 | 14.8 | 58.1 | 3.1 | 6.1 | 31.1 | 10.5 | 0.98 | 4.0 | 0.6 | 374 |

分析結果(R2年度産, R3年度産の平均値)を示した。「夢ささら」の玄米千粒重は25.7gと「山田錦」(27.1g)より低く小粒であった。精米歩合55%での碎米率は3.5%と「山田錦」(7.4%), 「五百万石」(6.1%)より低かった。吸水率は「山田錦」より低く「五百万石」よりやや高かった。消化性Brix, ホルモール窒素及び粗蛋白質は「山田錦」と「五百万石」の中間的な値であった。粗脂肪については品種間差は見られないものの、精米歩合が高いほど低くなった。カリウムは山田錦より高く五百万石並であった。このように「夢ささら」は、粒はやや小さいものの精米特性に優れ、蛋白質含量がやや高いことからホルモール窒素が高い特徴があった。

3. 2 小仕込試験

発酵経過を図1に示す。酵母は協会901号を使用した。もろみ経過は山田錦や五百万石と類似した経過を示した。また、低精白ほど発酵が進む傾向がみられた。

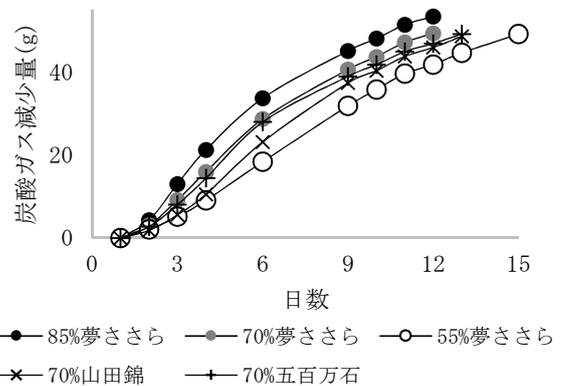


図1 発酵経過

3. 3 製成酒の成分分析

製成酒の成分分析結果を表3に示す。「夢ささら」のA

ミノ酸度は各精米歩合において「山田錦」より高く「五百万石」よりやや低かった。精米歩合が低いほどアミノ酸度が高かった。「夢ささら」は酢酸イソアミルの濃度が「山田錦」や「五百万石」よりも高くなった。「夢ささら」のイソアミルアルコールの濃度は「山田錦」よりやや高く、「五百万石」と同等であった。このように「夢ささら」による清酒はイソアミルアルコールの濃度が高く、その結果イソアミルアルコールを基質とする酢酸イソアミルが高くなることが示唆された。

製成酒のアミノ酸組成をみてみると、「夢ささら」は「山田錦」と比べると旨味系アミノ酸であるアスパラギン酸やグルタミン酸が高く、甘味系アミノ酸であるアラニンが低かった。アルギニンは品種間差は見られなかったが、精米歩合が高いほど割合が高くなる傾向があった。また、イソアミルアルコールの前駆体となる分岐鎖アミノ酸が多かった。

3.4 官能評価

製成酒の官能評価を表4に示す。「夢ささら」の製成酒はバナナ様の香りが高く旨味や酸味が特徴的であり、精米歩合が低いほどその特徴は顕著であった。「山田錦」のフクラミと「五百万石」との軽さを併せもつタイプの酒質であった。精米歩合が低いと発酵が旺盛なことに由来するアルデヒド感や、アミノ酸度が高いことによる苦渋などの欠点も見られた。

3.5 味覚センサー

製成酒の味覚センサー分析結果を表5と図2に示す。旨味と酸味で差が見られた。「夢ささら」は「山田錦」と比べると旨味値が高い傾向があり、この傾向は低精白ほど顕著であった。酸味値は「山田錦」よりもやや高く、低い精米歩合ほど低い傾向があった。品種間差よりは精米歩合の違いによる影響が大きかった。官能評価でも旨味や酸味が特徴的であったが、味覚センサーによる分析でもこの傾向が見られた。

表3 製成酒の成分分析結果

| 品種 | 精米歩合 (%) | 酸度 (ml) | アミノ酸度 (ml) | 日本酒度 | アルコール (%) | 酢酸イソアミル (ppm) | イソアミルアルコール (ppm) | アミノ酸割合 (%) | | | | | | |
|------|----------|---------|------------|------|-----------|---------------|------------------|------------|-----|------|------|-----|-----|-----|
| | | | | | | | | Asp | Glu | Ala | Arg | 分岐鎖 | | |
| | | | | | | | | | | | | Val | Ile | Leu |
| 夢ささら | 85 | 2.2 | 1.40 | 14.7 | 17.1 | 10.6 | 225 | 2.4 | 7.5 | 15.5 | 12.6 | 4.3 | 2.5 | 5.9 |
| 夢ささら | 70 | 2.3 | 1.30 | 10.0 | 16.3 | 6.5 | 177 | 2.2 | 7.3 | 17.4 | 13.5 | 4.8 | 3.0 | 6.7 |
| 夢ささら | 55 | 2.4 | 1.20 | 2.5 | 15.1 | 6.3 | 143 | 2.1 | 6.8 | 19.8 | 15.0 | 5.6 | 3.1 | 7.2 |
| 山田錦 | 85 | 2.1 | 1.30 | 15.3 | 17.3 | 9.5 | 221 | 2.1 | 7.1 | 16.5 | 11.8 | 3.9 | 2.5 | 5.5 |
| 山田錦 | 70 | 2.2 | 1.20 | 10.4 | 16.6 | 6.1 | 160 | 1.9 | 6.8 | 18.4 | 14.5 | 4.4 | 2.9 | 6.5 |
| 山田錦 | 55 | 2.3 | 1.05 | 5.5 | 15.8 | 4.6 | 135 | 1.6 | 6.1 | 21.1 | 14.7 | 5.5 | 3.0 | 6.9 |
| 五百万石 | 85 | 2.2 | 1.55 | 15.5 | 17.1 | 9.7 | 220 | 2.2 | 7.8 | 16.2 | 12.3 | 4.1 | 2.4 | 5.5 |
| 五百万石 | 70 | 2.3 | 1.50 | 11.0 | 16.4 | 6.2 | 163 | 2.1 | 7.2 | 18.7 | 13.9 | 4.5 | 2.7 | 5.9 |
| 五百万石 | 55 | 2.4 | 1.40 | 5.0 | 15.6 | 5.8 | 143 | 1.9 | 7.1 | 20.6 | 15.0 | 5.0 | 3.0 | 7.0 |

Asp:アスパラギン酸, Glu:グルタミン酸, Ala:アラニン, Arg:アルギニン, Val:バリン, Ile:イソロイシン, Leu:ロイシン

表4 製成酒の官能評価結果

| 品種 | 精米歩合 (%) | 平均点数 (1:優⇔5:劣) | 官能評価 |
|------|----------|----------------|-----------------------------|
| 夢ささら | 85 | 2.7 | バナナ, アルデヒド, 旨味, 酸味, 味わい, 苦渋 |
| 山田錦 | 85 | 3.0 | アルデヒド, 柔らかい, 酢エチ, 苦渋 |
| 五百万石 | 85 | 3.0 | アルデヒド, 軽い, 薄い, 硬い, 酸ウク, 苦渋 |
| 夢ささら | 70 | 2.7 | 酢イソ, 酢エチ, 旨味, 酸味, フクラミ, 苦渋 |
| 山田錦 | 70 | 2.2 | 酢イソ, エステル, フクラミ |
| 五百万石 | 70 | 3.0 | アルデヒド, 酢エチ, 酸臭, 軽い, 渋 |
| 夢ささら | 55 | 2.8 | 酸味, 苦, 軽い, 単調 |
| 山田錦 | 55 | 2.0 | ソフト, フクラミ |
| 五百万石 | 55 | 3.0 | 酸ウク, エグ味, 軽い, 渋 |

各精米歩合で五百万石を基準 (3.0 点) とする

4 おわりに

「夢ささら」について「山田錦」, 「五百万石」と比較検討した結果, 以下の知見を得た。

- (1) 低い精米歩合において, 「山田錦」や「五百万石」よりも碎米の発生は少なかった。
- (2) 消化性Brixは「山田錦」よりも低く「五百万石」より高かった。消化性F-Nは「山田錦」よりも高く「五百万石」より低く, 粗蛋白質も同様の傾向が見られた。
- (3) 製成酒は, 「山田錦」に比べてアミノ酸度が高く, 香気成分は酢酸イソアミルが高かった。
- (4) 製成酒のアミノ酸の組成は, 「山田錦」と比べてアスパラギン酸やグルタミン酸といった旨味系アミノ酸の割合が高く, バリンやロイシンといった分岐鎖アミノ酸の割合もやや高かった。
- (5) 製成酒の官能評価では旨味や酸味が特徴的で, 味わいある酒質であった。一方, 低い精米歩合ではアルデヒド感や苦渋が見られた。
- (6) 製成酒の味覚センサー分析では旨味値が高く, 低い精米歩合ほど顕著であった。

以上のことから, 「夢ささら」の原料米特性として「山田錦」と比べると粗蛋白質が多くアミノ酸度が高い性質が分かった。アミノ酸の中でも旨味系アミノ酸や分岐鎖アミノ酸の割合が高く, これらが「夢ささら」製成酒の旨味やバナナ様の香りの高さに寄与していると推察された。

一方で, 低い精米歩合ではカリウムや蛋白質といった酵母の栄養分が多く発酵が急進することから, もろみの低温管理や酵素力価の低い若い麴を使用するなど, 発酵を抑えるようコントロールする必要があると考えられた。

参考文献

- 1) 筒井達也ら: “令和元(2019)年度栃木県産業技術センター研究報告”, 17, 11-14, (2020)
- 2) 注解編集委員会編: “第4回改正国税庁所定分析法注解”, 日本醸造協会(1993)
- 3) “酒造用原料米全国統一分析法”, 酒米研究会(1996)
- 4) 吉澤淑: “醸協”, 68, 59, (1973)

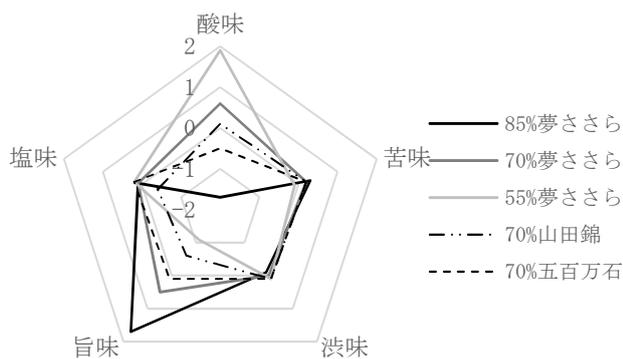


図2 製成酒の味覚センサー結果 (レーダーチャート)

表5 製成酒の味覚センサー結果

| 品種 | 精米歩合 (%) | 味覚センサー結果 | | | | |
|------|----------|----------|------|------|------|------|
| | | 酸味 | 苦味 | 渋味 | 旨味 | 塩味 |
| 夢ささら | 85 | -1.7 | 0.3 | -0.1 | 1.7 | 0.1 |
| 夢ささら | 70 | 0.6 | 0.2 | 0.0 | 0.5 | 0.1 |
| 夢ささら | 55 | 1.9 | -0.1 | 0.1 | -1.1 | 0.2 |
| 山田錦 | 85 | -2.0 | -0.1 | -0.1 | 0.8 | -0.1 |
| 山田錦 | 70 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | -0.6 | -0.4 |
| 山田錦 | 55 | 1.7 | -0.5 | -0.1 | -1.3 | -0.2 |
| 五百万石 | 85 | -1.7 | 0.2 | 0.0 | 0.8 | 0.2 |
| 五百万石 | 70 | -0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 |
| 五百万石 | 55 | 1.5 | -0.3 | 0.0 | -1.0 | -0.1 |

II 共同研究

Cooperative Research

共同研究

米菓の食感改質技術に関する研究

金井 悠輔* 阿久津 知宏* 守谷 和高** 川島 律子** 峰岸 沙代子**

Research on Texture Modification Technology for Rice Crackers

KANAI Yusuke, AKUTSU Tomohiro, MORIYA Kazutaka, KAWASHIMA Ritsuko and MINEGISHI Sayoko

米菓に関する消費者ニーズとして、スナック様の軽い食感を有する米菓製品が近年注目を集めていることから、本研究では、各製造工程が米菓の膨化性や食感に及ぼす影響を検討した。餅搗き回数の増加に伴い、生地中の残存米粒の破砕が進行するとともに焼成品の比容積が向上し、硬さが低減することが分かった。餅生地の水分率は、30%付近が最も大きく膨化し、これより不足または過剰な場合は、比容積及び食感は悪化した。予熱処理は膨化性の向上のためには不利である一方、膨化処理においては高出力で加熱するほど比容積が向上し、軽い食感につながる事が明らかとなった。

Key words: 米菓, 顕微鏡観察, 膨化, 比容積, テクスチャー

1 はじめに

米菓市場は、2013年から生産量・消費金額ともに一進一退を繰り返しながらも微増している堅調な市場である。直近では、新型コロナウイルスの感染拡大に伴う巣ごもり消費により売上げが好調なメーカーが目立つ。しかし長期的には、主な購買層が高齢者である現状から脱却すべく、若年層への消費喚起など、新たな需要の掘り起こしが急務となっており、各社とも付加価値の高い新商品開発に取り組んでいる。

新たな消費者ニーズとして、従来よりも食感が非常に軽く、スナック感覚で食べられる米菓製品が注目を集めており、県内の中小米菓メーカーにおいても同様の特徴を持つ商品開発に取り組む事例が増えている。米菓の製造には糯米の餅搗き、冷却固化、乾燥、焼成など多くの工程があるが、食感の軽い米菓を安定的に製造するためには、各工程において米菓を最大限膨らませるための適切な処理を行う必要がある。しかし、製造条件と膨化性の関係性が不明確であり、詳細な製造条件の決定には現場作業員の勘と経験に頼るところが大きく、再現性・安定性に課題がある。

そこで本研究では、従来よりも食感の軽い米菓製造技術の開発を目的として、膨化度の高い米菓製造に適したマイクロ波焼成品を対象とし、餅搗き・乾燥・焼成の各工程が餅生地の膨化性や食感に及ぼす影響の検討を行った。

2 研究の方法

2.1 餅生地の調製

原料は国産糯米を用い、丸彦製菓(株)が保有する各種製造設備により餅生地を調製した。糯米を8時間浸漬後、圧扁、蒸練したものに対し60~200回の胴搗を行った。その後、練り出し、冷却固化させたものを幅40mm×長さ70mm×厚み5mmに切断し、所定の水分率まで乾燥させることで餅生地を調製した。

2.2 餅生地の残存米粒評価

ロータリーマイクロトム(マイクローム社 HM340)により餅生地から厚さ20 μ mの薄片を切り出し、光学顕微鏡(オリンパス(株) BX-53)により倍率100倍で撮像した(図1)。1試験区あたり20枚の薄片を切り出し、薄片1枚あたり3ヶ所撮像することで、1試験区あたり計60枚の観察画像を得た。画像解析ソフトImage Jにより、得られた画像から残存米粒を検出し、残存米粒の

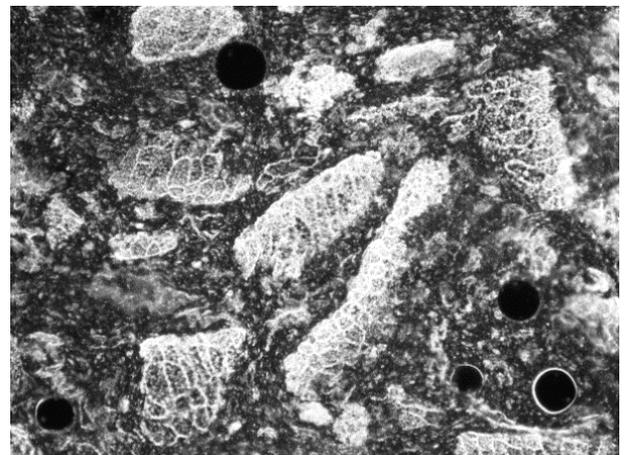


図1 餅生地の顕微鏡観察画像例

* 栃木県産業技術センター 食品技術部

** 丸彦製菓株式会社

面積ごとに4区分(区分1:100~1,000 μm^2 , 区分2:1,000~10,000 μm^2 , 区分3:10,000~100,000 μm^2 , 区分4:100,000~1,000,000 μm^2)に分別して積算し, 分布を評価した。

2.3 焼成試験

バンドソーにて15mm×15mmに切断した餅生地12枚を予熱処理及び膨化処理を行うことで焼成した。予熱処理は, ガスオーブン((株)マルゼン MRX-097E)または業務用電子レンジ(シャープ(株) RE-3300P)を用いて行った。膨化処理は, 同上の業務用電子レンジを用いることでマイクロ波焼成を行った。

2.4 比容積測定

焼成品の膨化性評価のため, $\phi 2\text{mm}$ のガラスビーズを使用した菜種置換法により, 焼成品の比容積を求めた。1回の試験で焼成品6個の比容積を測定し, 3回繰り返した平均値を求めた。

2.5 テクスチャー測定

テクスチャー測定はテクスチャーアナライザー(Stable Micro Systems TA.XT plus100c)を用いた。焼成品をバンドソーで厚さ10mmに切断し, 切断面から $\phi 6\text{mm}$ の円柱プローブにより圧縮速度:1mm/s, 圧縮距離:7mmの条件で圧縮試験を行った。得られた荷重データのうち圧縮距離1mm~7mmの範囲を解析範囲に設定し, この範囲における平均荷重及び平均ピーク深さを求めた(図2)。

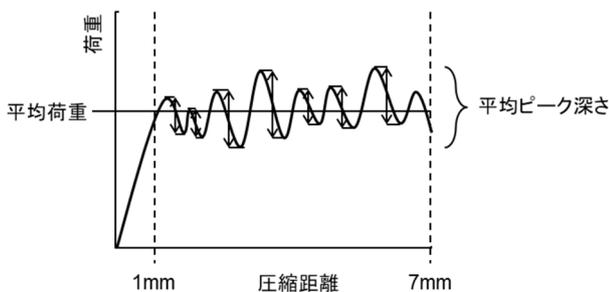


図2 テクスチャー測定結果の解析

3 結果及び考察

3.1 餅搗き工程が膨化性に及ぼす影響

米菓は, 餅生地に含まれる水分が加熱により蒸発する際, 体積が急激に増大する力を利用することで膨化する。このため, 餅生地の物性は米菓の膨化性に大きく影響することが予想される。そこで, 餅生地製造工程のうち, 特に餅生地の物性に大きく寄与すると思われる餅搗きの回数が膨化性に及ぼす影響を検討した。

異なる餅搗き回数の餅生地について残存米粒の評価を行った結果を図3に示す。餅搗き回数の増加に伴い,

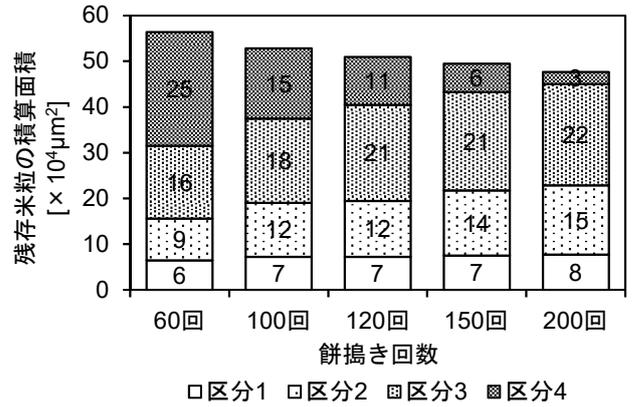


図3 残存米粒の評価結果

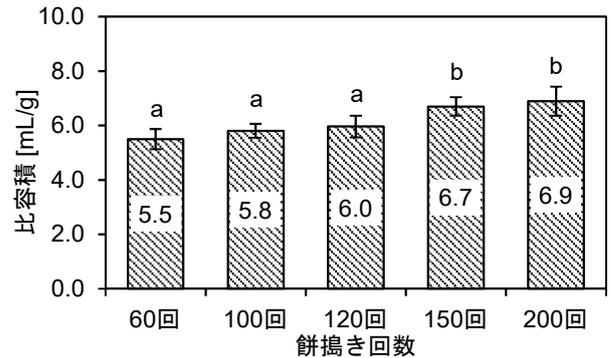


図4 餅搗き回数と比容積の関係

異なるアルファベット間では有意差あり ($p < 0.05$)。以下同じ。

水分率: 25%, 焼成: 電子レンジ 200W 1分→600W 2分

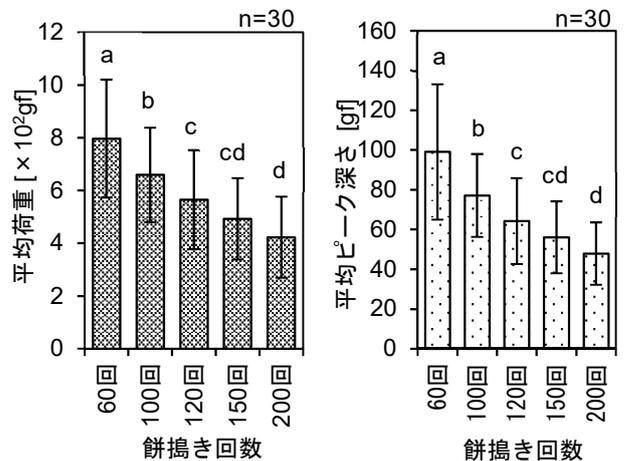


図5 餅搗き回数とテクスチャー評価結果

最も大きな区分4の残存米粒が顕著に減少し, 区分1~3の比較的小さな残存米粒はわずかながら増加する傾向となった。一方, 全ての残存米粒面積値の総和は餅搗き回数の増加とともに減少した。これは, 餅搗きにより大きい米粒が破碎されて小さな米粒の欠片が増え, これが繰り返し行われることで残存米粒として検出されない100 μm^2 未満の米粒が増えた結果と考えられた。これらのことから, 搗き回数を増やすことで残存米粒が破碎さ

れ、餅生地均質化が進行することが明らかとなった。

次に、それぞれの餅生地を同一条件で焼成し、焼成品の比容積を算出した(図4)。その結果、餅搗き回数が多い餅生地ほど比容積が高くなる傾向が見られ、餅搗き処理は膨化性の向上につながることを確認された。これは、餅搗き回数を増やすことで残存米粒が破碎され、きめ細かい餅生地となるため、焼成時の蒸気を捕捉する能力が高まった結果、より大きく膨らむものと考えられた。しかし、150回と200回の間では有意差がないことから、餅搗きによる膨化性向上には限界があるものと考えられた。

続いて、焼成品の食感を評価するため、テクスチャーアナライザーによる圧縮試験を行った。その結果、餅搗き回数の増加に伴い、平均荷重及び平均ピーク深さが大幅に低下することが確認された(図5)。平均荷重は試料の全体的な硬さ、平均ピーク深さは咀嚼時の歯ざわり感(サクサク、ガリガリ)を表す。今回の結果から、餅搗き回数の増加により、全体的な硬さが低減し、サクサクとした軽い食感に近づくものと考えられた。

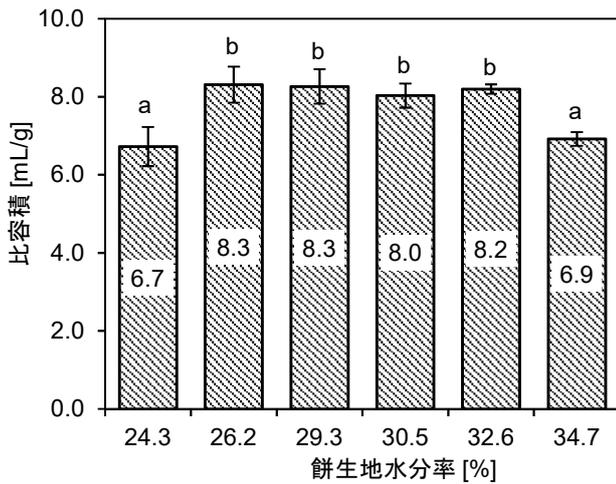


図6 餅生地水分率と比容積の関係

餅搗き回数：150回、焼成：電子レンジ200W 1分→600W 2分

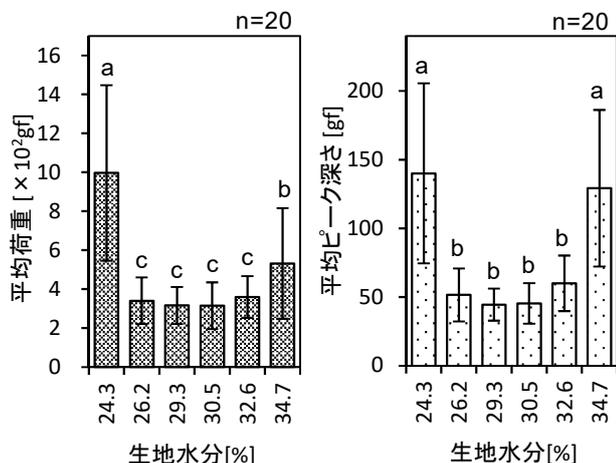


図7 餅生地水分率とテクスチャー評価結果

3. 2 乾燥工程が膨化性に及ぼす影響

米菓の膨化現象において、餅生地物性と同等に重要な要素が、餅生地に含まれる水分の蒸発である。そこで、水分率の異なる餅生地を調製し、同一条件で焼成試験を行った。焼成品の比容積測定結果を図6、テクスチャー測定結果を図7に示す。焼成品の比容積は、水分率26.2~32.6%の間で極大(約8mL/g)となり、水分率がこの範囲外になると比容積が低下した。テクスチャー評価においても、平均荷重・平均ピーク深さともに水分率26.2~32.6%の範囲において低値となった。これらのことから、餅生地の水分率が約30%において膨化性が良く、最も軽い食感を実現する水分率であることが明らかとなった。低水分率で膨化性が悪い原因として、餅生地の柔軟性が低いため蒸気を捕捉しきれないことに加え、発生する蒸気量が少ないことが考えられる。また、高水分率の場合は、多量の水分が蒸発する際に周囲の熱を気化熱として吸収し、水蒸気発生が低下することが要因の一つと考えられた。

3. 3 焼成条件が膨化性に及ぼす影響

米菓は、一般的に予熱、膨化及び焼き色付けを一連の流れで行う運行焼機にて焼成される。品質安定のためには、各処理区分の加熱出力や通過時間、ショット数などを緻密に設定して焼成することが求められる。そのため、焼成条件が米菓の膨化性に及ぼす影響を検討した。

3. 3. 1 予熱工程の検討

焼成前の餅生地に含まれるデンプンは、冷却固化工程において老化しているため、予熱により再び糊化させ、柔軟性を回復させることで焼成時の膨化性が向上するものと考えられる。そこで、予熱処理が米菓の膨化性に及ぼす影響を調べた。同一の餅生地をガスオープンにて予熱後、ただちにマイクロ波焼成を行った。予熱時の庫

表1 オープン予熱条件一覧

| 庫内温度 | 生地温度 | 加熱時間 |
|-------|-------|-------|
| 予熱なし | - | - |
| 100°C | 80°C | 2分11秒 |
| | 90°C | 4分12秒 |
| | 100°C | 9分37秒 |
| 120°C | 80°C | 1分9秒 |
| | 90°C | 1分41秒 |
| | 100°C | 3分30秒 |
| 140°C | 80°C | 0分40秒 |
| | 90°C | 1分4秒 |
| | 100°C | 1分36秒 |

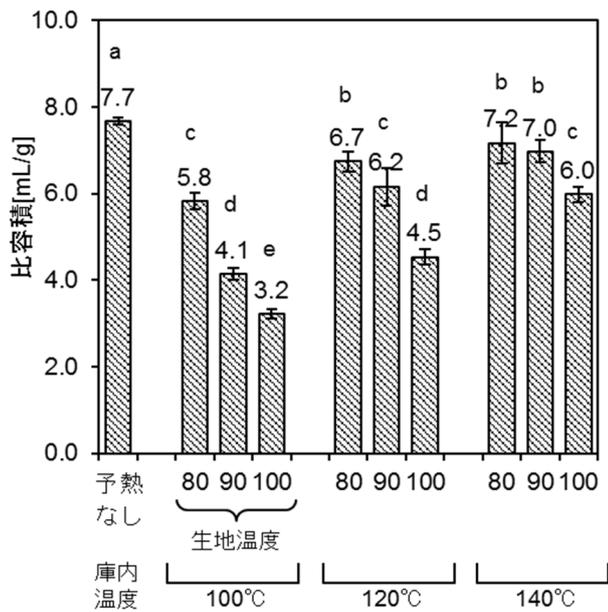


図8 予熱条件と比容積の関係

餅搗き回数:150回, 水分率:31.7%, 焼成:電子レンジ600W2分

内温度は100°C, 120°C, 140°Cとし, 各庫内温度にて餅生地を80°C, 90°C, 100°Cまで加熱した。予熱条件一覧を表1に, 焼成品の比容積を測定した結果を図8に示す。庫内温度で比較すると, 低温で時間をかけて加熱するより, 高温で急速に加熱することで比容積が高い結果となった。一方, いずれの庫内温度においても, 餅生地を高温に加熱するほど比容積が低下した。また, 予熱を一切行わずに焼成したものと比較すると, いずれの予熱条件も比容積が低い結果であり, 今回の試験条件においては, 膨化性向上のためには予熱処理は不利であるとの結論に至った。これは, 予熱により餅生地が乾燥し, 焼成時の蒸気発生量が減少してしまうことが主な要因と考えられる。対策として, 予熱による水分損失を見越し, 予め餅生地水分率を高め調整する方法が考えられた。

3. 3. 2 膨化工程の検討

膨化工程における加熱出力が, 米菓の膨化性に及ぼす影響を検討するため, マイクロ波焼成時の加熱出力を500~800Wの範囲で変化させ, 焼成品の比容積を測定した。その結果, 高出力で焼成したものの比容積が上昇し, 膨化が促進されることが明らかとなった(図9)。マイクロ波加熱は, 食品中の水分子を振動させて温度を上昇させるため, 高出力で加熱することで餅生地中の水分が急激に蒸発することが予想される。この蒸発の勢いを高めることで, 焼成品をより大きく膨化させることが可能になるものと考えられた。なお, 実際の製造現場においては, マイクロ波発振器(電源部)の能力や, マイクロ波遮蔽材の耐久性が課題となり, 大幅な加熱出力の上昇は困難な場合が多い。その場合, 時間あたりの餅生

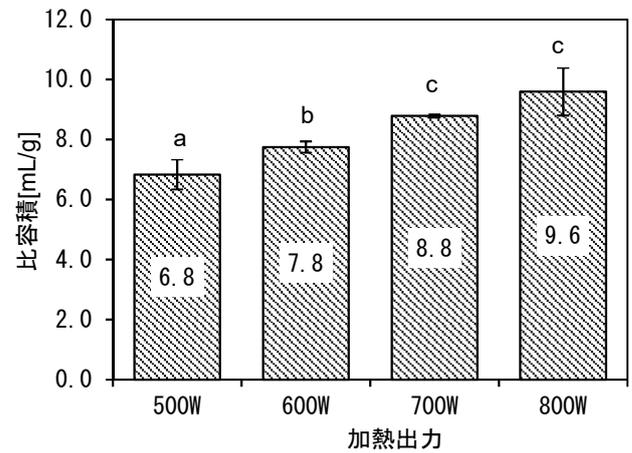


図9 膨化時の加熱出力と比容積の関係

餅搗き回数:150回, 水分率:31.7%, 予熱:電子レンジ200W1分

地投入量を減らすことで, 相対的な加熱能力が高まり, 同様の膨化性向上効果が得られる可能性が考えられた。

4 おわりに

従来よりも食感の軽い米菓の開発のため, 餅生地製造条件及び焼成条件が米菓の膨化性に及ぼす影響を検討した結果, 以下の知見を得た。

- (1) 餅搗き回数を増やすことで, 生地中の残存米粒の破碎が進行し, 焼成品の比容積が上昇するとともに, 硬さが低減し軽い食感につながる事が明らかとなった。しかし, 餅搗きによる膨化性の向上には限界があるものと考えられた。
- (2) 餅生地の水分率は30%付近において焼成品の比容積が最も高く, テクスチャー測定結果も低値を示した。これより水分が不足しても過剰でも膨化性は悪化することが確認された。
- (3) 予熱処理を行うことで, 焼成品の比容積が低下した。予熱を行う場合, 高温で短時間の加熱とすることで比容積の低下を防ぐ結果となった。
- (4) 膨化処理では, 高出力で加熱するほど比容積が向上することが明らかとなった。餅生地に含まれる水分を急激に蒸発させることが, 米菓を大きく膨化させる重要な要素であると考えられた。

米菓の膨化性は, 各工程の処理条件により大きく影響を受けることが明らかとなった。実際の製品製造においては, 上記の知見を踏まえつつ, 各事業者の保有設備に応じた適切な製造条件を検討することが重要である。

参考文献

- 1) 斎藤昭三: "製菓辞典", 朝倉書店, 390-420, (1981)
- 2) 永島伸浩, 川端晶子, 中村道徳: "澱粉科学", 37 (4), 243-250, (1990)

Ⅲ 受託研究

Contract Research

受託研究

県産トウガラシのおいしさの見える化に向けた 前処理法・測定条件の確立

伊藤 和子* 石田 莉菜*

Establishment of the Pretreatment Method and the Measurement Condition for
Visualization of the Taste of *Capsicum Annum* from Tochigi Prefecture

ITOH Kazuko and ISHIDA Rina

県産トウガラシのおいしさを見る化するため、味覚センサー及びDHS-GC/MSを用いた味・香り測定に関する最適な前処理法・測定条件を検討した。その結果、味覚センサー測定前処理時の抽出温度は50℃、DHS-GC/MS測定条件はDHS-MVM法がトウガラシ分析に適していた。

確立した方法により、中国産天津三鷹を対照として県産トウガラシ7種（信鷹・鷹の爪・山房・望都・益都・栃木三鷹・新三鷹）の味・香りを測定した結果、県産トウガラシは中国産に比較して苦味雑味、旨味及び旨味コクが高い傾向にあることや、香りが強く、甘く香ばしい香りの特徴を有することが明らかになった。

Key Words : トウガラシ, おいしさの見える化, 味覚センサー, 香気分析

1 はじめに

栃木県大田原市はトウガラシ収穫量日本一であり、市内の生産者・加工業者及び飲食店等で構成する「大田原とうがらしの郷づくり推進協議会」が、町おこしの一環として普及、新商品開発等に取り組んでいる。

国産トウガラシは、外国産に比べて旨味や甘い香りが強い等の特徴があるとされているが、こうした特徴を裏付ける十分なデータがないため、安価な外国産との品質の差が曖昧になり、市場拡大のネックになっている。このため、外国産とのおいしさ（味・香り）の違いや優位性を明らかにする必要があるが、強い辛みのため、ヒトの官能による評価が困難である。

そこで、本研究では味覚センサー及びダイナミックヘッドスペースーガス chromatography 質量分析 (DHS-GC/MS) 法を用いて、味・香り分析に最適な前処理法・測定条件を確立し、さらに確立した方法で県産トウガラシのおいしさの見える化に取り組んだので報告する。

2 研究の方法

2.1 トウガラシ粉末

トウガラシ粉末は未焙煎とし、吉岡食品工業(株)に

て粉末化したものを用いた。なお、天津三鷹は中国産であり、信鷹・鷹の爪・山房・望都・益都・栃木三鷹・新三鷹の7品種は、栃木県内の農家にて栽培したものをを用いた。

粉末化後すぐに密閉し、速やかにDHS-GC/MSによる香気成分分析を実施した。その後、粉末を冷凍保存し、味覚センサー測定に供した。

2.2 味測定

2.2.1 前処理

コショウの前処理法に準じ、以下の方法を検討した。トウガラシ粉末3gを量りとり、任意の温度(90℃・50℃・30℃)に調整した蒸留水97gを加え、その温度に10分間保持しつつ1分ごとに攪拌し抽出した。水冷後ろ過し、ろ液を測定用サンプル液とした。なお、旨味先味については、1/3に希釈した味覚センサー用基準液により測定用サンプルを18倍希釈したものをを用いた。

2.2.2 機器測定

2.2.1で調製した測定用サンプル液を用い、味覚センサー(㈱インテリジェントセンサーテクノロジー製TS-5000Z)で酸味・苦味雑味・渋味刺激・塩味・苦味(後味)・渋味(後味)・旨味コク(後味)を測定した。なお、旨味先味については、上述したとおり、希釈したものをを用いて別途測定した。

*栃木県産業技術センター 食品技術部

2. 3 香り測定

香氣成分測定は、トウガラシ粉末 0.2g に蒸留水 0.1mL, 内部標準として 0.05%(v/v) 1-プロパノール水溶液を 10μL 加えたものを測定試料とし(N=3), DHS-GC/MS 法により行い, 吸着材は Carbopack B&X 及び Tenax TA を用いた。試験前処理として, 各測定試料を N₂ パージして香氣成分の各吸着管への吸着を行い, さらにその吸着管を 30℃下で 50mL/分の流速で所定時間ドライパージを行い, 加熱脱着装置 (Gerstel 社製 TDU2) 付 DHS-GC/MS (Agilent Technologies 社製 5977B) に供した。

加熱脱着装置の温度条件は, TDU:30℃ (0.3min)-720℃/min 昇温-300℃ (3min)とし, CIS:-50℃ (0.5min)-720℃/min 昇温-210℃ (20min)とした。測定装置条件は, カラム:DB-WAX(30m, 0.25mm, 0.25μm), オープン温度:40℃ (5min)-10℃/min 昇温-240℃ (10min), キャリアガス:He 1.6768mL/min, トランスファーライン温度:240℃, イオン源温度:230℃, イオン化モード:EI, イオン化電圧:70eV で測定を行った。得られたガスクロマトグラムのピークから, Aroma Office 2D(Gerstel 社製)によりおいを有する化合物のみを抽出し, その後, 多変量解析ソフト Mass Profiler Professional (Agilent Technologies 社製)を用いて, 抽出した成分中の再現性の高い化合物の絞り込み (CV<25) 及びそれらのクラスター解析を行った。

3 結果及び考察

3. 1 味測定前処理法の検討

栃木三鷹・新三鷹・益都の3品種を用い, 3つの温度条件(90℃・50℃・30℃)で抽出前処理し味覚センサーで測定した結果を図1に示す。90℃抽出の栃木三鷹を対照として測定した。90℃抽出では, 他の条件と比較して「苦味雑味」の値が低く, 応答している物質が熱に弱い可能性が考えられた。他の味覚は抽出温度では大きな影響はみられなかったため, 30℃・50℃ともに適していると考えられた。

作業性としては, 90℃を保って抽出操作をすることは難しく, 値のバラつきにつながると考えられた。また, 一般に普及されている恒温槽の性能は室温+5℃

のため, 気温が高い時期には 30℃を保持することも難しいと考えられる。

以上のことから, 50℃での抽出が最適と考えられた。

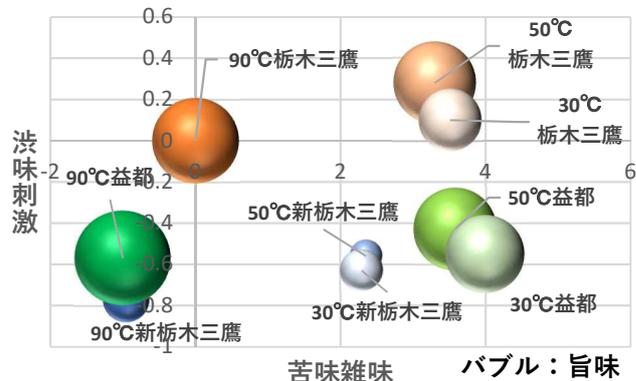


図1 味覚センサー測定前処理法の検討結果

3. 2 DHS-GC/MS による香り測定条件検討

3. 1と同様のサンプルを用いて, トウガラシの香り分析に最適な DHS-GC/MS 条件を検討した。測定条件は表1に, 結果を図2に示す。全ての測定条件において, トウガラシ各品種に特有の成分がそれぞれ検出された。そのため, 品種ごとの違いを比較するには3条件すべての分析が必要であると考えられた。よって, 3条件を同時に測定可能な Multi Volatile Method (以下, MVM) がトウガラシの特徴を把握する最適条件であると考えられた。

3. 3 トウガラシのおいしさの見える化

3. 3. 1 味の見える化

中国産の天津三鷹を対照とし, 信鷹・鷹の爪・山房・望都・益都・栃木三鷹・新三鷹の7品種について味覚センサーにより測定し, おいしさの見える化を行った結果を図3に示す。酸味はすべての品種において検出されなかった。また, 塩味も少なく, 中国産と国産の違いは明確ではなかった。渋味刺激・苦味(後味)・渋味(後味)は, 産地よりも品種による違いの方が大きかった。

中国産と国産による違いが大きいのは苦味雑味・旨味及び旨味コクであり, その3つの味覚について国産トウガラシが高い傾向があるという特徴を見える化することができた。

表1 DHS-GC/MS 測定条件

| No. | 捕集香氣 | 吸着剤 | 吸着条件 | パージ条件 |
|-----|------------|------------------------------|------------------------|--------------|
| 1 | トップ/ミドルノート | Carbopack B&X + Shincarbon-X | 25℃, 100mL/min, 6.5min | 12min ドライパージ |
| 2 | ミドル/ベースノート | Tenax TA | 80℃, 10mL/min, 6min | 12min ドライパージ |
| 3 | 不揮発性成分 | Tenax TA | 80℃, 100mL/min, 35min | ドライパージなし |

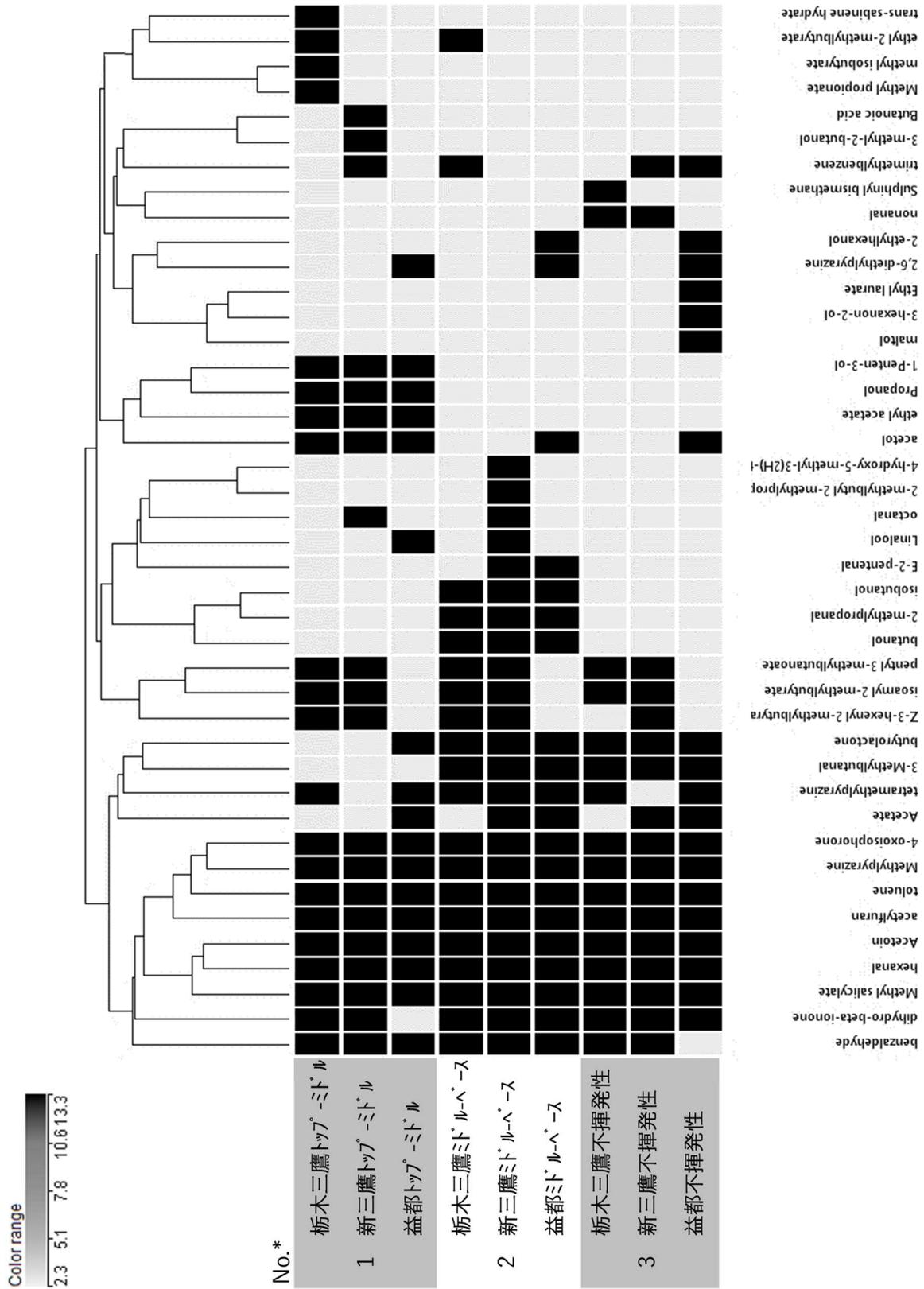


図2 DHS-GC/MS測定条件検討結果 *No.は表1に対応

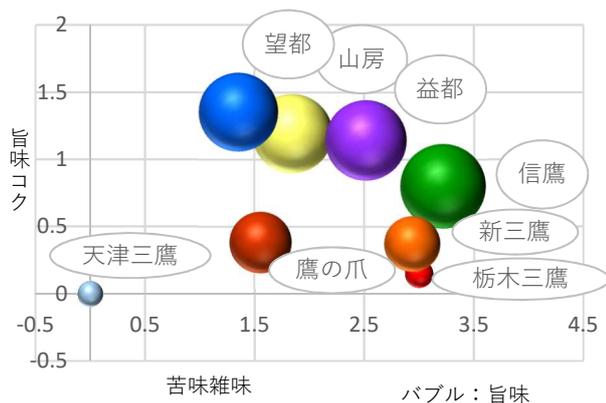


図3 味覚センサーによるおいしさの見える化

3. 3. 2 香りの見える化

トウガラシ各品種をMVMにて測定し、おいしさの見える化を行った結果を図4に示す。また、各品種に特徴的な香気成分を表2に示す。図中の(*)で示した成分は栃木三鷹に特徴的な成分である。官能では甘く香ばしい、強い香りが特徴であり、香気成分分析においてもバニラ・ハチミツ様の成分、香ばしさを示す成分が検出された。新三鷹は、栃木三鷹とおおむね近い傾向であったが、(*)の成分は見られず、官能でもやや

栃木三鷹と異なる香りであった。(**)の成分は山房、望都、益都に特徴的な成分群である。これらの3品種は他の品種とは異なる甘く重い香りを有していた。(***)の成分は中国産の天津三鷹にのみ含まれる成分群である。栃木三鷹と元は同じ品種であるにも関わらず、官能では、天津三鷹は甘く香ばしい香りが弱く、異なる香りを有していた。よって、これら成分が県産トウガラシとの香りの違いに影響している可能性が示唆された。

4 おわりに

トウガラシのおいしさの見える化に最適な前処理法・測定条件を検討し、味覚センサー・DHS-GC/MSそれぞれについて方法を確立した。その結果を用いて8品種のトウガラシを評価し、栃木県産トウガラシの特徴を見える化した。

これまででは、辛みにより客観的な味・香りの評価が困難であったが、今回の結果により、栃木県産トウガラシの優位性を打ち出して発信力強化に結びつくと考えられる。

表2 各品種に特徴的な香気成分

| 品種名 (試料名) | 香気成分 | 香気の特徴 (Character) |
|----------------|-------------------------------|---|
| 栃木三鷹 (*) | E-Hex-2-enol | floral, green, cortex, earthy |
| | heptadecane | perfume |
| | methyl vanillate | honey, vanilla, spicy, guaiacol, カーネーション |
| 山房・望都・益都 (**) | 2,3-pentadione | caramel, buttery, creamy, nutty, almond, diacetyl acetoin |
| | pentadecane | green, waxy |
| | 3,5-octadien-2-one | citrus-like, fatty, fruity, mashroom |
| | hexa-4-olide | coconut-like, tobacco, coumarinic, vanilla |
| | methionol | baked vegetables, sulfurous, meaty |
| | pentadecanal | sweet, fresh, waxy |
| 天津三鷹 (***) | p-xylene | medicinal |
| | 2-methyltetrahydrofuran-3-one | bread, 溶剤 |
| | 5-methylfurfural | almond-like, coffee-like, bready, brown |
| | 4-terpineol | apple, spicy, citrus, woody |
| | butyric acid | aged cheese |
| | beta-caryophyllene | camphor-like, spicy, clove, dry |
| | 4-methylacetophenone | hay, floral, 木ヤスパイス |
| | 2-Pentadecanone | burnt, fresh, jasmin, celery, floral, waxy |
| | pantolactone | balsamic |
| | Ethyl myristate | mild waxy, violet |
| 4-Chlorophenol | 消毒臭 | |

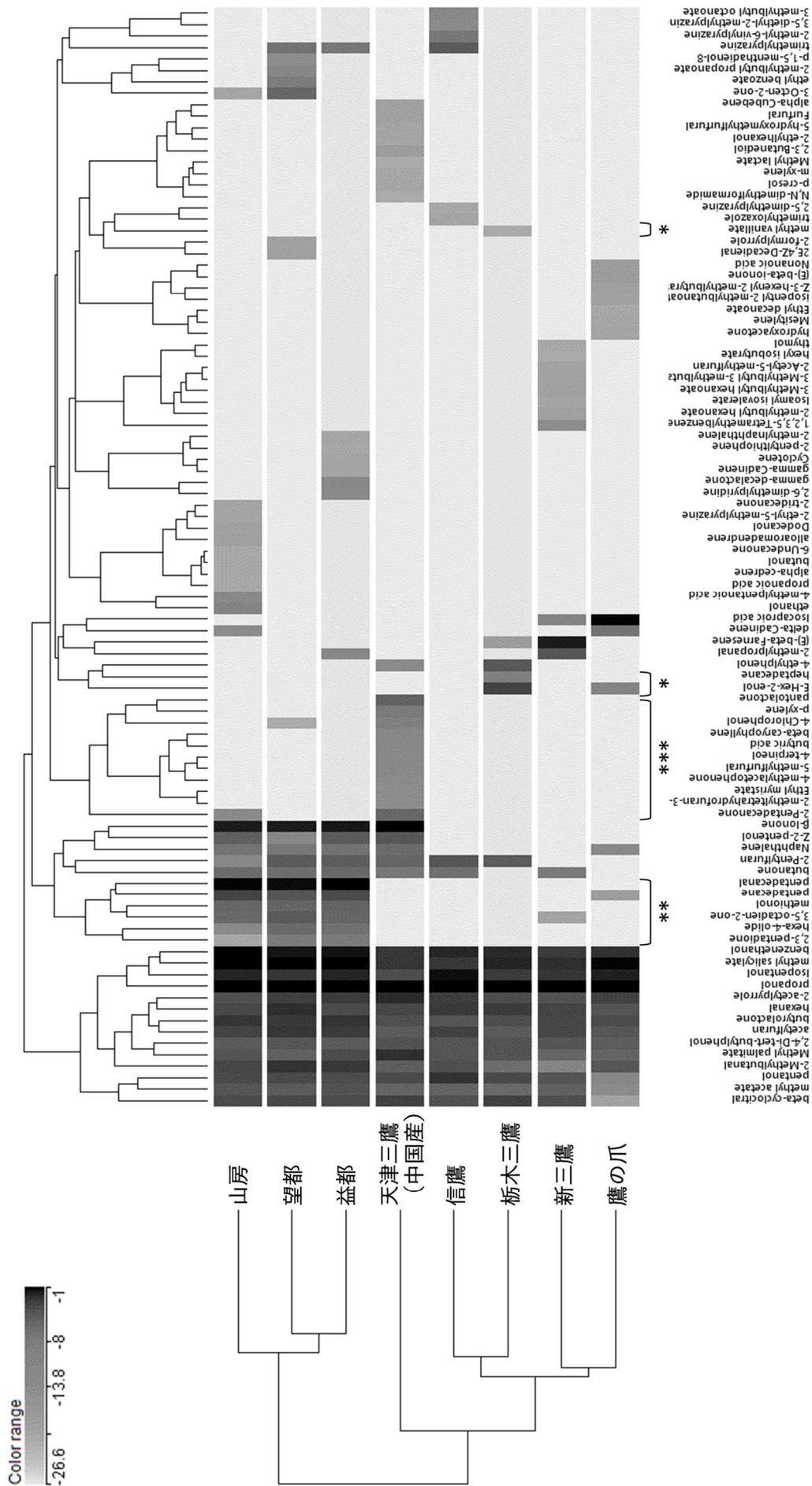


図4 DHS-GC/MS (MVM) によるおいしさの見える化

受託研究

二軸オープンロール機を用いて作製した セルロースナノファイバーマスターバッチの性能評価

小林 愛雲* 渡辺 克人*

Evaluation of Cellulose Nanofiber/Polypropylene Master Batches Compounded using Open Roll Continuous Kneader

KOBAYASHI Azumi and WATANABE Katsuto

二軸オープンロール機（ロール機）を用いて作製された 50 wt% セルロースナノファイバー（CNF）/ポリプロピレン（PP）マスターバッチ（MB）について、二軸混練押出機による希釈混練条件を検討して 10 wt% CNF/PP ペレットを作製した。作製したペレット断面には、幅数 μm から数十 μm の CNF 凝集物が確認された。ロール機温度が低いと、10 wt% CNF/PP 成形品の希釈混練条件の違いによる引張強度の差は大きく、引張、曲げ強度・弾性率が高い傾向があった。相溶化剤濃度を変えて作製された MB から作製した 10 wt% CNF/PP ペレットの CNF 凝集物-PP 界面の隙間は、相溶化剤 0 wt% では多く、50 wt% ではほとんど見られなかった。成形品の引張、曲げ強度は相溶化剤の添加で大きく向上したが、相溶化剤濃度による差は大きくなかった。

Key words: セルロースナノファイバー, マスターバッチ, 混練, 元素マッピング, 射出成形

1 はじめに

植物由来の繊維であるセルロースナノファイバー（CNF）を樹脂内部に分散させた CNF 複合樹脂は、軽くて高強度であることから、自動車、家電業界等から注目されている^{1),2)}。CNF 複合樹脂を成形するには、通常 CNF を高濃度に含有した樹脂ペレット（マスターバッチ：MB）を原料樹脂ペレットに混合し、所定濃度に希釈して成形する。製品の適性に応じて CNF 濃度を調整し、樹脂材料設計の自由度を高めるため、CNF を高濃度化した MB が求められている。

委託者では、フィラーを高濃度に混練できる二軸オープンロール機（以下ロール機）を用いて、CNF を高濃度に配合したポリプロピレン（PP）MB を作製している。しかし CNF/PP MB の CNF 分散性は十分でなく、また希釈成形品においては、CNF の複合化による強度向上の効果が十分得られていない。そこで本研究では、高濃度、高分散な CNF/PP MB の作製を目的に、委託者がロール機による処理条件を検討して作製した CNF/PP MB について、県南技術支援センターが二軸混練押出機による希釈混練条件の検討と、希釈混練により得られたペレットの CNF 分散状態、物性評価を行ったので報告する。

2 研究の方法

2. 1 CNF/PP MB の希釈混練

2. 1. 1 ロール機温度の検討

委託者がロール機を用いて作製した 2 種類の 50 wt% CNF/PP MB（CNF に対する相溶化剤濃度：2.5 wt%）（以下 MB1, MB2）について次のとおり希釈混練を行った。なお MB1 と MB2 は原料の配合は同じだが、ロール機の排出直前温度（非開示）が MB1 より MB2 の方が 5℃低い条件で作製されている。

MB1, 2 を箱形乾燥機（(株)松井製作所製 P0-50SH-J）で 80℃, 8 h 予備乾燥した後、MB1, 2 と CNF を含まない PP（以下ニート PP）ペレットをそれぞれ 1 対 4 でドライブレンドし、原料とした。原料を二軸混練押出機（芝浦機械(株)製 TEM-18DS）を用いて、原料フィーダー流量 2.5 kg/h、混練温度 155（MB2 のみ）、165, 175, 185℃、スクリー回転数 100, 300, 500 rpm で希釈混練し、得られた熔融樹脂（ストランド）を水冷した後、ペレタイザーでカットしペレット化することで 10 wt% CNF/PP ペレットを作製した。

2. 1. 2 2 段階希釈混練の検討

MB2 を①CNF 50 wt%→20 wt%→10 wt%（以下 50→20→10）、②CNF 50 wt%→30 wt%→10 wt%（以下 50→30→10）の 2 条件で 2 段階希釈混練した。

MB2 を箱形乾燥機で 80℃, 8 h 予備乾燥した後、MB2

* 栃木県産業技術センター 県南技術支援センター

とニート PP ペレットを CNF が①20 wt%または②30 wt% になるようドライブレンドし、原料とした。原料を二軸混練押出機を用いて、原料フィーダー流量 2.5 kg/h、混練温度 165℃、スクリュウ回転数 100 rpm で希釈混練し、2.1.1 と同様の方法で①20 wt%、②30 wt% CNF/PP ペレットをそれぞれ作製した。①20 wt%、②30 wt% CNF/PP ペレットとニート PP ペレットを CNF が 10 wt% になるようドライブレンドし、前述と同じ条件で希釈混練して 10 wt% CNF/PP ペレットを作製した。

2.1.3 相溶化剤濃度の検討

委託者がロール機を用いて、相溶化剤濃度を変えて作製した 50 wt% CNF/PP MB (CNF に対する相溶化剤濃度: 0, 5, 10, 50 wt%) (以下 MB3) について、次のとおり希釈混練を行った。

MB3 を箱形乾燥機で 80℃、8 h 予備乾燥した後、MB3 とニート PP ペレットを 1 対 4 でドライブレンドし、原料とした。原料を二軸混練押出機を用いて、原料フィーダー流量 2.5 kg/h、混練温度 165℃、スクリュウ回転数 100 rpm で希釈混練し、2.1.1 と同様の方法で 10 wt% CNF/PP ペレットを作製した。

2.2 CNF/PP ペレットの CNF 分散状態評価

10 wt% CNF/PP ペレットを液体窒素中で切断し、断面を金 (Au) 蒸着後、走査型電子顕微鏡: SEM (日本電子 (株) 製 JSM-IT200LA) を用いて加速電圧 5 kV、照射電流 (PC) 30 で観察した。また SEM 付属のエネルギー分散型 X 線分析装置を用いて、加速電圧 8 kV、PC50、デュエルタイム 0.20 ms、スイープ回数 20 で元素マッピングした。

2.3 試験片の作製

作製した 10 wt% CNF/PP ペレットを箱形乾燥機で 80℃、6 h 予備乾燥した後、射出成形機 (日精樹脂工業 (株) 製 NEX 80IV-9EG) を用いてシリンダー温度 180℃、射出速度 10 mm/min、保圧 23 MPa、保圧時間 21 s、金型温度 48℃ (固定側ミラープレートの熱電対により計測し調整) で成形し、得られた成形品をゲートカットして JIS K7139:2009 のダンベル形引張試験片タイプ A1 を作製した。またダンベル形引張試験片の一部を樹脂試験片ノッチ加工機 ((株) 安田精機製作所製 No. 189-PNCA) を用いて加工し、短冊形試験片を作製した。ニート PP ペレットについても同様に射出成形し、試験片を作製した。以下、MB1~3 を希釈混練して作製した 10 wt% CNF/PP 成形品をそれぞれ成形品 1~3 とする。

2.4 試験片の物性評価

作製したダンベル形引張試験片の引張強度・弾性率は、JIS K 7161-1:2014 により万能材料試験機 (50 kN) ((株) 島津製作所製 AG-50kN-XV (特型)) を用いて、試験速度 $v_1=0.5$ mm/min、 $v_2=5$ mm/min (速度切替位置: ス

トローク 0.5 mm) で測定した。引張弾性率の測定には接触式伸び計 ((株) 島津製作所製 SSG50-10SH) を用いた。短冊形試験片の曲げ強度・弾性率は JIS K 7171:2016 により万能材料試験機 (50 kN) を用いて、支点間距離 64 mm、試験速度 2 mm/min で測定した。曲げ弾性率の測定にはたわみ測定装置 ((株) 島津製作所製 3 点曲げ試験用 たわみ測定装置) を用いた。

3 結果及び考察

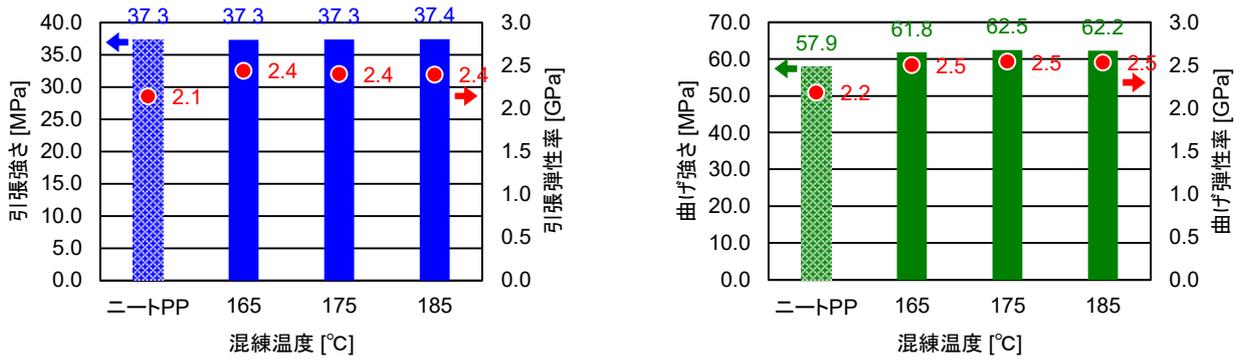
3.1 ロール機温度の検討

作製した 10 wt% CNF/PP ペレット (以下 CNF/PP ペレット) と試験片は、二軸混練押出機の混練温度、スクリュウ回転数が高いほど黄変する傾向が見られた。ニート PP ペレットを二軸混練押出機で処理後、射出成形して得た試験片は、混練温度、スクリュウ回転数による黄変等の変化が見られなかったことから、CNF/PP ペレット、試験片の黄変は、CNF が変色したことによるものと考えられる。

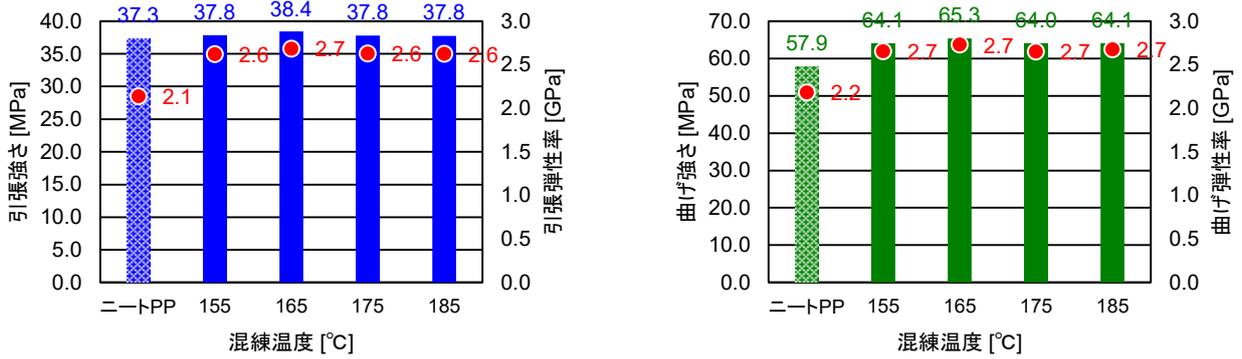
MB1 を混練温度 165, 175, 185℃、スクリュウ回転数 100 rpm で希釈混練し作製した成形品 1 の引張、曲げ試験の結果を図 1 a) に、MB2 を混練温度 155, 165, 175, 185℃、スクリュウ回転数 100 rpm で希釈混練し作製した成形品 2 の結果を図 1 b) に示す。ニート PP と比較すると、成形品 1 の引張強度は変わらないものの、引張弾性率、曲げ強度・弾性率は高くなった。また成形品 1 の引張、曲げ強度・弾性率すべてにおいて、混練温度による有意差は見られなかった。一方、成形品 2 は、引張、曲げ強度・弾性率すべてにおいてニート PP より高くなった。また 165℃ で混練し作製した成形品 2 の引張、曲げ強度は、他の温度で混練した成形品よりわずかに高いことが明らかとなった。

混練温度 165℃、スクリュウ回転数 100, 300, 500 rpm で希釈混練し作製した成形品の結果を図 2 に示す。ニート PP と比較すると、成形品 1 の引張弾性率、曲げ強度・弾性率は高くなった。また 100 rpm で混練し作製した成形品 1 の引張強度は、300, 500 rpm で混練した成形品よりわずかに高いことが分かった。一方、成形品 2 は、引張、曲げ強度・弾性率すべてにおいてニート PP より高くなった。また 100 rpm で混練し作製した成形品 2 の引張、曲げ強度は、300, 500 rpm で混練した成形品よりわずかに高いことが分かった。

成形品 2 は成形品 1 よりも希釈混練条件の違いによる引張強度の差が大きく、また引張、曲げ強度・弾性率すべてにおいて高い傾向があることが分かった。これは MB2 の作製時におけるロール機の排出直前温度が MB1 より 5℃ 低いいため、せん断応力が大きくなり、CNF の分散

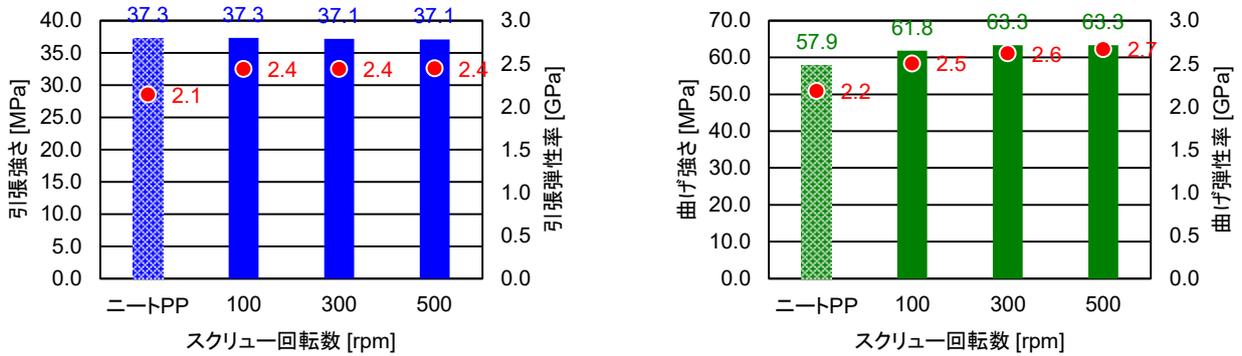


a) 成形品 1

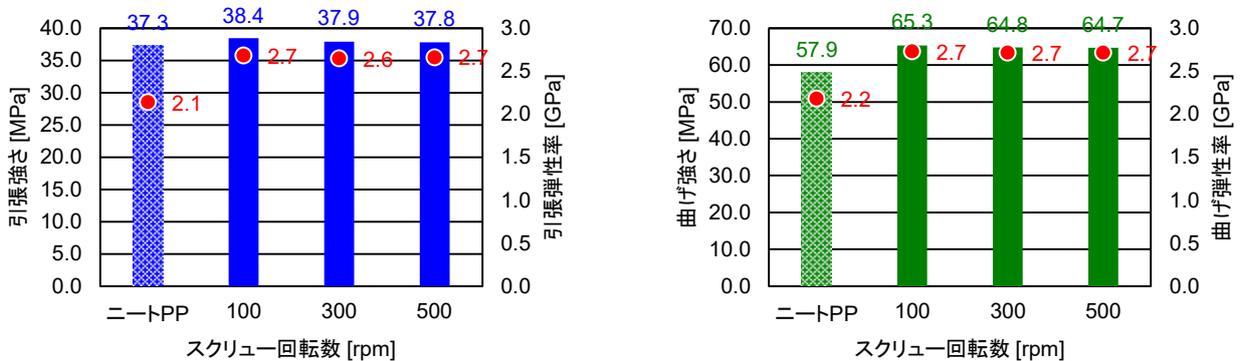


b) 成形品 2

図1 混練温度の違いによる 10 wt% CNF/PP 成形品の引張、曲げ強度・弾性率



a) 成形品 1



b) 成形品 2

図2 スクリュー回転数の違いによる 10 wt% CNF/PP 成形品の引張、曲げ強度・弾性率

性が向上したためと推察される。

MB2を165°C、100 rpmで希釈混練し作製したCNF/PPペレット断面のSEM像を図3に示す。他の条件で作製し

たペレット断面のSEM像は示していないが、今回検討したすべての条件において、CNF/PPペレット断面には、幅数μmから数十μmのCNF凝集物が複数確認された。CNF

凝集物-PP 界面の一部に隙間 (図3の丸で囲んだ部分) が見られたことから、CNF と PP の密着性は不十分であると考えられる。また CNF/PP ペレット断面を SEM で元素マッピングしたところ、酸素 (O) と CNF 凝集物の位置が一致することが明らかになった (図4)。酸素 (O) マッピングにより幅数 μm 以上の CNF 凝集物の分散状態が評価可能と見込まれることから、本手法により各 CNF/PP ペレット断面の酸素 (O) マッピングを行った (図5)。その結果、CNF 凝集物サイズ、分散状態において、MB 作製時のロール機温度、希釈混練時の混練温度、スクリー回転数による明らかな差は見られなかった。

3.2 2段階希釈混練の検討

MB2 において、最も高い強度を示した 165°C 、100 rpm の条件で 2 段階希釈混練 (以下 2 段階希釈) を検討した。2 段階希釈により作製した CNF/PP ペレット断面の SEM 観察、酸素 (O) マッピング (図6) を行った。SEM 像は示していないが、CNF/PP ペレット断面には、図3 (1段階希釈 (50 \rightarrow 10)) と同様の CNF 凝集物及び CNF 凝集物-PP 界面の隙間が見られた。また図6より、1段階希釈と 2段階希釈において、CNF 凝集物サイズ、分散状態の明らかな差は見られなかった。CNF 等のセルロース繊維は相溶性の良い樹脂との熔融混練時には分散 (解繊) が進行することが知られているが³⁾、疎水性の高い PP との相溶性は良くないため、今回検討した原料においては希釈段数を増やしてもそれほど分散しなかったと考えられる。

成形品 2 の希釈条件 (段数) の違いによる引張、曲げ試験の結果を図7に示す。2段階希釈 (50 \rightarrow 20 \rightarrow 10、50 \rightarrow 30 \rightarrow 10) の引張、曲げ強度は、1段階希釈 (50 \rightarrow 10) より低くなった。これは 2段階希釈に伴う CNF 分散によ

る強度向上よりも、劣化による強度低下の影響が大きいためと推察される

以上 3.1, 3.2 の検討から、ロール機、二軸混練押出機の条件変更のみによる大幅な物性、CNF 分散性向上は困難であり、材料の見直し (CNF の疎水化、相溶化剤濃度の検討等) が必要であることが示唆された。

3.3 相溶化剤濃度の検討

作製した CNF/PP ペレット断面の SEM 像を図8に示す。相溶化剤 0 wt% のペレット断面には、CNF 凝集物-PP 界面の隙間が多く観察された。また CNF が抜けてきたとみられる穴 (図8の矢印部) が観察された。一方で相溶化剤 50 wt% のペレット断面には、CNF 凝集物-PP 界面の隙間がほとんど見られなかったことから、相溶化剤濃度を高くすることで、CNF-PP 界面の密着性が向上することが確認された。なお SEM 像は示していないが、相溶化剤 5, 10 wt% のペレット断面には、図3と同程度の CNF 凝集物-PP 界面の隙間が観察された。作製した CNF/PP ペレット断面の酸素 (O) マッピング像を図9に示す。CNF 凝集物サイズ、分散状態において、相溶化剤濃度による明らかな差は見られなかった。

各成形品 3 の引張、曲げ試験の結果を図10に示す。成形品 3 の引張、曲げ強度は相溶化剤の添加で大きく向上することが明らかとなった。しかし今回検討した条件においては、相溶化剤濃度による差は大きくなかった。データは示していないが、ニート PP ペレットと相溶化剤をドライブレンドし、射出成形して得た試験片の引張強さは、相溶化剤濃度が高いと低下する傾向が見られた。相溶化剤濃度を高くすると CNF-PP 界面の密着性は向上する一方で、PP の強度は低下するため、相溶化剤濃度による強度差は大きくなかったと考えられる。

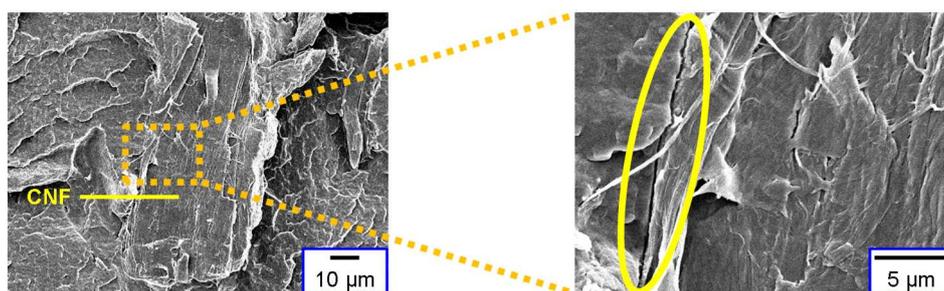


図3 MB2 を 165°C 、100 rpm で希釈混練し作製した 10 wt% CNF/PP ペレット断面の SEM 像

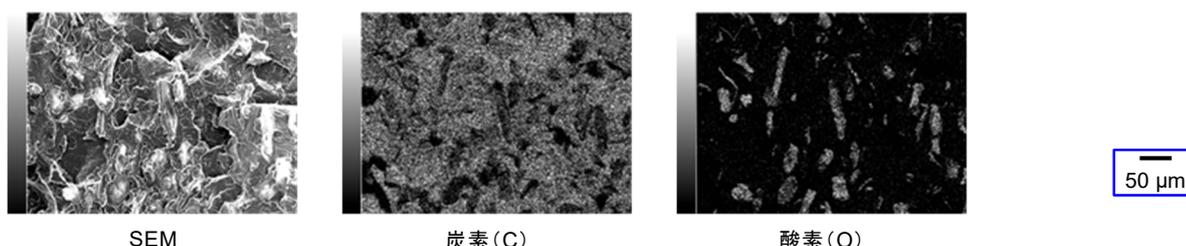


図4 MB2 を 165°C 、100 rpm で希釈混練し作製した 10 wt% CNF/PP ペレットの元素マッピング像

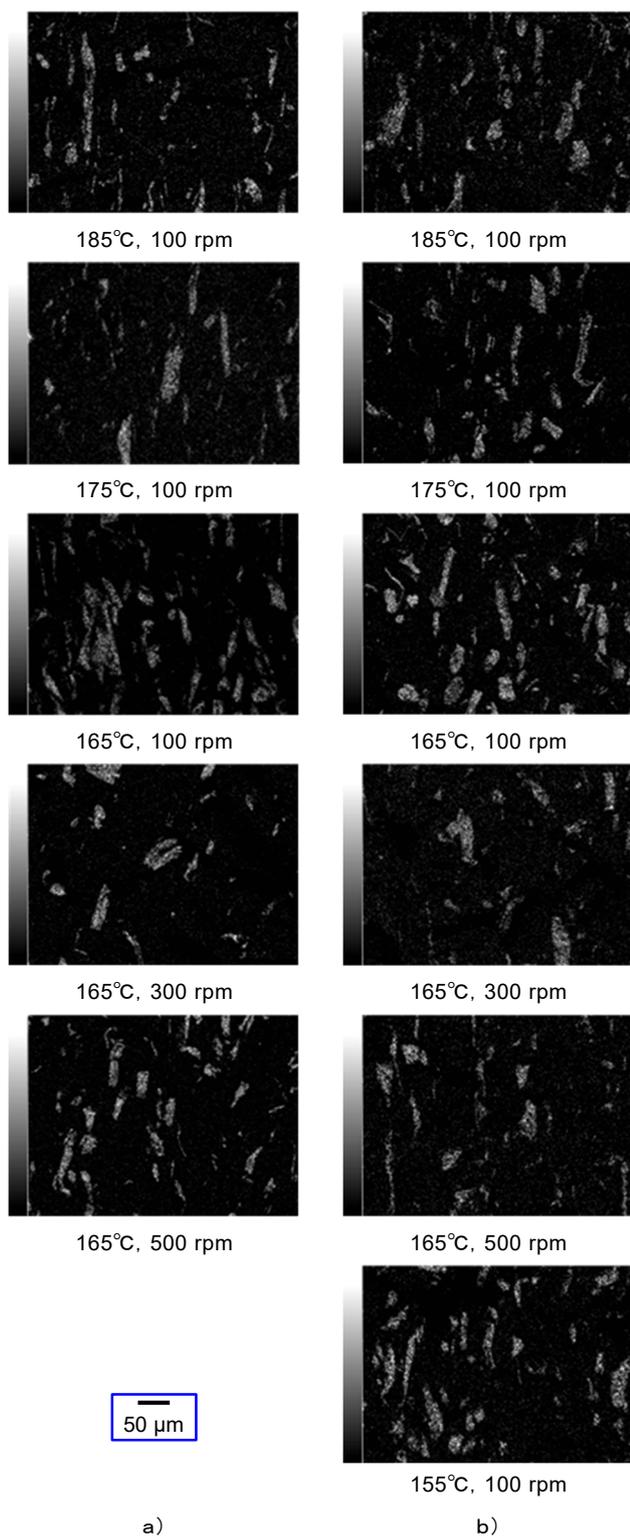


図5 10 wt% CNF/PP ペレット断面の酸素 (O) マッピング像

- a) MB1 を希釈混練し作製したペレット (ペレット1)
- b) MB2 を希釈混練し作製したペレット (ペレット2)

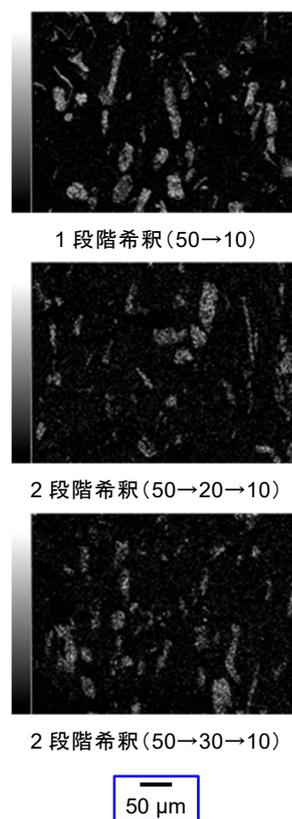


図6 希釈条件 (段数) の違いによる 10 wt% CNF/PP ペレット (ペレット2) 断面の酸素 (O) マッピング像

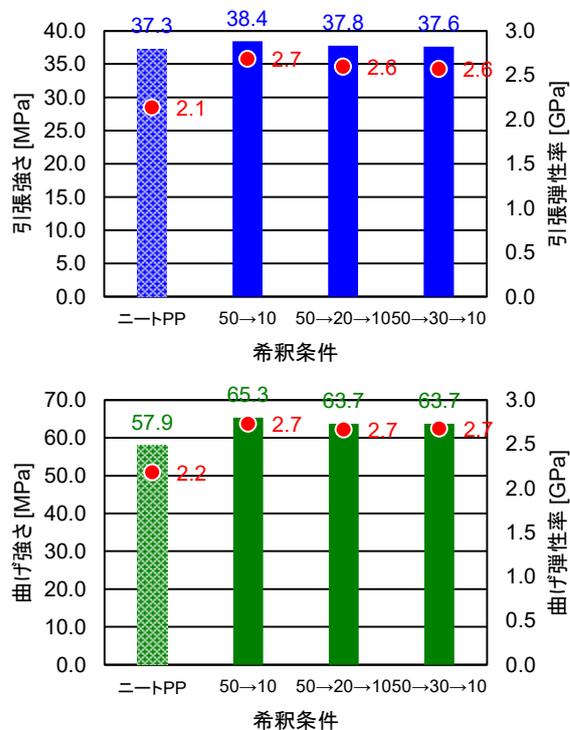
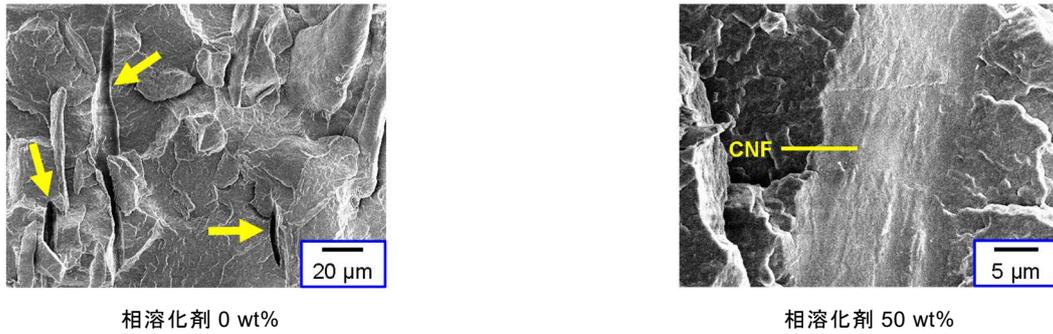
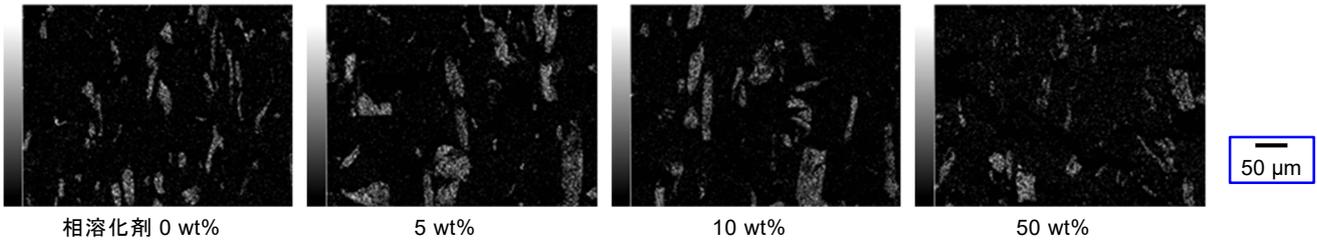


図7 希釈条件 (段数) の違いによる 10 wt% CNF/PP 成形品 (成形品2) の引張, 曲げ強度・弾性率



相溶化剤 0 wt% 相溶化剤 50 wt%
 図 8 MB3 を希釈混練し作製した 10 wt% CNF/PP ペレット断面の SEM 像



相溶化剤 0 wt% 5 wt% 10 wt% 50 wt%
 図 9 MB3 を希釈混練し作製した 10 wt% CNF/PP ペレット断面の酸素 (O) マッピング像

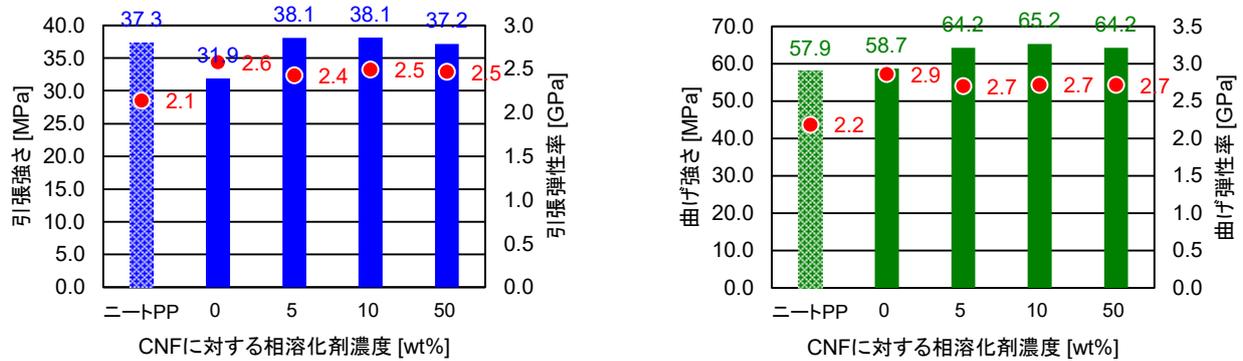


図 10 10 wt% CNF/PP 成形品 (成形品 3) の引張, 曲げ強度・弾性率

4 おわりに

高濃度、高分散な CNF/PP MB の作製を目的に、委託者がロール機による処理条件を検討して作製した 50 wt% CNF/PP MB について、二軸混練押出機による希釈混練条件を検討し、10 wt% CNF/PP ペレットを作製した。作製したペレットの CNF 分散状態を SEM により、物性を射出成形後、引張、曲げ試験により評価し、次の知見を得た。

- (1) 10 wt% CNF/PP ペレット断面には、幅数 μm から数十 μm の CNF 凝集物が複数確認された。またペレット断面の元素マッピングにより、酸素 (O) と CNF 凝集物の位置が一致することが明らかになった。
- (2) MB1 より低温で作製された MB2 を希釈混練し作製した成形品 2 は、成形品 1 よりも希釈混練条件の違いによる引張強度の差が大きく、また引張、曲げ強度・弾性率が高い傾向があった。

- (3) MB2 を 2 段階希釈混練して作製した成形品は、1 段階希釈で作製した成形品と比較して、CNF 分散状態は同等であり、引張、曲げ強度は低下した。
- (4) 相溶化剤濃度を変えて作製された MB3 を希釈混練し作製した 10 wt% CNF/PP ペレットの CNF 凝集物-PP 界面の隙間は、相溶化剤 0 wt% では多く、50 wt% ではほとんど見られなかった。成形品の引張、曲げ強度は相溶化剤の添加で大きく向上したが、相溶化剤濃度による差は大きくなかった。

参考文献

- 1) 矢野浩之：“日本ゴム協会誌”，85 (12)，376-381，(2012)
- 2) 矢野浩之：“工業材料”，68 (8)，14-16，(2020)
- 3) 仙波健：“WEB Journal”，2018.11，10-12，(2018)

IV 重点研究

Selected Research

重点研究

金属 3D プリンタ 造形品の構造部材適用に向けた 耐久性・信頼性に関する研究

石川 信幸* 高岩 徳寿* 柏崎 親彦*

Study on Durability and Reliability for Application to
Structural Members of Metal 3D Printer
ISHIKAWA Nobuyuki, TAKAIWA Norihisa and KASHIWAZAKI Chikahiko

金属 3D プリンタによる造形品（金属積層造形品）は、造形時に発生する空隙等に起因し機械加工品等と比べ機械的性質が劣るとされ、疲労特性に関するデータも少ない。本研究では、3D プリンタの構造部材適用に向け、造形後に施した処理が造形品に及ぼす機械的性質及び疲労特性を評価した。時効処理無し試料と時効処理試料は、ほぼ同等の疲労限度となり溶製材の約 50%の疲労強度となることがわかった。時効処理後ショットブラストを施し表面に圧縮の残留応力を付与した試料は、未処理品に比べ疲労限度が 30%向上することが認められた。

Key Words: 3D プリンタ, 金属積層造形, 高サイクル疲労, マルエージング鋼

1 はじめに

今日のものづくりは、多品種少量生産に移行している中、いかに効率良く高付加価値の製品を製造するかが課題となっている。このような中で、3D プリンタによる造形品を治具や金型などの製造部材としてだけでなく、最終製品や部品として直接活用していく取り組みが注目されている^{1),2)}。

今後は、金属 3D プリンタを用いた 3D データからの直接製造による省力化の他、部品一体化による軽量化・機能化、オンデマンド製造などの特徴を発揮できる設計・製造技術へのアプローチが必要である²⁾。

しかし、一般的に金属 3D プリンタ造形品は、鍛造部品や機械加工品と比べ機械的性質が劣るとされ、同時に疲労特性に関する情報も少ない。これは、造形時に発生する内部の僅かな空隙等に起因して機械的性質や疲労強度が低くなるため、機械構造部材や機構部材などへの適用の妨げとなっている³⁾⁻⁶⁾。したがって、金属 3D プリンタ造形品の機械構造部材等への適用を進めるためには、造形品の機械的性質のみならず疲労特性を把握し耐久性・信頼性をあらかじめ検証しておく必要がある。

そこで本研究では、金属 3D プリンタ造形品の造形後に施した処理と、造形品の機械的性質や疲労特性との関係を把握し、疲労限度について調査した。

2 研究の方法

2.1 供試材及び試験片

供試材は、マルエージング鋼粉末を用いて金属 3D プリンタ（(株) ソディック製・OPM-250L）により造形した。造形条件は、高岩らの研究によって断面の密度が 99.89%と最大となる条件を採用した⁷⁾。造形条件を表 1 に示す。素材は、図 1 に示すとおりベースプレートに垂直な方向に積層し、直径 10mm 長さ 150mm の丸棒を作製した。また、造形に使用したマルエージング鋼の化学成分を表 2 に示す。造形した素材を試験片形状に機械加工した。試験片形状を図 2 に示す。機械加工後の試験片の一部に対し、真空熱処理炉（(株) サーマル製・VC-4）を用いて図 3 に示す熱処理サイクルで時効処理を施した。すなわち、340℃4 時間保持後 480℃3 時間保持しその後炉冷した。時効処理後の試験片の一部を粒径 1.2mm の鉄系ショットをショットタンブラスト（新東工業（株）製・STB-0B TD-2G）を用いて 3 分間投射した（以下、ショット処理）。なお、本処理は、機器の構造上詳細な投射条件を設定できない。疲労試験に供する試験片の名称と処理を表 3 に示す。以下、機械加工した試験片を「時効無し」、機械加工後時効処理した試験片を「時効処理」、時効処理後ショット処理を施した試験片を「時効+ショット」と呼ぶこととする。

*栃木県産業技術センター 機械電子技術部

表 1 素材造形条件

| | |
|------------------------------|-------|
| 積層厚さ (mm) | 0.04 |
| レーザー走査ピッチ (mm) | 0.12 |
| レーザースポット径 (mm) | 0.2 |
| レーザー走査速度 (mm/s) | 1000 |
| レーザーパワー (W) | 420 |
| エネルギー密度 (J/mm ²) | 87.50 |

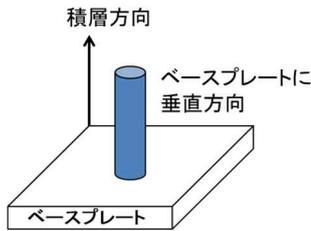


図 1 素材造形方向

表 2 化学成分 (wt%)

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Ni |
| 0.01 | 0.04 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 17.9 |
| Cr | Mo | Co | Ti | Fe | |
| 0.02 | 4.99 | 8.99 | 0.98 | Bal. | |

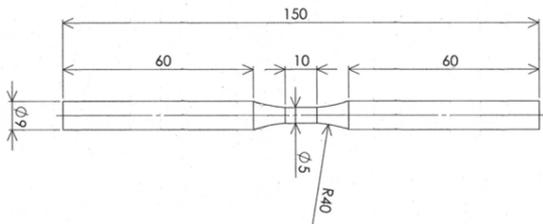


図 2 試験片形状

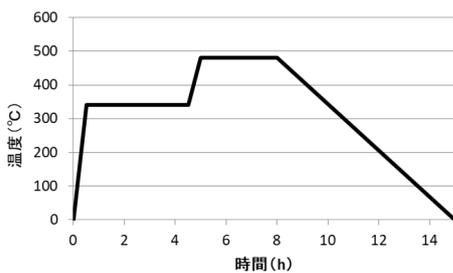


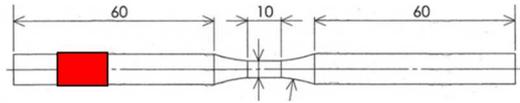
図 3 時効処理熱処理サイクル

表 3 試料名と処理

| 試料名称 | 処理 |
|---------|---|
| 時効無し | 造形素材から旋盤で試験片形状に機械加工 |
| 時効処理 | 時効無し試験片を、真空熱処理炉で 340°C 4h 保持、480°C 3h 保持後炉冷 |
| 時効+ショット | 時効処理後に、粒径 1.2mm の鉄系ショットをショットタンブラストで 3 分間投射 |

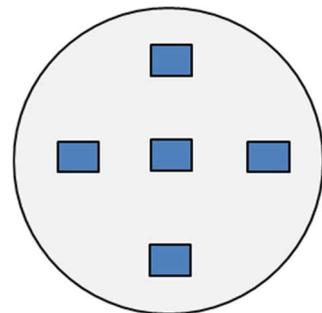
2. 2 機械的性質と残留応力の測定

試験片平行部軸方向の表面粗さ測定は、表面粗さ測定システム (アメテック (株) 製・PGI840) を用いた。平行部軸方向の表面残留応力の測定は、微小部 X 線応力測定装置 (リガク (株) 製・Auto MATE) を用いた。測定は、 $\sin^2\Psi$ 法 (Cr-K α 線, α -Fe (211)) で行った。表面粗さ及び残留応力の測定は、試験片加工の工程毎に全数測定を行いその変化を確認した。時効処理により表面粗さは変化しないため時効後の表面粗さ測定は省略した。空隙率及び硬さ測定試料は、疲労試験後のつかみ部より切り出した。試料採取位置を図 4 に示す。硬さは、ロックウェル硬さ試験機 ((株) アカシ製 HR522) を用いて測定し、内部の空隙率は、時効無し、時効処理各 3 本を研磨し、金属顕微鏡 (オリンパス (株) 製・GX71) により図 5 に示す試料中央と周囲 4 か所の 5 視野を 100 倍で撮影した画像を 2 値化処理し、空隙の面積比の平均値として求めた。



■ 硬さ及び空隙率測定試料採取位置

図 4 硬さ及び空隙率測定試料採取位置



■ : 撮影位置

図 5 光学顕微鏡写真撮影位置

2. 3 疲労試験

疲労試験は、電磁共振式疲労試験機 ((株) ツビッコローエル製・Vibrophore100 (図 6)) を用いた。繰返し数は 1.1×10^7 回まで行った。疲労試験後の破面は、走査型電子顕微鏡 (日本電子 (株) 製・JSM-5600LV) を用いて観察した。



図6 疲労試験機

3 結果及び考察

3.1 試験片の処理と機械的性質

表4に試験片の表面粗さと表面残留応力の測定結果を示す。時効+ショット試料の表面粗さは、時効無し及び時効試料の表面粗さと同等であった。時効処理後の試料の硬度はHRC51~54のため、ショット処理を施しても表面の変形は起きにくく表面粗さが変化しなかったものと考えられる。表面の残留応力は、時効無し試料が最も引張残留応力が大きく、時効処理を施すことにより引張残留応力は減少した。さらに、時効+ショット試料は、ショット処理により圧縮残留応力が付与された。

表4 表面粗さと表面残留応力測定結果

| 試料名 | 表面粗さ (μm) | | 表面残留応力 (MPa) |
|---------|-----------|---------|--------------|
| | Ra | Rz | |
| 時効無し | 0.4~2.0 | 2.9~8.7 | 135~516 |
| 時効処理 | | | 106~267 |
| 時効+ショット | 0.5~1.1 | 3.6~7.1 | -243~-345 |

表5にロックウェル硬さと断面の空隙率の測定結果を示す。時効処理によって材料が強化されたことが確認された。断面の空隙率は、時効処理による変化はなかった。図7に空隙率を測定した時効無し試料、時効処理試料の光学顕微鏡写真を示す。写真中の黒色部が試料内部の空隙である。

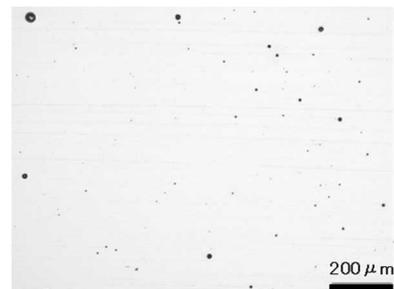
表5 ロックウェル硬さと断面の空隙率測定結果

| 試料名 | ロックウェル硬さ HRC | 断面の空隙率 (%) |
|---------|-----------------|---------------|
| 時効無し | 34~37 | 0.23~0.26 |
| 時効処理 | 51~54 | 0.22~0.29 |
| 時効+ショット | | — |

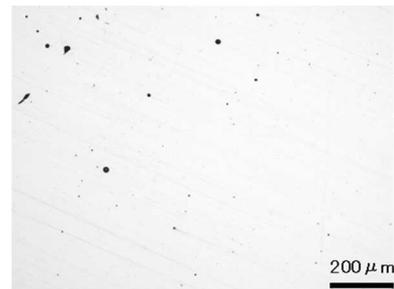
3.2 疲労強度

図8に室温大気環境下における疲労試験結果を示す。時効無し試料と時効処理試料の間では大きな違いは見られなかった。 1.1×10^7 回疲労限度はおよそ300MPaであり、溶製材の約50%の強度になった⁸⁾。応力が400MPa以下になると破断繰返し数にばらつきが見られた。3Dプリンタ造形品の疲労強度は、内部の空隙や密度に影響を受けるとの研究報告があり、時効処理により材料強度は向上したが、内在する空隙が同等のためほぼ同一線上になったと推測される³⁾。

時効+ショット試料は、800MPaから長寿命側に推移し疲労限度は400MPaとなり他の2試料に比べ疲労限度が30%向上した。時効+ショット試料は、表面の圧縮応力が初期亀裂発生を抑制して長寿命化に至ったと推測される。

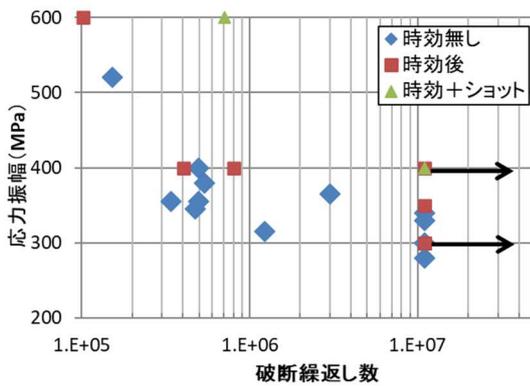
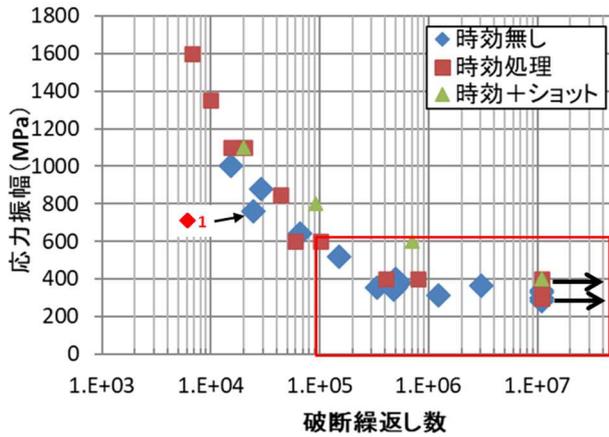


時効無し試料の断面光学顕微鏡写真



時効処理試料 断面光学顕微鏡写真

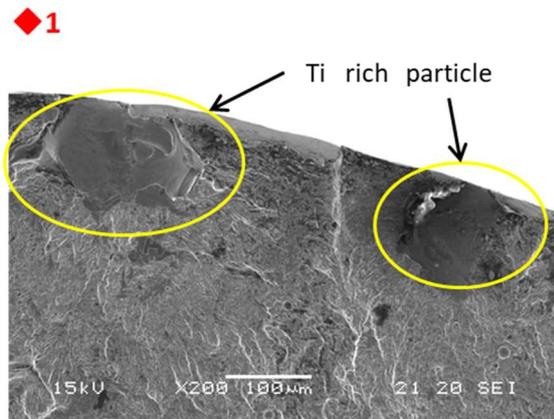
図7 断面の光学顕微鏡写真



上図枠内応力振幅600MPa以下領域の拡大図
 図8 疲労試験結果

3.3 破壊面観察

試験後の試料を、走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を図9に示す。図8中で寿命が短かった時効無し試料の応力760MPa、破断繰返し数24,000回の試料(◆1)の破壊起点近傍には、基地組織よりチタンが強く検出される100 μ m程度の粒子が観察された(丸囲い部)。この粒子が起点となったと推測される⁹⁾。



時効無し試料 応力760MPa 破断繰返し数24,000回
 図9 SEM観察結果

4 おわりに

金属 3D プリンタで造形したマルエージング鋼造形品に機械加工，時効処理，時効後ショット処理を施した3種の試料の疲労試験を行い，以下の知見を得た。

- (1) 時効無し，時効処理がほぼ同一のS-N線になり，疲労限度はおよそ300MPaで溶製材の50%程度になった。空隙の割合が同程度のため，時効無しと時効処理の疲労限度に差が生じなかったと考えられる。
- (2) ショット処理を施すことで，表面に圧縮残留応力が付与され800MPa以下の応力で長寿命化することが確認され，疲労限度はおよそ400MPaであった。ショット処理を行わない試料に比べ33%疲労限度が向上した。
- (3) 試験片表面に，基地とは異なる粒子が露出しているような場合，早期に破断に至ることがわかった。

謝 辞

本研究を実施するにあたり多大なるご指導をいただいた宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科 教授 高山 善匡氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小岩井修二：“素形材”，Vol.61No.7, 21-26, (2020)
- 2) チャックハン・タン：“素形材”，Vol.61No.7, 34-39, (2020)
- 3) 趙研，安田弘行，當代光陽，上田実，竹山雅夫，中野貴由：“スマートプロセス学会誌”，第9巻第4号，180-184, (2020)
- 4) 土屋詩織，高橋宏治：“ばね論文集”，第66号，7-12, (2021)
- 5) 唐土庄太郎，増尾大慈，矢倉孟，山本泰弘：“粉末および粉末冶金”，第61巻第5号，250-254, (2014)
- 6) 平田智丈，木村貴広，中本貴之：“軽金属”，第70巻第4号，128-135, (2020)
- 7) 高岩徳寿，荒井辰也：“栃木県産業技術センター研究報告”，No.16, 53-57, (2019)
- 8) 深澤郷平，勝又信行，古屋雅章，寺澤章裕，鈴木大介，佐野正明：“山梨県産業技術センター研究報告”，第1号, (2018)
- 9) 政木清孝，小林祐次，水野悠太：“材料” Vol.67 No.10, 891-897, (2018)

重点研究

超高分子量ポリエチレン配向フィルムの積層成形による 高弾性率プラスチック成形体の開発

大森 和宏* 桐原 広成* 益子 朱音*

Development of High Elastic Modulus Plastic by Lamination Molding of
Ultra-High Molecular Weight of Polyethylene Drawn Film

OMORI Kazuhiro, KIRIHARA Hironari and MASHIKO Akane

超高分子量ポリエチレン (UHMWPE) 延伸フィルムの積層成形による高弾性率自己補強プラスチック成形体製造技術の確立のため、延伸フィルム同士を融着させるための低分子量成分の添加条件、高弾性率フィルムを製造するための延伸条件及び高弾性率を保持し融着する熱プレス条件を検討した。平均分子量 200×10^4 の UHMWPE に対し、低分子量成分として平均分子量 50×10^4 のポリエチレンを 20wt% 添加した UHMWPE ゲルシートを 33 倍延伸することで、弾性率は 79GPa まで向上した。また、延伸フィルム同士を 150°C 、 $20 \sim 50\text{MPa}$ で融着することで、融着強度は延伸倍率によらず $2 \sim 5\text{N/mm}$ であった。この融着処理で弾性率は低下するものの、弾性率 30GPa 以上の成形体を製造できることが示された。

Key words: 超高分子量ポリエチレン, 延伸フィルム, 分子配向, 積層成形, 自己補強プラスチック

1 はじめに

プラスチックは、軽量で成形性に優れる等の特徴から、様々な製品において利用されているが、金属等と比較し強度や弾性率等が劣るため、強度等が求められる製品にはガラス繊維や炭素繊維で強化したプラスチックが使用されている。近年、更なる軽量化のため、自己の分子配向により強化された自己補強プラスチックが注目されており、音響振動板やスポーツ用品、自動車部品等に利用されている。例えば音響振動板では、高弾性率、低密度、高内部損失の特徴を有する材料が適しており、それらの特性を満たす自己補強プラスチックが採用されている¹⁾。特に近年、with/post コロナ社会に向けて、人と物や人同士の接触機会を減らした「非接触型社会」の実現のためスマートスピーカーを用いた IoT 機器等の音声制御が加速すると予想され、音響振動板にはさらなる高性能化が求められている。加えて、エコなプラスチック製品への要求が高い昨今、易リサイクル性である自己補強プラスチックの開発・用途拡大が期待されている。

筆者らは、超高分子量ポリエチレン (UHMWPE) のバッテリーセパレータフィルム (BSF) 端材を積層し、ある温度及び圧力下で圧縮成形することで、フィルムの分子配向を維持したまま一体化された自己補強プラスチック

成形体を製造できることを見出している²⁾。この成形体は切削加工が可能であり、様々な部品への応用が期待できる。しかし、BSF 端材を用いた成形体では、音響振動板等に用いるには弾性率が低く、配向度を高めた成形体の製造が必要であった。

そこで本研究では、高弾性率が見込める UHMWPE のゲル延伸及び溶融延伸フィルムを用いて、既存の音響振動板よりも高い、弾性率 30GPa 以上の成形体の製造技術を確立するため、フィルム同士を融着させる低分子量成分の添加条件、高弾性率フィルムを製造するための延伸条件及び高弾性率を保持し融着する熱プレス条件について検討したので報告する。

2 研究の方法

2.1 材料

UHMWPE シート材料は、三井化学(株)製ハイゼックスミリオン 240S (平均分子量 200×10^4)、630M (平均分子量 580×10^4) に、低分子量成分として 030S (平均分子量 50×10^4) を 0~30wt% 添加したものをを用いた。酸化防止剤は、川口化学工業(株)製 H-BHT を用いた。デカヒドロナフタレン及びアセトンは、関東化学(株)製の特級グレードを使用した。

2.2 UHMWPE シートの作製及び延伸

ゲル延伸用のシートは、デカヒドロナフタレンに対し

* 栃木県産業技術センター 材料技術部

10wt%のUHMWPEシート材料と0.1wt%のH-BHTを混合し、160℃で加熱して作製したゲルを、(株)東洋精機製作所製ミニテストプレスを用いて160℃、6MPaで5分間加熱後急冷してシート状に成形し、アセトンで洗浄後、室温下で乾燥して作製した。溶融延伸用のシートは、UHMWPEシート材料に対し0.1wt%のH-BHTを加え、(株)東洋精機製作所製ミニテストプレスを用いて150℃、2MPaで5分間加熱・圧縮し、加圧したまま徐冷して作製した。

作製した各シートは、幅10mmの短冊状試験片とし、(株)井元製作所製恒温槽付電動一軸延伸機を用いて延伸した。延伸温度は、シート表面に熱電対を貼り付け計測した。ゲル延伸は、一回目の延伸を115℃、100mm/minで行い、二回目以降の延伸は125℃、50mm/minで行った。溶融延伸は、140～160℃で、50～150mm/minの速度で延伸し、高倍率延伸の場合は同条件で繰り返し延伸した。延伸倍率は、シートに付記したインマークの変位から算出した。

2. 3 UHMWPE 延伸フィルムの融着及び熱プレス

UHMWPE 延伸フィルムの融着強度評価用の試験片は、同じ延伸倍率のフィルムを二枚重ね、(株)東洋精機製作所製ミニテストプレスを用いて、加熱・加圧下で5分間保持した後、徐冷して作製した。未延伸試料には、溶融延伸用のシートを用いた。

UHMWPE 延伸フィルムの熱プレス試料は、各延伸倍率のフィルムを、(株)東洋精機製作所製ミニテストプレスを用いて、150℃、20～50MPaの条件で5分間保持した後、徐冷して作製した。

2. 4 評価

融着強度及び弾性率の評価は、(株)島津製作所製万能材料試験機AG-M1を用いて行った。X線回折像は、(株)リガク製RINT RAPIDを用いて測定した。

3 結果及び考察

3. 1 フィルム同士の融着に与える030S成分の影響

本研究では、高度に分子配向した延伸フィルムを、UHMWPEの融点以上の条件で圧縮成形し、分子配向を維持しつつフィルム同士を融着させた高弾性率成形体の作製を目指している。本成形体は、加工や使用下において層間剥離が起こらず、フィルム同士が強固に融着して一体化している必要がある。そこで、分子運動性が低いUHMWPEに低分子量成分として030Sを加え、融着強度を高めることを試みた。図1に、630Mに030Sを0～30wt%添加したシート同士を150℃・20MPaの条件で融着させた試験片の引張試験結果を示す。030Sの添加量が増えるにつれ、融着強度が高くなる傾向が見られた。また、030Sの添加量が0、5、10wt%では融着した試料が剥離した

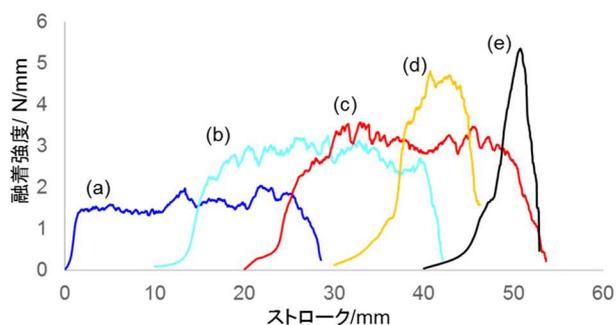


図1 030S各添加量に対する630M未延伸シート融着試験片の引張試験結果；

(a)0wt%, (b)5wt%, (c)10wt%, (d)20wt%, (e)30wt%,

が、20、30wt%では剥離せず、最大点を迎えた後破断した。このことは、UHMWPEシート同士の融着には主に030Sが寄与していることを示しており、分子量が非常に大きい630Mは分子運動性が低く、150℃の成形温度ではシート同士の界面で分子鎖同士の拡散が起こりにくかったのに対し、030Sは比較的分子量が小さいため分子運動性が高く、添加量の増大に伴いシート同士の界面で分子拡散が起こり、融着強度が向上したのではないかと考えている。

また、結果は示していないが、140℃・20MPaの条件で融着した場合、030Sを20wt%添加しても剥離することがわかった。140℃では030Sの分子運動性が低く、融着に寄与しなかったと考えられる。

以上より、UHMWPEフィルム同士の融着には、低分子量成分の添加が有効であることが示された。このことから、以降の実験では、030Sの添加量は、各フィルム同士が強固に融着する20wt%とし、熱プレス温度は150℃とすることとした。

3. 2 UHMWPE シートの延伸及び延伸フィルムの弾性率

高弾性率成形体の製造には、材料となるUHMWPE延伸フィルムが高弾性率である必要があり、そのためには高倍率で延伸する必要がある。UHMWPEシートを超延伸する手法としては、ゲル延伸法、溶融延伸法、膨潤延伸法、重合パウダー延伸法等が知られている³⁾。本研究では、ゲル延伸法と溶融延伸法による延伸フィルムの作製を試みた。

ゲル延伸法は、UHMWPEの準希薄溶液からゲルを調整することで分子鎖の絡み合いを減少させ、超延伸するものである。240Sを用いた10wt%ゲルシートを延伸した結果、50倍程度まで延伸が可能であった。文献から⁴⁾、低濃度の希薄溶液から調整したゲルを用いれば、さらに高延伸させることが可能であると思われる。一方、630Mを用いた10wt%ゲルシートでは延伸ができなかった。630M

では均一なゲルシートを調整できなかったことが原因であると考えている。

UHMWPE は分子鎖の絡み合いが多い樹脂であるため、熔融粘度が極めて高く、融点以上で延伸する熔融延伸が可能であり、80 倍以上延伸した事例が報告されている⁵⁾。そこで 240S 及び 630M を用い、延伸温度 140~160℃、延伸速度 50~150mm/min で延伸を試みたが、本研究では 630M を用いた 11 倍延伸が最大という結果となった。原因としては、延伸機の恒温槽内の温度ムラにより、延伸環境が熔融延伸可能な温度範囲を超えてしまったことが考えられる。

図 2 に、ゲル延伸フィルム及び熔融延伸フィルムの各延伸倍率と弾性率の関係を示す。延伸方法に関わらず、延伸倍率が増加するにつれ弾性率は高くなった。11 倍延伸した熔融延伸フィルムの弾性率は 2.6GPa であったのに対し、ゲル延伸フィルムの弾性率は、20 倍延伸では 21GPa、25 倍延伸では 40GPa、33 倍延伸では 79GPa であった。

図 3 に未延伸シート及びゲル延伸フィルムの X 線回折像を示す。未延伸シートの X 線回折像ではデバイ環が確認でき、未配向であると言える。これに対し、ゲル延伸フィルムでは赤道線上に回折スポットが確認でき、高度に分子配向していることが示された。以上より、高倍率で延伸されたゲル延伸フィルムは、高度に分子配向することで高弾性率となっていることが明らかになった。

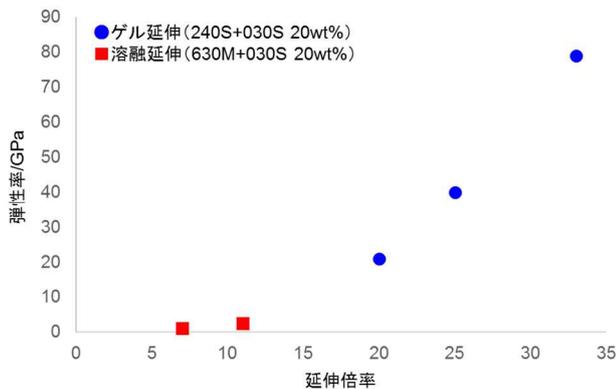


図 2 延伸倍率と弾性率の関係

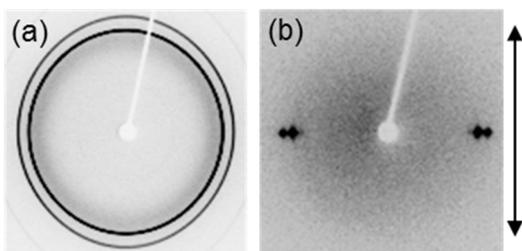


図 3 未延伸シート (a) 及びゲル延伸フィルム (×35) の X 線回折像。矢印は延伸方向を示す。

3. 3 延伸フィルムの融着強度

ゲル延伸フィルムを二枚重ねて 150℃、20~50MPa の条件で融着した試料を用いて、融着強度を評価した。フィルムの延伸倍率とフィルムの融着強度の関係を図 4 に示す。破壊の生成状況が試料により異なり、融着強度のばらつきが大きいのが、フィルムの延伸倍率に関わらず、約 2~5N/mm 程度の融着強度となった。本試験では、圧縮成形の加圧により定長状態でフィルムが固定されていたため、平均分子量が大きい 240S は加熱による分子運動が制限され、融着への寄与が少なかったことが示唆される。従って、主に平均分子量が低い 030S 成分の分子拡散によりフィルム同士が融着したため、延伸倍率に関係なく一定の融着強度であったのではないかと考えている。

また、ゲル延伸フィルム同士の融着強度は、融着条件 (圧力) による影響も確認できなかった。これらの結果から、フィルム同士の融着には、20MPa 以上の圧力で十分であることが示された。

なお、本実験で得られた融着強度は、延伸フィルムの TD 方向 (延伸方向と垂直の方向) の引張強さより高い値であった。このため、ゲル延伸フィルムを融着した成形体は、フィルム間の融着強度が TD 方向の強度よりも高

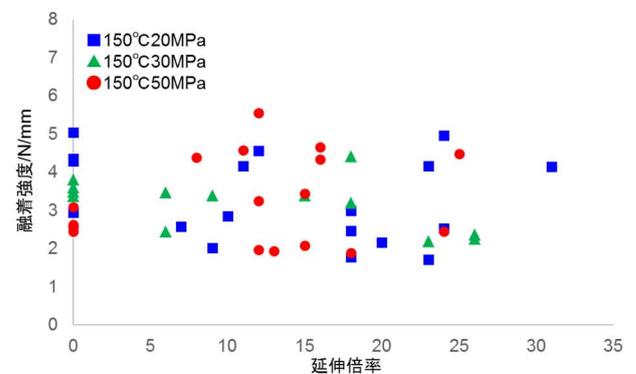


図 4 各融着条件における延伸倍率と融着強度の関係

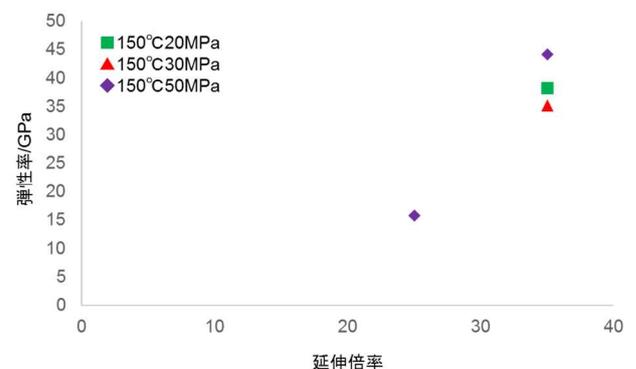


図 5 熱プレス後における延伸倍率と弾性率の関係

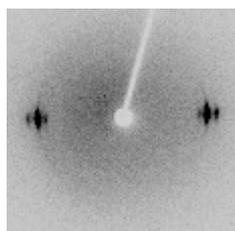


図6 熱プレス後のゲル延伸フィルム（×35）の X線回折像

く、一体化した成形体となると考えられる。

3. 4 熱プレス後の延伸フィルムの弾性率

ゲル延伸フィルムを 150℃、20～50MPa で 5 分間熱プレスした後、徐冷した試料の弾性率を測定した結果を図 5 に示す。熱プレス後のゲル延伸フィルムの弾性率は熱プレス前（図 2）と比較して低下したが、25 倍延伸フィルムでは 16GPa、35 倍延伸フィルムでは 40GPa 程度の弾性率を維持していた。

図 6 に 35 倍延伸フィルムの熱プレス後の X 線回折像を示す。熱プレス前（図 3 (c)）と比較し、熱プレス後は回折スポットが若干アーク状に広がっているのが確認され、若干分子配向の乱れが生じていると考えられるが、赤道線上に回折スポットが確認されていることから、分子配向が維持されていることがわかった。UHMWPE を融点以下で延伸した固体延伸フィルムは、定長状態で保持した場合、分子鎖の絡み合い点が非常に多いことから分子運動が抑制され、融点以上の高温下であっても配向構造が維持されることが報告されている⁶⁾。一方、ゲル延伸フィルムは溶剤により絡み合いを解きほぐして延伸されており、固体延伸フィルムと比較し絡み合い点は少ないことが予想される。本研究により、絡み合い点が少ないゲル延伸フィルムにおいても、加圧し、定長状態で保持することで、固体延伸フィルムと同様に分子配向が維持されることが明らかになった。

以上より、熱プレス後のゲル延伸フィルムは、分子配向の乱れは若干あるものの、分子配向を維持し、高弾性率であることが明らかになった。これらの結果より、ゲル延伸フィルムを積層し、150℃、20MPa 以上の条件で圧縮成形することで、30GPa 以上の弾性率を有する一体化した成形体を製造できることが示された。

4 おわりに

UHMWPE 延伸フィルムの積層成形による高弾性率自己補強プラスチック成形体の製造技術の開発を試みた。UHMWPE (240S) に低分子量成分 (030S) を 20wt% 添加し、10wt%ゲルを延伸したフィルムを用い、150℃、20～50MPa で圧縮成形することで、30GPa 以上の弾性率を有し、フィルム同士が一体化した成形体得られることが示された。

謝 辞

本研究は、JST A-STEP トライアウト事業の支援を受けて実施しました。ここに記し深謝いたします。

参考文献

- 1) 西美緒：“高分子”，50 (2)，78，(2001)
- 2) 特許第 7005867 号
- 3) 伊藤眞義ら：“高分子の延伸による分子配向・結晶化メカニズムと評価方法”，(株)R&D 支援センター，61，(2020)
- 4) 京谷裕子，三橋重信，井口正俊：“高分子論文集”，42 (12)，849，(1985)
- 5) 東海林美雪，澤井大輔，金元哲夫，大浜俊生：“繊維学会誌”，60 (11)，56，(2004)
- 6) 桜井謙資，早川浩二，高橋利禎：“高分子論文集”，45 (2)，155，(1988)

V 經常研究

Ordinary Research

経常研究

加速度センサを用いた工具摩耗推定方法の開発

阿部 雅* 近藤 弘康* 棚原 貴登*

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

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

Key words: 工具摩耗, インプロセス, 切削力, 加速度センサ

1 はじめに

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

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

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

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

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

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

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

2 研究の方法

2.1 加工機

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

2.2 加工工具

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

2.3 加速度センサ及び周波数解析方法

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

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

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

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

2. 4 加速度センサの設置位置の影響

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

2. 4. 1 テーブル設置

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

表1 切削条件

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

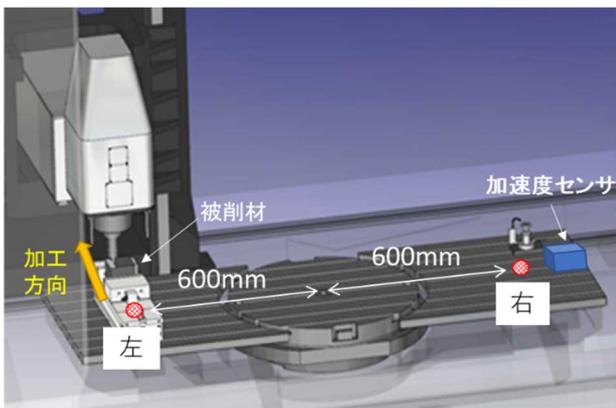


図1 段取り模式図 (●: 被削材設置位置)

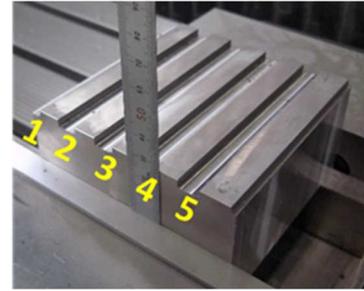


図2 被削材内加工位置

2. 4. 2 加工機主軸設置

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



図3 加速度センサ主軸設置

2. 5 工具摩耗状態把握に適した切削条件

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

2. 6 工具摩耗状態把握の確認試験

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

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

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

3 結果及び考察

3.1 加速度センサの設置位置の影響

3.1.1 テーブル設置

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

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

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

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

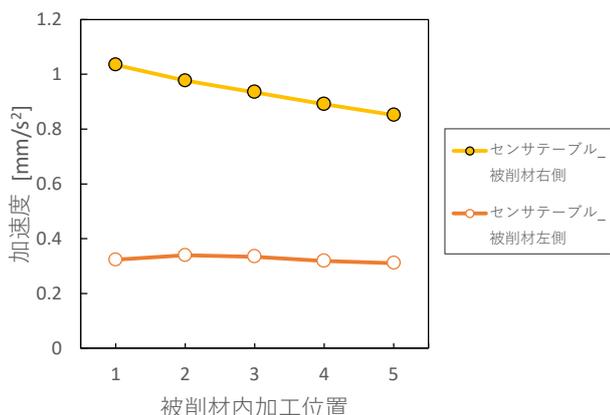


図4 被削材設置位置変更時の被削材内加工位置と加速度 (n=4)

3.1.2 加工機主軸設置

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

て図5に示す。

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

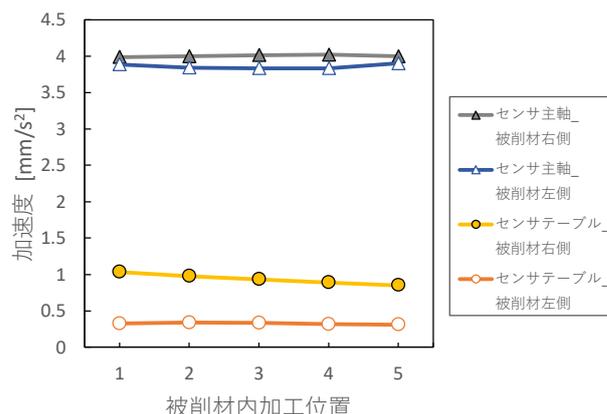


図5 設置位置の違いによる加速度の比較 (n=4)

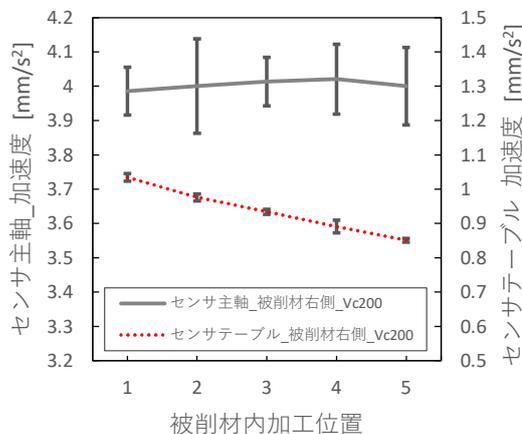


図6 Vc200の加速度値のばらつき (n=4, 誤差範囲±σ)

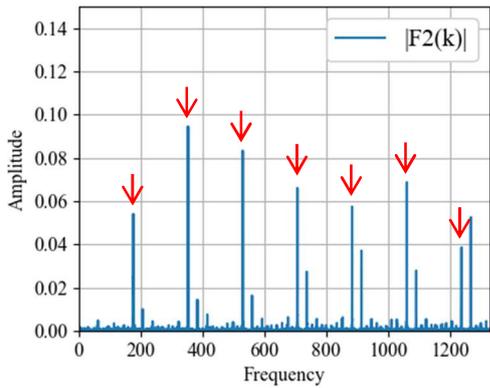


図7 Vc200の加速度波形の周波数解析結果 (矢印は強制振動の整数倍)

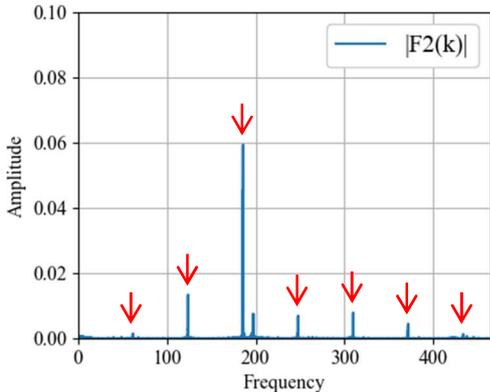


図8 Vc70の加速度波形の周波数解析結果 (矢印は強制振動の整数倍)

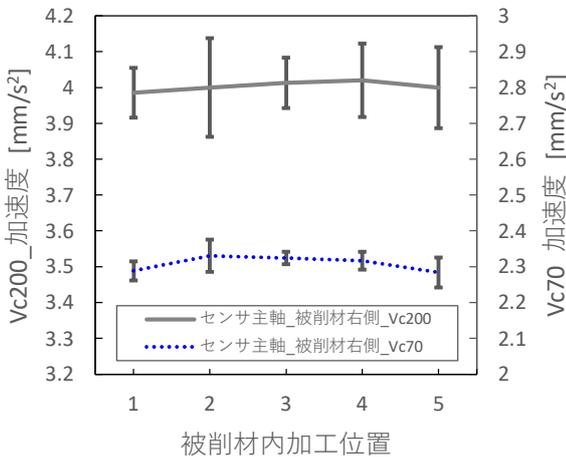


図9 Vc200とVc70の加速度値のばらつき (n=4, 誤差範囲±σ)

3.2 工具摩耗状態把握に適した切削条件

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

R²値が切削速度によって異なることから、加速度と切削力の線形性の悪い条件が存在することがわかる。

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

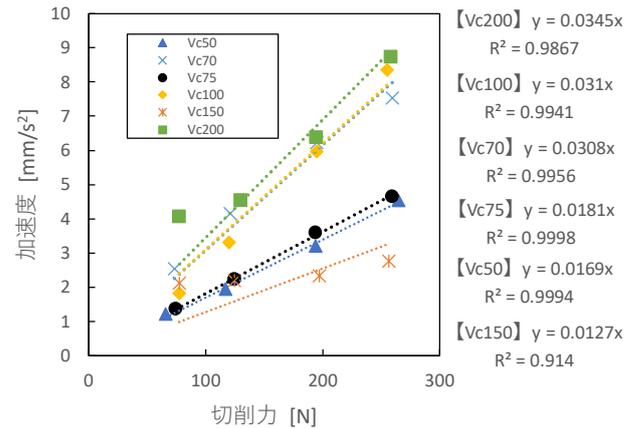


図10 切削条件変更時の加速度と切削力の関係

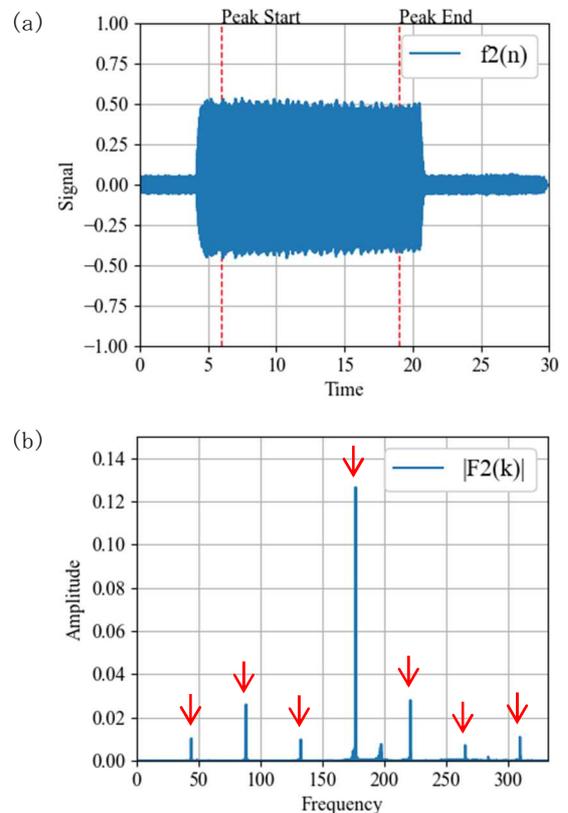


図11 Vc50加工時の(a)加速度と(b)周波数解析結果 (矢印は強制振動の整数倍)

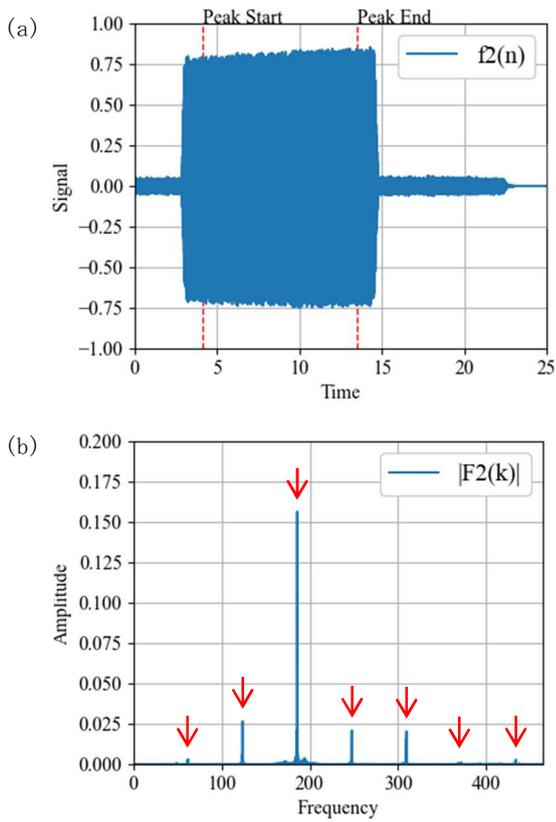


図 12 Vc70 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果 (矢印は強制振動の整数倍)

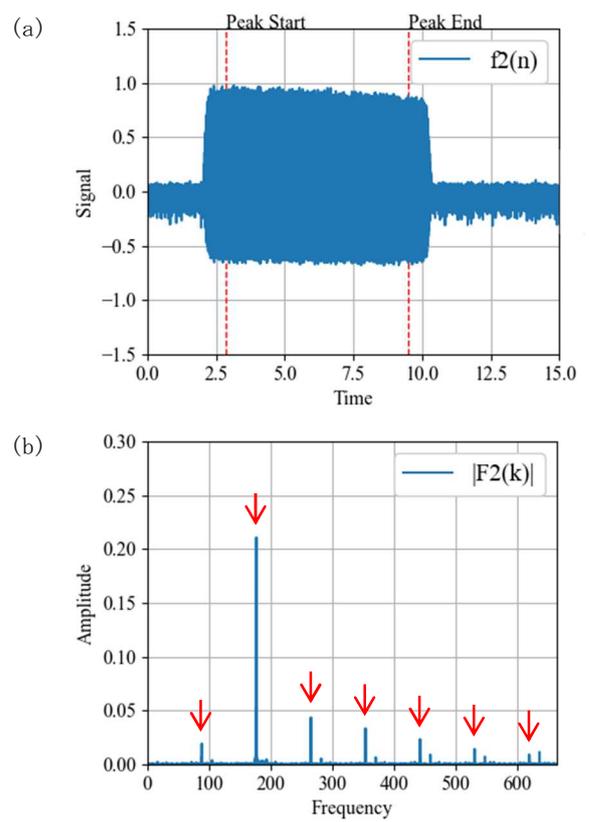


図 14 Vc100 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果 (矢印は強制振動の整数倍)

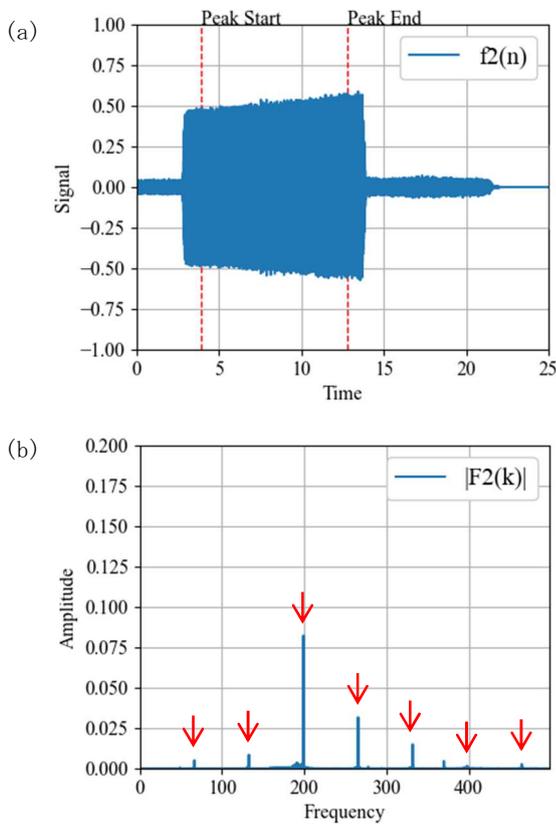


図 13 Vc75 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果 (矢印は強制振動の整数倍)

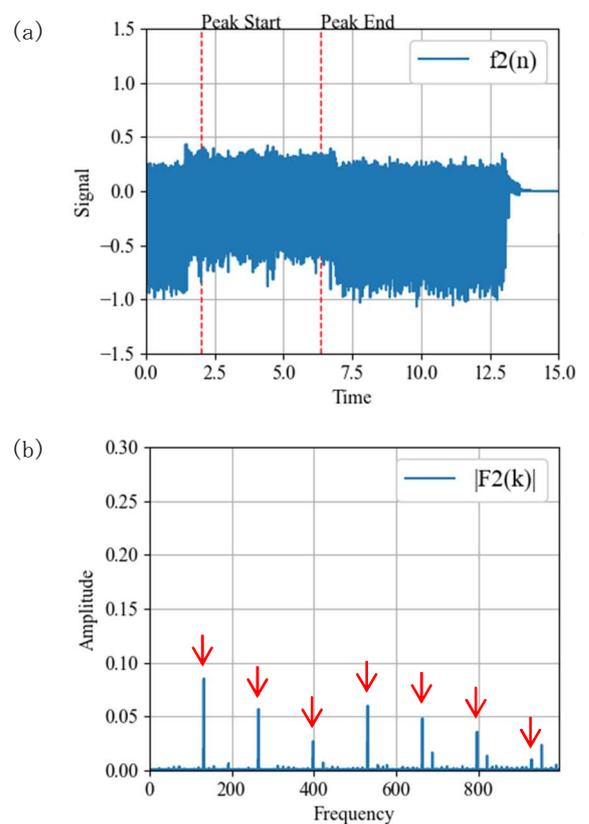


図 15 Vc150 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果 (矢印は強制振動の整数倍)

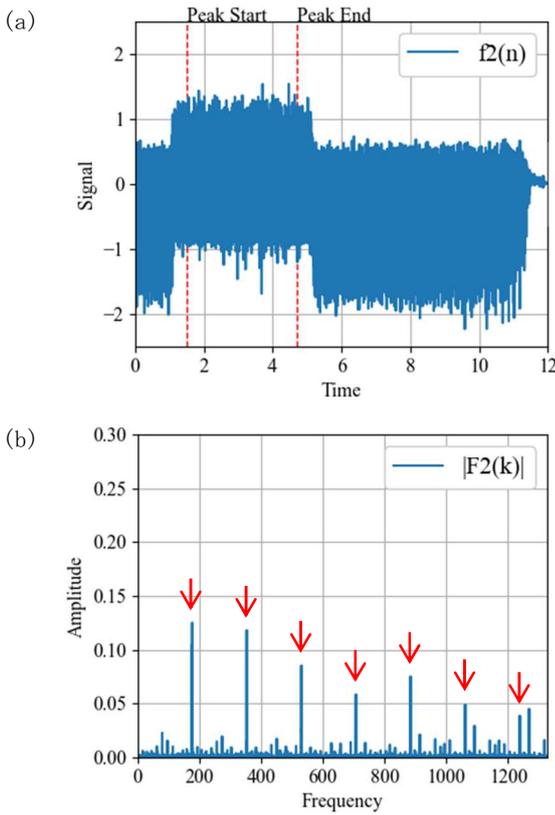


図 16 Vc200 加工時の (a) 加速度と (b) 周波数解析結果 (矢印は強制振動の整数倍)

3. 3 工具摩耗状態把握の確認試験

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

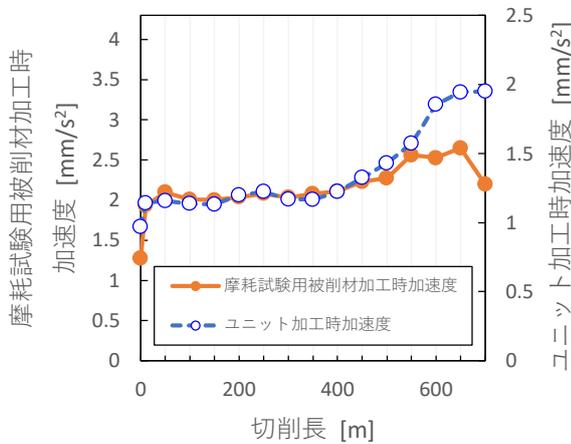


図 17 摩耗試験用被削材とユニットの加速度の比較

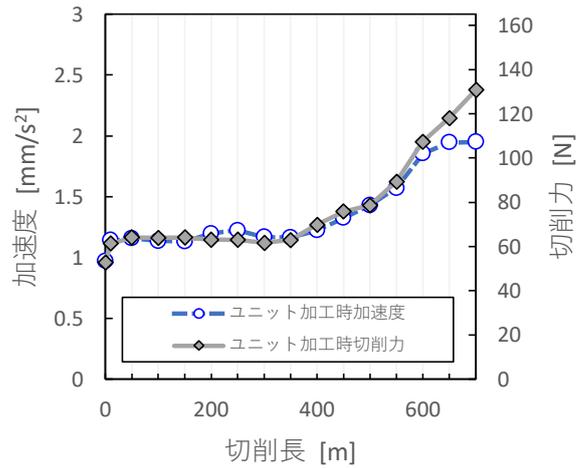


図 18 ユニットの加速度と切削力の比較

4 おわりに

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

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

参考文献

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

経常研究

測定手法の違いによる円筒内形状測定結果への影響

内藤 恭平* 石川 信幸* 片岡 智史*

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

NAITO Kyohei, ISHIKAWA Nobuyuki and KATAOKA Satoshi

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

Key Words: 円筒内測定, 精密測定, 非接触測定, 表面性状

1 はじめに

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

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

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

2 研究の方法

2.1 検証用試験片の作成

2.1.1 円筒内径の異なる試験片

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

2.1.2 表面性状の異なる試験片

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

表 1 試験片加工条件

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

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

表2 測定手法及び測定条件

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

2. 2 検証用試験片の測定

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

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

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

3 結果及び考察

3. 1 円筒内径の異なる試験片の測定結果

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

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

3. 2 表面性状の異なる試験片の測定結果

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

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

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

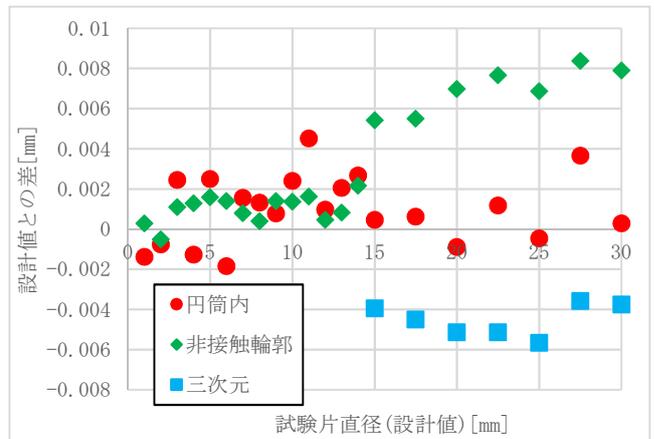


図1 各測定機における設計値と測定結果の差

表3 各試験片の表面粗さパラメータ

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

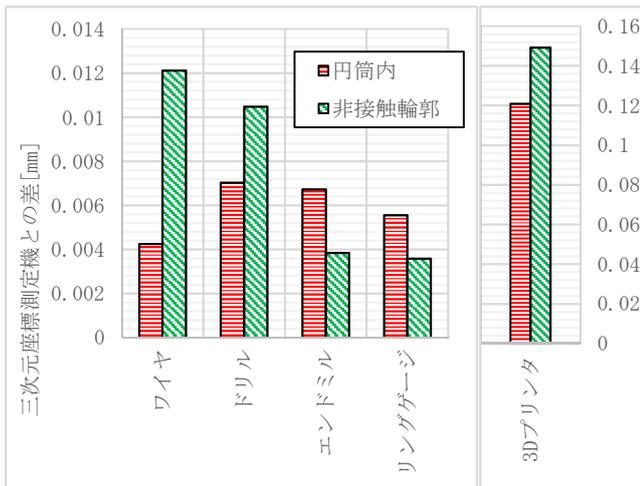


図2 三次元座標測定機を基準とした各測定機の差

3.3 測定プローブ径を考慮した直径値の補正

3.1項及び3.2項に示した結果から、各測定手法の結果の差は、測定物の表面性状及び測定に使用するプローブの大きさやレーザのスポット径の影響を受けていると推定した。測定結果が小さくなった三次元座標測定機は先端φ2mm(=2,000μm)のルビー球プローブを使用しているため、レーザスポット径が2μmである非接触輪郭形状測定機や、同じくスポット径が15μm~30μm程度である円筒内形状測定機と比較して、表面にある微細な幅の谷形状の情報取得できず、結果として穴直径が小さく計算されたと考えられる。

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

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

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

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

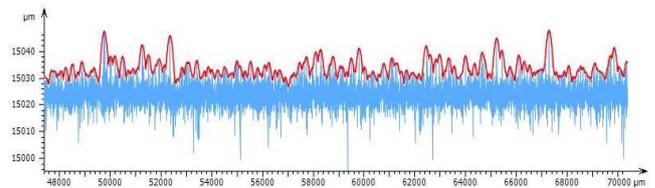


図3 モルフォロジフィルタの適用

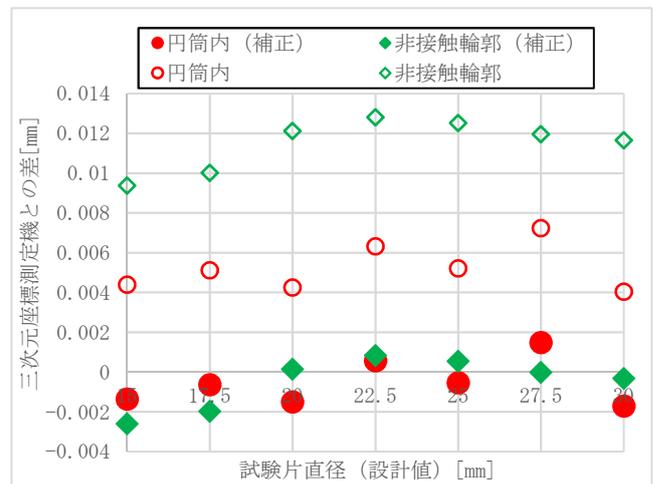


図4 モルフォロジフィルタを用いた補正後の差

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

3.4 表面性状による測定値への影響

続いて、図2に示した表面性状の異なる試験片の測定結果に対して3.3項で求めたモルフォロジフィルタによる補正を適用した結果を図5に示す。

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

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

Rskは表面性状の山谷の対称性を見る無次元数であり、Rsk>0であるほど、図6に示すような山よりも谷の領域が多い表面であることを示している³⁾。3.3項で述べた通り、円筒内形状測定機のモルフォロジフィルタによる補正值を算出するときは非接触輪郭形状測定機の測定結果の平均化データを代用している。図6の形状を例にとると、図中の範囲を平均化し、破線で示した高さの測定点が計算される。しかし、実際の円筒内形状測定機による取得データの場合、光干渉法

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

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

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

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

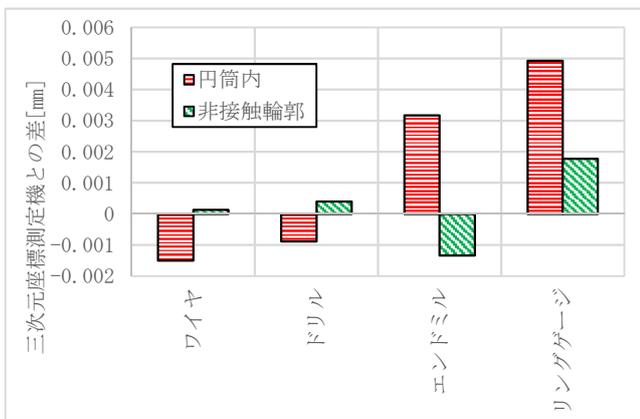


図 5 補正後の各表面試験片の三次元座標測定機との差

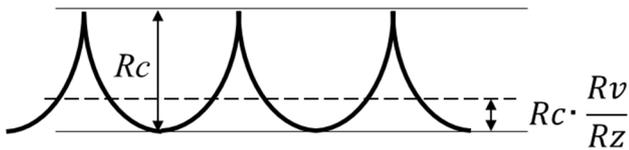


図 6 Rsk の大きな表面の補正

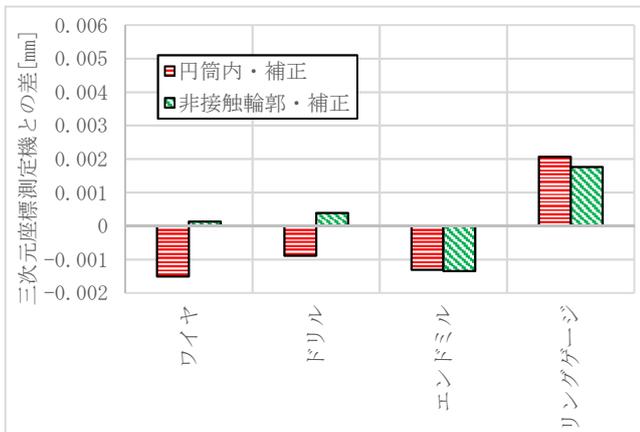


図 7 Rsk を考慮した再補正後の差

3.5 レーザ入射角による表面性状の影響

図 1 に示した結果のうち、非接触輪郭形状測定機による測定結果が標準試験片(φ15 mm～φ30 mm)では設計値に対して平均で+6.9 μm の差であるのに対し、小径試験片(φ1 mm～φ14mm)では平均して+1.0 μm 程度であり、異なる傾向を示している。

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

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

検証のため、ワイヤ放電加工で作製した小径試験片の φ12 mm 半円を断面測定及び回転測定で測定した結果を図 10 に示す。回転測定での測定結果の方が 5.24 μm 大きく計算され、最小二乗円に対する偏差成分 (x200 表示) を見ると、回転測定の結果では位置によってほぼ変化していないのに対して断面測定では円の端に近づくほど偏差が小さくなっている。

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

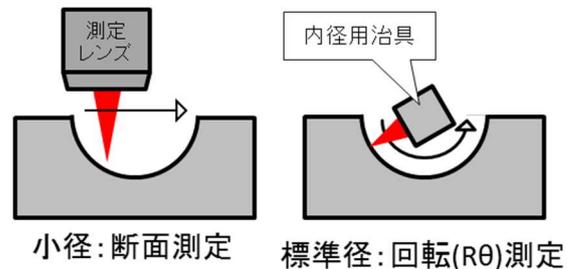


図 8 非接触輪郭形状測定機の測定手法概略図

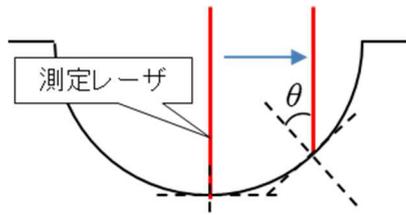


図9 断面測定時のレーザー入射角の変化

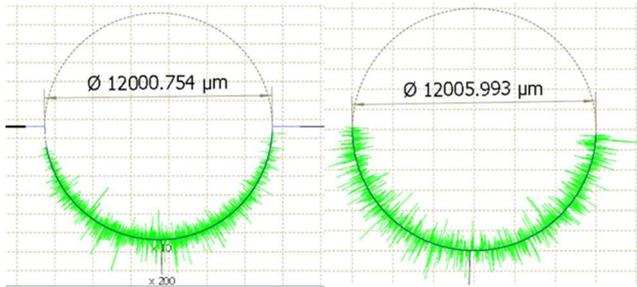


図10 φ12 mm 半円の測定結果
(左：断面測定 右：回転測定)

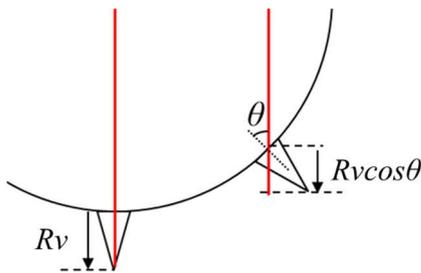


図11 レーザ入射角による谷深さ Rv 成分への影響

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

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

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

となる。

一方断面測定では、

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

となるので、(1)、(2)式より、断面測定によって無視される Rv 成分は

$$Rv \frac{\pi - 2}{\pi} \quad \dots(3)$$

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

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

3. 6 円筒内形状測定機の最大許容指示誤差相当値の算出

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

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

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

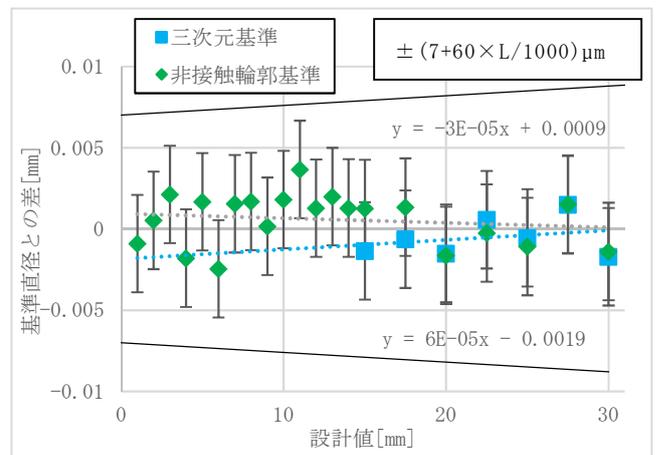


図12 各装置を基準にした円筒内形状測定機の測定値

4 おわりに

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

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

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

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

参考文献

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

経常研究

データ収集・解析システムの機能拡張

ー データ収集・解析システムユーザインタフェースの拡張 ー

島田 智* 八木澤 秀人*

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

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

Key words: IoT, 可視化, YOLO, アノテーション

1 はじめに

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

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

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

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

せ方の変更が必要となることが想定される。

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

2 研究の方法

2.1 見える化ツールの機能向上

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

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

2.1.1 ダッシュボード編集のためのUI拡張

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

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部



図1 ダッシュボード画面
表1 パネル毎の設定内容

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

2. 1. 2 統合監視ツールやBI ツールの活用

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

表2 ツールの機能比較

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

2. 2 計器読取プログラムの機能向上

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

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

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

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

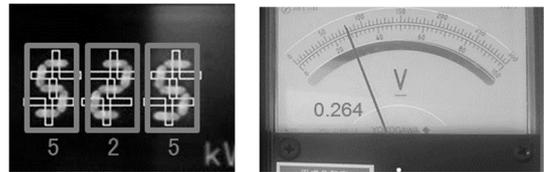


図2 アノテーション作業

画像にラベル（今回の場合は読み値）付けしていく作業

2. 2. 1 モデル作成環境の構築

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

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

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

2. 2. 2 作成したモデルの実タスクへの適用

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

3 結果及び考察

3.1 見える化ツールの機能向上

3.1.1 ダッシュボード編集のための UI 拡張

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

図3 作製したダッシュボード編集画面

3.1.2 統合監視ツールや BI ツールの活用

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

3.1.2.1 Google Data Portal

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

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

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

3.1.2.2 Microsoft Power BI Desktop

Power BI Desktop は、Microsoft が提供する無償版

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

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

3.1.2.3 Grafana

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

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

3.1.2.4 Zabbix

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

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

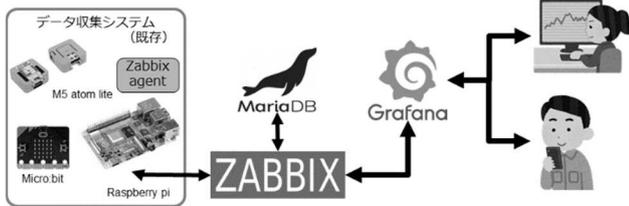


図4 システム構成図



図5 Grafanaを用いたダッシュボード

3. 2 計器読取プログラムの機能向上

3. 2. 1 モデル作成環境の構築

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

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

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

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



図6 輝度差読取り位置指定 Web UI

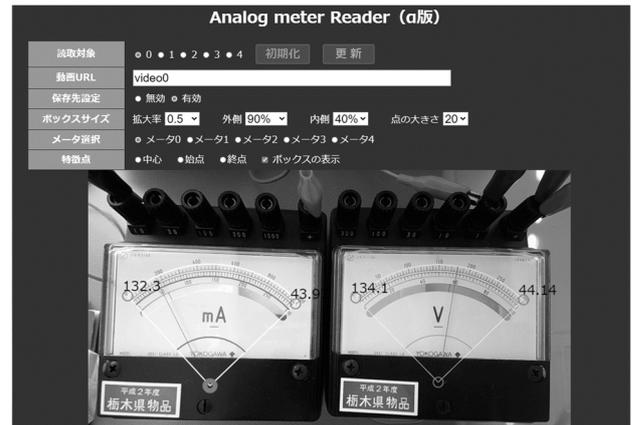


図7 ハフ変換読取り位置指定 Web UI

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

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

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

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

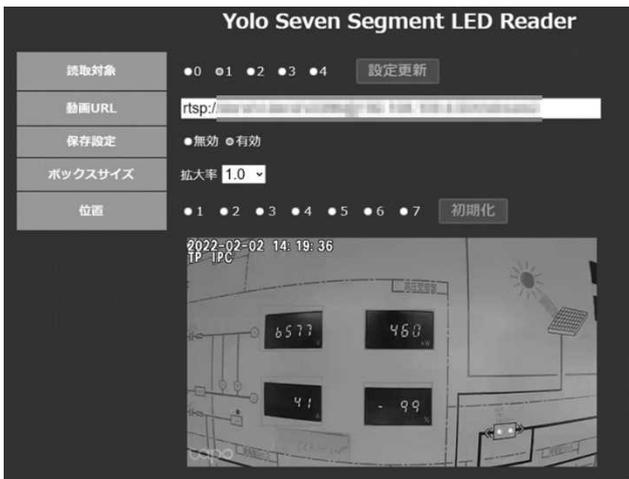


図8 YOLO位置指定 Web UI

3. 2. 2 作成したモデルの実タスクへの適用

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



図9 昼間と夜間の電力計の見え方

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

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

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

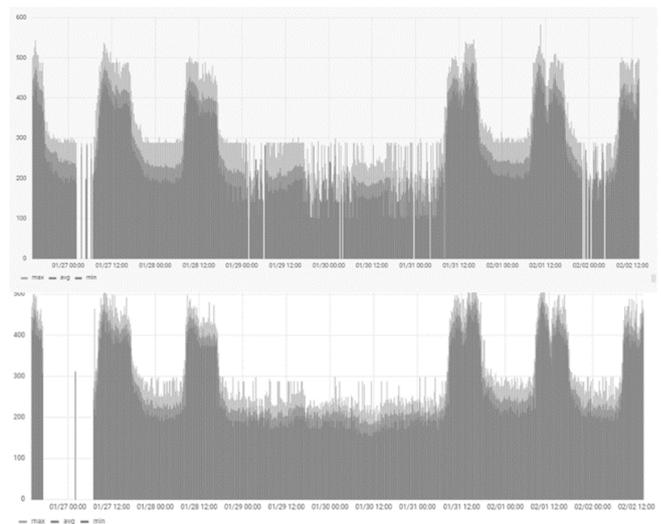


図10 消費電力計の読取り

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

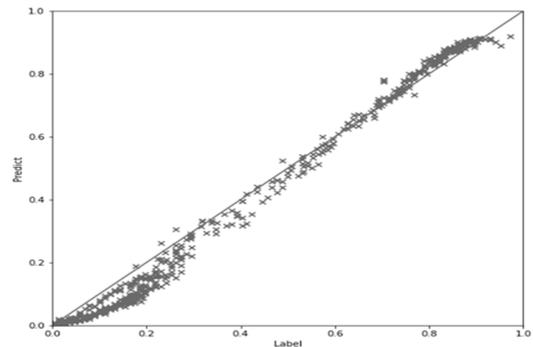


図11 アナログメータ読取りモデルの評価

4 おわりに

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

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

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

参考文献

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

経常研究

スマートグラスを用いた作業支援検証に関する研究

松本 健司*

Verification of Support by Smart Glasses
MATSUMOTO Kenji

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

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

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

1 はじめに

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

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

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

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

2 研究の方法

2.1 実施方法

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

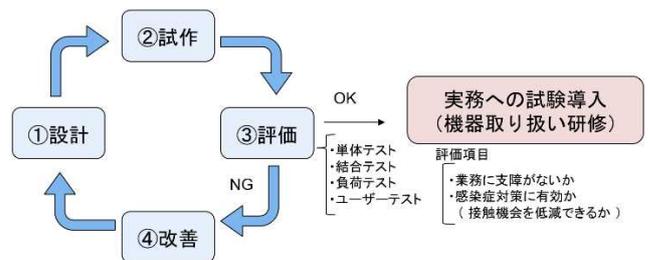


図1 開発の流れ

2.2 使用機器（スマートグラス）

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

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部



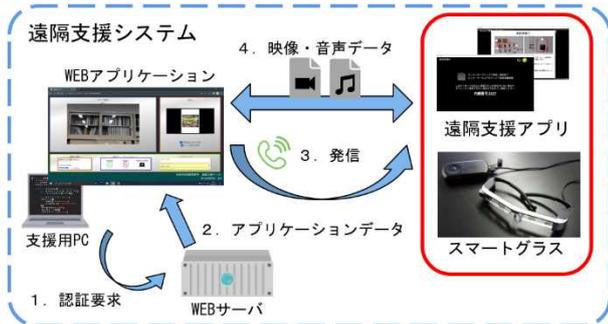
図2 MOVERIO BT-300

2.3 開発内容

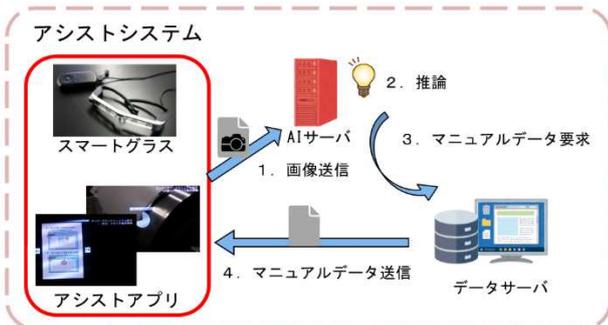
2.3.1 システムの概要

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

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



(a) 遠隔支援システム



(b) アシストシステム

図3 開発システム概要

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

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

2.3.2 遠隔支援システム

2.3.2.1 システム構成

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

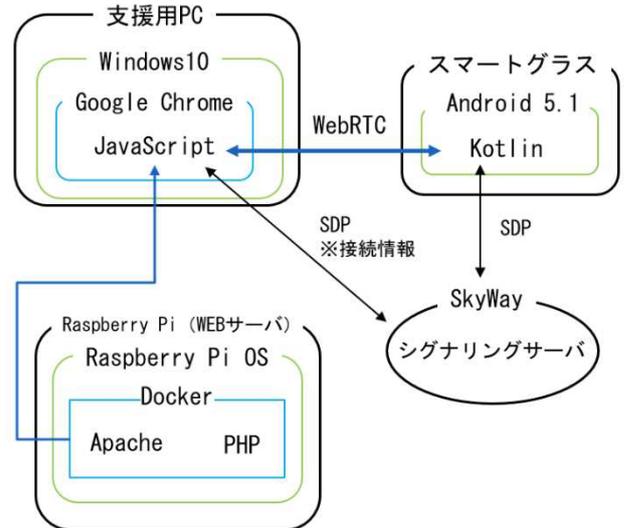


図4 遠隔支援システム構成

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

2.3.2.2 支援用PC

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

2.3.2.3 サーバ

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

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

2.3.2.4 スマートグラス用アプリ

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

ため、スマートグラス用に別途アプリを開発した。

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

2. 3. 3 アシストシステム

2. 3. 3. 1 システム構成

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

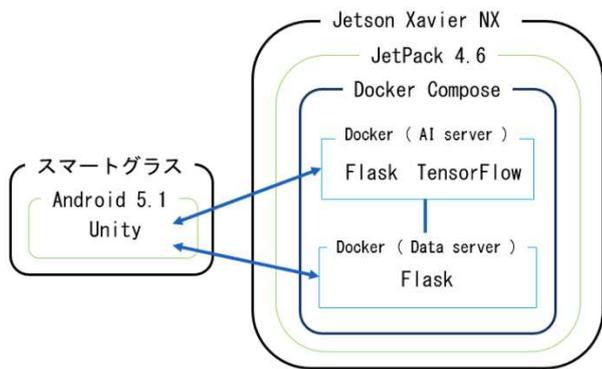


図 5 アシストシステム構成

2. 3. 3. 2 スマートグラス用アプリ

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

2. 3. 3. 3 サーバ

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

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

2. 4 実用性検証方法

2. 4. 1 対象業務

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

2. 4. 2 システム評価方法

各システムは動作テスト・負荷テスト・ユーザーテ

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

3 結果及び考察

3. 1 遠隔支援システム

3. 1. 1 開発成果

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

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



(a) 通信中



(b) 画面共有時

図 6 遠隔支援システム利用イメージ

3. 1. 2 各種評価

3. 1. 2. 1 動作テスト (単体・結合)

設計仕様に基づきチェックを実施し、すべての項目をクリアした。

3. 1. 2. 2 負荷テスト

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

3. 1. 2. 3 ユーザーテスト

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

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

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

3. 2 アシストシステム

3. 2. 1 開発成果

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



(a) 機器認識時

(b) リスト表示時



(c) データの AR 表示時

図 7 アシストシステム利用イメージ

3. 2. 2 各種評価

3. 2. 2. 1 動作テスト(単体・結合)

設計仕様に基づきチェックを実施し、すべての項目をクリアした。

3. 2. 2. 2 負荷テスト

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

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

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

3. 3 実務への試験導入

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

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

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

4 おわりに

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

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

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

参考文献

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

経常研究

生姜辛味成分の簡易分析法の開発

阿久津 知宏* 金井 悠輔*

Development of Simplified Analysis Method for Pungent Components in Ginger
AKUTSU Tomohiro and KANAI Yusuke

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

Key words: 生姜, 辛味, 6-ジンゲロール, TLC

1 はじめに

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

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

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

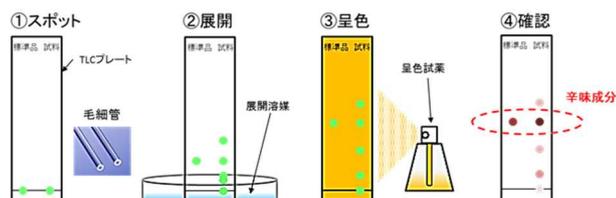


図1 TLC法の概略図

2 研究の方法

2.1 辛味成分の抽出

2.1.1 ミル粉碎による抽出

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

2.1.2 乳鉢粉碎による抽出

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

2.1.3 おろし器粉碎による抽出

生姜をおろし器により粉碎し、同様にエタノール抽出した。

2.1.4 従来法による抽出

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

2.2 TLC 法による辛味成分分析

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

* 栃木県産業技術センター 食品技術部

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

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

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

2.3 HPLC法による辛味成分分析

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

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

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

2.4 官能評価

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

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

3 結果及び考察

3.1 辛味成分抽出方法の検討

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

表1 抽出率及び相対標準偏差

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

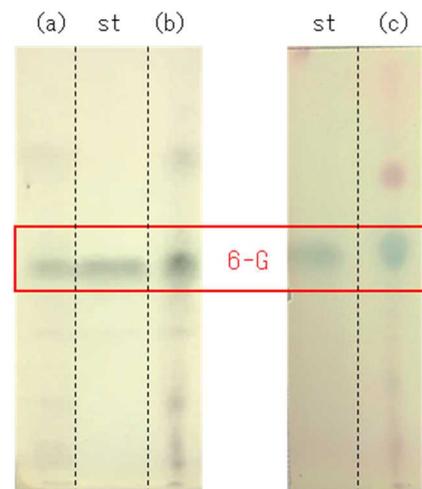


図2 添加エタノール量の違いによるTLC分析結果

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

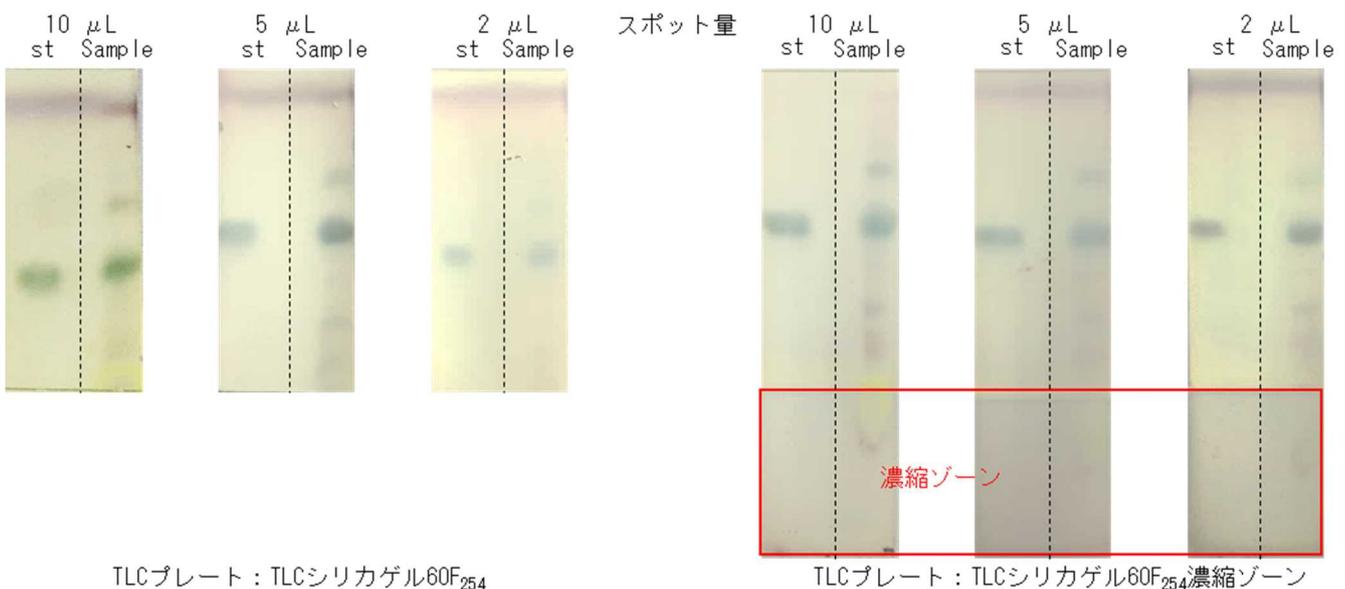


図3 2種類のTLCプレートによるTLC分析結果

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

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

3. 2 辛味成分抽出濃度の検討

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

3. 3 TLC 法による辛味成分分析条件の検討

3. 3. 1 TLC プレートの検討

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

3. 3. 2 展開溶媒の検討

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

3. 4 官能による辛さと成分含有量との関係

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

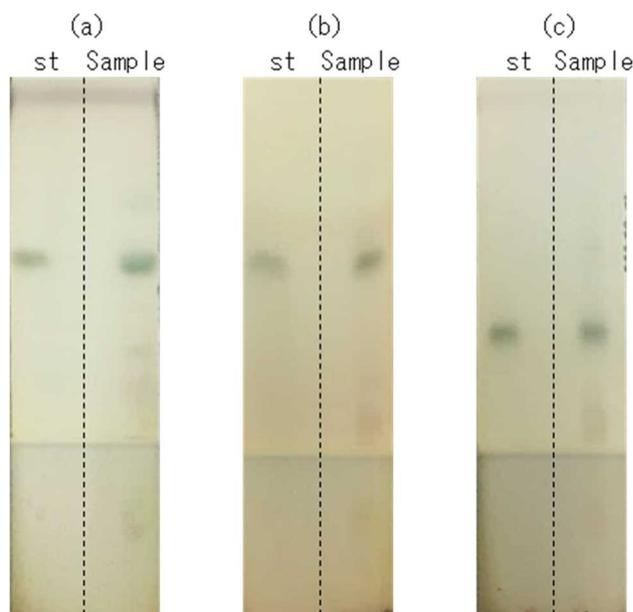


図 4 展開溶媒の違いによる TLC 分析結果

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

表 2 生姜の官能評価結果

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

表 3 生姜の HPLC 分析結果

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

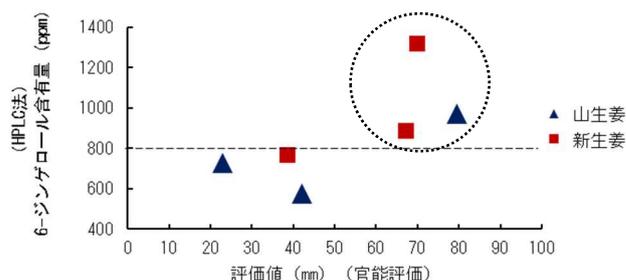


図 5 官能による辛さと 6-ジンゲロール含有量の関係

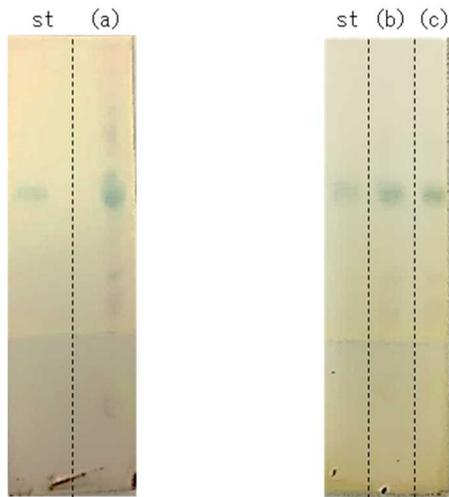


図6 クレームになる可能性がある生姜のTLC分析結果
(a) 山生姜C (1:1抽出), (b) 新生姜C (1:1抽出),
(c) 新生姜B (1:1抽出), st: 6-ジンゲロール標準品
(800ppm), TLCプレート: TLCシリカゲル60F₂₅₄濃縮ゾーン
付, 展開溶媒: ヘキサン/酢酸エチル (1:1)。

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

3.5 クレームになる可能性がある生姜の判別

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

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

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

4 おわりに

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

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

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

参考文献

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

経常研究

解し織のデザインと緋の効果に関する研究

佐瀬 文彦* 金子 優* 磯田 政夫*

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

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

Key words: 解し織, 緋, 効果

1 はじめに

大正から昭和初期にかけて流行した銘仙（着物）は、華やかな色使いと緋による独特な模様が特徴で、足利地域でも主に解し織の技法による銘仙が、第二次大戦頃まで盛んに生産されていた。しかしその後の洋装の普及などにより生産量は減少、これに伴い関連する企業数の減少や業態の変化、技術者の高齢化等により、地域内で安定的に解し織を一貫生産することは困難になっていった。一方で、銘仙の緋模様が与えるレトロモダンな印象は、現在国内外を問わず高い評価を得ており、県内の繊維関連企業群では、洋装に対応するための銘仙（生地）の広幅化への取組や、これを含む繊維関連製品のブランド化に向けたPR活動を行い、海外などから一定の評価を得ているものもある。

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

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

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

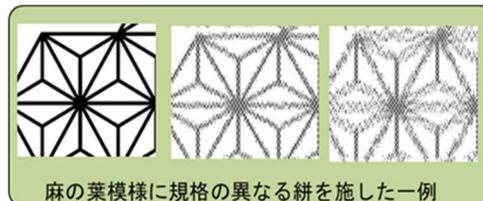


図1 緋による印象の変化（シミュレーション）

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

2 研究の方法

2.1 デザインの選択と調整

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

2.2 緋のシミュレーション

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

* 栃木県産業技術センター 繊維技術支援センター

実施してそれぞれ結果をプリントして緋の見本とした。

また、シミュレーションの結果から柄に対する緋の効果について考察した。

2. 3 試織と検証

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

3 結果及び考察

3. 1 デザインの選択と調整

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

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



図2 新しい分類と選出柄の例

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

3. 2 緋のシミュレーション

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

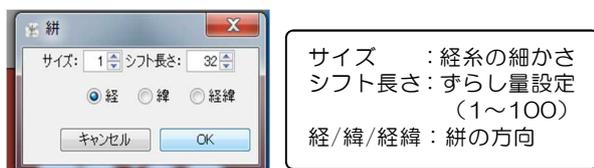


図3 シミュレーションのパラメーター

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



図4 シミュレーション例(シフト量32)

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

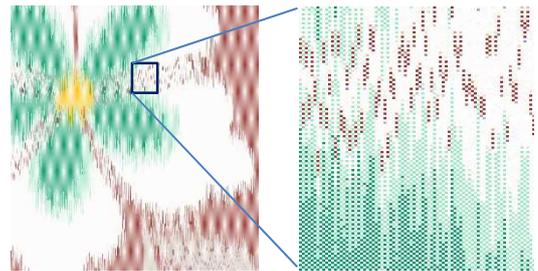


図5 シミュレーションの処理(拡大図)

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

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

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

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



図6 見本帳

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

①柄の結合

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

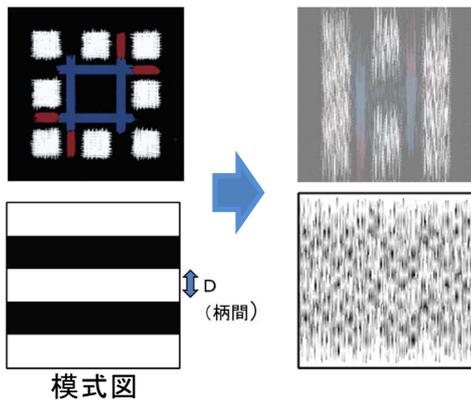


図7 柄の結合例

②柄の消滅

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

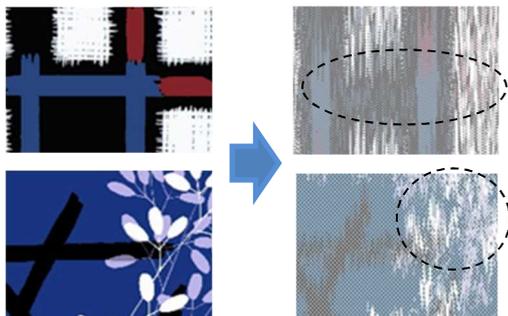


図8 柄の消滅例

③新しい柄の出現

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

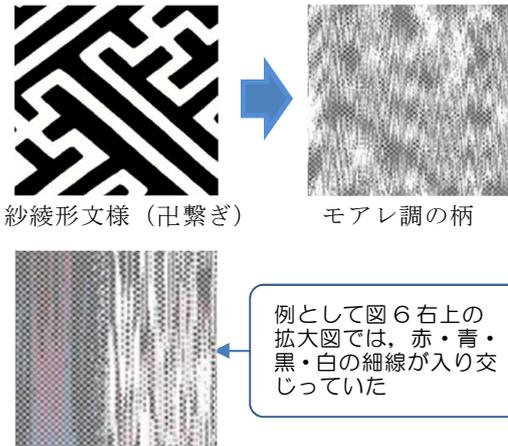


図9 新しい柄の出現例

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

3. 3 試織と検証

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

表1 試織の規格等

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

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

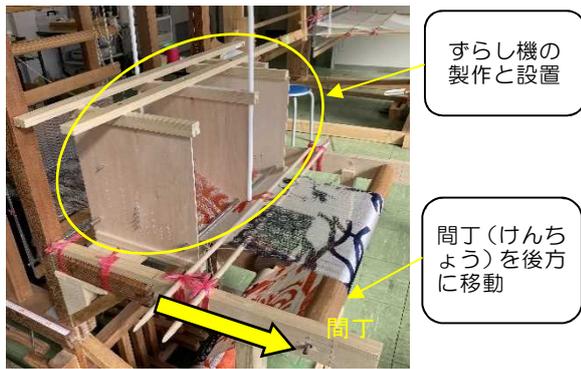


図 10 本織時の織機改造

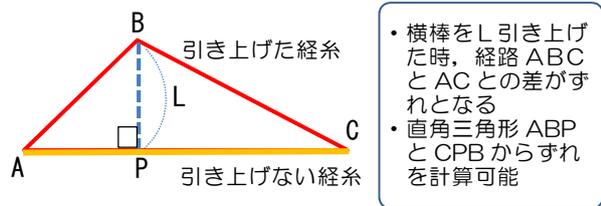
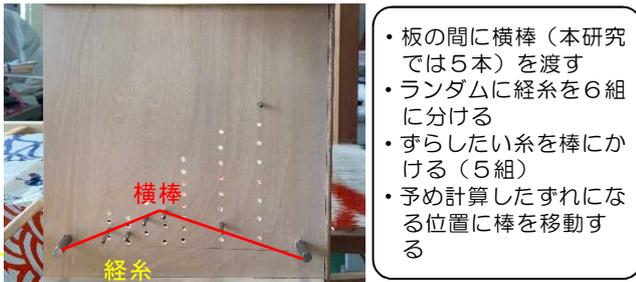


図 11 ずらし機の原理

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

試織とシミュレーションの例を図12に示す。

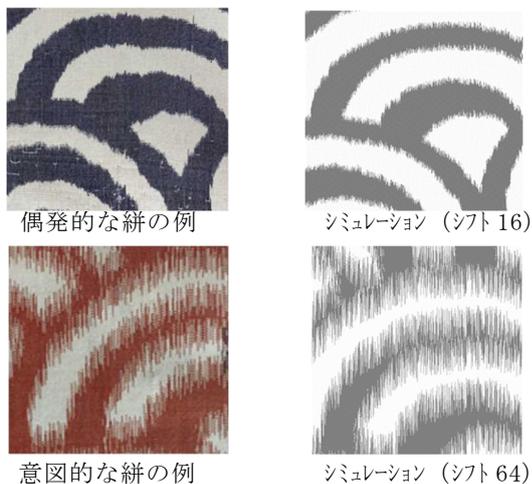


図 12 試織とシミュレーションの例

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

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

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

4 おわりに

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

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

参考文献

- 1) 佐瀬文彦ら：“栃木県産業技術センター研究報告”，No.18, 43-46, (2021)

経常研究

切削条件が透明アクリル樹脂の透明度に及ぼす影響

西宮 紹* 関口 康弘* 岡村 弘太*

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

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

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

Key Words :アクリル樹脂, 切削加工, ヘーズ, 表面粗さ

1 はじめに

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

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

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

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

2 研究の方法

2.1 加工機、被削材及び切削工具

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

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

2.2 実験計画法による加工条件

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

* 栃木県産業技術センター 県南技術支援センター

表1 各因子の水準

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

表2 L₈直交表

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

表3 因子と水準の設定

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

2. 3 測定方法

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

使用した被削材の無加工状態でのヘーズは 15%であった。

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

3 結果及び考察

3. 1 ヘーズ測定

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

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

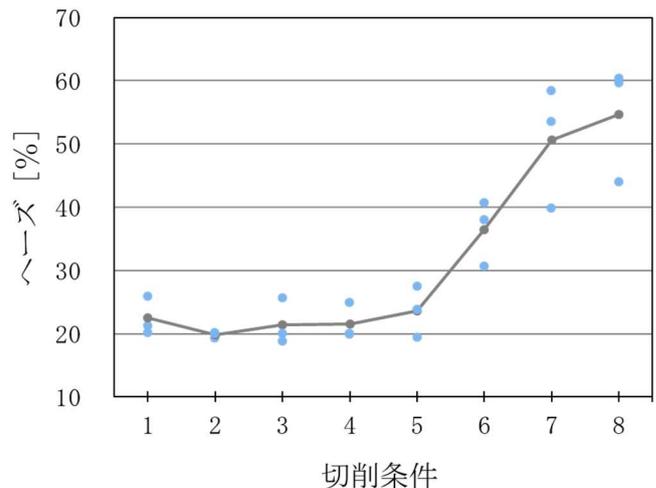


図1 各水準におけるヘーズと平均値

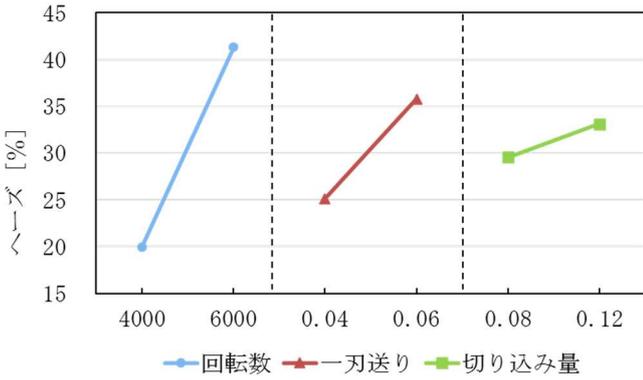


図2 各因子のヘーズの平均

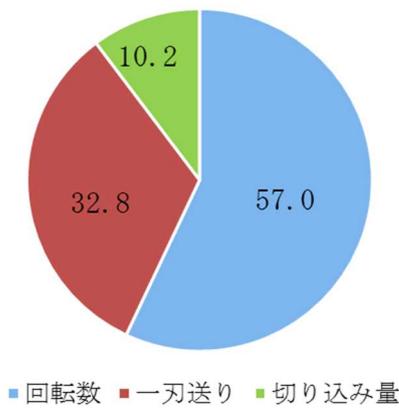


図3 各因子のヘーズに及ぼす影響の割合

3.2 ヘーズと表面粗さの関係

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

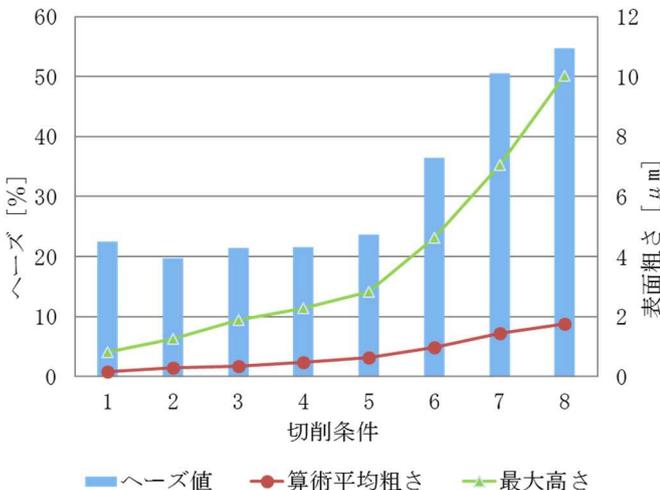


図4 ヘーズの平均と表面粗さの平均

3.3 低回転数の切削

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

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

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

表4 工具推奨条件と低回転での切削条件

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

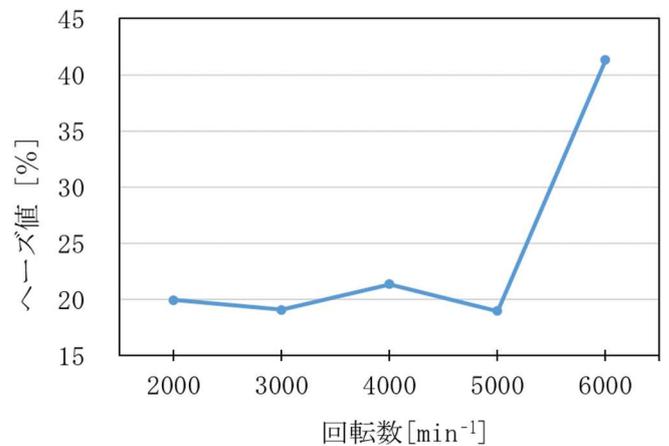


図5 各回転数におけるヘーズの平均

3. 4 半径方向切込量の影響

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

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

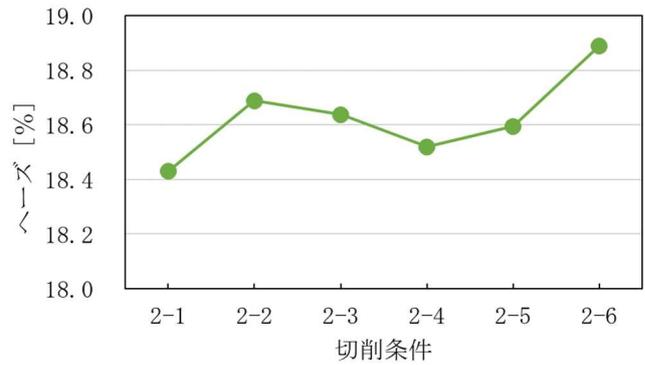


図6 5000回転におけるヘーズ

表5 5000回転での切削条件

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

4 おわりに

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

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

参考文献

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

経常研究

つづれ織り技法による紬織物製品の開発

石井 優利奈* 太田 仁美*

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

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

Key words: 結城紬, 手つむぎ糸, つづれ織り

1 はじめに

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

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

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

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

2 研究の方法

2.1 布地サンプル製織

2.1.1 経糸密度・緯糸織度の条件を変えたサンプル製織

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

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

【製織条件】

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

* 栃木県産業技術センター紬織物技術支援センター

表1 経糸の製織条件

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

2. 1. 2 緯糸織度, 緯糸の色の条件を変えたサンプル製織

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

【製織条件】

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

2. 2 絵柄製織

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

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

【製織条件】

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

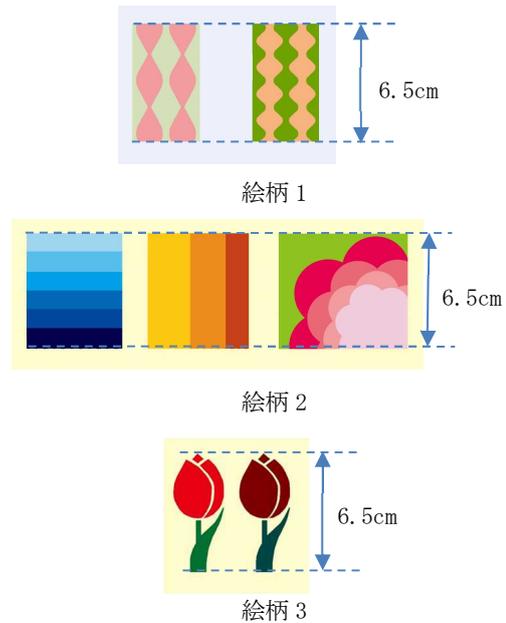


図1 試し織りに使用した図案

2. 3 帯製織

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

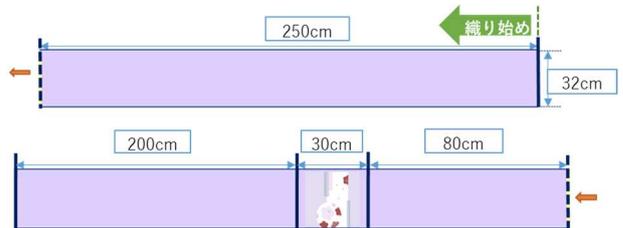


図2 帯製織設計図

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

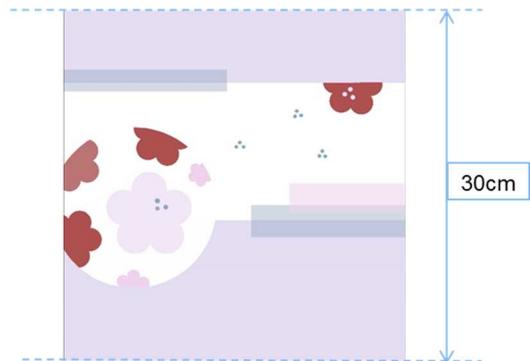


図3 帯に使用した図案

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

【製織条件】

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

3 結果及び考察

3.1 布地サンプルの評価

3.1.1 経糸密度・緯糸織度の条件を変えた布地サンプルの評価

製織した 32 種類の布地サンプルの製織条件及び結果を表 2 に示す。

表 2 布地サンプル①～④の製織条件及び結果

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

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

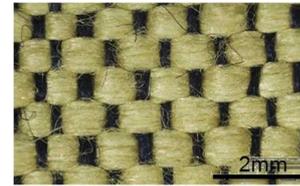
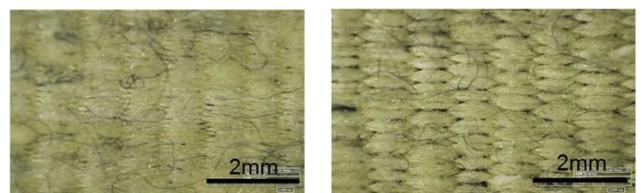
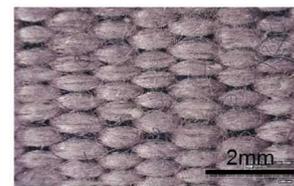


図 4 経糸が隠れなかったサンプル (No. ①-8)



No. ③-1

No. ③-2



No. ③-3

図 5 経糸が隠れたサンプル

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

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

3. 1. 2 緯糸織度、緯糸の色の条件を変えた布地サンプルの評価

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

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



図6 布地サンプル⑤



絵柄 1



絵柄 2



絵柄 3

図7 つづれ織り技法で製織した絵柄



図8 縫い取り技法で製織した絵柄

3. 2 絵柄製織

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

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

3. 2. 1 たて方向の色の境界部分の製織

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

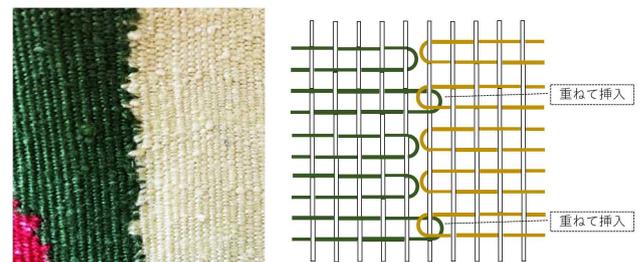


図9 境界線がたて方向の直線である2色の隣接部分
写真(左)と織り込み方(右)

3. 2. 2 打ち込み方法と布幅

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

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



図 10 製織に使用した櫛

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

3. 3 帯製織

製織した名古屋帯の絵柄を図 14 に示す。予定していた絵

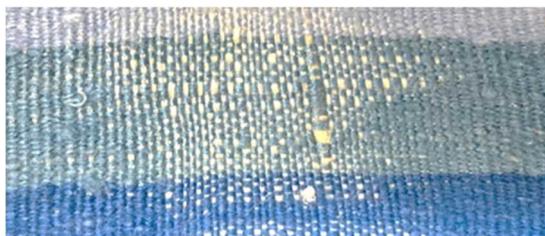


図 11 絵柄 2 緯糸密度が低下し経糸が隠されなかった部分

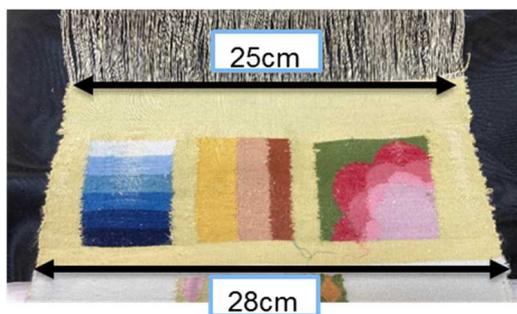


図 12 絵柄 2 布幅が詰まった様子

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



図 13 絵柄 3 筧と杼を使用し布幅が保たれた布地



図 14 製織した名古屋帯の絵柄

4 おわりに

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

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

参考文献

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

経常研究

陶器成形用石膏型製作の高精度化に関する研究

大和 弘之* 星 佳宏* 磯部 大我* 片岡 智史**

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

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

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

1 はじめに

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

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

2 研究の方法

2.1 石膏型成形における成形品の収縮・変形等調査

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

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



図1 角皿石膏型



図2 製作対象の陶器（角皿）

* 栃木県産業技術センター窯業技術支援センター

** 栃木県産業技術センター機械電子技術部

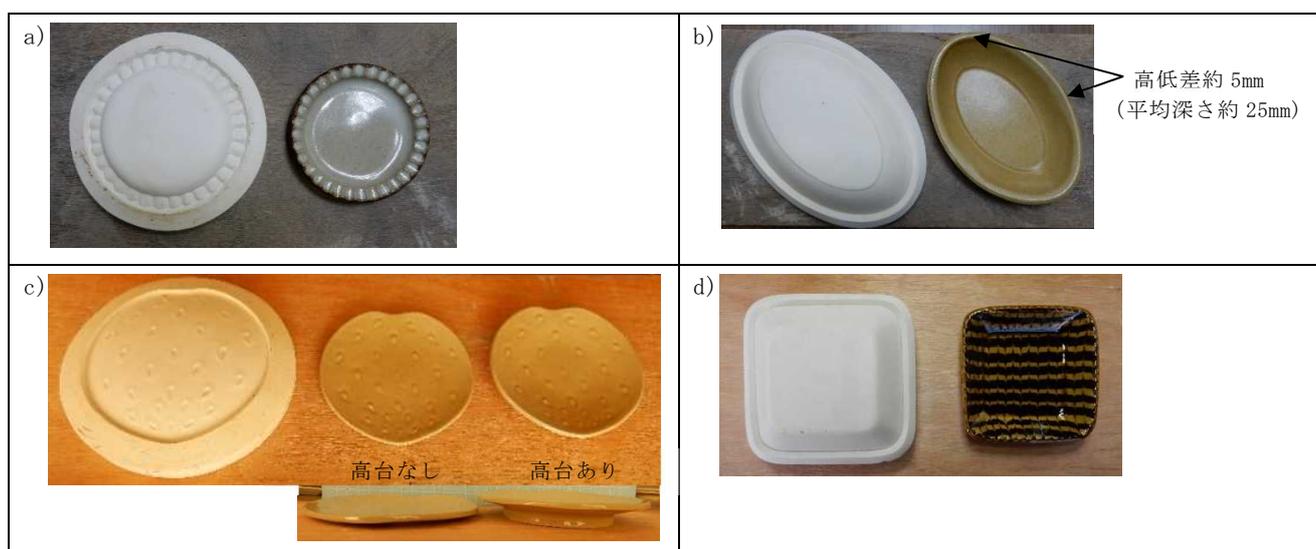


図3 石膏型とそれを用いて作られた陶器

a)丸皿 b)オーバル皿 c)異形皿(いちご形) d)角皿

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

2.2 石膏型の製作

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

2.3 製作した石膏型を用いた陶器の製作

2.2により製作した石膏型を用いて次の工程で陶器を作製した。製作方法は、2.1の角皿と同様とし、乾燥は、管理乾燥のみで行った。評価は、目視、寸法計測及びデジタル計測機により行った。主な製作条件を次に示す。

粘土：益子水簸土，益子赤土

釉薬：益子並白釉

乾燥：管理乾燥

本焼き：1,250℃（SK8 相当）酸化焼成

3 結果及び考察

3.1 石膏型成形における成形品の収縮・変形等調査

丸皿（φ9cm）、オーバル皿（21×15cm）、異形皿（12×11.5cm）及び角皿（12×12cm）の4種類について、石膏型とそれを用いて作られた陶器の寸法、形状等を調査した（図3）。これらは、益子水簸土を用いて製作されており、収縮率は9～11%程度であった。変形について、丸皿では、大きな形状変化は認められなかった。オーバル皿は、縁（フチ）に歪みが認められ、皿の底から縁まで、最大5mm程度の高低差があった（皿の平均深さ約25mm）。異形皿は、高台の有無により変形に差があり、高台がないものでは縁が落ちて平面に近づくような変形が認められた。角皿では、型と製作品で大きな形状変化は認められなかったが、型の段階で製作者の意図しない設計とのずれが生じていた。陶器の歪みについて、成形後の乾燥工程において、粘土の不均一な乾燥による歪みが生じることが知られている⁵⁾。今回調査した丸皿、異形皿及び角皿は、均一に乾燥しやすい形状で比較的サイズが小さいこともあり、石膏型と陶器との大きな形状変

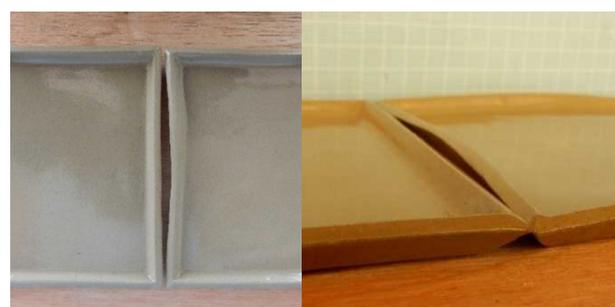


図4 乾燥条件の比較（益子赤土）
（左：管理乾燥 右：通常乾燥）

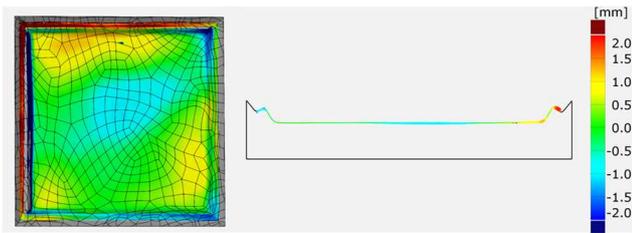


図5 デジタイザによる石膏型と角皿の形状比較

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

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

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

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

3.2 石膏型の製作

製作対象の器をデジタイザによりスキャンし、形状

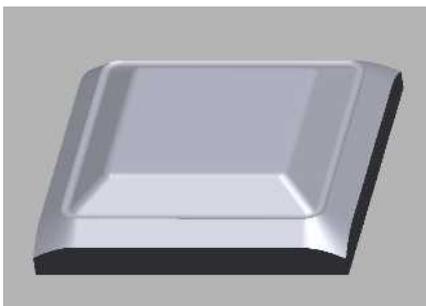


図6 作成した石膏型データ



図7 製作した石膏型

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

3.3 製作した石膏型を用いた陶器の製作

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



図8 製作した角皿
(左:益子水簸土 右:益子赤土)

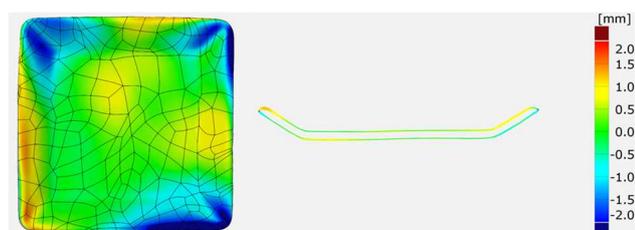


図9 制作対象の器（角皿）とそれを基にした石膏型により制作した角皿のデジタイザによる形状比較



図10 応用試作品（角皿セット）

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

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

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

4 おわりに

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

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

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

参考文献

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



令和3（2021）年度

栃木県産業技術センター研究報告

第19号

Reports of Industrial Technology Center of Tochigi Prefecture

No. 19 (2022)

発行 令和4（2022）年9月

発行所 栃木県産業技術センター

〒321-3226 栃木県宇都宮市ゆいの杜 1-5-20

TEL (028) 670-3391

FAX (028) 667-9430

VERY 
GOOD
LOCAL

とちぎ