

令和7年度

宮城県産業技術総合センター研究報告

The Annual Research Report of Industrial Technology Institute, MIYAGI Prefectural Government

No.23

2026年8月発行

目次

【研究論文】

1 印刷機を用いた機能性形状転写の研究	1
小松 迅人	
2 固化流れシミュレーション技術の開発	9
吉川 譲、野口 暁人、内海 宏和	
3 外観検査 DX に資する AI 画像処理デジタル技術開発と産業応用	19
高野 寛己、高久 悠杜、太田 晋一	
4 適応的実験計画法による開発加速化	25
内海 宏和	

【短報】

1 生成 AI 時代における新たな商品開発プロセスの確立	31
益田 佳奈、畠 純子、篠塚 慶介	
2 空間電磁界可視化による放射電磁ノイズ評価に関する検討	35
佐藤 裕高、坂下 雅幸、安齋 哲、今井 和彦	
3 産学官連携素材技術活用支援事業	39
今野 奈穂、千葉 亮司、佐藤 勲征	
4 サーキュラーエコノミー推進事業	45
推野 敦子、千葉 亮司、浦 啓祐、佐藤 勲征	
5 県産サツマイモの品質調査	
ー 県特産品及び県育成新品種の特性評価と利用拡大に向けた検討 ー	51
今野 知佐子、佐藤 信行、畑中 咲子	

6 イチゴ「ころろんベリー」の果実特性の調査	
ー 県特産品及び県育成新品種の特性評価と利用拡大に向けた検討 ー	57
	今野 知佐子、佐藤 信行、畑中 咲子
7 吟醸用宮城酵母泡無し株の開発	63
	池田 匠、吉村 緑、中村 佳与、小山 誠司

【ノート】

1 流体計測および可視化技術を活用した製品開発の高度化	67
	野口 暁人、吉川 穰
2 無機材料分析評価用治具の開発	73
	阿部 一彦、水上 浩一、鈴木 鋭二、林 正博
3 放射光の特性を生かした三次元物性イメージングの研究	77
	伊藤 桂介、内海 宏和、曾根 宏
4 HDD プラッタの層構造解析	79
	内海 宏和、伊藤 桂介、曾根 宏
5 UPLC-MS の新たな測定メニューの充実	81
	星野 友花、佐藤 信行
6 NanoTerasu の活用に向けた食品測定事例の蓄積	85
	羽生 幸弘、星野 友花

【研究論文】

【研究論文】

【令和6～7年度 県単独試験研究】

印刷機を用いた機能性形状転写の研究

小松 迅人

機械電子情報技術部

(現 自動車産業支援部)

近年、印刷技術の微細化が急速に進展しており、製造業における応用が期待されている¹⁾。とりわけ、省人化や生産性の向上、省資源化といった社会的要請を背景に、新たな製造手法としての印刷技術の活用が注目されている²⁾。

本研究では、構造物構築を可能とする印刷技術の応用条件を明らかにすることを目的とし、スクリーン印刷法と手動オフセット印刷によって形成されたパターンと、半導体プロセスであるフォトリソグラフィ技術を用いた高精度に作製されたメタサーフェス構造との機能差に着目して、両製法によるパターン形成の違いがメタサーフェスの機能性に及ぼす影響を検討したので報告する。

キーワード：スクリーン印刷、オフセット印刷、メタサーフェス、電磁界シミュレーション(HFSS)、フリースペース測定法

1 緒言

近年、印刷技術の微細化が急速に進展しており、製造業における応用が期待されている。エレクトロニクス分野や微細構造体の形成など、機能性を伴う新たな応用分野へと展開が進んでいる。特に、スクリーン印刷、インクジェット印刷、グラビア印刷といった既存の印刷プロセスに対し、微細化・高精度化・材料多様化が進められており、これまで半導体プロセスに依存してきた領域においても、簡便かつ低コストな製造技術として期待されている。これらの動きは、近年の「ファインパターン印刷技術」として体系化されつつあり、研究開発が国内外で活発に行われている³⁾。とりわけ、省人化や生産性の向上、省資源化といった社会的要請を背景に、新たな製造手法としての印刷技術の活用が注目されている。印刷手法は、同一構造の大量生産に適していることから、地域中小企業においても関心が高まりつつあるが、導入には依然として慎重な姿勢が見られる。その主因として、装置のみでは製造が成立せず、電子部品等への応用においては紙媒体とは異なる転写条件やプロセス制御が求められる点が挙げられる。

一方、社会的背景として、国内の製造業は生産人口の減少による人手不足に直面しており、生産工程の自動化・省人化が急務となっている。加えて、カーボンニュートラルや資源循環型社会の実現に向けて、省資源・省エネルギーな製造プロセスへの転換が求められてい

る。このような要請に応える手段として、印刷技術による製造は、材料使用量の最小化、エネルギー消費の抑制、製造装置の簡素化といった観点から注目されている。

特に、同一パターンの繰り返し構造を短時間かつ大量に形成可能な印刷技術は、中小企業にとっても導入のハードルが比較的 low、ものづくり産業においても応用可能性が高いと評価されつつある。しかしながら、実際の現場では装置を導入するだけで即座に実用化できるものではなく、その技術的成立には多くの課題が残されている。

主な課題の一つとして、印刷対象物の違いに起因するプロセス条件の最適化が挙げられる。紙媒体への印刷と異なり、電子部品や樹脂、金属基板などへの印刷では、インクの濡れ性、密着性、焼成条件、さらには微細構造の精度と再現性といった要素が製品機能に直結する。また、材料の熱的・化学的特性に応じた工程制御が求められるため、プロセス開発には応用先ごとの個別検討が不可欠である。

本研究では、こうした背景を踏まえ、構造物による機能発現を目的とした印刷技術の応用において、量産技術としての成立性を持った基礎的な転写条件のパラメータの抽出を目的とする。

印刷プロセス(スクリーン印刷法、オフセット印刷法)と半導体プロセスによる同じパターンのメタサーフェスを作製し、作製手法の違いによるパターン形成の違いがメタサーフェスの機能性に及ぼす影響をフリースペース法

により比較・評価したので報告する。

2 実験方法

半導体プロセスと印刷プロセスでの機能発現の違いを検証するため、令和4～5年度の期間で実施した研究テーマ「メタサーフェスデバイスの研究」⁴⁾のパターン形状およびサンプルを比較用に用いた⁵⁻⁸⁾。

2.1 メタサーフェスパターン

ある角度に反射させるグラディエントメタサーフェスのパターンおよびパッチは、スネルの法則から1セルのX方向の長さDxは下記の式で表される。

$$Dx = \frac{\lambda}{|\sin\theta_r - \sin\theta_i|}$$

θ_r : 反射角、 θ_i : 入射角

また、1セルのY方向の長さDyは、

$$Dy = \frac{\lambda}{2}$$

で求まる。

また、ある反射角度 θ を発現させる、i番目のパッチの抵抗値は下記の式で表される。

$$R(X_i) = \frac{Z_s(X_i) - \eta_0}{Z_s(X_i) + \eta_0}$$

$$Z_s(X_i) = \frac{\eta_0}{\sqrt{\cos\theta_R}} \frac{\sqrt{\cos\theta_R} + \exp(-jk_0 X_i \sin\theta_R)}{1 - \sqrt{\cos\theta_R} \exp(-jk_0 X_i \sin\theta_R)}$$

ここで、 X_i はi番目のパッチ中心座標、 $\eta_0(\Omega)$ は真空中のインピーダンス、 k_0 は真空中の空間波数である。

以上の式から、セル内のパッチの数を8個として、真空中の空間波数が28 GHz帯で60度反射を起こす各パッチの位置と位相を求めた(図1)。

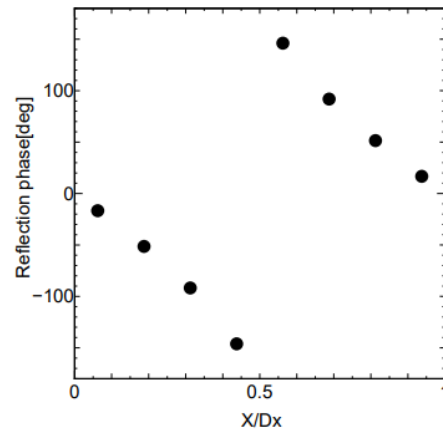


図1 パッチの位置と位相

パッチのそれぞれの長さは、電磁界シミュレーション Ansys HFSS (Ver 13.0) を使用し割り出した。

2.2 パターン作製方法

(1) 半導体プロセス法(フォトリソグラフィ)

基材には、厚さ100 μm のポリエステルフィルム(コスモシャインA4160)に、メタロイドML-450⁹⁾とレジストを配合したインクを両面塗布したものを使用した。パターン露光には高精度な露光機を使用した。

(2) スクリーン印刷法

サンプル作製に使用したスクリーン印刷では、線幅が20 μm 増加する特徴があるため、それぞれのパッチ幅の寸法を20 μm 縮小し1.23 μm とした(図2)。

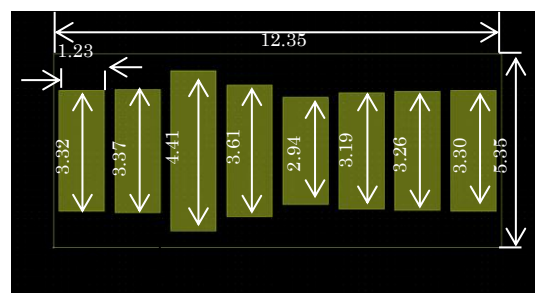


図2 1セル内のパッチの位置と寸法

スクリーン版の紗はSUS、460メッシュ、乳剤厚8 μm 、基材には、ポリエステルフィルム(コスモシャインA4160:厚み100 μm 、50 μm)、インクはパターン部にML-270、裏面のグラウンド面はML-250SLV3を使用した。

スクリーン印刷は以下の工程で実施した。

- ① 裏面にML-250SLV3をバーコーターにより塗布 (wet6 μm)→乾燥120 $^{\circ}\text{C}$ ×2 分

- ② 表面にML-270スクリーン印刷→乾燥120℃×20分
- ③ アルカリ脱脂 45℃×3分
- ④ 無電解Cu 40℃×20分(厚み1μm狙い)
- ⑤ 防錆処理(BTA系)RT×30秒
- ⑥ 熱処理120℃×30分

(3) 手動オフセット印刷法

パターン作製された版にメタロイドインクをスピコーターで塗布(500 rpm、20 秒)し、ブランケットにこの版のパターンを手動で転写後、ブランケットを基材に0.2 MPaの圧力で押し当てオフセット印刷を行った。その後、下記の順番でメッキ処理を行った。

- ① アルカリ脱脂 45℃×3分
- ② 無電解Cu 40℃×20分
- ③ BTA系防錆処理 RT×30秒
- ④ 熱処理 100℃×30分

3 実験結果

3.1 作製サンプルの寸法比較

28 GHz、60 度反射を発現するメタサーフェスの設計寸法と、半導体プロセス法およびスクリーン印刷法で作製したサンプル寸法の違いを測定した(表1)。

半導体プロセス法では20 μm、スクリーン印刷手法では150~200 μmのパッチの幅が増加していた(図3)。

表1 設計・シミュレーション寸法と各プロセスで作製したサンプルの計測値との関係
(設計値との差:測定箇所3カ所の平均値)

	設計	フォトリソ	スクリーン	スクリーン
基材厚さ	100 μm	100 μm	100 μm	50 μm
パッチ間 (mm)	0.3 ※+10μm	0.3 (+0.01)	0.19 (-0.11)	0.09 (-0.21)
パッチ幅 (mm)	1.23 ※-20μm	1.27 (+0.02)	1.38 (+0.15)	1.43 (+0.2)
インク 膜厚 (mm)	0.1	0.03 (-0.07)	0.02 (-0.08)	0.04 (-0.06)

※スクリーン印刷用に設計寸法変更

(設計寸法:パッチ間0.29、パッチ幅1.25 mm)

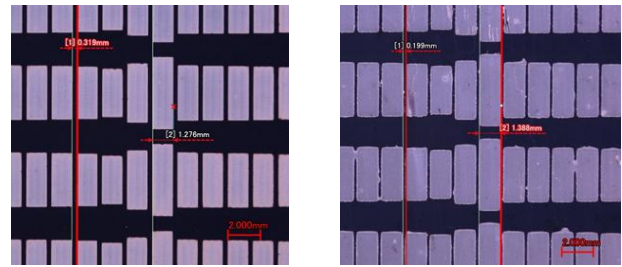


図3 フォトリソ(左側)とスクリーン100 μm(右側)のサンプル外観

3.2 作製サンプルの機能比較

評価測定は、京都府中小企業技術センターの光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システム(アンリツ社製広帯域ベクトルネットワークアナライザ ME7838A)¹⁰⁾を使用し、フリースペース法による吸収・シールド性能を評価した(図4)。

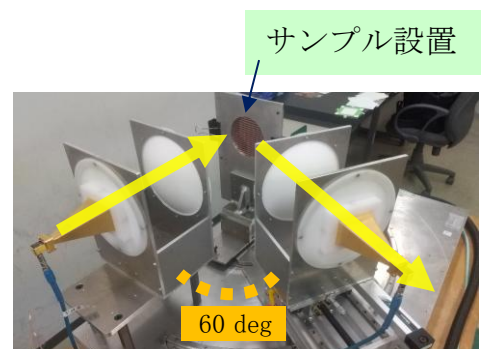


図4 測定風景

3.2.1 半導体プロセスのサンプル特性(基材t=100 μm)

半導体プロセス(フォトリソグラフィ)により作製したメタサーフェスサンプルの26.5~40 GHz帯での反射特性は、28 GHz付近で変化が見られた。また、同じサンプルを180度回転させた特性は、39 GHz付近で反射傾向が見られた(図5)。

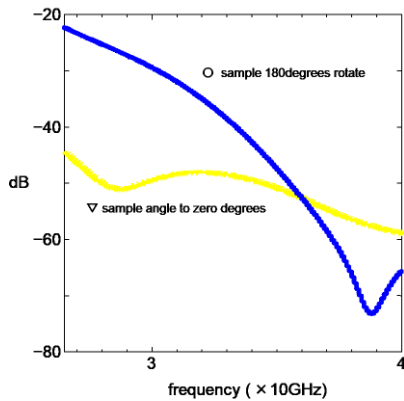


図 5 フトリソグラフィによるサンプル反射板の
26.5～40 GHz反射特性実測値 (PET $t=100 \mu\text{m}$)

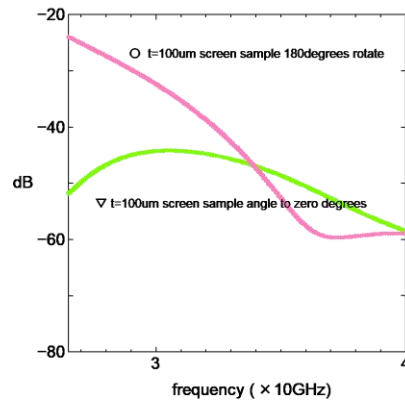


図 7 スクリーン印刷手法試作反射板の
26.5～40 GHz反射特性実測値 (PET $t=100 \mu\text{m}$)

3.2.2 スクリーン印刷のサンプル特性(基材 $t=100 \mu\text{m}$)

PETフィルムの厚み $100 \mu\text{m}$ の基材に、スクリーン印刷により作製したメタサーフェスサンプルの18～26.5 GHz帯での反射特性は、21 GHz付近で変化が見られた(図.6)

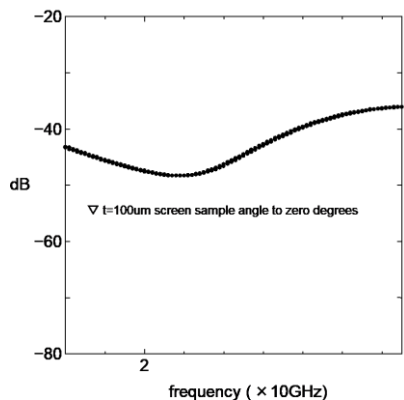


図 6 スクリーン印刷手法試作反射板の
18.5～26.5 GHz反射特性実測値 (PET $t=100 \mu\text{m}$)

同じスクリーン印刷で作製したサンプルを180度回転させた26.5～40 GHz帯での測定では、37 GHz付近で反射傾向が見られた(図7)。

3.2.3 スクリーン印刷のサンプル特性(基材 $t=50 \mu\text{m}$)

PETフィルムの厚み $50 \mu\text{m}$ の基材に、スクリーン印刷により作製したメタサーフェスサンプルの反射特性は、37.5 GHz付近で変化が見られた。また、同じサンプルを180度回転させた特性は、38.5 GHz付近で反射傾向が見られた(図8)。

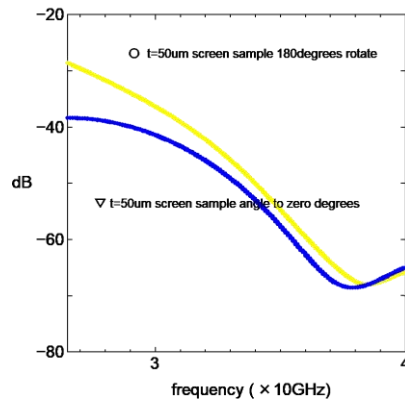


図 8 スクリーン印刷手法試作反射板の
26.5～40 GHz反射特性実測値 (PET $t=50 \mu\text{m}$)

半導体プロセスによるパターンでは、高精度な寸法制御が可能で、メタサーフェスとしての機能(反射制御)が明確に発現した。また、180度回転すると特性が変化するグラジエントメタサーフェスの特徴が確認できた。

スクリーン印刷法のサンプルでは、パターン寸法のばらつきやエッジの丸まりが確認された。基材の厚みが

100 μm の場合は、比較的パターン形状の転写が見られたため、メタサーフェスの特徴である180度回転すると特性の変化が見られた。

一方、基材の厚みが50 μm のスクリーン印刷で作製したサンプルは、パターン形状が非対称ではなくなっていることが見られ、サンプルを180度回転させた反射特性が相似することが確認できた(図9)。

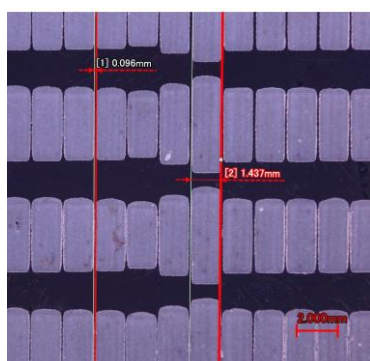


図 9 スクリーン 50 μm のサンプル外観

3.2.4 手動オフセット印刷のサンプル特性

メッキ後のサンプルは、手動でオフセット印刷を行ったため印圧が不均一になり、 $\phi 100$ mmのサイズ領域では転写されない部分があるなどの転写斑が確認された(図10)。

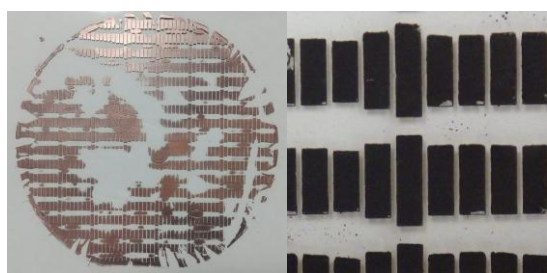


図 10 手動オフセット印刷で作製したサンプル外観
(転写斑の例とパターン部)

パターンが転写されている部分のパッチ間、パッチ幅は、それぞれ30 μm 程度の誤差であった(表2)。

これは、フォトリソグラフィで作製したサンプルに近い数10 μm 単位の差であった。

表 2 設計値の寸法と手動オフセット印刷での
パターン部の差

設計値	パッチ間	パッチ幅
(mm)	0.293	1.25
サンプル	0.264 ※-29 μm	1.281 ※31 μm

※設計値との差:測定箇所3カ所の平均値

手動オフセット印刷で転写されたサンプルパターンでは、ある特定の周波数に反射制御の機能が明確に発現した。このサンプルは、転写斑があるものの、セル寸法のばらつきが抑えられ、パッチ部ではエッジの角が確認された。フリースペース法による測定では、34.6GHzに反射のピークが出現したが、転写斑の影響から40GHz以上にピークが出現することが確認できた(図11)。

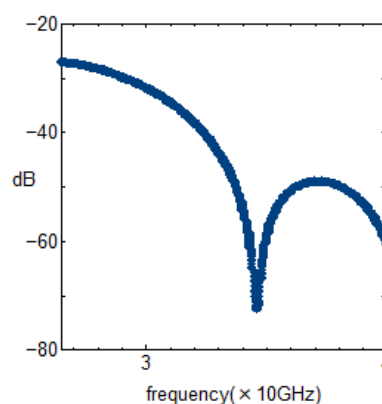


図 11 手動オフセット印刷試作反射板の
26.5～40 GHz反射特性実測値 (PET t=100 μm)

3.2.5 $\phi 40$ の測定治具を用いた手動オフセット印刷のサンプル特性

転写斑が少なく機能性を持たせたパターンが転写されているサンプル分部を、通常 $\phi 100$ のアルミ板の測定治具から $\phi 40$ の治具に交換し反射特性の評価を行った(図12、13)。

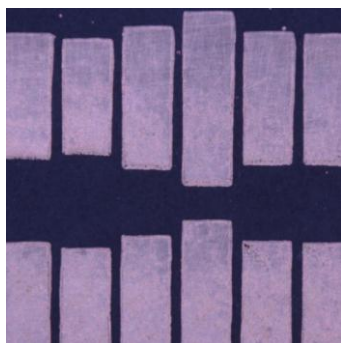
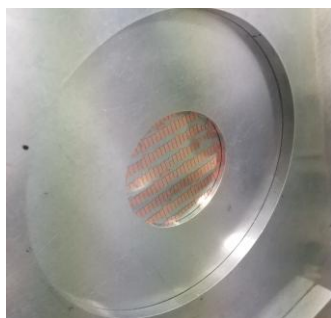
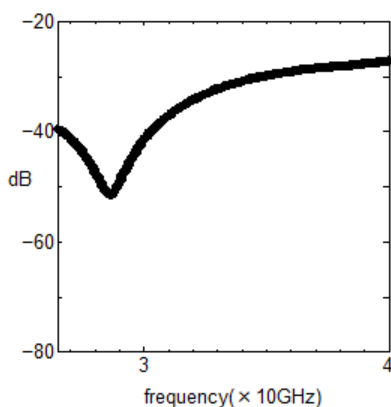


図 12 転写斑が少ないパターン部の外観

図 13 $\phi 40$ の治具の外観

この測定治具では、28.7 GHz付近で反射傾向が見られた(図14)。

図 14 手動オフセット印刷試作反射板測定($\phi 40$ 治具)

4 考察

半導体プロセスは、高精度なパターン形成が可能である一方で、装置コストが高く、製造工程も複雑化する傾向があることから、地域中小企業への技術展開には一定の制約が存在する。これに対し、印刷法はプロセスの簡便さおよび低コストといった利点を有するが、微細構造の形成における再現性には課題が残る。

本研究では、半導体プロセス、スクリーン印刷法およ

び手動オフセット印刷により作製した各種グラジエントメタサーフェスのサンプルを比較した。実験結果からは、スクリーン印刷の基材の厚みが100 μm のサンプルの測定位置を180度回転した場合に、グラジエントメタサーフェスの特徴である離れた周波数帯域への反射のシフトが見られた。一方、スクリーン印刷の基材の厚みが50 μm のサンプルでは、180度回転してもほぼ同じ反射帯域であった。

手動オフセット印刷では、印刷斑があるものの明確な反射のピークが見られた。印刷斑が比較的少ない範囲部分のみを選択して $\phi 40$ mmの測定治具を用いて評価した結果では、28 GHzの近傍で反射特性が得られているのが確認できた。

これらのことから、印刷手法による機能を持たせた構造物は、印刷プロセス条件(例:インク粘度、スクリーンメッシュ、転写速度など)の最適化¹¹⁻¹⁴⁾、ブランケットを用いたオフセット手法¹⁵⁻¹⁷⁾による印刷精度の向上で十分な機能発現が可能となると考える。

5 結論

本研究では、メタサーフェス構造のパターン形成手法としてスクリーン印刷と手動オフセット印刷を用いたデバイスについて、半導体プロセスであるフォトリソグラフィ技術を用いた高精度に作製されたデバイスと比較することで、印刷技術による微細構造形成の現状と課題を把握することを目的とした。具体的には、同一の設計パターンを両手法に適用し、得られた構造の形状精度、膜厚、ならびに機能性(フリースペース法を活用した反射特性)について定量的評価を実施した。

これにより、スクリーン印刷法における形成限界やプロセスのばらつきの傾向の把握、手動ではあるがオフセット印刷の可能性を示唆するとともに、フォトリソグラフィ手法に対する性能差を明確化することができた。これらの比較検討結果は、今後の印刷技術の工程最適化および応用展開に向けた指針を得る上での基礎資料となった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、メタロイドインクを使ったスクリーン印刷のサンプル作製およびメッキ処理に関しては、株式会社イオックス 中澤様、中辻様、測定に関しては、京都府中小企業技術センター 坪井様、小山様、Si版の作製には株式会社デアネヒステ 中尾様には多大なるご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 栗山 博道, 中島 聡, 大村 知也, 鷹氏 啓吾, 梶田 倫正, 木田 仁司, 金子 哲也, 岩永 秀規, 後河内 透. インクジェット印刷技術によるリチウムイオン電池のデジタル製造. Ricoh Technical Report No.45(2023).
https://jp.ricoh.com/-/Media/Ricoh/Sites/jp_ricoh/technology/techreport/45/pdf/RTR45a08.pdf
- 2) 時任 静士. プリンテッドエレクトロニクスの新展開. 色材協会誌. 2021-08-20, 94 (8), p. 234-241. DOI: 10.4011/shikizai.94.234
- 3) 日下 靖之. 電子デバイス製造のための微細印刷技術. 日本印刷学会誌. 2022, 第59巻第3号, p. 104-109.
- 4) 小松 迅人, 佐藤 裕高2021-08-20. メタサーフェスデバイスの研究. 2024, 令和5年度宮城県産業技術総合センター研究報告, No.21, p. 1-6.
https://www.mit.pref.miyagi.jp/wp-content/uploads/2024/09/Report_No_21.pdf
- 5) Yuto, Kato; Kohei, Omori; Atsushi, Sanada. D-Band Perfect Anomalous Reflectors for 6G Applications. IEEE Access. 23 November 2021, vol.9, p.157512-157521. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3130058
- 6) A, Díaz-Rubio; V,S, Asadchy; A, Elsakka; S,A, Tretyakov. From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors. Sci. Adv. Aug. 2017, vol. 3, no.8, Art. no. e1602714.
- 7) Shulin, Sun; Kuang-Yu, Yang; Chih-Ming, Wang; Ta-Ko, Juan; Wei, Ting, Chen; Chun, Yen, Liao; Qiong, He; Shiyi, Xiao; Wen-Ting, Kung; Guang-Yu, Guo; Lei, Zhou; Din, Ping, Tsai. High-Efficiency Broadband Anomalous Reflection by Gradient Meta-Surfaces. 2012, Nano Let., 12, p.6223-6229. DOI: 10.1021/nl3032668
- 8) Olli, Luukkonen; Constantin, Simovski; Gérard, Granet; George, Goussetis; Dmitri, Lioubtchenko; Antti V. Räisänen; Sergei A. Tretyakov. Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. June 2008, Volume:56, Issue:6, p. 1624 - 1632.
- 9) メタロイドインク, 株式会社イオックス,
<https://www.iox.co.jp/>
- 10) フリースペース法, 光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システム, 京都府中小企業技術センター,
https://www.kptc.jp/mtc/wp-content/uploads/2016_09-20.pdf
- 11) Sarah-Jane, Potts; Chris, Phillips; Tim, Claypole; Eifion, Jewell. The Effect of Carbon Ink Rheology on Ink Separation Mechanisms in Screen-Printing. Coatings. 2020, 10(10), 1008.
<https://doi.org/10.3390/coatings10101008>
- 12) Sarah-Jane, Potts; Chris, Phillips; Eifion, Jewell; Ben, Clifford; Yin, Cheung, Lau; Tim, Claypole. High-speed imaging the effect of snap-off distance and squeegee speed on the ink transfer mechanism of screen-printed carbon pastes. SPRING NATURE, 2020, Volume17, p. 447-459.
- 13) Taejun, Lee; Chihun, Lee; Dong, Kyo, Oh; Trevon, Badloe; Jong, G. Ok; Junsuk, Rho. Scalable and High-Throughput Top-Down Manufacturing of Optical Metasurfaces. Sensors. 2020, 20(15), 4108.
<https://doi.org/10.3390/s20154108>
- 14) Nathan, Zavanelli; Woon-Hong, Yeo. Advances in Screen Printing of Conductive Nanomaterials for Stretchable Electronics”, ACS Omega 2021, 6, p. 9344-9351.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00638>
- 15) 野村 健一, 牛島 洋史, 永瀬 和郎, 池戸 裕明, 三井 亮介, 高橋 誠哉, 中島 伸一郎, 岩田 史郎. スクリーンオフセット印刷装置の開発と高品質配線形成. 2014. 第28回エレクトロニクス実装学術講演大会,
https://doi.org/10.11486/ejisso.28.0_289
- 16) Konami, Izumi; Yasunori, Yoshida; Shizuo, Tokito. Soft blanket gravure printing technology for finely patterned conductive layers on three-dimensional or curved surfaces. Japanese Journal of Applied Physics. 2017, Volume 56, Number 5S2.
- 17) Jessamine, Ng, Lee; Cheolmin, Park; George, M. Whitesides. Solvent Compatibility of Poly(dimethylsiloxane)-Based Microfluidic Devices. Anal. Chem. 2003, 75, p. 6544-6554.

【研究論文】

【令和5～7年度 地域企業競争力強化支援事業】

固化流れシミュレーション技術の開発

吉川 穰、野口 暁人、内海 宏和*

自動車産業支援部、材料開発・分析技術部*

アルミ合金の鋳造特性を評価する流動性評価試験と、溶射など熔融液滴が固体表面に衝突する現象を対象として、凝固流れシミュレーションに取り組んだ。流動性評価試験においては、管内を流動する合金が凝固により運動を停止する距離が、熔融金属温度の増加に対して長くなる傾向が実験とシミュレーションで一致した。また固体表面へのろう溶滴衝突現象においては、凝固後のろうの直径が溶滴の衝突直前速度の増加に伴い大きくなる傾向をシミュレーションで再現できた。シミュレーションでは、管内部の速度分布や衝突溶滴の変形の様子、固体との接触により急激に熔融物の温度が降下し凝固が進展する様子など、実験では観測困難な現象を可視化することができた。

キーワード：固液相変化、凝固流れモデル、多相流、鋳造、溶射、数値計算

1 緒言

宮城県では、平成20年度からみやぎ発展税を有効に活用し、「富県宮城の実現」に向けた施策を行っている。中でも、県内総生産10兆円達成を目標とした産業振興パッケージでは、高度電子機械産業や自動車関連産業に関連した県内の中小企業の競争力強化を目的としており、当センターもその下に県内企業の技術の高度化を目指して日々の支援を行っている。

さて、上述の産業分野においては、デジタルエンジニアリング技術を活用した設計開発が世界的に普及しており、当センターでも平成9年度からコンピュータシミュレーションを導入して、県内企業向けに構造・伝熱を中心とした先導的な技術支援を行ってきた。ところが近年ではその分野を超え、特に流体力学分野に関して、シミュレーション(数値計算)技術を用いた設計の事前検討についての技術相談が年々増加している。例えばファンによる気流の到達距離や水冷による発熱体の温度を求めたいといった相談や、スプレーによる液滴の飛散挙動や熔融金属が流れながら冷えて固まる位置を知りたいといった相談が実際に寄せられている。前者の相談のように、気体や液体それぞれ単独の流れ(単相流)を扱う問題に関しては大方対応が可能で、数値計算利用の有無に関わらず数多くの支援を行っている。一方で、後者のように気体や液体、固体が混在した流れ(多相流または混相流)の問題については、当センターでは知見が乏しく、多相流現象を単相流現象と見立てた簡略モデルによる部分的な支援を行い、内容によっては対応不

可なる場合もあった。

このような背景から、当センターでは、県内企業が抱える多相流問題の設計開発に資するべく、令和3年度から2年間にわたって「多相流シミュレーション技術の高度化研究」を実施し、シミュレーション技術を培った²⁾。その中では、これまで当センターで対応できなかった多相流関連の問題の中から、「液滴振動」「ノズル濡れ」「液滴飛散」の3つのテーマに取り組んだ。また、各テーマに対するシミュレーションを実施するだけでなく、対応する線形理論及び実験と比較することで、シミュレーション結果の妥当性を確認した。一方で、ガスアトマイズや溶射に見られるような、溶滴が流れの中で凝固するような問題や、塗装やペースト塗布に見られるような、溶媒が流れの中で蒸発するような問題については、シミュレーション技術の開発に至らなかった。

そこで、本研究は「多相流シミュレーション技術の高度化研究」で残された課題として、凝固や乾燥によって固化が生じる流れについて、シミュレーション技術の開発を目的とする。凝固現象については、鋳造シミュレータの中で既に取り扱われているが、本研究では鋳造に限らず、より広範な技術分野への適用を見据えているため、汎用の流体シミュレータを用いて簡易的な取り扱いを可能とする。3年間の研究期間の前半では、鋳造プロセスに見立てた熔融金属の流動性評価試験を、後半では落下溶滴の凝固をテーマとして、それぞれシミュレーションで取り扱う。一方、乾燥現象についてはチャレンジ課題とし、研究開発のステップには位置付けない。令和7年度は研究期間3年の最終年度にあたり、本研究論文

では研究期間で得られた成果を総括する。

2 問題設定と計算・実験方法

2.1 流動性評価試験シミュレーション

流動性評価試験では、型下部を熔融金属の液面に付着させた後、ある瞬間に型上部を減圧させることで、型内部へ突発的に流入させる。対照実験³⁾では、型を外径6 mm、内径4 mm、高さ250 mmのSUS304製の中空円筒とし、大気圧から圧力を20 kPa減圧することで、熔融させた鋳造用アルミ合金(AC4C)を吸い上げ、凝固後の流動長を測定している。本計算もその諸元に則り、凝固流れモデルを導入した熱流体シミュレーションにて現象の再現を試みた。

本シミュレーションは、商用の流体計算ソフトウェア Ansys Fluent 2024 R1を用いて実施した。流れは非圧縮性を仮定し、熔融AC4Cと空気の気液二相流問題として扱った。気液二相流モデルには昨年度「突発的な吸引による流れ」問題で採用したVolume of Fluid法を、凝固流れモデルには昨年度「潜熱を考慮した伝熱」問題で採用したエンタルピー・空隙率法⁴⁾を使用した。エンタルピー・空隙率法においては、式(1)に示す速度 u に比例する運動量のシンク項 S を導入することで凝固現象を表現する。

$$S = k \frac{(1-\beta)^2}{\beta^2 + 0.001} u \quad (1)$$

ここで、 β は液体分率、 k は半熔融領域パラメータを表し、本計算においては $k = 1 \times 10^5$ とした。

熔融AC4Cの物性値⁵⁾は、密度を 2640 kg/m^3 、比熱を $963 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 、熱伝導率を $159 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ で一定とし、固相線温度を $545 \text{ }^\circ\text{C}$ 、液相線温度を $612 \text{ }^\circ\text{C}$ 、潜熱を 390 kJ/kg と与えた。なお温度に対する液体分率 β の変化は、図1に示す区分線形分布とした。また、表面張力係数 σ と粘性係数 μ については熔融AC4Cの値を参照できなかったため、 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ のアルミの物性値^{6), 7)}を参照し、その効果を検証した。計算に用いた値は次章の計算結果とともに示す。

図2に計算領域の全体図(a)と原点近傍の拡大図(b)を示す。本計算は、 x 軸を中空円筒型の対称軸とする軸対称2次元計算とし、 y 方向を半径方向とした。また型への等方的な熔融AC4Cの流入を表現するために、流入境界を円形とし、ゲージ圧を 0 Pa とした。一方で流出境界には、ゲージ圧 -20 kPa を与えた。初期条件は、図2の緑色領域のうち $x \leq 0 \text{ mm}$ または $x \leq 10 \text{ mm}$ の領域

をAC4Cの体積分率および液体分率 β を1として、その他の緑色領域を0(空気)とした。なお、原点近傍の拡大図に灰色で示す領域は、SUS304の固体領域を表す。SUS304と空気の初期温度は $26.85 \text{ }^\circ\text{C}$ とし、熔融AC4Cの初期温度は $637 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $677 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $717 \text{ }^\circ\text{C}$ と変えてその傾向を調べた。また、場全体の初速度と初期圧力は0とし、 $-x$ 方向に重力を与えた。

計算に使用したメッシュは、円筒型内部で 0.25 mm の直交等間隔格子、 $x < 0$ における原点から半径 6 mm 以内の領域で 0.25 mm の非構造格子となるように設定し、小さな速度で流入されると予想される流入境界に近づくにつれてメッシュを 5 mm まで粗大化させた。また時間刻みを $\Delta t = 0.01 \text{ ms}$ として、時刻 $t = 100 \text{ ms}$ まで計算を行った。

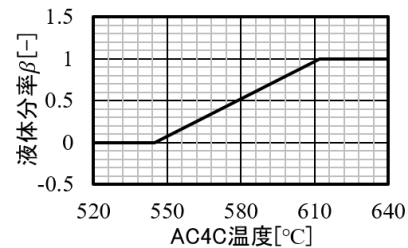


図1 AC4Cの温度と液体分率の関係

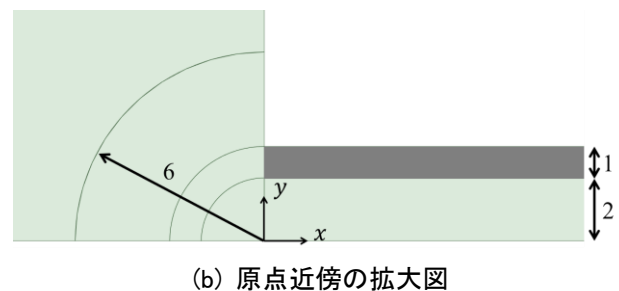
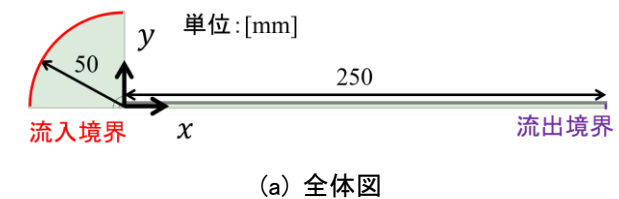


図2 流動性評価試験シミュレーションの計算領域

2.2 落下溶滴の凝固シミュレーション

溶射や塗装のような表面処理プロセスによって得られる表面性状の良否は、スプレー状に飛散した液滴の、固体表面への衝突後変形や固化過程に依存する。したがってその性状改善のためには、液滴の衝突から変形、

固化までを一貫したシミュレーションでの取り扱いが求められる。本研究では、汎用の流体計算ソフトウェアにて凝固を考慮することでその実現を試みた。シミュレーションでは、パラフィンワックス溶滴が落下し、壁面衝突後に凝固するまで計算し、結果の検証のため対照実験を行った。

本シミュレーションは、商用の流体計算ソフトウェア Ansys Fluent 2025 R2を用いて実施した。流れは非圧縮性を仮定し、パラフィンワックスと空気の気液二相流問題として扱った。その他は、流動性評価試験シミュレーションと同様のモデルを用いた。

溶融パラフィンワックスの物性値^{8), 9), 10), 11)}は、密度を 800 kg/m^3 、比熱を $2140 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、熱伝導率を $0.25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、粘性係数を $0.005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、表面張力係数を 0.003 N/m で一定とし、固相線温度を 48°C 、液相線温度を 50°C 、潜熱を 200 kJ/kg とし、半溶融領域パラメータ k は流動性評価試験シミュレーションと同様に 1×10^5 とした。なお温度に対する液体分率の変化は、図3に示す区分線形分布とし、壁面とパラフィンワックスとの接触角を 170° とした。

図4に計算領域を示す。本計算は、 x 軸を対称軸とする軸対称2次元計算とし、 y 方向を半径方向とした。初期条件は、図4に黒色領域で示すように $x = 3.75 \text{ mm}$ 、 $y = 0 \text{ mm}$ を中心とする半径 1.75 mm の領域において、 80°C のパラフィンワックスの体積分率および液体分率 β を1、その他の白色領域において体積分率および液体分率を0(20°C の空気)とした。また、パラフィンワックス領域に与える初速度は $-x$ 方向に一樣として、その速度を 1.0 m/s 、 1.3 m/s 、 1.5 m/s 、 1.7 m/s と変えて傾向を調べた。なお、 $-x$ 方向に重力を課した。

計算に使用したメッシュは直交不等間隔格子で、壁面境界における格子幅 0.005 mm から x 方向に伸長させ、60層のレイヤーメッシュを成長率 1.05 で格子幅 0.1 mm まで発達させた。また時間刻みを $\Delta t = 0.002 \text{ ms}$ として、時刻 $t = 20 \text{ ms}$ まで、その後は $\Delta t = 0.01 \text{ ms}$ として、時刻 $t = 520 \text{ ms}$ まで計算を行った。

図5に対照実験のセットアップを示す。まず、予熱されたパラフィンワックスを $1/8 \text{ inch}$ パイプに満たし、巻き付けたラバーヒーターにより管中央部で 80°C になるように保温した。その後、シリンジをゆっくりと押し込むことで、パイプ先端に装着された内径 3.4 mm のノズルから、 $W150 \text{ mm} \times D100 \text{ mm} \times t 30 \text{ mm}$ のアルミブロックへ向けてパラフィンワックス溶滴を滴下した。溶滴の落下から凝固の様子はハイスピードカメラで観察し、衝突速度は撮影画像から計算した。ノズル先端とアルミブロックとの

距離を 50 mm 、 100 mm 、 150 mm 、 200 mm と変えることで、溶滴の衝突速度をそれぞれ 0.97 m/s 、 1.31 m/s 、 1.52 m/s 、 1.70 m/s と変化させた。実験は距離ごとに4回ずつ実施し、凝固後のパラフィンワックスの形状はキーエンス社製VR-3000で観察した。

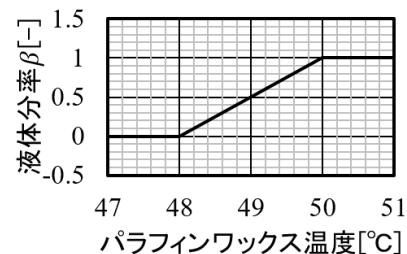


図3 パラフィンワックスの温度と液体分率の関係

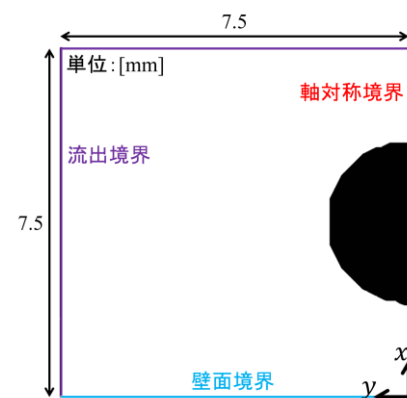


図4 落下溶滴の凝固シミュレーションの計算領域

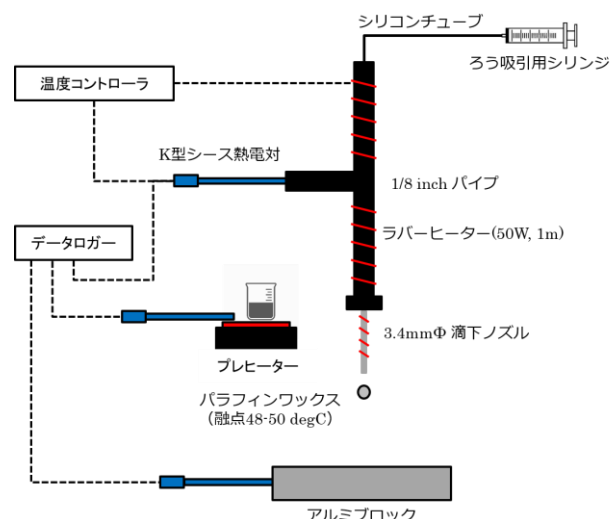


図5 対照実験のセットアップ

3 計算結果

3.1 流動性評価試験シミュレーション

図6に対照実験で得られた凝固AC4Cの一例を示す。半径方向にはほぼ一様な一本の円筒形状となっていることがわかる。本シミュレーションでは、まず流動性評価試験で得られたこの形状を再現する上で必要な計算条件を探った。図7に、初期温度を637℃として、表面張力係数 σ 、粘性係数 μ 、初期の溶融AC4C位置 x_{ini} の条件を変えた計算で得られた、 $t = 100 \text{ ms}$ の溶融AC4Cの体積分率分布を示す。黒色領域は溶融AC4Cの体積分率が1の位置を、白色領域は体積分率が0の位置を表す。図7(a)は、溶融AC4Cの表面張力を考慮せず($\sigma = 0 \text{ N/m}$)、粘性係数を700℃のアルミの粘性係数 $\mu = 3.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ とし、溶融AC4Cの初期位置を $x_{ini} \leq 0 \text{ mm}$ とした計算結果である。溶融AC4Cは流出境界に到達し、中心軸周辺のAC4Cのみが軸方向に大きく伸びた形状となっており、本計算結果はこの点で対照実験の結果と異なる。そこで、溶融AC4Cの表面張力として700℃のアルミの表面張力係数 $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ を与えた計算結果を図7(b)に示す。表面張力がはたらくことで、溶融AC4Cの流出境界への到達は防ぐことができたものの、溶融AC4Cの分裂や液滴の発生が観察され、この点で対照実験の結果と異なる。このような分裂現象は、溶融AC4C内部の局所的な速度差に起因すると考えられるため、粘性係数を10倍大きくした($\mu = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)。その計算結果を図7(c)に示す。細かい液滴の分裂は減少したものの、 $x = 160 \sim 170 \text{ mm}$ の位置に液滴が残存することがわかる。この液滴は、吸引開始直後に溶融AC4Cの先端部が分裂することで生成されたもので、型内部に急激に吸引された溶融AC4C先端の局所的な加速に起因するものと考えられる。そのため、溶融AC4Cの初期位置を $x_{ini} \leq 10 \text{ mm}$ まで拡張した計算を行った。その

結果を図7(d)に示す。液体の分裂は生じず、図6のように半径方向に一様で軸方向に伸びたAC4C形状となったことから、対照実験で得られたAC4C形状の特徴と一致する。したがって、以下の計算では条件を $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 10 \text{ mm}$ に固定して計算を進めた。

次に、その条件において図7(d)の状態($t = 100 \text{ ms}$)に至る過程を調べる。図8に液体の体積分率分布と速度分布の時間変化を、図9に温度の時間変化を示す。なお図8では、溶融AC4Cの体積分率については図7と同様に色付け、軸方向速度で色付けした速度ベクトルと合わせて表示した。型内部では、 $y = 0 \text{ mm}$ 近傍で速度が大きく、SUS304壁面近傍で軸方向速度が低下していることがわかる。図9の温度分布と見比べると、初期温度の低い壁面と接する溶融AC4Cが、温度低下によって壁面近傍で急速に凝固して減速する。一方で、 $y = 0 \text{ mm}$ 近傍では温度低下が遅く、 $x = 60 \text{ mm}$ 周辺のAC4Cが固相線温度に達して運動が止まった $t = 100 \text{ ms}$ においても、流動性を有することがわかった。図10に、AC4Cの初期温度に対する流動長の違いを示す。黒点は対照実験の結果を、赤点は計算結果を表す。実験・計算ともに、初期温度の増加に伴って流動長が増加しており、その長さのスケールが一致することから、定性的な一致を確認することができた。一方で、初期温度に対する流動性の変化率は、計算に比べて実験の方が大きい。この理由は未解明であるが、AC4Cの密度や粘性係数の温度変化を考慮していない点や、半溶融領域パラメータが未調整である点、固相線温度と液相線温度間における液体分率の非線形性の考慮の必要性などが原因として考えられる。



図6 流動性評価試験で得られた凝固AC4Cの一例

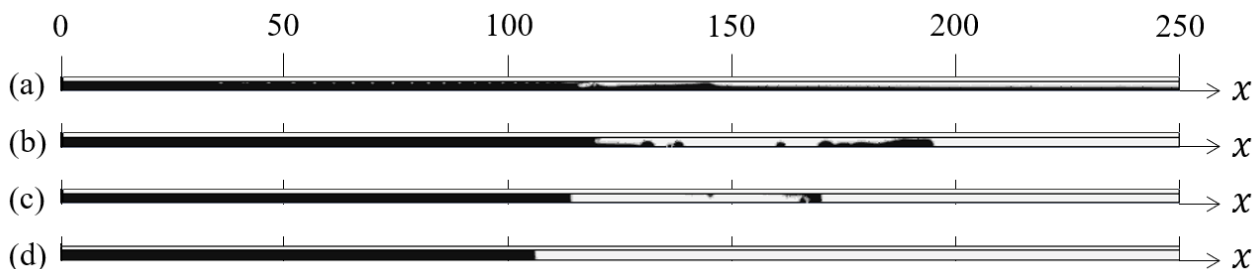


図7 $t = 100 \text{ ms}$ における溶融AC4Cの体積分率分布

- (a) $\sigma = 0 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 3.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 0 \text{ mm}$
- (b) $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 3.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 0 \text{ mm}$
- (c) $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 0 \text{ mm}$
- (d) $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 10 \text{ mm}$

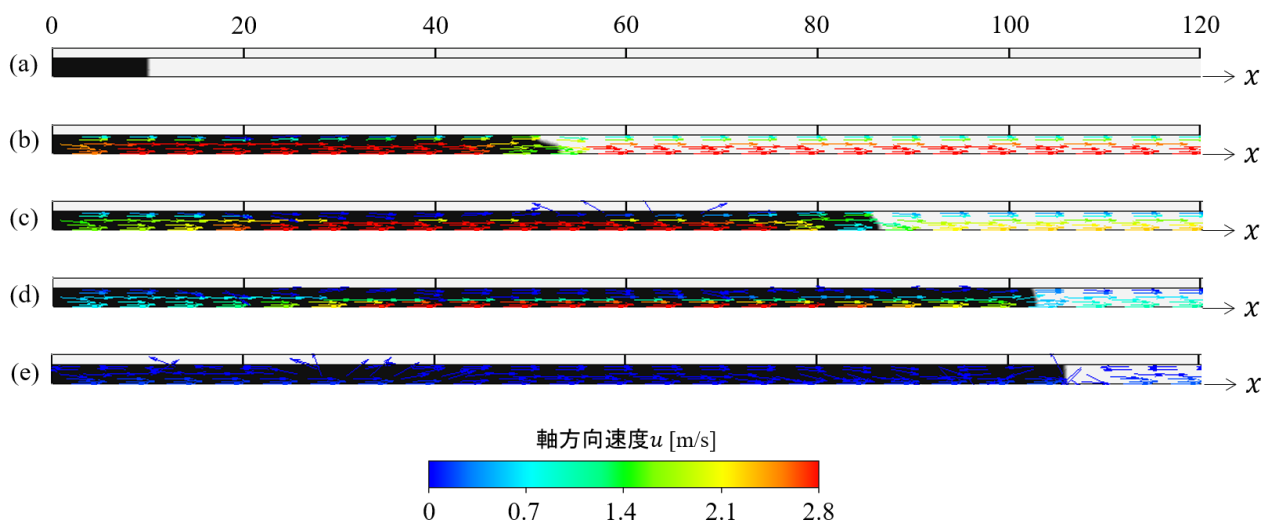


図8 溶融AC4Cの体積分率分布と速度分布の時間変化
(a) $t = 0$ ms, (b) $t = 25$ ms, (c) $t = 50$ ms, (d) $t = 75$ ms, (e) $t = 100$ ms

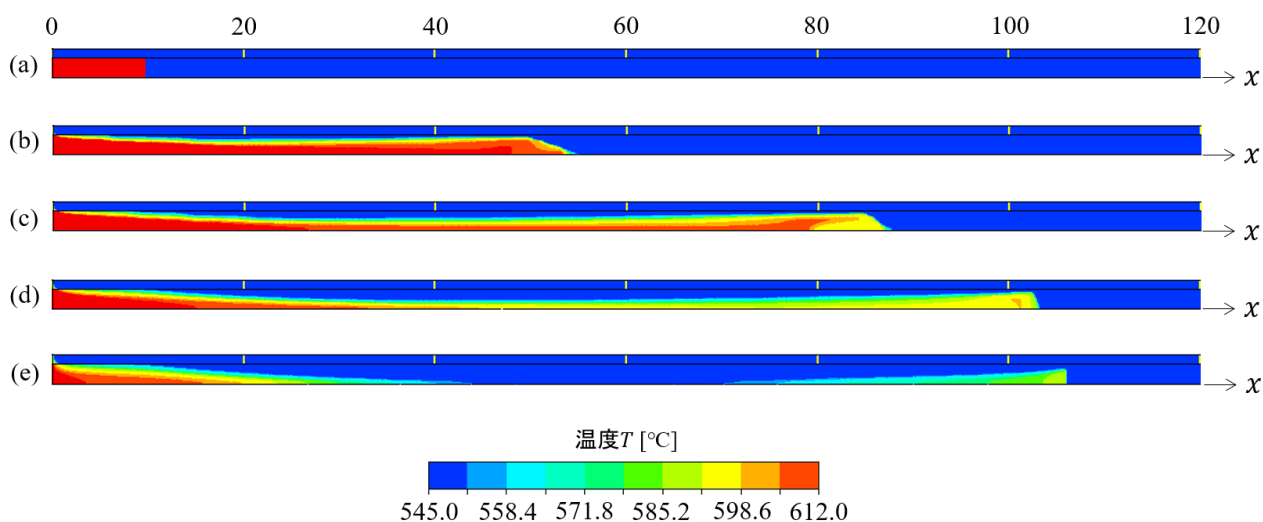


図9 温度分布の時間変化
(a) $t = 0$ ms, (b) $t = 25$ ms, (c) $t = 50$ ms, (d) $t = 75$ ms, (e) $t = 100$ ms

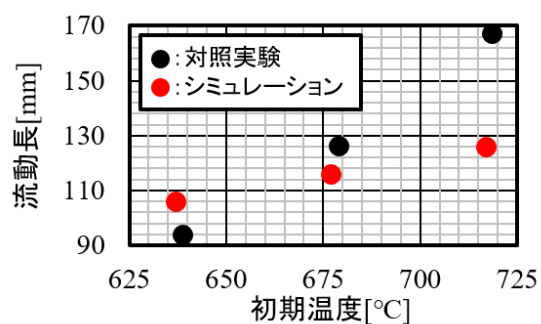


図10 AC4Cの初期温度に対する流動長の違い
(黒点: 実験結果、赤点: 計算結果)

3.2 落下溶滴の凝固シミュレーション

図11に、溶滴初速度を1.7 m/sとしたシミュレーションから得られた、パラフィンワックスの体積分率分布と速度ベクトルの時間変化を示す。図中の黒色領域はパラフィンワックスの体積分率が1の領域を、白色領域は0の領域を示しており、速度ベクトルの色と長さは速さに対応している。溶滴は壁面へ衝突後、半径方向に濡れ拡がり液膜を形成した。まず時刻 $t = 4.0$ msにおいては、半径方向位置 y が大きいほど液膜は薄く傾斜を有するものの、時刻 $t = 8.0$ msにおいては半径方向にほぼ様な厚さとなった。またパラフィンワックスの内部流動は、時刻 $t = 4.0$ msにおいて半径方向位置 y が大きいほど半径方向速度が大きく、 $t = 12.0$ msにかけて一様に大きく減速された。

この減速の原因を考察するにあたり、液膜端部近傍に着目する。時刻 $t = 4.0$ msにおいて、液膜端部は薄く鋭利であるものの、時間の経過とともに急激に鈍化し、膜厚が増大していることがわかる。これは、液膜流で観察されるリム状の構造であり、その形成は表面張力の作用に起因する¹²⁾。半径方向に凸を持つ液膜端部では、表面張力が半径方向と逆向きに作用して液膜端部の流れを減速させるが、液膜は原点近傍まで連続しているため、質量保存の条件から結果的に液膜流全体が減速したものと考えられる。減速の先で $t = 12.0$ ms以降は、液膜端部で中心軸側に逆流する様子が観察され、この時点では液膜流動において、慣性や粘性力に比べて表面張力が卓越していると考えられる。

一方で本研究では、シミュレーションに凝固流れモデルを導入し、固化により流動を減速(停止)させる取り扱いを施しているため、液膜内部流動の減速は凝固に起因する可能性も考えられる。減速の主因を調べるため、図12に同条件における $t = 16.0$ msの温度分布を示す。図中の黒線はパラフィンワックスの体積分率0.5の等高線であり、気液界面を表す。図12より $t = 16.0$ msにおいてもパラフィンワックスは全体で液相線温度(50 °C)を上

回っていることがわかる。本計算で凝固流れモデルとして使用したエンタルピー・空隙率法では、液体分率 β が1を下回ることによって流体を減速させる体積力が発生するが、 $t = 16.0$ msにおいて凝固はまだ開始しておらず、内部流動減速の原因とは言えない。したがって、液膜の拡がりを減速させる主因は、端部の凸形状に発生する表面張力であると考えられる。

次に、パラフィンワックス溶滴の凝固形状を図13に示す。図13(a)は、ノズル-アルミブロック間距離を200 mmとした実験結果の一例で、観察された3次元の形状データから上面図に示す l 軸上の断面プロファイルを抜き出したものである。一方で図13(b)は溶滴初速度を1.7 m/sとした場合のシミュレーション結果で、時刻 $t = 520$ msにおけるパラフィンワックスの体積分率分布を示している。なお計算は軸対称を仮定したため、対称軸 $y = 0$ にて折り返して表示した。両者を比較すると、半径方向の拡がりにはほぼ一致している。一方で断面プロファイルは、対照実験では軸近傍で厚く半径方向に薄くなるのに対して、シミュレーション結果は最も厚い位置が $y = 3.0 \sim 5.0$ mmに存在し、その分布に違いが見られた。この原因の追究と差異の改善については今後の課題である。

また図14に、溶滴の衝突速度に対する凝固後直径の違いを示す。実験結果は、衝突速度が小さい順に、ノズル先端とアルミブロック間距離が50 mm、100 mm、150 mm、200 mmの場合に対応しており、プロットされた結果はそれぞれ4回ずつの試行結果を平均したものである。ノズル-ブロック間距離50 mmの実験結果と衝突速度1.0 m/sの計算結果には差があるものの、シミュレーション結果の直径はおおむね実験結果に一致しており、衝突速度の増加に対して凝固後の直径が大きくなる傾向も捉えることができた。以上より、本シミュレーションでは半径方向の広がりについて実験結果との一致を示しており、シミュレーションの結果得られた内部流動の観察により、その挙動を考察することができた。

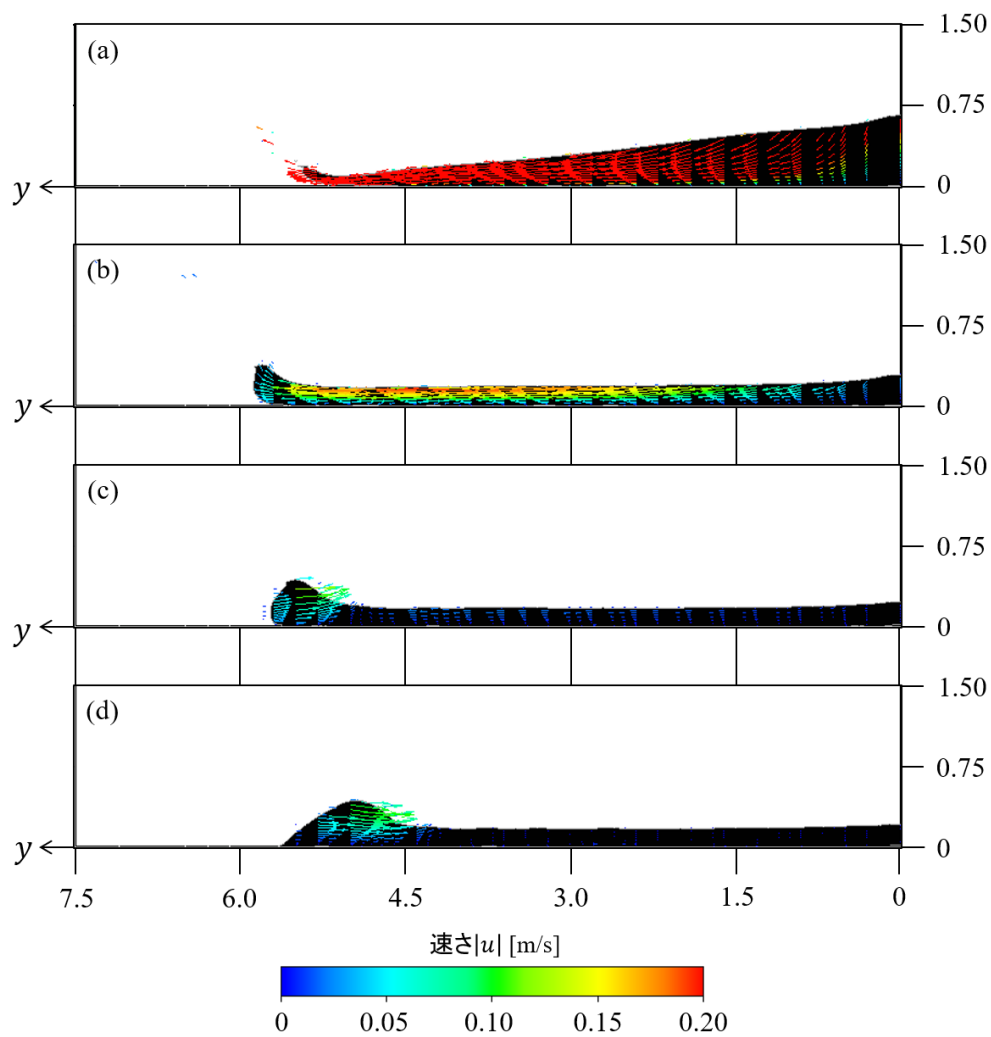


図11 パラフィンワックスの体積分率分布(黒色領域)と速度ベクトルの時間変化(溶滴衝突速度1.7 m/s)
(a) $t = 4.0$ ms, (b) $t = 8.0$ ms, (c) $t = 12.0$ ms, (d) $t = 16.0$ ms

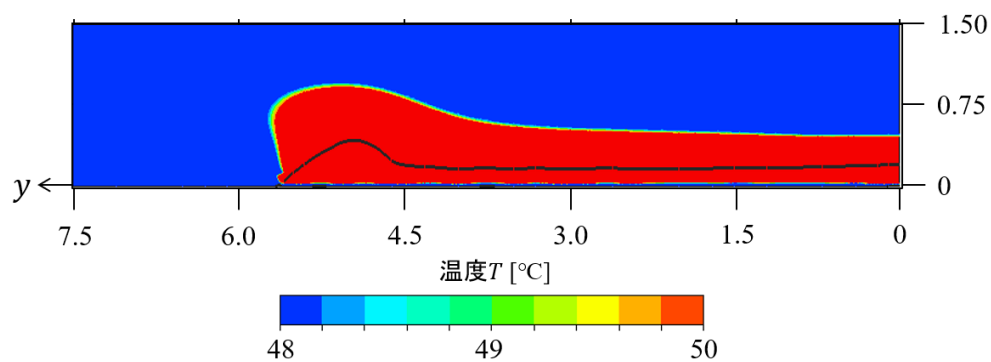


図12 $t = 16.0$ msにおける温度分布(溶滴衝突速度1.7 m/s)

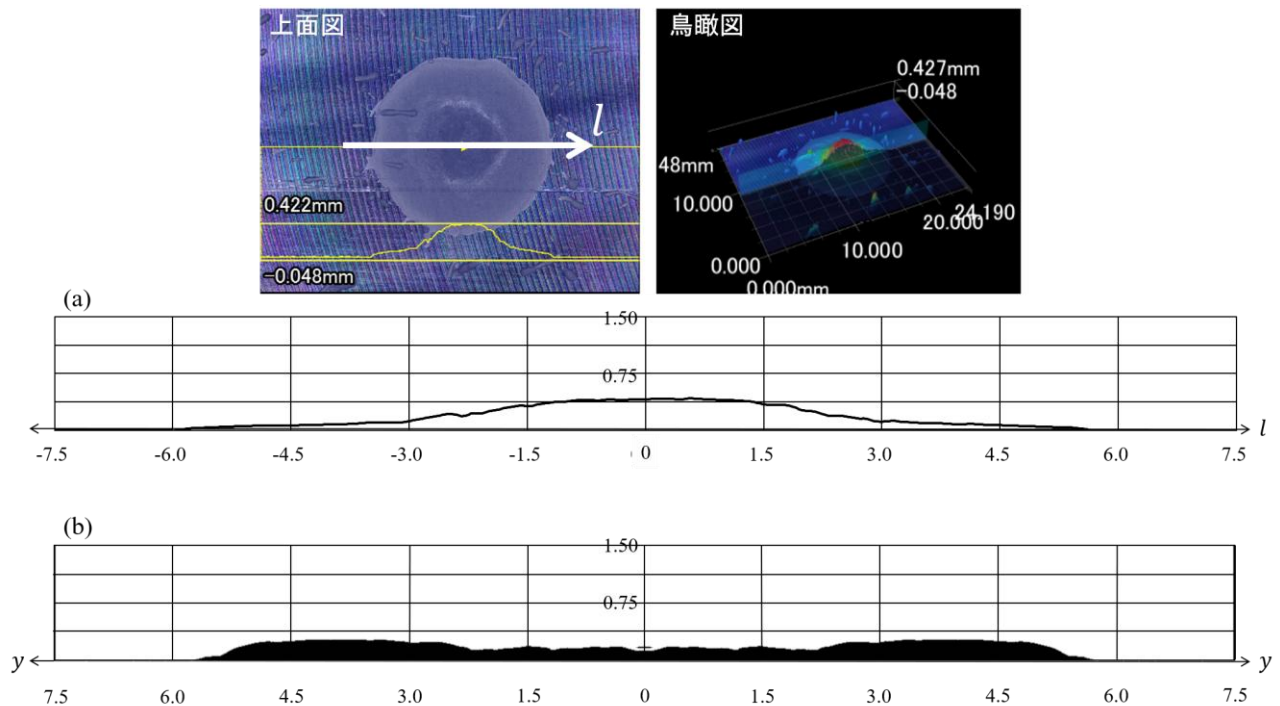


図13 パラフィンワックス凝固形状の比較(溶滴衝突速度1.7 m/s)

(a) 対照実験, (b) シミュレーション

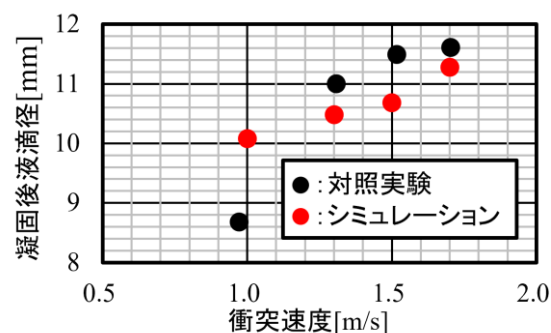


図14 パラフィンワックス溶滴衝突速度に対する凝固後直径の違い

4 結言

本研究では、凝固や乾燥によって固化が生じる流れについて、汎用の流体シミュレータを用いて簡易的な取り扱いを可能とするために、熔融金属の流動性評価試験と、落下するパラフィンワックス溶滴の凝固を対象としたシミュレーションを実施した。

まず熔融金属の流動性評価試験のシミュレーションでは、表面張力係数と粘性係数、熔融AC4Cの初期位置を変えて、適切な計算条件を探った。その結果、実験で確認された半径方向に一樣で軸方向に延びた円

筒形状の凝固AC4Cを得るためには、表面張力の効果を考慮し、初期状態として型内部に一部熔融AC4Cが入り込んだ状態を仮定することが重要であることがわかった。また、熔融AC4Cの流れ場と温度場の時系列を追うことで、熔融AC4Cが初期に低温の壁面によって冷却されて凝固に至り、全体の流動が停止した状態においても先端部は流動性を有することがわかった。最後に、初期温度の上昇に伴って流動長が増加するという観点で、計算結果は流動性評価試験の実験結果と定性的な一致を確認することができた。

次に落下するパラフィンワックス溶滴の凝固シミュレ

ーションでは、溶滴が壁面に衝突することで液膜が形成され、液膜厚さが均一となりつつ液膜流が一様に減速された。その減速の要因を調査したところ、液膜端部において半径方向逆向きにはたらく表面張力によって端部が減速し、結果的に連続した液膜全体の流れも減速したと考えられた。なお、この時点で液膜流は液相線温度には達しておらず、凝固により減速が生じてはいなかった。また凝固後形状を対照実験と比較したところ、軸方向の厚み分布には差異があるものの、半径方向の拡がりについては、そのスケールや衝突速度に対する傾向の一致を確認することができた。

以上より本研究では、凝固によって固化が生じる流れについて、汎用の流体シミュレータにより、実験と定性的な一致を示すシミュレーションを実施することができた。チャレンジ課題としていた乾燥現象については課題として残されたものの、本研究で得られた知見を活かし、次年度以降に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 「みやぎ発展税」の活用について
<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/fukensui/hatenzei.html> (参照 2024-6-6)
- 2) 吉川穰ほか.多相流シミュレーション技術の高度化研究. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2023, p. 9-15.
- 3) 内海宏和ほか.アルミニウム合金の流動性評価に関する研究. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2015, p. 24-26.
- 4) Ansys, Inc.. "Ansys Fluent 理論ガイド", 2022, p. 683-685.
- 5) 財団法人 素形材センター. "軽合金鋳物ダイカストの生産技術 改訂版", 2011, p. 47.
- 6) 表面張力とは
<https://www.contact-angle.jp/contact-angle/surface-tension> (参照 2025-5-23)
- 7) 【初級編】溶湯の流れ方|鋳造の基礎知識
<https://yoshidacast.com/>【初級編】溶湯の流れ方|鋳造の基礎知識/ (参照 2025-5-23)
- 8) 物理的特性とメイン分類のパラフィン
<https://ja.khonorwax.com/physical-properties-and-main-classification-of-paraffin.html> (参照 2026-5-11)
- 9) WIKITECH エンジニアリング・化学技術情報
<https://wikitech.info/1165> (参照 2026-5-11)
- 10) Christopher Chi Wai Tse et al., Utilising inkjet printed paraffin wax for cell patterning applications, International Journal of Bioprinting, 2016, 2(1), p. 35-44.
- 11) Nurulazirah MdSalih et al., Surface Tension Analysis of Cost-Effective Paraffin Wax and Water Flow Simulation for Microfluidic Device, Advanced Materials Research, 2014, 832, p. 773-777.
- 12) Nasser Ashgriz, Handbook of Atomization and Sprays, Springer, 2011, 935p.

【研究論文】

【令和5年度～令和7年度 地域企業競争力強化支援事業】

外観検査DXに資するAI画像処理デジタル技術開発と産業応用

高野 寛己、高久 悠杜、太田 晋一^{*1}

機械電子情報技術部(*1現 産業立地推進課)

製造現場における外観検査の自動化・デジタル化は、労働人口減少に伴う熟練検査員の確保や技能伝承という課題を解決するための重要な要素である。一方で、実際の現場では異常データの収集が困難なケースが多く、AI手法の導入を妨げる要因となっている。そこで本研究では、正常画像のみで高精度な判定が可能な最新の異常検知AIアルゴリズムPatchCoreを導入し、地域企業が外観検査や異常検知AI活用のイメージを持つデモシステムの開発に取り組んだ。

まずPatchCoreを用いた性能検証において、工業用画像の各種カテゴリで極めて高い判別性能(AUC値)を確認した。さらに、習得した異常検知AIモデルをエッジAIにて動作するよう実装し、製造現場での実際の活用を模擬した「見える化デモシステム」を構築した。このシステムは、信号灯、操作ボタン、I/Oターミナルと連携し、異常箇所をヒートマップで表示することで、現場の生産ラインにおける運用を再現している。今後は、構築したシステムやAIモデルを活用し、地域企業へのAI内製化支援や勉強会を通じて、異常検知AI技術の普及と県内ものづくり企業の競争力強化に貢献することを目指す。

キーワード: AI、画像処理、外観検査、異常検知AI、物体検出、画像分類、エッジAI

1 緒言

ものづくり企業において、製品の品質を担保する外観検査は極めて重要な工程である。現状、多くの現場では外観検査を熟練技術者の目視検査に頼っているが、労働人口の減少に伴い、熟練検査員の確保やその技能伝承が困難となっている。加えて、製品検査に対する要求水準が高度化しており、人の目視のみでは対応が困難な事例も増加している。

これらの課題を解決する手段として、AI画像処理技術を活用した検査の自動化・デジタル化によるデジタルトランスフォーメーション(DX)への期待が高まっている。しかしながら、中小企業においては、AIモデルの学習に必要な「不良品データ」の収集が困難であることや、高度なAIシステムを現場へ導入・運用するための技術的ハードルが高いという課題が存在する。そのため、具体的な活用イメージを持てずに導入を断念するケースも多い。

そこで本研究では、外観検査DXに資する、中小企業でも導入容易なAI画像処理技術の開発に取り組み、県内ものづくり企業の競争力強化を図った。具体的には、製造現場で広く課題となっている、正常画像データのみで学習可能(不良品データ不要)な異常検知AI技術の開発や、低コストかつ現場に組み込みやすいエッジ

AIを用いたシステムの構築を行い、現場でのAI活用能力向上に寄与する技術の確立を目指した。

2 異常検知AIモデルPatchCore

2.1 PatchCoreの概要

PatchCore¹⁾は、AI学習において正常画像のみを用いて正常と異常を判別できる異常検知AIモデルの一つである。事前学習済みのResNet²⁾などの畳み込みニューラルネットワークを特徴抽出器として用い、正常画像を入力して中間層から局所的なパッチ単位の特徴量を抽出する。これらの特徴量について、単一の画素単位ではなく、周辺のコテキストを包含した局所的な近傍特徴として抽出する。

同じ異常検知AIの一つであるPaDiM³⁾がマハラノビス距離を用いた多変量正規分布によるモデル化を行うのに対し、PatchCoreはメモリーバンク方式を採用する。学習段階において、画像から抽出される膨大なパッチ特徴量のすべてを保存すると、推論時の計算負荷が極大化してしまう。そこで、PatchCoreではCoreset Samplingと呼ばれる手法、具体的にはgreedy法(貪欲法)を用いることで、元の特徴空間の分布を最大限に維持したまま、データ数を数パーセント程度にまで削減し、効率的なメ

メモリーバンクを構築している。

異常検知のプロセスでは、評価画像から得られた各パッチの特徴量に対し、メモリーバンク内の最も近い(最近傍の正常パッチ特徴量との距離を算出する。この距離が閾値を超えて離れている場合、その箇所は未知のパターン、すなわち異常であると判定される。この手法は、分布を仮定する統計的モデルに比べて複雑な構造の欠陥にも強いという利点を持つ。これにより、正常画像のみの学習で高性能に正常と異常の判別が出来るというものである。

2.2 PatchCore性能検証

2.1で紹介したアルゴリズムの性能評価では、外観検査において著名なデータセットである MVTecAD⁴⁾が使用されている。MVTecADは製造業における産業用画像異常検知アルゴリズムの性能を評価するために作成された、標準的なベンチマークデータセットである。このうち工業製品7種の画像カテゴリに対して、筆者が画像単位の検知性能を検証した結果を表1に示す。ここでAUC値は1.0に近いほど良い検出性能を表す。表1の結果より、PatchCoreはいずれのカテゴリにおいても高いAUC値を示し、高精度な異常検知性能を有することが確認され、本アルゴリズムが工業製品の的外観検査用途において有効であることが示唆された。

表1 PatchCoreを用いたAI性能(AUC値)

カテゴリ	AUC値
Bottle	1.00
Capsule	0.987
Metalnut	1.00
Screw	0.992
Carpet	0.996
Leather	1.00
Tile	0.988

3 エッジAIを用いた異常検知AIシステムの構築

3.1 エッジAI Jetsonとは

本研究では、エッジAI向け計算デバイスとして図1に示したJetson Orin NanoおよびJetson Orin AGXを使用した。Jetson シリーズは、GPUを内蔵した小型の組込み型デバイスであり、画像処理や深層学習推論をエッジ環境で実行できる。Jetson Orin Nanoは省電力でコンパ

クトな構成を特徴とし、現場設置を想定した用途に適している。一方、Jetson Orin AGXは高い演算性能を有し、計算負荷の大きい処理にも対応可能である。両デバイスはLinuxベースのOS上で動作し、GPUを活用したAI推論処理が可能である。本研究では、これらの特性を活かし、エッジ環境における異常検知デモ構築に用いた。



図1 Jetsonシリーズの外観写真
(左: Jetson Orin Nano 右: Jetson Orin AGX)

3.2 Google Colaboratoryを用いたPatchCore開発

従来AI開発を行うためには、高性能なパソコンの準備や複雑な環境設定が必要であり、導入の負担が大きいという課題があった。そこで本研究では、AI開発および検証環境としてGoogle Colaboratory(以下Colab)を採用した。Colabでは、第一に、高性能な計算資源を利用可能である点が挙げられる。Colabはクラウド型の開発環境であり、クラウド上の計算資源を利用できるため、手元のパソコンの性能に依存せずにプログラムを実行できる。第二に、環境構築を必要としない点である。従来の開発環境では、ライブラリの導入や各種設定など複雑な環境構築が必要であった。一方、Colabはウェブブラウザ上で利用可能であり、特別な設定を行うことなく、即座にデータ分析やAI開発を開始できる。

3.3 データセット

今回使用したデータセットはオリジナルデータのプラスチックキャップ(ミスミ プラスチックジョイント内キャップPJ503)表面の画像を用いた。表面が正常のもの、線キズのあるものをそれぞれ OK 品、NG 品とした。撮像キットとして、デジタルデータスタンド DS-4、USB カメラとしてHOZAN L-837、C マウントレンズ(12 mm)、手製のパー照明を用いて、訓練用に OK 画像 20 枚、評価用に OK/NG 各 10 枚を撮影した。撮影した画像例を図 2 に

示す。

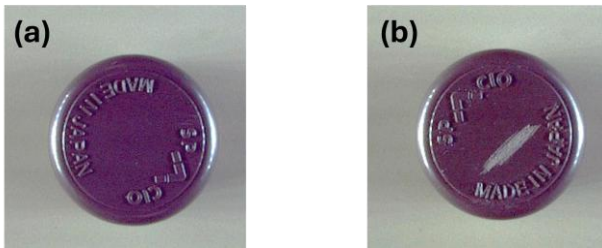


図 2 プラスチックキャップの
(a) OK 品と(b)NG 品の表面画像

3.4 使用機材

本研究では、AI 処理結果を物理信号として入出力する手段として、USB 接続型デジタル I/O ターミナル CONTEC DIO-0808LY-USB を用いた(図 3)。本デバイスは 8 点のデジタル入力および 8 点のデジタル出力を備え、外部センサからの ON/OFF 信号(状態検知、異常検出等)を取得するとともに、AI の推論結果に基づいて表示灯等の 12-24 V 駆動機器の制御を行うことが可能である。

この I/O ターミナルに入力として 24 V 駆動のボタン、出力として信号灯および緑ランプ、赤ランプを接続し AI 処理結果を可視化した。各種配線についてボタン、信号灯、ランプをそれぞれ図 4(a) (b) (c)の通り接続した。また撮像はカメラを固定し、バー照明を両側に配置し、評価対象のプラスチックキャップがカメラ中心に配置されるよう目印を設置している。



図 3 I/O ターミナル

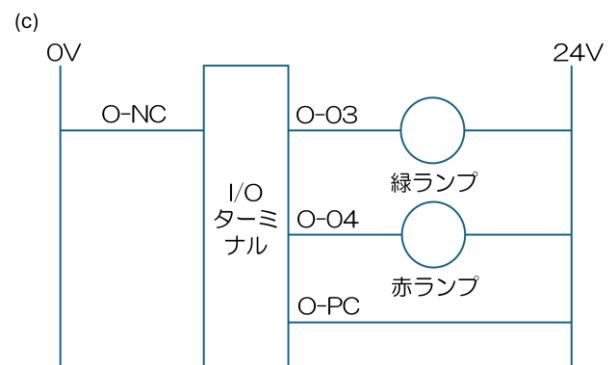
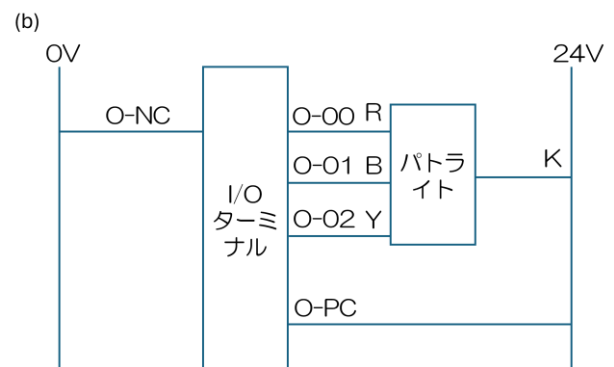
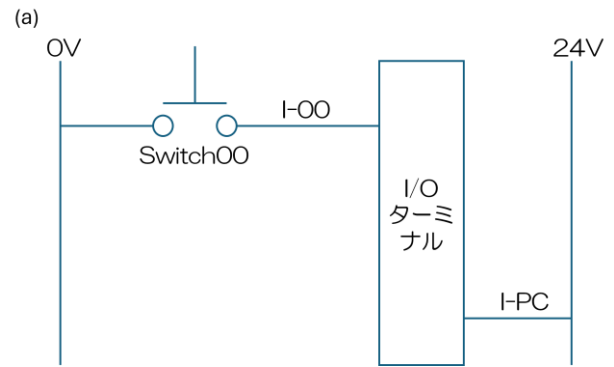


図 4 (a) ボタン、(b) 信号灯、(c) ランプの配線図

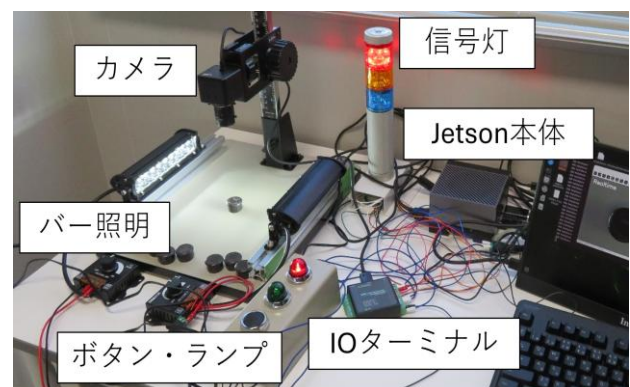


図 5 使用機材の接続を示す外観写真

3.5 学習条件

今回 PatchCore の学習画像としてあらかじめ撮影したプラスチックキャップ OK 画像 20 枚を用いて PatchCore のモデルを学習した。その後、Colab 上で作成した学習済モデルをダウンロードした後 Jetson へ移し、Jetson 上で PatchCore の学習済モデルを読み込み、評価プログラムを動作させた。

4 結果

開発したエッジ AI を用いた異常検知 AI システムを図 6 に示す。今回 OK/NG の閾値を 3.5 に設定し、これ未満のものを OK、これ以上のものを NG とした。また NG の場合、画像のヒートマップ表示により異常領域箇所候補が赤系の色で表示されるように設定した。AI 推論結果例を図 7 に示す。

評価画像として用意したプラスチックキャップ OK、NG 各画像 10 枚については適切に閾値を設定することにより、正解率 100 % となり、リアルタイムデモにおいて、おおむね正しい判定ができるシステムとなった。また照明レベルや僅かな位置ズレの違いにより、OK 品が NG 品と誤判定される例(図 8)も多く、PatchCore の実際の運用において、照明強度を一定に保つことおよび撮像位置が性能担保のために重要であることが分かった。

また、本システムはものづくり現場での運用イメージに繋がることを期待し、AI 判定結果の出力をランプ等で可視化できる仕組みとなっている。具体的にはボタンを押すことで AI 判定が始まり、OK の場合、図 9(a)のように信号灯が青く光り、緑ランプが点灯する。一方 NG の場合、図 9(b)のように、信号灯が赤く光り、赤ランプも点灯する。

本システムについては当センター内で展示を行っており、今後も県内企業への AI 活用例に繋げていく。また、当センター主催で令和 8 年度開催の AI 内製化勉強会でのコンテンツとして活用し、県内企業への異常検知 AI の普及促進に取り組む予定である。

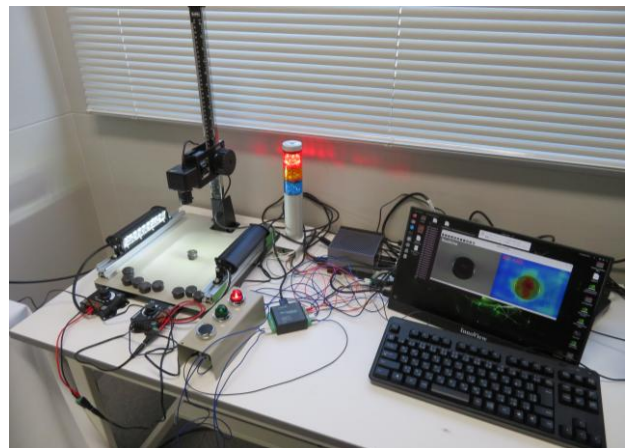


図 6 エッジ AI を用いた異常検知 AI システム

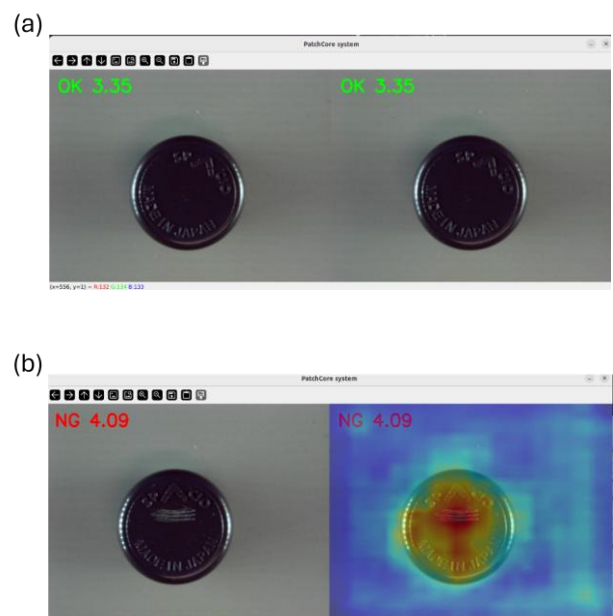


図 7 (a) OK、(b)NG の AI 推論結果例

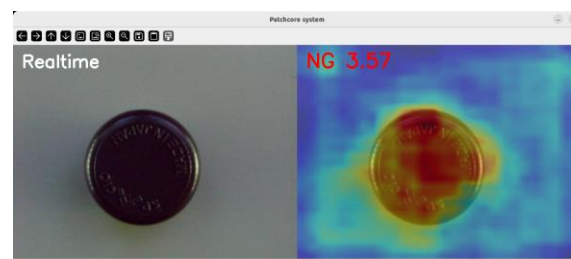


図 8 OK 品を NG 品と誤判定した例

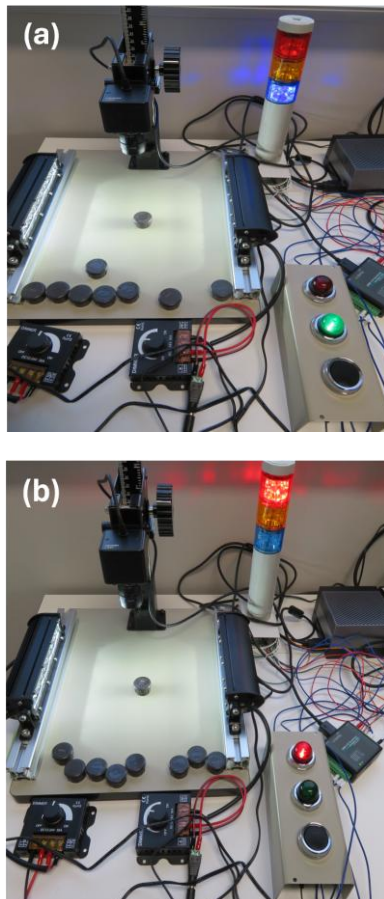


図 9 信号灯及びランプの様子

5 生成 AI を活用した欠陥画像の生成

本研究では、Jetson を用いたエッジ AI デモシステムにおいて、PatchCore による異常検知 AI を適用し、正常画像のみを学習データとして用いた正常／異常の 2 分類による外観検査の有効性を示した。PatchCore は少量データで高い判別性能を発揮する一方、異常の種類を直接分類することは想定しておらず、実際の製造現場で求められる異常の種類判別には別のアプローチが必要となる。

この課題に対して、生成 AI (Diffusion モデル) を用いて異常画像を人工的に生成し、学習データを拡張する手法が考えられる⁵⁾。具体的には、実際の異常画像を少量用意し、LoRA⁶⁾等の手法により生成モデルを微調整することで、複数種類の異常を含む画像を生成することが可能となる。これにより、異常クラスを含む教師あり分類 AI の学習が可能となり、異常検知 AI では対応が難しい多クラス分類への展開が期待できる(図 10)。詳細については参考文献⁵⁾を参照されたい。

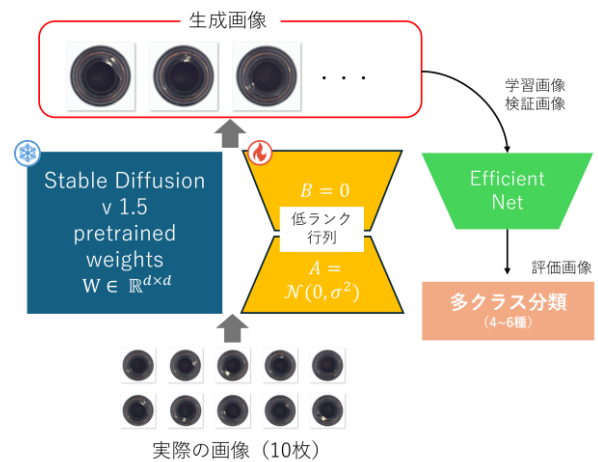


図 10 LoRA を用いた画像生成とマルチクラス異常分類

6 AI を活用した見える化デモシステムの開発

3 章と 4 章で異常検知 AI を活用したエッジ AI デモシステムを紹介した(図 6)。このほかに、AI 活用が見込める「見える化デモシステム」として、PC ベースのベルトコンベヤに乗るコイン電池表面の欠陥を画像分類と物体検出を用いて出力するベルトコンベヤシステムを作成した⁷⁾(図 11)。また、DOBOT 社のロボットを活用した物体検出 AI を用いたロボットシステムを開発した⁸⁾(図 12)。さらに DOBOT 社の協働ロボット NOVA2 を導入し、金属部品のピック&プレース作業が行えるシステムを開発した(図 13)。将来的に物体検出 AI などと組み合わせ、高性能、高機能化して企業の生産現場での活用を検討していく。

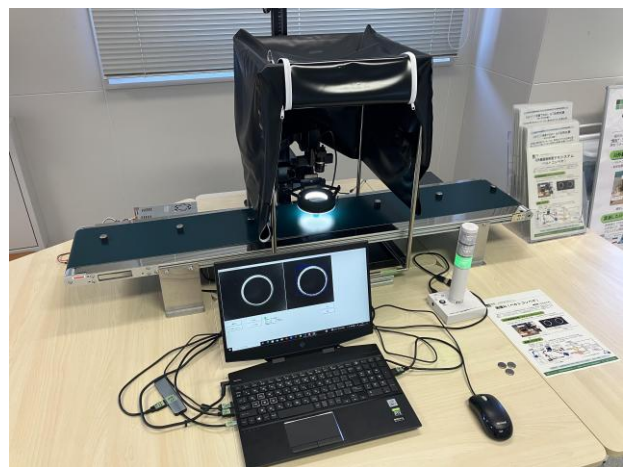


図 11 外観検査 AI 活用ベルトコンベヤシステム



図 12 ロボット+ベルトコンベアによる物品計数システム



図 13 協働ロボットによるピッキングシステム

7 結言

本研究では、外観検査の自動化・デジタル化によるDXを目的として、異常検知AI技術であるPatchCoreの導入および検証を行った。さらに、AIモデルを製造現場で実際に活用することを想定し、Jetson シリーズを用いたエッジAIデモシステムを構築した。本システムでは異常箇所をヒートマップとして可視化するとともに、I/Oターミナルを用いて判定結果を信号灯やランプへ出力することで、AIの判断を現場で直感的に把握できる仕組みを実現している。リアルタイムでのデモ運用の結果から、照明強度やワークの設置位置といったわずかな環境差が判定結果に影響を及ぼすことも明らかとなり、実運用における環境条件の維持の重要性がわかった。

また、製造現場でのAI活用をイメージしやすくするため、「見える化デモシステム」を開発した。ベルトコンベアやロボット等と接続することで、現場での活用やAI導入の検討に役立つデモシステムとなっている。今後は、

AIの内製化支援や技術普及を通じて、ものづくり企業でのAI活用につなげていきたい。

参考文献

- 1) Roth, K., Pemula, L., Zepeda, J., Scholkopf, B., Brox, T., and Gehler, P., "Towards total recall in industrial anomaly detection", Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 14318-14328, (2022)
- 2) H. Kaiming, Z. Xiangyu, R. Shaoqing, and S. Jian, "Deep Residual Learning for Image Recognition", Proc. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.770-778, (2016)
- 3) T. Defard, A. Setkov, A. Loesch, R. Audigier, "Padim: a Patch distribution modeling framework for anomaly detection and localization", The 25th International Conference on Pattern Recognition Workshops and Challenges (ICPR), pp.475-489, (2021)
- 4) P. Bergmann, et al., "Mvtec ad-a comprehensive real-world dataset for unsupervised anomaly detection", Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.9584-9592, (2019)
- 5) 高野 寛己、高久 悠杜、太田 晋一. 生成画像を用いた工業画像マルチクラス分類と異常検知アルゴリズム性能との比較検証. 令和6年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2024, No.22, pp. 49-54.
- 6) E. J. Hu, Y. Shen, P. Wallis, Z. Chen, V. Li, A. Singh, P. Rajpurkar, "LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models", Proceedings of the 10th International Conference on Learning Representations (ICLR), (2022)
- 7) 高久 悠杜、高野 寛己、太田 晋一. 製造現場環境を模した外観検査AI活用ベルトコンベヤシステムの開発. 令和5年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2023, No.21, pp. 29-32.
- 8) 小泉 協、高久 悠杜、高野 寛己、太田 晋一. 画像AIおよびロボット+ベルトコンベアによる物品計数システムの開発と 最新画像AIアルゴリズムの産業応用検討. 令和6年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2024, No.22, pp. 55-58.

【研究論文】

【令和5～7年度 県単独試験研究】

適応的実験計画法による開発加速化

内海 宏和

材料開発・分析技術部

製品やプロセス開発の効率化は、ものづくり企業にとって重要な課題である。従来の開発においては、知識や経験に基づく仮説を構築し、実験等により検証する手法であった。これに対して、近年、データから仮説を生成・検証し、その結果に基づいて新たなデータを取得する、というデータ駆動型アプローチが注目されている¹⁾。このようなアプローチを実験計画に適用する手法は、適応的実験計画法と呼ばれ、材料開発や創薬、プロセス開発に適用されている²⁾。本手法を用いれば、効率良く目標に到達することが期待されるが、規模の小さな企業が取り組むにはハードルがやや高い。そこで、本研究では、当センターのような公的機関が先んじて取り組み、事例集積を図ることで、地域企業が喫緊に取り組むべき課題の効率的な解決に貢献することを目的とする。本手法を実施するためのコードは、公開されているもの³⁾をカスタマイズした。構築したコードを様々な最適化課題に適用した。本報告では、焼結条件、平面研削加工条件、自然空冷ヒートシンク形状の最適化課題に組み、効率的に最適解を導いた結果を報告する。

キーワード：適応的実験計画法、ガウス過程回帰、ベイズ最適化、焼結、平面研削、ヒートシンク

1 緒言

県内ものづくり企業を取り巻く環境は、近年大きく変化している。顧客ニーズの多様化に加え、脱炭素化、資源循環、サプライチェーン強靱化への対応が求められる一方、生産年齢人口の急速な減少により、経営資源には制約が生じている。そのため、製品開発や生産プロセスの変革を、効率的かつ継続的に進めることが重要となっている。

従来、製品やプロセスの開発では、過去の経験や知識に基づく仮説を検証するため、実験計画を設計することが一般的であった。一方、近年では、データを活用して仮説の生成・検証を行い、その結果に基づいて次に取得すべきデータを選択するデータ駆動型アプローチが注目されている¹⁾。

このようなアプローチを実験計画に適用する手法は、適応的実験計画法と呼ばれ、材料開発や創薬、プロセス開発などに適用されている。図1に、適応的実験計画法の流れを示す²⁾。得られた実験データからモデルを構築し、そのモデルに基づいて次に実施すべき実験条件を提案する過程を繰り返す。これにより、限られた実験回数の中で効率的に目標性能に近づくことを目指す。さらに、ベイズ最適化を用いることで、有望な条件に加え、不確実性が大きく新たな発見につながる可能性のある条件も選択できる。

このような手法は、開発プロセスを加速化させる有力な手段であるが、規模の小さい企業が取り組むにはハードルがやや高い。そこで当センターのような公的機関が先んじて取り組み、事例を集積することで、地域企業が喫緊に取り組むべき課題の効率的な解決に貢献する。

本研究では、適応的実験計画法を実行するコードをpythonで構築し、様々な最適化課題に適用した。その中から、焼結条件、研削加工条件、自然空冷ヒートシンク形状の最適化課題に取り組んだ結果を報告する。

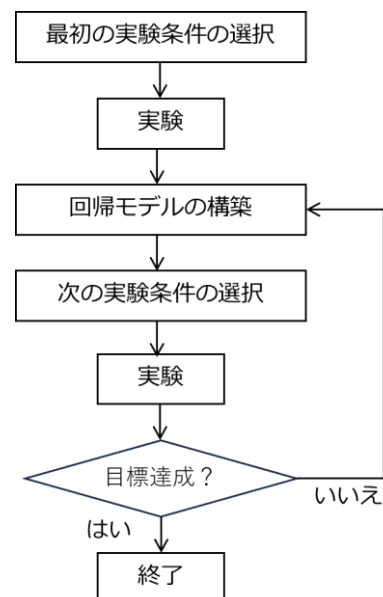


図1 適応的実験計画法の流れ²⁾

2 構築したコード

回帰モデルを1種類のみとしたS-Adaptiveと、複数の回帰モデルを適用するM-Adaptiveを構築した。いずれも無償で配布されているもの³⁾をカスタマイズした。図2に、構築したコードの概略を示す。

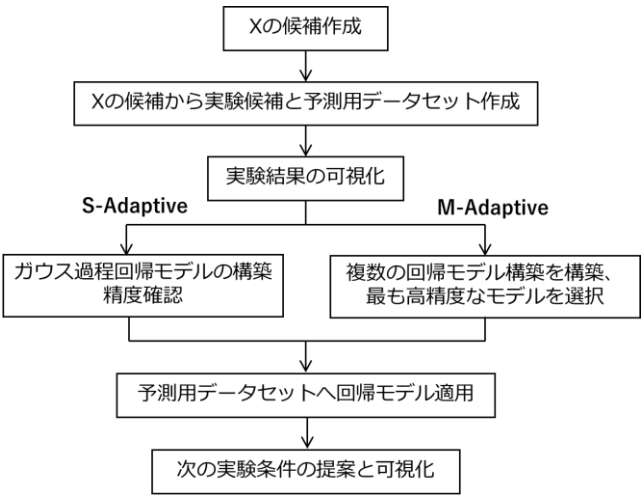


図2 構築したコードの概略

S-Adaptiveは、ガウス過程回帰モデルのみを適用する。11種類のカーネル関数から、クロスバリデーションにおける推定結果の相関係数の二乗が最大となるものを選択する。M-Adaptiveは、7つの回帰モデルを適用し最も精度が高いものを選択する。いずれのコードも予測用データセットに回帰モデルを適用し、目的とする特性値が最大となるよう次の実験条件を提案する。ガウス過程回帰モデルを用いた場合は、バイズ最適化により次の実験条件を提案することもできる。また、いずれのコードも目的とする特性値が複数ある場合にも対応する。

3 適用事例

3.1 焼結条件最適化

原料粉末は、株式会社フジミインコーポレーテッド製の高純度イットリア(Y_2O_3 、純度99.99%)を用いた。粒度は、 $63 \pm 10 \mu m$ である。カーボン型(内径20 mm、外径50 mm)を使用し、放電プラズマ焼結機(住友石炭鉱業、Dr.Sinter SPS-7.40)により焼結を実施した。最適化する焼結条件は図3に示す温度プロフィールと荷重、原料粉末量とした。目標は密度の最大化とした。密度は、上下面を研削した後、大気炉でカーボンシートを除去してアルキメデス法により測定した。

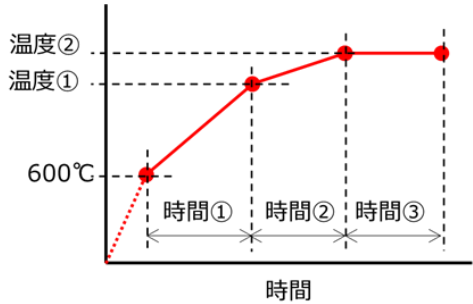


図3 最適化する温度プロフィール

表1に最適化する実験条件の探索範囲を示す。この範囲内で、乱数に基づき多数の実験候補を作成し、その中からD最適化基準に基づき実験候補を選択した。なお、温度プロフィールには温度① < 温度② かつ 時間① + 時間② + 時間③ = 50分の制約を設けた。得られた候補から実験候補として10条件を選択した。

表1 実験条件の探索範囲

実験条件	上限値	下限値
時間① (分)	40	10
時間② (分)	40	10
時間③ (分)	30	5
温度① (°C)	1550	1000
温度② (°C)	1600	1200
荷重 (kN)	30	15
充填量 (g)	12.5	4.7

図4に、温度②および荷重と、実験の結果得られた密度の関係を示す。温度②は、他のパラメータに関わらず密度と比例関係であるのに対し、荷重は相関が弱い結果となった。

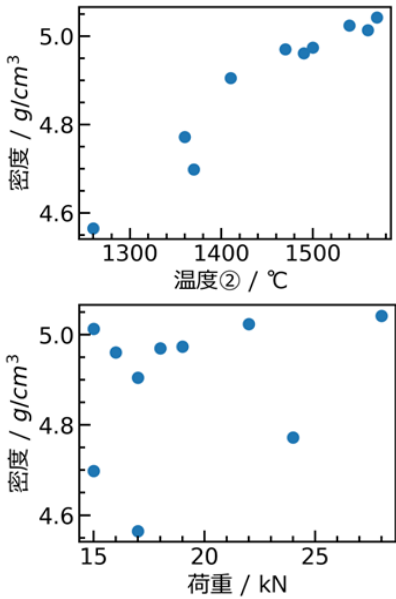


図4 選択された実験条件における結果

回帰モデルは、目的関数の推定値だけでなく、推定値の分散も計算できるガウス過程回帰モデルを適用した。カーネル関数をクロスバリデーションにより選択し、非線形に拡張した。作成したモデルを用いて実験条件から計算された推定密度と実測値を比較した結果を図5に示す。これより、今回構築したモデルの精度は良好と考えられる。

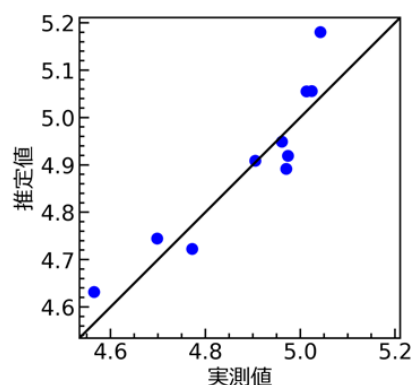


図5 ガウス過程回帰を行った際の、密度の実測値と推定値の関係

得られたモデルを実験条件の探索範囲内の候補に適用し、EI (Expected Improvement) 値を算出した。EI値はこれまでに観測された最良値をどれだけ上回る期待があるかを示すものである。EI値が最大となる条件で焼結実験を実施した。表2に、結果を示す。得られた焼結体の密度は理論値にほぼ近い値となった。

表2 酸化イットリウムの加圧加熱焼結の最適条件

実験条件	値	密度の 予測値	密度の 実測値
時間① (分)	11	4.95	5.02
時間② (分)	26		
時間③ (分)	12		
温度① (°C)	1230		
温度② (°C)	1440		
荷重 (kN)	27		
充填量 (g)	12		

3.2 平面研削加工条件の最適化

薄板を平面研削加工すると、研削面に生ずる残留応力の影響で反りが発生する。本事例では、反り量が最も小さくなる加工条件を探索することとした。被削材はSUS420J2焼き入れ材で、直径45 mm、厚さ1 mmとした。加工前の反り量は概ね5 μ m程度であった。使用した加

工機は(株)ナガセインテグレックス製 サドル型高精度成形平面研削盤(型式SGE-520SLD2-E2)である。研削量は0.3 mmとした。砥石は直径180 mmのCBNレジンボンドホイール、粒度#170で、砥石回転数、テーブル速度、切り込み量と前加工に対する研削方向をパラメータとして選定した。表3に加工条件の探索範囲を示す。

表3 平面研削加工条件の探索範囲

実験条件	上限値	下限値
砥石回転数(rpm)	1500	1000
テーブル左右速度 (目盛位置)	4	1
粗研削時のテーブル 前後速度 (mm/min)	200	50
精研削時のテーブル 前後速度 (mm/min)	200	50
粗研削切込み量 (μ m)	10	5
粗研削切込み回数	59	1
精研削切込み量 (μ m)	5	1
精研削切込み回数	200	1
ゼロカット回数	5	1
加工角度(°)	90	0

研削量の合計が0.3 mmとなるよう切込み量と回数に制約を設けて、ランダムに実験条件の候補を作成した。この中から、D最適化基準に基づき実際に実験する条件を10個選択し、研削実験を実施した。反り量はワシヨット測定顕微鏡(VR-3200/3000)を用いて全体の三次元形状を取得した後、最も反り量が大きい方向の断面プロファイルから求めた。

7つの回帰モデルから最も精度が高いモデルを選択するM-Adaptiveを適用したところ、非線形重回帰(2次)モデルが選択された。このモデルから予測される反り量が最も小さくなる条件を3個選択し、実験を追加した。新たに追加されたデータセットを用いて、再度モデルを作成し、新たなモデルから予測される条件を2個選択し、さらに実験を追加した。

図6に、実験の進行に伴う反り量の変化を示す。本手法により選択される条件が、効率よく最適値に向かっていくことが示された。

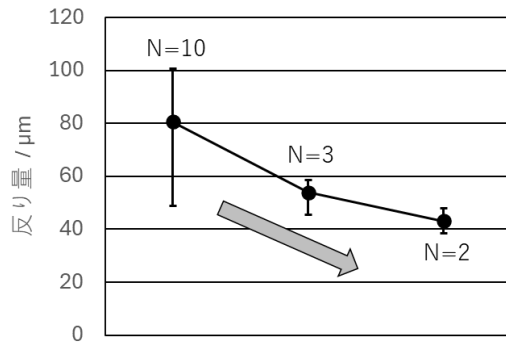


図6 実験の進行に伴う目標量(反り量)の変化

図7に、15条件のデータセットから求めた、各実験条件と反り量の相関係数を示す。加工角度(theta)の相関係数が高く、角度が大きいくほど、反り量が小さくなる可能性があることがわかった。

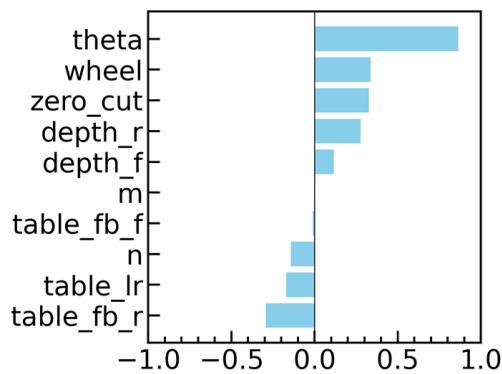


図7 研削条件と反り量の相関係数

図8に、加工角度と切込み量(粗、精)を変化させ、その他の変数を固定した条件における反り量の予測値の分布を示す。加工角度と切込み量以外のパラメータは、ランダムに作成した実験候補のうち、最も反り量が小さくなると予測される値で固定した。図中のプロットは、実際の実験結果である。プロット内の色は、暖色系ほど良好な値であることを示す。

本事例で作成された予測モデルは、加工角度と切込み量が実験範囲の最大側に寄るほど、反り量が小さくなる傾向となった。切込み量が多いと、加工回数が少なくなる。これは、加工回数が増えるに従い、残留応力が蓄積されて反り量が大きくなることを示唆している。加工角度は、前加工と同じ方向であることが望ましいとの結果であるが、この理由は今後の検討が必要である。

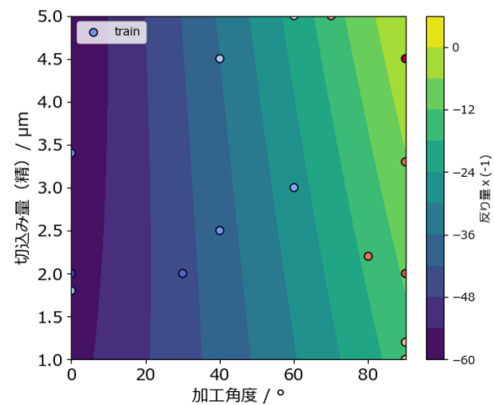
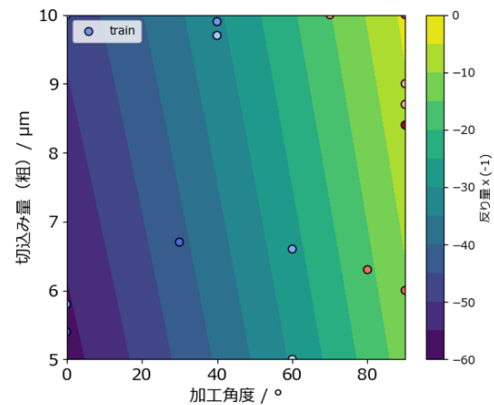


図8 加工角度と切込み量に対する反り量(予測値)の等高線図

3.3 自然空冷ヒートシンク形状の最適化

CAE(Computer Aided Engineering)を用いて、自然空冷ヒートシンクの形状最適化を試みた。図9に、定常伝熱解析モデルを示す。幅100 mm×奥行100 mm×高さ50 mmのケース上部にヒートシンクが設置されているとした。ケース内部のヒートシンク側壁に30 Wの熱源を配置した。ケース、ヒートシンクの材質はアルミニウムとし、熱源の材質は二酸化ケイ素とした。フィンの熱伝達係数(フィン面 h_F 、フィン底面 h_B)は、自然空冷フィンの理論式⁴⁾を適用した。熱伝達係数の算出に必要なヒートシンク代表温度と雰囲気温度の差は50 Kとした。なお、今回の計算に用いた解析ソフトはAnsys Mechanical 18.2(Ansys, Inc.)である。

解析により最小化したい特徴量は熱源表面温度とした。最適化する形状パラメータは、フィン枚数 N 、フィン高さ a 、フィン間隔 s 、フィン厚さ t とした。表4に、各パラメータの探索範囲を示す。

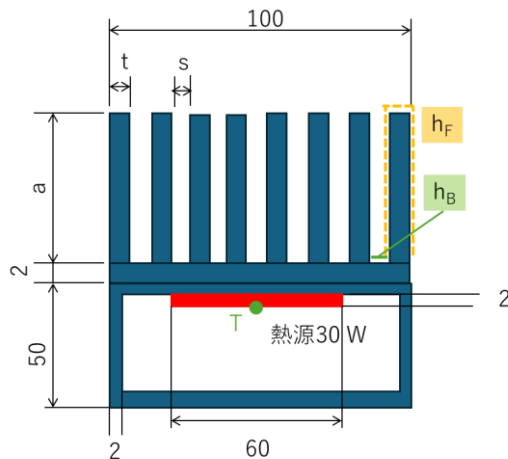


図9 定常伝熱解析モデル(断面)

表4 ヒートシンク形状パラメータの探索範囲

形状パラメータ	上限値	下限値
フィン枚数N	25	5
フィン高さa(mm)	150	20
フィン厚さt(mm)	8	2
フィン間隔s(mm)	20	2

フィンの形状パラメータ候補は、幅100mm×奥行100mmとなるよう制約を設けてランダムに作成した。この中から、D最適化基準に基づき実際に計算する条件を10個選択した。ガウス過程回帰モデルを使用するS-Adaptiveを適用した。得られたモデルをフィン形状パラメータ候補に適用して、熱源表面の温度を予測した。この予測値が最も小さくなる条件を選択し、実際に計算した。これを3回繰り返した。

図10に、計算の進行に伴う熱源表面温度の変化を示す。本手法により選択される条件が、効率よく最適値に向かっていることが示された。

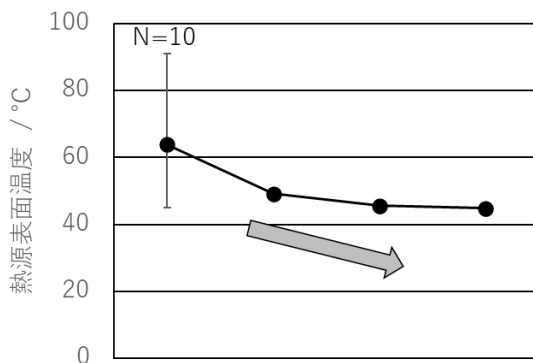


図10 計算の進行に伴う目標量(熱源表面温度)の変化

得られた13条件の結果から、熱源表面温度を予測するガウス過程回帰モデルを作成した。図11に、フィン枚数Nとフィン間隔sを変化させ、フィン高さaを150mmに固定した条件における熱源表面温度の予測値の変化を示す。青で示したプロットが予測値を示す。赤で示したプロットは、各フィン枚数のうち、もっとも予測値が低い条件で実際に計算した結果を示す。ガウス過程回帰モデルによる予測値と実際の計算結果には差があるものの、傾向は一致した。

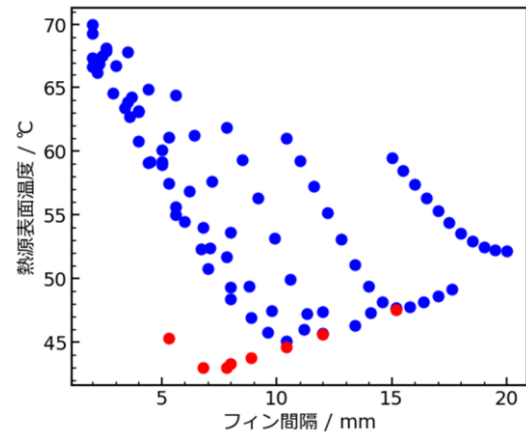


図11 ガウス過程回帰モデルによる予測値と各フィン枚数のうち最も予測値が低い条件における実際の計算値

これらより、導出された自然空冷ヒートシンク形状の最適値は表5のとおりであった。限られた計算回数から全体の傾向を把握して最適な条件を絞り込み、実際に計算して最適値を得た。

表5 導出された最適値

形状パラメータ	最適値	熱源表面温度
フィン枚数N	11	43.0 °C
フィン高さa(mm)	150	
フィン厚さt(mm)	2	
フィン間隔s(mm)	7.8	

4 結言

データ駆動型アプローチである適応的実験計画法を実行するためのコードをpythonで作成した。具体的には、ガウス過程回帰のみを使うS-Adaptive、7つの回帰モデルから、自動的にモデルが選択されるM-Adaptiveの2種類を構築した。これらを用いて、焼結条件、平面研削加工条件、自然空冷ヒートシンク形状の最適化課題に取り組んだ。いずれの課題でも、作成したコードは効率的に最適解を導いた。最適化構造が単純と考えられる焼結やヒートシンク形状では、15条件程度の学習デー

タで、最適値を導くことが可能であった。一方、パラメータ数が多い研削においては、実験データを追加する必要があると考えられる。しかしながら本事例のように限られた実験回数でも、パラメータの変化による傾向を可視化することで、最適構造を把握することができた。これにより、パラメータの物理的意味を考察しながら、最適な条件を検討することが可能である。

本研究で示したアプローチで最適課題に取り組む場合、最初に実施する多数の実験候補の作成が重要である。これらから、予測モデルを作成する基となる実験条件が選択される。これにはD最適化基準という手法が用意されているが、最初の候補作成については、制約条件の組み込み方や、生成した候補に偏りがないかなど、検討すべき点は多い。より簡便に作成、確認できる手法の確立が望まれる。この点も含め、地域企業への展開を念頭に、より使いやすく改善していく。

参考文献

- 1) 今村英明, 松井孝太. ベイズ最適化-適応的実験計画の基礎と実践-, 近代科学社, 2023, 316p.
- 2) 金子弘昌.Pythonで学ぶ実験計画法入門 ベイズ最適化によるデータ解析, 講談社, 175p.
- 3) https://github.com/hkaneko1985/python_doe_kspub (accessed 2022-04-14)
- 4) 日本機械学会, 伝熱工学資料改定第5版, 丸善株式会社, 246p-247p.

【短報】

【短報】

【令和7～8年度 県単独試験研究】

生成AI時代における新たな商品開発プロセスの確立

益田 佳奈、畠 純子、篠塚 慶介
企画・事業推進部

本研究では、県内企業における商品開発の初期段階の支援を目的に、実際の開発現場において生成AIを活用した商品開発プロセス仮説の有効性を検証した。市場調査、ペルソナ設定、アイデア創出、コンセプト設計、試作・販売計画の各工程に生成AIを組み込み、食料品製造業、プラスチック製品製造業、電子部品・デバイス・電子回路製造業、金属製品製造業等との連携を通じて実践を行った。

その結果、生成AIは情報整理、文章作成、アイデア創出、販売計画立案等の幅広い場面で有効に機能し、商品企画における検討作業の効率化とアイデア展開の促進に寄与することが確認できた。

キーワード: 商品開発、商品企画、デザイン、アイデア、生成AI

1 緒言

近年、県内産業においても、消費者ニーズの多様化による商品サイクルの短縮化は加速している。厳しい市場競争の中で生き残るためには、新たな商品やサービスを迅速に打ち出し続けるスピード感が不可欠となっている。

しかし、多くの県内企業においては、商品企画を専門に担う人材が不足している。開発担当者が製造や営業などの他業務を兼務していることも多く、新しい企画の立案に十分な時間を投入することが困難な状況にある。その結果、特にコンセプト立案や市場分析といった商品開発の初期段階でプロジェクトが停滞してしまうといった課題が顕在化している。

このような商品開発の停滞を解消するため、これまで当センターでは、商品開発の手順を整理し専門的なノウハウがなくてもスムーズに取り組める手法¹⁾²⁾を検討してきた。こうしたこれまでの知見に対し、近年の生成AIの登場は、商品開発のあり方にさらなる可能性をもたらしている。

生成AIの、言語・画像を自在に生成・変換できる機能は、専門スキルの有無を問わず、誰もが高品質なアウトプットを創出できる環境を生み出している。また、膨大なデータに基づいた多角的な視点や整理能力は、人間単独では到達し得なかった発想のきっかけを提供可能であり、停滞しがちな商品開発プロセスの初動を加

速させる強力な手段となり得る。

しかしながら、県内企業における期待感の高いものの、実務への導入には依然として多くの課題が残っている。自社の業務に具体的にどう生かせるのかという活用イメージが描ききれないことに加え、情報の安全な取り扱いに関する不安が、導入を躊躇させる一つの要因となっている。また、生成AI技術に詳しい指導者が社内には不在であるため、具体的な使い方のノウハウが蓄積されず、本格的な活用には至っていない。

そこで本研究では、自社商品開発に課題を抱える県内企業のため、生成AIを活用した商品開発プロセスを確立することを目指す。今年度は、いくつかの県内企業において実際の開発プロセスへの、具体的な活用手法とその効果を検証した。

2 生成AIを活用した商品開発プロセスの仮説

まず、商品開発の工程を5つの段階に整理し、それぞれの段階(フェーズ)において生成AIがどのように活用できるかという仮説を図1のように設定した。特にアイデア創出においては、従来の発想法を踏まえつつ、生成AIを用いることで多様な切り口の提示や発想の拡張を試みた³⁾。これらの仮説に基づき、いくつかの県内企業において実際の開発現場における有効性を詳しく検証していくこととした。

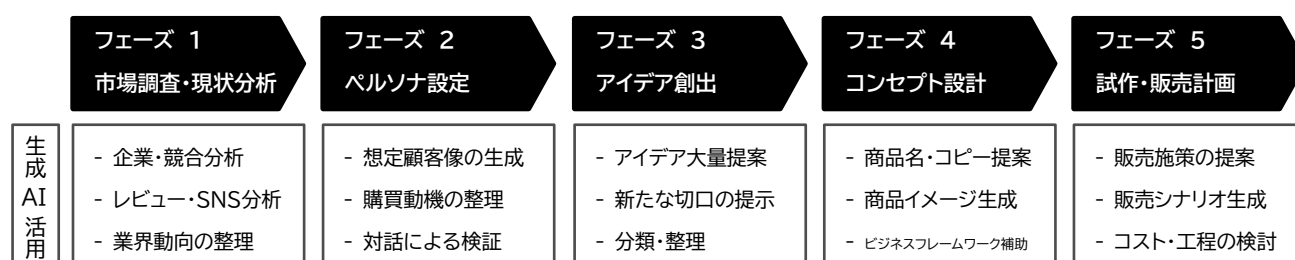


図1 商品開発の工程における生成AI活用の仮説

3 県内企業との連携による実証・検証

本研究にあたり、県内企業17社および3団体に対してニーズ調査と情報提供を実施した。そのうち、生成AIの具体的な実務活用を希望した12社と連携し、商品開発プロセスの各段階における検証を開始した。以下、工程別に分類した実践内容の経過を抜粋して報告する。

業種	連携 (社)	主な検証内容	使用した生成AI サービス
電子部品・デバイス・電子回路製造業	3社	【フェーズ:1,2】 SWOT分析、ペルソナ検証、アイデア創出	Copilot
プラスチック製品製造業	2社	【フェーズ:1,3】 自社分析、技術シリーズ整理、新規製品テーマ検討	ChatGPT Copilot
食料品製造業	6社	【フェーズ:4,5】 企画書作成、販促案作成、試食アンケート分析	ChatGPT Copilot Gemini NotebookLM
金属製品製造業	1社	【フェーズ:5】 製品リスト整理、販売計画立案、展示会出展計画	ChatGPT

図2 主な検証内容と使用した生成AIサービス

3.1 電子部品・デバイス・電子回路製造業における検証

電子部品・デバイス・電子回路製造業では3社と連携

を開始し、新規市場開拓や新製品創出に向けて、生成AIを活用した自社分析、ペルソナ検証、アイデア創出を実施した。

自社分析では、自社技術の強みと弱みを整理するため、Microsoft Copilot（以下、Copilot）を用いたSWOT分析を実施したが、担当者が自社技術の特徴や市場環境を客観的に整理する際、日常的に扱っている技術であるために、強みや市場との接点を言語化しにくい場面が見られた。そこで、生成AIにより第三者的な視点から用途や市場機会を提示することで、担当者自身では気づきにくかった技術の価値や応用可能性を整理することができた。これにより、既存技術を活用した新市場展開や新商品開発の方向性を検討しやすくなった。

ペルソナ検証では、自社で設定したペルソナやカスタマージャーニーマップをCopilotに読み込ませ、対象顧客として振る舞う簡易的なチャットボットを作成した。これにより、開発側の主観だけでは気づきにくいニーズや検討事項の抜け漏れを確認し、当初の顧客仮説を補強することができた。特に、技術起点で検討した商品アイデアについて、顧客視点からの妥当性を確認する手段として有効であった。

アイデア創出では、自社ウェブサイトの公開情報のみを生成AIに読み込ませてアイデア出しを試みたものの、分析結果が表面的な内容に留まり、生成AIの出力は入力する情報の質に大きく左右されることも確認され、具体的な商品アイデアには結びつきにくいという課題も見られた。そのため、社内のグループワークを通じて、現場担当者が持つ経験知を生成AIとの対話に追加投入し、情報の解像度を高めながらアイデアを具体化した。

電子部品・デバイス・電子回路製造業では、既存技術の応用先を探索するうえで、生成AIによる市場整理や顧客視点の補完が有効であった。しかし、専門性の高い技術情報を扱うため、一般的な入力情報だけでは十分な精度が得られにくい。したがって、生成AIの出力を

そのまま採用するのではなく、社内の技術者や営業担当者が持つ知見を加えながら、対話的に精度を高める運用が重要であると考えられる。

3.2 プラスチック製品製造業における検証

プラスチック製品製造業では2社と連携し、生成AIを活用した自社分析を実施した。これまで受託製造業務を中心としてきた企業が多く、社内にマーケティングやデザインの専門人材が不足していることから、自社の技術的シーズをどのように商品につなげるかが課題となっていた。

そこで、SWOT分析などのビジネスフレームワークを活用する際に、Copilotによる回答も参考に取り入れ、自社技術や市場機会の整理を試みた。その結果、社内だけでは見落としがちだった技術の強みや、新規製品テーマにつながる視点を整理することができた。また、生成AIの出力を議論の原案とすることで、担当者間で現状認識を共有しやすくなり、自社技術をどのような顧客価値や商品コンセプトに結びつけるかを検討するきっかけとなった。

プラスチック製品製造業では、技術的な強みを有していても、それを顧客価値や商品コンセプトに変換する段階で停滞しやすい傾向が見られた。生成AIは、社内の技術情報を整理し、市場や顧客の視点に置き換える補助として有効であった。ただし、公開情報や一般的な技術説明だけでは分析が抽象的になりやすく、実効性のある商品テーマを得るためには、企業固有の加工技術、設備、対応可能な仕様、過去の取引経験などを加味する必要があると考えられる。

3.3 食料品製造業における検証

食料品製造業では6社と連携を開始し、商品アイデアを企画書にまとめる作業の効率化や、新商品の販売促進案の検討、試食アンケートの分析等に生成AIを活用した。

商品企画書の効率化においては、過去の商品企画書や商品説明文の内容をGoogle NotebookLM（以下、NotebookLM）に読み込ませ、既存商品の文体や体裁を再現できるよう調整した。その結果、簡単なレシピや材料のメモを入力するだけで、キャッチコピーや商品紹介文など、企画書の主要項目を含む原案を作成できるようになった。これにより、企画書作成に要する時間が従来の3分の1にまで短縮され、担当者がアイデアの検

討や商品の魅力整理に充てる時間を確保しやすくなった。

販売促進案の検討においては、現在発売中の新商品について、自社ウェブサイト上の商品情報をもとに、Copilotでキャッチコピー案や訴求案を生成した。単発の問いかけで案を出すだけでなく、提示された案に対して方向性を指定したり、特定の言葉を深掘りしたりすることで、生成AIとの対話を通じて販売促進案を段階的に磨き上げることができた。

試食アンケートの分析では、味や見た目に関する評価に加え、自由記述欄のコメントをChatGPTに読み込ませ、意見の傾向や改善点を整理した。膨大な回答結果から、試食者が感じた魅力や改善点を短時間で把握できたことで、アンケート結果を次の試作や販売促進活動へ速やかに反映できる体制を整えることができた。

食料品製造業では、商品説明文、販売促進コピー、アンケート分析など、言語化を伴う業務と生成AIの相性が高く、生成AIの導入効果が比較的分かりやすく現れた。一方で、企業独自の文体や商品の魅力を反映させるためには、過去の企画書や商品情報など、自社内に蓄積された情報を適切に活用する必要があることが分かった。単に生成AIに文章を作らせるのではなく、自社らしい表現や訴求軸をどのように与えるかが、成果物の質を左右する重要な要素であると考えられる。

3.4 金属製品製造業における検証

金属製品製造業では1社と連携し、受託製造業務と並行した自社製品の開発およびブランディングについて、ChatGPTを活用した販売促進計画の整理を実施した。既存製品のラインナップが多岐にわたるため、どの商品をどの販路で訴求すべきか、売上拡大に直結する販売戦略の整理が課題となっていた。

そこで、製品リストや在庫状況等のデータをChatGPTに読み込ませ、販売促進施策や販売促進シナリオの立案を試みた。この計画に基づき、実際に展示会等へ出展し、その効果を検証した。生成AIによる客観的なデータ整理を実務に反映させることで、販売促進活動に向けた優先順位や訴求内容を検討しやすくなった。

金属製品製造業では、製品数や販売先の選択肢が多い場合に、生成AIによる情報整理が有効であった。一方で、販売促進計画の実行には、展示会での反応、在庫管理、製造体制、価格設定など、生成AIだけでは判断できない実務条件が関係するため、生成AIによる提案は現場の判断材料のひとつとして位置づける運用

が必要であると考えられる。

参考文献

3.5 業種別の検証から見えた課題

業種別に検証を行った結果、生成AIは情報整理、文章作成、アイデア創出、販売促進計画立案等の幅広い場面で有効に機能することが確認された。一方で、使用可能な生成AIサービスや入力可能な情報の範囲は企業ごとに異なり、同じ商品開発プロセスであっても、実践可能な手法には差が見られた。特に、過去の企画書や商品情報、想定顧客像、製品リスト等を活用する場合には、各社の情報管理ルールに応じた運用設計が必要であった。このことから、生成AIを活用した商品開発プロセスでは、業種や開発工程だけでなく、各社の情報管理ルールや利用可能なサービスに応じた運用設計が必要であり⁴⁾⁵⁾、企業ごとの利用環境や運用体制を踏まえた個別対応が重要であると考えられる。

4 結言

本研究では、県内企業と連携し、生成AIを活用した商品開発プロセス仮説に基づいて、実際の開発現場における有効性を検証した。その結果、生成AIは商品開発の各工程において、情報整理、発想支援、文章作成、販売促進計画立案等に有効であり、企画初期段階における検討作業の効率化とアイデア展開の加速化に寄与することが確認された。

また、生成AIを実務に導入するうえでは、単に活用方法を示すだけでなく、各企業の業務内容や利用環境に応じて、具体的なワークフローへ落とし込む支援が重要であることが明らかとなった。特に、商品開発に必要な社内情報をどの範囲まで活用できるかによって、生成AIの出力精度や活用効果は大きく変化するため、企業ごとの運用条件を踏まえた支援が求められる。

次年度は、企画段階で得られたアイデアやコンセプトを、試作や販売促進計画等の具体的なアウトプットにつなげることを目標とする。多様な業種での実践を継続し、企業ごとの利用環境に応じた導入方法を整理することで、県内企業における生成AIを活用した商品開発プロセスの確立を目指す。

さらに将来的には、検証で得られた知見をもとに、生成AIを活用した商品開発プロセスの事例をさらに蓄積するとともに、セミナーや個別研修を通じて県内企業への普及を図っていく。

- 1) 益田 佳奈, 篠塚 慶介, 伊藤 利憲. “デジタルアプリケーションによる地域商品開発”, 宮城県産業技術総合センター研究報告書.
https://www.mit.pref.miyagi.jp/wp-content/uploads/2023/12/seeds-r4_research01-r.pdf, (参照 2026-05-11).
- 2) 益田 佳奈, 伊藤 利憲, 篠塚 慶介. “地域資源デザインエレメント生成システムによる商品開発”, 宮城県産業技術総合センター研究報告書.
https://www.mit.pref.miyagi.jp/wp-content/uploads/2025/08/Report_No.22.pdf, (参照 2026-05-11).
- 3) 石井 力重. AIを使って考えるための全技術「最高の発想」を一瞬で生み出す56の技法. ダイアモンド社. 2025
- 4) 総務省, 経済産業省. AI事業者ガイドライン(第1.2版)概要.
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/ai_shakai_jisso/pdf/20260331_2.pdf, (参照 2026-05-24)
- 5) 一般社団法人日本ディープラーニング協会. 生成AIの利用ガイドライン【条項のみ】(第1.1版, 2023年10月公開). <https://www.jdla.org/document/#ai-guideline>, (参照 2026-05-24)

【短報】

【令和7～8年度 県単独試験研究】

空間電磁界可視化による放射電磁ノイズ評価に関する検討

佐藤 裕高、坂下 雅幸^{*1}、安齋 哲、今井 和彦
機械電子情報技術部^(^{*1}現 新産業振興課)

多くの電子機器は販売・輸出にあたり、その機器から放射される電磁ノイズの強度を法規制・規格などで定められた限度値より小さくしなければならない。法規制・規格に準拠した放射電磁ノイズ評価では、限度値を超えた放射電磁ノイズの周波数の情報を得られるが、その情報から電子機器の中のどの電子部品・配線が限度値超過の原因であるか特定することは難しいケースが少なからずあるため、放射電磁ノイズ抑制対策に時間・費用を要することが課題となっている。

本研究では放射電磁ノイズ抑制対策の効率化を目的として、電磁界可視化システムによる放射電磁ノイズ可視化結果と法規制・規格準拠の放射電磁ノイズ評価結果の相関性を検証する。

本年度はLEDシーリング照明を測定対象物として国際規格準拠の放射電磁ノイズ評価結果と放射電磁ノイズ可視化結果の比較を行い、限度値を超える放射電磁ノイズの放射源を推定することができた。

キーワード:放射電磁ノイズ評価、空間電磁界可視化、近傍界と遠方界

1 緒言

多くの電子機器は国内での販売及び海外への輸出にあたり、その機器から放射される電磁ノイズの強度を各国の法規制・規格・顧客要求などで定められた限度値より小さくしなければならない。このため、機器の放射電磁ノイズが限度値を超過した場合はノイズ抑制部品の追加や内部電子回路の再設計などの対策を行って、機器の放射電磁ノイズを限度値より下げる必要がある。

電子機器の放射電磁ノイズ強度の評価(測定、及び限度値と測定値の比較)は、法規制・規格によって定められた施設(電波暗室)・測定機器(EMIレシーバ、アンテナなど)・測定法によって実施される。宮城県産業技術総合センターでは、保有する10m法電波暗室と3m法電波暗室においてCISPRなどの国際規格に準拠した放射電磁ノイズ評価を行うことができる¹⁾。

法規制・規格に準拠した放射電磁ノイズ評価では限度値を超えた放射電磁ノイズの周波数の情報を得られるが、その情報から電子機器の中のどの電子部品・配線が限度値超過の放射電磁ノイズ発生源であるか特定することは難しいケースが少なからずあり、放射電磁ノイズ抑制対策に時間・費用を要することが課題となっている。

本研究では、空間電磁界可視化による放射電磁ノイズ抑制対策の効率化を目的として、法規制・規格準拠の放射電磁ノイズ評価結果と放射電磁ノイズ可視化結

果の相関性を検証する。

2 電磁界可視化による放射電磁ノイズ発生源の特定

放射電磁ノイズ抑制対策の効率化(対策時間短縮、対策費用削減)に役立つことが期待されている技術の1つに空間電磁界可視化がある。空間電磁界可視化を行うことによって、電子機器からの放射電磁ノイズの空間的な分布を可視化する。宮城県産業技術総合センターは、県内の電子機器開発・製造企業の放射電磁ノイズ抑制対策の効率化支援を目的として、令和6年度に電磁界可視化システムを導入した²⁾。

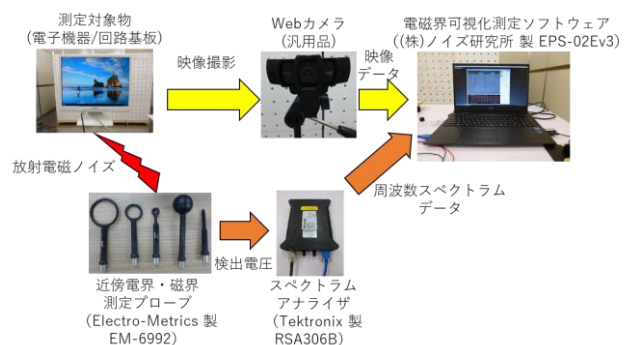


図 1 電磁界可視化システムによる放射電磁ノイズ可視化の流れ

図1に、導入した電磁界可視化システムによる電子機器の放射電磁ノイズ可視化の流れを示す。

初めに、測定対象の電子機器、または電子回路基板において放射電磁ノイズの可視化を行う箇所をWebカメラで撮影したリアルタイム映像データを電磁界可視化測定ソフトウェアに送信する。

次に、図2に示すようにスペクトラムアナライザに接続されている近傍磁界測定プローブ(または近傍電界測定プローブ)を、撮影している測定対象物の前面に配置する。

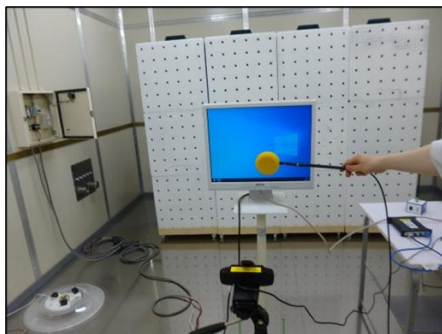


図2 測定対象物、近傍磁界プローブ(位置検出マーカー装着)、Webカメラの位置関係

この状況において、プローブが測定対象品からの放射電磁ノイズ信号を受信して、そのノイズ信号に応じた電圧信号がスペクトラムアナライザへ伝わる。スペクトラムアナライザはプローブからの電圧信号(時間波形)を周波数スペクトラム(周波数対電圧値)に変換して、電磁界可視化測定ソフトウェアへそのデータを送信する。同時に、電磁界可視化ソフトウェアはプローブに装着されているマーカーによって映像内のプローブの位置を認識する。そして、電磁界可視化測定ソフトウェアはその位置における周波数スペクトラムデータから電圧値の大小に応じた色を割り当て、映像内のプローブの位置にその色を重ねて表示する。

プローブ位置を変えて上述の一連の処理を行っていくことで、測定対象物の映像内に放射電磁ノイズの強さに基づいたヒートマップが生成される。この放射電磁ノイズの可視化測定結果から、測定対象物内の放射電磁ノイズ源を特定することができる。

3 近傍界と遠方界

電磁界の発生源を理想的な微小円形ループ源及び微小直線ダイポール源、伝搬空間を自由空間と仮定し

たとき、電磁界発生源からの正規化距離 r/λ (r は電磁界発生源からの距離、 λ は電磁界の波長)と空間インピーダンス E/H (E 、 H はそれぞれ電磁界発生源から距離 r の点における電界強度と磁界強度)の関係は図3のようになる³⁾⁴⁾。図3において、正規化距離に依存して空間インピーダンスが大きく変動する領域を近傍界(誘導界)、空間インピーダンスが一定値に収束する正規化距離の領域を遠方界(放射界)と呼び、一般的に $r < \lambda/2\pi$ の領域が近傍界、 $r > \lambda/2\pi$ の領域が遠方界とされる。電磁界の周波数は波長に反比例することから、周波数が低ければ電磁界発生源から遠方界までの距離が長く、周波数が高ければ電磁界発生源から遠方界までの距離が短いといえる。

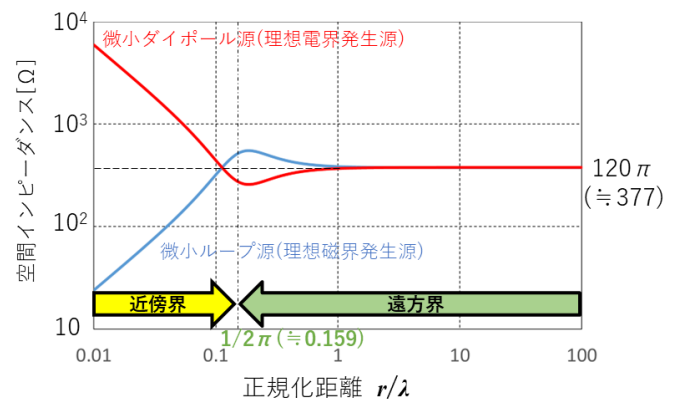


図3 電磁界発生源からの距離と空間インピーダンスの関係

上述の近傍界と遠方界の分類は電磁界発生源として理想的な微小円形ループ源、または微小直線ダイポール源を仮定して行っているが、実際の電磁界発生源の場合も発生源からの距離に依存して電磁界が近傍界または遠方界になると考えられる。

第2節で述べた電磁界可視化システムによる放射電磁ノイズ可視化測定における測定対象物と近傍電界・磁界測定プローブの距離は高々数十cmである一方、法規制・規格に準拠した放射電磁ノイズ評価における測定対象物と測定アンテナの距離は3mまたは10mである。従って、測定周波数が高い領域では可視化測定と法規制・規格準拠測定が共に遠方界の測定となるが、測定周波数が低い領域では可視化測定が近傍界の測定、法規制・規格準拠の測定が遠方界の測定となる。このため、測定周波数が低い領域においては、放射電磁ノイズ可視化測定(近傍界測定)で得られた結果に基づいて測定対象物の放射電磁ノイズ抑制対策を実施したとしても、対策後に行う法規制・規格準拠の放射電磁ノ

イズ評価(遠方界測定)では放射電磁ノイズの抑制が見られないことが懸念される。

そこで本年度の研究では、ある電子機器について国際規格準拠の放射電磁ノイズ評価結果と放射電磁ノイズ可視化結果の比較を行った。

4 国際規格準拠の放射電磁ノイズ測定結果と放射電磁ノイズ可視化結果の比較

市販品から内部に付けられたノイズ対策部品を取り除いたLEDシーリング照明に対して、国際規格(CISPR15)準拠の30 MHz～1 GHzの放射電磁ノイズ尖頭値測定を3m法電波暗室(測定距離3 m)で行った結果を図4に示す。このLEDシーリング照明はノイズ対策部品を取り除いているため、垂直偏波、水平偏波ともに低周波領域においてCISPR15の電界強度限度値を超えている。また低周波領域では水平偏波より垂直偏波の放射電磁ノイズが大きい。

上記のシーリングLED照明に対して放射電磁ノイズ可視化測定を行った結果を図5に示す。可視化測定の測定場所はシールドルーム、測定プローブは直径6 cmループの磁界プローブ、測定距離は10 cmとしている。図5の上図は各測定位置における30 MHz～300 MHzの放射電磁ノイズの強さの最大値に基づいて色分けしたヒートマップ、図5の下図は上図の中の正方形マーカーが付いた位置における周波数スペクトラムである。

図5の上図において、シーリングLED照明の中央より垂れ下がっている黒色の電源線から強い電磁ノイズが放射されていることがわかる。これは図4において垂直偏波の放射電磁ノイズが大きいことに対応していると考えられる。

国際規格準拠の測定結果では40 MHz近辺において放射電磁ノイズが強く、可視化測定でも40 MHz近辺において電源線の周囲で電磁ノイズが強いことから、40 MHz近辺の放射電磁ノイズは電源線からの放射であると推測される。

放射電磁ノイズが極大となる周波数を調べると、約167 MHz、及び約285 MHz近辺では国際規格準拠の測定結果と可視化測定結果の両者において極大となっている。また両者の30 MHz～300 MHzの周波数スペクトラム全体も似た傾向を示している。

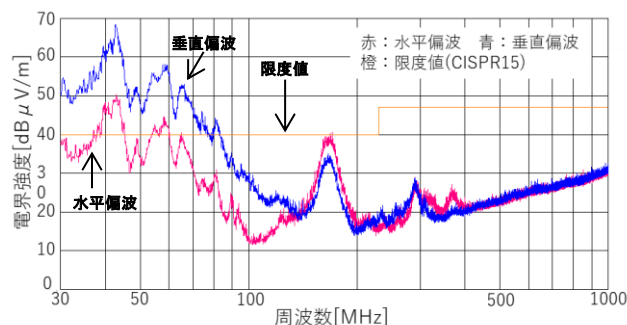


図4 市販LEDシーリング照明(ノイズ対策部品除去)の国際規格準拠の放射電磁ノイズ測定結果

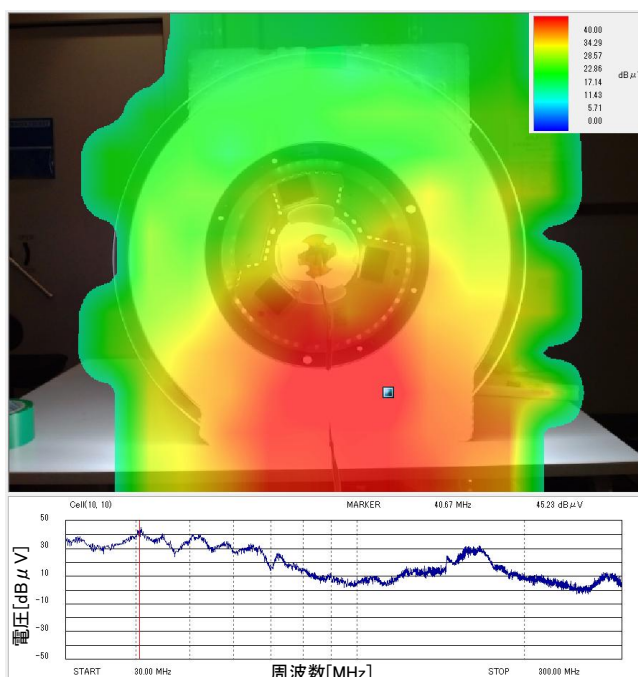


図5 市販LEDシーリング照明(ノイズ対策部品除去)の放射電磁ノイズ可視化結果

(上)放射電磁ノイズの強さに基づいたヒートマップ
(下)ヒートマップの正方形マーカー位置における周波数スペクトラム(30 MHz～300 MHz)

5 結言

本年度はLEDシーリング照明を測定対象物として、国際規格準拠の放射電磁ノイズ評価結果と放射電磁ノイズ結果の比較を行い、両者の相関に関する知見を得た。

次年度は放射電磁ノイズ可視化において測定距離や測定プローブ、測定場所などの測定条件を変えた場合の可視化結果と、法規制・規格準拠の放射電磁ノイズ評価結果との相関性を検証する予定である。

参考文献

- 1) 坂下雅幸、佐藤裕高、安齋哲、10m法電波暗室を用いた放射電磁ノイズの測定環境依存に関する調査研究. 宮城県産業技術総合センター研究報告、2023、21、p.7-13.
- 2) <https://www.mit.pref.miyagi.jp/product/電磁界可視化システム>、(参照 2026-05-29)
- 3) Michel Mardiguian 著. 羽鳥光俊 監修. 小林岳彦 訳. EMC設計の実際－放射妨害波の制御－. 丸善、2000、p.15-23.
- 4) Henry W. OTT 著. 出口博一、田上雅照、高橋丈博 監訳. 詳解EMC工学 実践ノイズ低減技法. 東京電機大学出版局、2013、p.184-186.

【短報】

【令和6～9年度 産学官連携素材技術活用支援事業】

産学官連携素材技術活用支援事業

今野 奈穂、千葉 亮司、佐藤 勲征
材料開発・分析技術部

本事業では、SDGsの達成やサーキュラーエコノミーの実現は世界的な潮流であり、県内ものづくり企業においても喫緊の課題である。材料・分析技術(特にプラスチック関連)において、県内企業が有する技術課題をテーマに産学官連携により材料開発に取り組むことで、県内企業の技術開発力及び競争力の向上を図り、県内製造業の発展に貢献することを目的とし、プラスチック再生材利用を拡大推進するため、プラスチック劣化評価技術の開発に取り組んでいる。

令和7年度は、ポリプロピレンを対象に、プラスチック成形工場内マテリアルリサイクル材を想定した熱劣化モデル試料を作製し、そのレオロジー特性評価を行った結果について報告する。

キーワード: マテリアルリサイクル、ポストインダストリアルリサイクル(PIR)、ポリプロピレン、熱劣化、動的粘弾性

1 緒言

持続可能な開発目標(SDGs)の達成やサーキュラーエコノミー(CE)の実現は世界的な潮流であり、県内ものづくり企業のプラスチック成形加工現場では、成形加工工程で排出された廃スプルー・ランナーやなどの一度熱負荷がかかった再生材を利用した工場内マテリアルリサイクル(いわゆるポストインダストリアルリサイクル;PIR)やポストコンシューマーリサイクル(PCR)が喫緊の課題である。

本事業では、このような社会的背景を受け、県内企業が有するプラスチック再生材利用に係る技術課題をテーマに産学官連携により課題解決に取り組むことで、県内企業の技術開発力及び競争力の向上を図り、県内製造業の発展に貢献することを目的とする、プラスチック劣化評価と使いこなし技術の開発に取り組んでいる。

プラスチック再生材はVirgin材とは異なる性状を示すことが知られており¹⁾、成形品の品質確保のためには、再生材の特性を適切に理解・把握した上で、再生材の混合割合や使用回数を決定し、その性状にあった成形条件の最適化を行うことが必要となる。筆者らが過去に調査を行った結果からも、地域ものづくり企業では、再生プラスチック成形材料が射出成形時に、Virgin材と異なる流動性や固化速度を示すために、バリの発生、冷却時間の延長などの生産上の技術課題を抱えていることが明らかとなった²⁾。

このことから、筆者らは、再生プラスチック成形材料が示す特性を適切に把握し、最適な成形加工条件等を選定することを目指して、ポリスチレン(PS)を対象に、PIR材を想定した熱劣化モデル試料を作製し、各種劣化度評価を行い、熱劣化モデル試料の熱負荷と劣化の関係について、多面的な評価を行った。その結果、FT-IRでは検出できない初期の劣化を化学発光法で高感度に捉えられることが分かった。また、分子量とMFR、分子量と動的粘弾性、分子量とシャルピー衝撃強度及び化学発光量とシャルピー衝撃強度、分子量と低せん断粘度領域の粘度に相関があることが分かった。また、熱劣化モデル試料とバージン材を所定の重量比で混合してリペレットした模擬再生試料のレオロジー特性評価を行い、模擬再生材がバージン材同様の成形加工性を持つレオロジー特性となる適切な配合比を評価できることを確認した^{2)、3)、4)}。

令和7年度は、物性とコストのバランスがよく、日用品から自動車部品まで多岐に利用されているポリプロピレン(PP)を対象に、PIR材を想定した熱劣化モデル試料を作製し、成形加工における熱負荷による劣化の程度について、各種劣化度評価を行い、熱劣化モデル試料の熱負荷と劣化の関係について、多面的な評価を行ったので、その結果を報告する。なお、本報告の一部は第73回レオロジー討論会⁵⁾及び第18回ケミルミネッセンス研究会講演要旨集⁶⁾において発表した内容を含む。

2 実験(熱劣化モデル樹脂でのレオロジー特性評価)

2.1 試料

2.1.1 成形材料

成形材料は日本ポリプロ製ノバテックPP射出成形グレードであるMA3(ホモPP)とBC3AD(ブロックPP)を用いた。なお、ホモPPは半透明、ブロックPPは乳白色のペレットであり、これらのMFR(230℃、2.16 kg)は、いずれも10 g/10 minである。

2.1.2 熱劣化試料の作製

熱劣化試料は、二軸熔融混練押出機(東芝機械製TEM-26SX、L/D=48)を用いて、材料供給量約8 kg/hr、バレル温度200℃、スクリュ回転数200 rpmの条件で複数回押出して作製した。Virgin材ペレットを1回押出して得たペレットを1回熱劣化試料とし、その試料を用いて同様に押出し操作を繰り返し、最大5回まで押出して、ペレット形状の熱劣化試料を作製した。

ペレット形状の熱劣化試料を、熱プレス機(東洋精機製作所製mini TEST PRESS-10)を用い、200℃、0 MPaで5分間予熱した後、200℃、5 MPaで5分間プレスした後速やかに40℃で冷却し、直径25 mm、厚み1 mmの円板を作製し、レオメーター測定用サンプルとした。

また、ペレット試料から超小型電動射出成形機(新興セルビック製C.Mobile0813)を用いて、樹脂温度200℃、金型温度50℃、射出速度10 mm/s、保圧70～80 MPa、冷却時間15 secの条件でJIS1号1/4サイズのダンベル試験片を成形した。

測定に供した試料の一覧を表 1に示す。

表 1 PP熱劣化モデル試料一覧

樹脂・形状	ホモPP	ブロックPP
押出回数	ペレット、円板、ダンベル試験片	
0回(Virgin)	H0	B0
1回	H1	B1
2回	H2	B2
3回	H3	B3
4回	H4	B4
5回	H5	B5

2.2 評価方法

2.2.1 FT-IR

ペレット形状の熱劣化試料を、日本分光製FT/IR-6700を用い、一回反射ATR法でダイヤモンドプリズムを使用して測定した。

2.2.2 微弱発光検出装置による化学発光計測

化学発光計測は、東北電子産業製CLA-FS3s(試料室CLS-350LI)を用いて、JIS K 7351に準じて測定した。ペレット用の熱劣化試料の測定条件は、窒素(150mL/min)フロー下で、50℃から設定温度まで10℃/minで昇温し、35分間保持した。測定温度はホモPPで140℃、ブロックPPで150℃とした。

2.2.3 ゲル浸透クロマトグラフ(GPC)による分子量分布測定

装置は東ソー製HLC-8321GPC/HTを用いた。カラムTSKgel GMHHR-H(S)HT2を3本と溶離液に α -ジクロロベンゼン(BHTを0.05 wt%添加)を用いた。測定温度は140℃、試料濃度は1 mg/mL、注入量は300 μ Lとした。ペレット形状の熱劣化試料を用い、標準試料はPSとして、PS換算分子量を求めた。

2.2.4 キャピラリーレオメーターによるせん断粘度測定

ペレット形状の熱劣化試料を、東洋精機製作所製キャピラリーレオメーター(キャピログラフ1D)を用いて、JIS K 7199付属書(方法A1)に準じて、せん断粘度を測定した。試料を充填し、各測定温度で6分間予熱後、キャピラリー長(L) 20.0 mm、直径(D) 1.0 mm、L/D=20、流入角180°のキャピラリーダイを用いて、ピストンの押込み速度が0.1～882.35 mm/min、みかけのせん断速度換算で1.216～10,000 s⁻¹の範囲で測定した。測定温度は230、210、190℃の3水準とした。

2.2.5 回転型レオメーターによる動的粘弾性測定

円板状の熱劣化試料を、回転型レオメーター(Anton Parr製レオメーターMCR702e)を用い、窒素フロー下、直径25 mmのパラレルプレートで挟み、温度230、210、190℃の3水準にて、ひずみ1%(固定)、角速度0.01～

100 rad/sの条件で動的粘弾性を測定した。

りも高感度に劣化を捉えることができた。

2.2.6 機械的特性の測定

ダンベル試験片の熱劣化試料について、東洋精機製作所製ストログラフV10-Cを用いて、JIS K 7161-2に準じて、試験速度 5 mm/minで引張特性を評価した。

3 結果及び考察

3.1 FT-IRによる組成分析

ペレット形状の熱劣化試料について、FT-IRにより測定した結果を図 1及び図 2に示す。PPは熱酸化により劣化が進行すると、カルボニル基の吸収が現れるが、今回のFT-IRの分析ではホモPP、ブロックPPともに5回押出品でも酸化劣化の進行に伴い生成するカルボニル基の検出は確認できなかった。

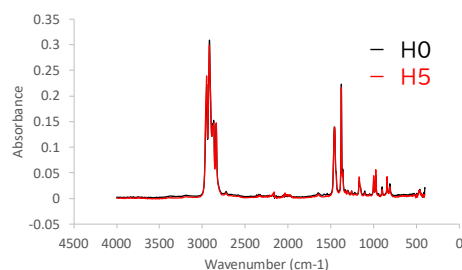


図 1 ホモPPのFT-IRスペクトル

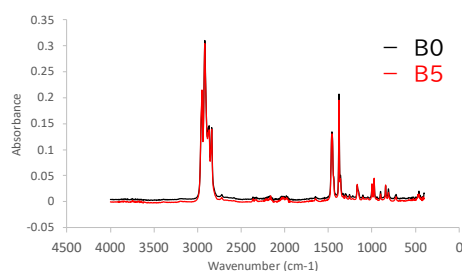


図 2 ブロックPPのFT-IRスペクトル

3.2 微弱発光検出装置による化学発光計測

ペレット形状の熱劣化試料について、化学発光を計測した結果を図 3及び図 4に示す。ホモPP、ブロックPPともに、押出回数の増加に伴い、化学発光量が増加傾向を示した。これは、押出処理により過酸化物の蓄積、すなわち酸化劣化が進行していることを示す。また、化学発光計測では、1回押出しでもvirgin材と比べて、明確な発光量の違いが確認され、FT-IRよ

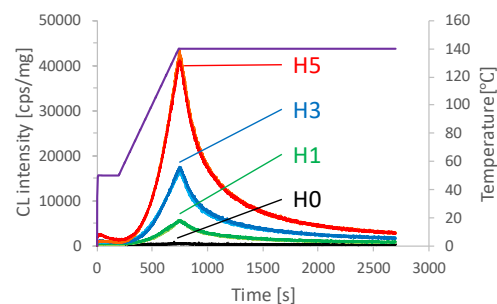


図 3 ホモPPの化学発光量

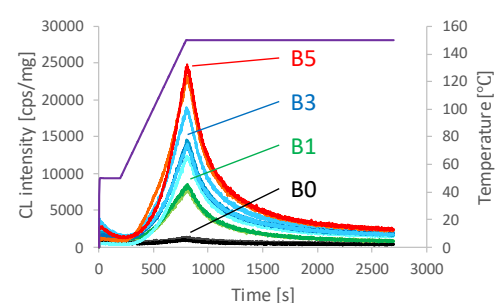


図 4 ブロックPPの化学発光量

3.3 高温GPCによる分子量分布測定

ペレット形状の熱劣化試料について、高温GPCにより測定した分子量分布を図 5及び図 6に示す。一般的に、樹脂の酸化劣化が進行すると、主鎖の切断が起こり、分子量が低下する。図 5より、ホモPPではH0からH3にかけては重量平均分子量(Mw)にほとんど差がないが、H3からH5にかけて高分子量成分が大きく減少しており、押出回数3回と5回の間で、Mwの低下の幅が大きいことが分かる。一方、ブロックPPでは、押出回数の増加に伴い、高分子量成分が低下する傾向を示した。

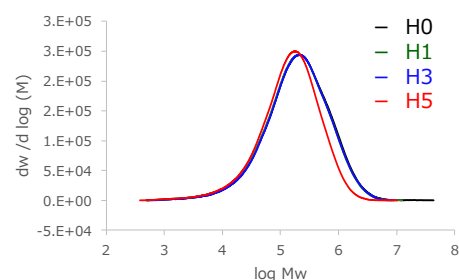


図 5 ホモPPの微分分子量分布曲線

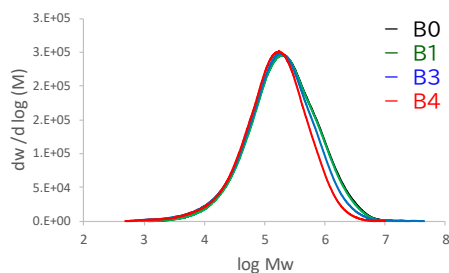


図 6 ブロックPPの微分分子量分布曲線

3.4 熱劣化モデル試料のせん断粘度

230 °Cで測定した熱劣化モデル試料のせん断粘度を図 7及び図 8に示す。100 s⁻¹以上のせん断速度領域はキャピラリーレオメーターによるみかけのせん断粘度(η)を、100 s⁻¹以下のせん断速度領域は、回転レオメーターによる動的粘弾性測定による複素粘度(η^*)を用い、Cox-Merzの経験則に従い重ね合わせた。各試料とも両者は良好に一致した。

ホモPPでは、押出回数の増加に伴い、特に低せん断領域の粘度が低下し、おおむね0.1 s⁻¹以下の低せん断領域で η^* が収束傾向を示し、零せん断粘度(η_0)が観察された。このことは、ホモPPの押出処理による分子量の低下を示唆し、高温GPCの測定結果とも整合する。化学発光計測結果と併せると、ホモPPでは熱酸化による分子量低下が示唆される。

一方、ブロックPPでは、押出回数の増加に伴い、全体的な粘度の低下はみられるものの、おおむね0.1 s⁻¹以下の低せん断領域で、低周波になるほど η^* が上昇傾向を示し、この傾向は、押出回数が増すほど顕著となった。このことから、ブロックPPに含まれるエチレン成分の熱架橋の可能性が考えられた。そこで、高分子鎖の分岐の有無を判断する方法として、複素弾性率($|G^*|$)に対して位相角(δ)をプロットし、Van Gurp Palmenプロットによる評価を行った⁷⁾。ここで、 δ 及び $|G^*|$ は次式で与えられる。また、 G' は貯蔵弾性率、 G'' は損失弾性率、 δ は損失正接 $\tan \delta$ の位相である。

$$\delta = \tan^{-1} (G''/G')$$

$$|G^*| = (G'^2 + G''^2)^{1/2}$$

試料に正弦波振動ひずみを与え、試料が弾性体ならばひずみと同位相($\delta=0^\circ$)の、粘性体では歪みより位相が $\pi/2$ rad ($\delta=90^\circ$)進んだ応力振動が現れる。温度-時間換算則が成立する場合、高 $|G^*|$ 側は短時間側又は低温側に対応するので、高分子の応答は弾性的であり δ は 0° に近くなる。一方、低 $|G^*|$ 側は長時間又は高温側に対応するので、高分子の応答は粘性的

であり δ は 90° に近くなる。図 9において、高 $|G^*|$ 側では各試料の曲線がおおむね一致したが、低 $|G^*|$ 側ではB0とB1、B3とB5の二つのグループに曲線が分離した。低 $|G^*|$ 側の δ は、B0では 90° に近いが、B3及びB5では低角度側にシフトしている。これはB0に比べてB3及びB5では弾性的成分の割合が増加したことを意味する。ブロックPPには、ホモPPには含まれないポリエチレン(PE)やエチレンプロピレンゴム(EPR)成分が含まれている。PEを対象とした研究において、PEの長鎖分岐鎖の量が増大すると、 δ が低角度側へシフトすることが報告されている^{7), 8), 9)}。PEは、酸化劣化で生じた過酸化物質ラジカルにより水素が引き抜かれて生じるポリマー鎖ラジカルどうしが架橋反応することが知られている¹⁰⁾。化学発光の測定結果も踏まえると、図 9において、押出回数の増加に伴い低 $|G^*|$ 側の δ が低角度にシフトした一因に、ブロックPPに含まれるPEの熱架橋が生じ、弾性成分が増加した可能性が示唆される。

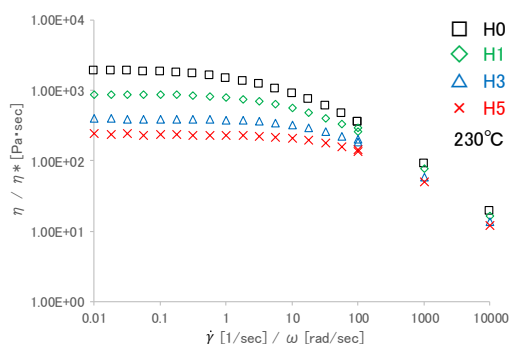


図 7 熱劣化モデル試料(ホモPP)のせん断粘度

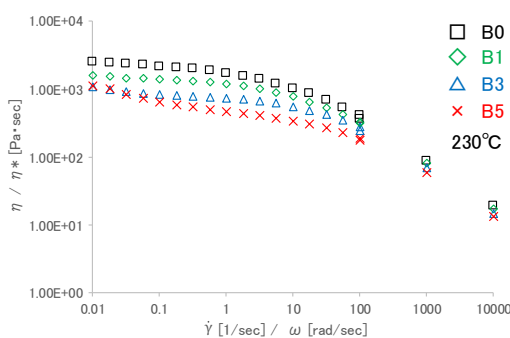


図 8 熱劣化モデル試料(ブロックPP)のせん断粘度

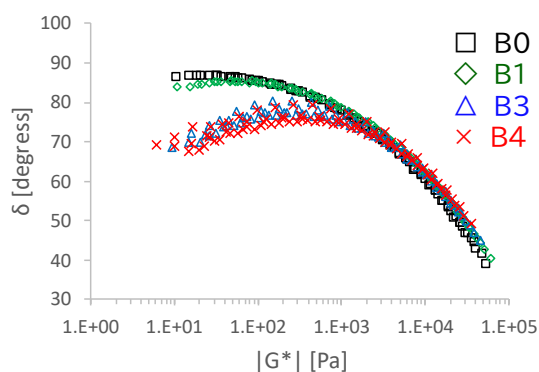


図 9 ブロックPPのVan Gorp-Palmenプロット

3.5 機械的特性の評価

ダンベル試験片形状の熱劣化試料について、引張試験を行った結果を図 10 及び図 11 に示す。ホモPP、ブロックPPともに、押出回数の増加に伴い、引張降伏応力が低下する傾向がみられた。一方、引張破断伸びでは、押出回数による変化はあまりみられなかった。

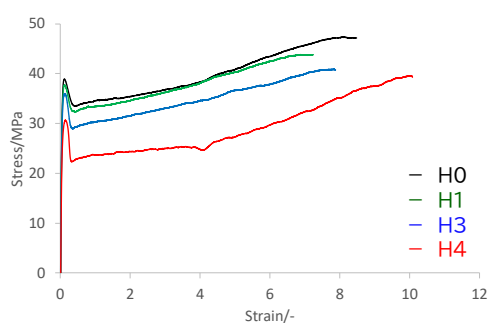


図 10 ホモPPの引張試験結果

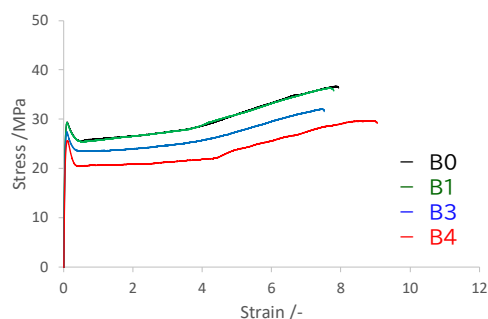


図 11 ブロックPPの引張試験結果

3.6 化学発光量と動的粘弾性の関係

ホモPPにおいて、押出回数と化学発光量、押出回数と η_0 に高い相関性がみられたことから、ホモPPの

化学発光量と 0.1 sec^{-1} における複素粘度の関係を図 12 に示す。ホモPPでは、化学発光量と複素粘度は高い相関性を示すことが分かった。

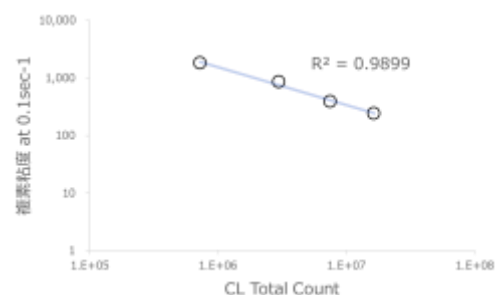


図 12 ホモPPの化学発光量と複素粘度の関係

3.7 化学発光量と降伏応力の関係

ホモPPとブロックPPいずれも、押出回数と化学発光量、押出回数と引張降伏応力に高い相関性がみられたことから、それぞれの化学発光量と引張降伏応力の関係を図 13 及び図 14 に示す。ホモPP、ブロックPPともに、化学発光量と引張降伏応力は高い相関性を示すことが分かった。

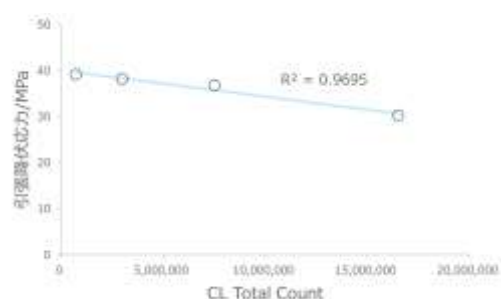


図 13 ホモPPの化学発光量と引張降伏応力の関係

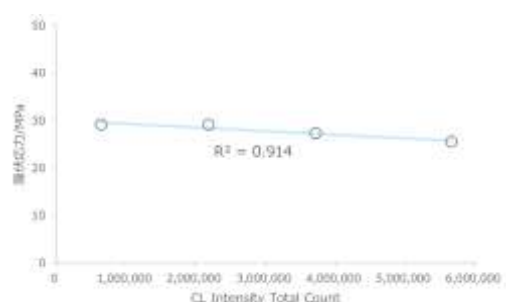


図 14 ブロックPPの化学発光量と引張降伏応力の関係

4 結言

ホモPPとブロックPPの熱負荷による劣化の程度について、多面的な評価を行った。その結果、化学発光法では高感度に酸化劣化を捉えることができた。また、分子量と動的粘弾性、化学発光量と動的粘弾性、化学発光量と降伏応力に相関がみられた。

ホモPPでは、押出回数の増加に伴う低せん断速度域での粘度低下及び零せん断粘度の低下がみられた。零せん断粘度は分子量と相関があるとされ、GPCによる分子量測定結果と同じ傾向を示したことから、分子量の低下をレオロジー測定による零せん断粘度の変化から定性的に推測することができる可能性が示唆された。また、化学発光量とGPCの計測結果から、ホモPPでは押出回数の増加に伴い、酸化劣化が進行したことによる分子量の低下が生じていると推察された。

ブロックPPでは、押出回数の増加に伴う粘度低下がみられるが、低せん断領域では押出回数が増すほど弾性成分の増加がみられ、これは劣化に伴う架橋反応などの弾性成分の割合が増加している可能性が示唆された。

本研究により、ホモPPとブロックPPのように、同じポリプロピレン系樹脂であっても、含有成分の差により劣化機構やレオロジー特性の変化が異なることが分かり、マテリアルリサイクル時の物性低下防止等への対策手法が異なる可能性が分かった。

今後は、今回の劣化評価結果に基づいた熱劣化モデル試料のレオロジー特性や力学特性の回復に向けた検討を行いたい。さらに、本評価方法の他の樹脂や実際に成形加工で生じる廃スプルー・ランナーなどへの適用性の検討についても取り組みたい。

なお、図 3 及び図 4は文献5)掲載データを、図 5及び図 10は文献6)掲載データを用いて作成した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、回転型レオメーターの測定では山形大学有機材料システム研究科杉本・Sathish研究室に御支援いただくとともに、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業(課題番号：JPMXP1224 YG0114)の支援を受けた。ダンベル試験片は、山形大学有機材料システム研究科高山研究室に作製いただいた。高温GPCの測定には、広島大学デジタルものづくり教育研究センター材料モデルベースリサーチ部門の高温GPCを利用した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高取永一. プラスチックのマテリアルリサイクルと再生プラスチックの物性. 日本ゴム協会誌. 2024, 87(11), p.441-446.
- 2) 今野奈穂、浦啓祐、佐藤勲征. 熱可塑性プラスチック再資源化技術高度化事業. 令和3年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2022, No.19, p. 15-20.
- 3) 今野奈穂、浦啓祐、佐藤勲征. プラスチックの工場内マテリアルリサイクルに資するための各種劣化測定結果の相関把握について. マテリアルライフ学会第14回ケミルミネッセンス研究会講演要旨集. 2022, p. 49-52.
- 4) 今野奈穂、浦啓祐、佐藤勲征. 産学官連携素材技術活用支援事業. 令和6年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2025, No.22, p. 63-66.
- 5) 佐藤勲征, 今野奈穂, 高山哲生. “複数回押出したポリプロピレンの酸化劣化評価とレオロジー変化”. 第73回レオロジー討論会講演要旨集. 長岡市, 2025-10-14/16, 日本レオロジー学会, 2025, p. 368-369.
- 6) 今野奈穂. “複数回押出したポリプロピレンの酸化劣化評価とレオロジー特性および力学特性の変化”. 第18回ケミルミネッセンス研究会講演要旨集. 川崎市, 2026-3-12, マテリアルライフ学会ケミルミネッセンス研究会, 2026, p. 27-32.
- 7) Van Gurp, M. and Palmen, J. Rheology Bull., 1998, 67(1), p5-8
- 8) C. Garcia-Franco et al., Eur Polymer J, 2008, 44 (2), 2, p. 376-391.
- 9) 岡本健三, 高分子溶融体のレオロジー特性, 成形加工, 2003, 15 巻, 7 号, p. 472-474
- 10) 大澤善次郎, 高分子劣化・長寿命化ハンドブック, 丸善出版, 2011, 358p, ISBN 978-4-621-08419-9

【短報】

【令和7～9年度 産業廃棄物税活用事業】

サーキュラーエコノミー推進事業

推野 敦子、千葉 亮司、浦 啓祐、佐藤 勲征
材料開発・分析技術部

持続可能な形で資源を循環利用する「サーキュラーエコノミー」への転換に向けて、サーキュラーデザイン化を支援する研究開発と地域資源の利活用(資源循環)をテーマとした研究会を実施した。研究開発では、単一素材化を想定したポリプロピレンの成形加工条件と力学的性質の関係調査、及びバイオマス複合樹脂の再生利用を想定した澱粉PP複合材のペレットの再生工程における水分の影響調査を実施した。その結果、射出成形の成形条件と成形後の保管条件が成形品の材料物性に影響を与えることを確認し、また、バイオマス複合樹脂をペレットに再生する実験では、材料を十分に乾燥することで発泡の少ない再生ペレットが得られることが分かった。研究会については、宮城大学や地域の企業が参画する「サーキュラーエコノミー研究会」を立上げ、地域未利用資源の調査と地域資源を利用したマテリアルリサイクルプロダクトの試作に向けた活動を行った。

キーワード：単一素材化、射出成形、バイオマス複合樹脂、再生利用

1 緒言

サーキュラーエコノミーとは、大量生産・大量消費・大量廃棄を伴う従来のリニアエコノミーに対し、生産から廃棄までのあらゆる段階で資源の循環利用を図り、その取組を企業の収益につなげていく経済活動であり、環境と経済が両立する持続可能な社会実現のために重要な考え方である¹⁾²⁾。

サーキュラーエコノミーの実現には、設計・生産、流通・消費、再資源化など各段階での取組が必要となるが、製造業における課題として、設計生産段階での環境配慮設計やリサイクル材利用が挙げられる¹⁾²⁾。本研究は、サーキュラーデザインや環境配慮設計を支援することを目的とし、単一素材化とリサイクル推進を想定して実施した。単一素材化では、成形加工条件が樹脂成形品の力学的特性に与える影響を調査した。また、リサイクルの推進では、バイオマス複合樹脂の再生工程における材料と押出し条件が再生ペレットの性状に与える影響を調査した。さらに、地域の未利用資源の利活用をテーマとして研究会を設立し、地域の未利用資源の調査や未利用資源と樹脂の複合化に関する検討と研究、また情報交換や先進事例調査を目的としたセミナー・意見交換会を行った。

2 成形加工条件が樹脂成形品の力学的特性に与える影響(実験)

「単一素材化」は、製品が一つの素材・原料(つまり単一素材)のみで構成されることで、その製品のリサイクルにあたっては、素材毎に分解・分別操作が不要になるため、リサイクルが容易になり、リサイクルコストの圧縮、リサイクルまでの工程や時間の短縮に効果が高く、リサイクルの実現可能性が大幅に高まる。このためできるだけ同じ素材だけを使って製品を作ることが肝要である。則ち、一つの素材で様々な物性を付与できれば、単一素材製品の実現性は高くなると考える。

樹脂の成形方法として、射出成形法、2軸延伸法、プレス成形法、ブロー成形法などがあり、製品や用途に応じて成形方法が選択されている。金属では鍛造法等により機械的物性が向上した報告³⁾があるが、樹脂(PLAやPTFEなどいくつかの樹脂)でも鍛造法等により機械的物性(射出成形法等と比較して)が向上した報告がある⁴⁾。樹脂は成形条件によって物性が向上する可能性があり、ここでは典型的な樹脂材料の一つであるポリプロピレン(PP)について、射出成形法において成形条件でどのように物性が変化するかを検討した。

2.1 実験方法

射出成形法における成形条件がポリプロピレンの機械的物性へ及ぼす影響を調査した。

ポリプロピレン(プライムポリマー、プライムポリプロ J-

700GP、homo-PP、MFR=8g/10min)を材料として、射出成形機(日本製鋼所、J80ADS-60U)により、表1に示す成形条件で試験片(JIS K7139 タイプA1)を作製した。

成形条件は、樹脂温度210℃、型温40℃を標準とし、結晶化度への影響を想定して型温が高い条件(型温80℃)、樹脂流れや緩和の影響を想定して樹脂温度が異なる条件(190℃、230℃)を設定した。また、成形後の緩和の影響を調べるため、成形後の熱処理条件として熱処理なし(室温)、水冷(成形品取り出し直後に流水水没、その後水中で24 h保管)、加熱(80℃、24 h)を設定した。

試験片の力学的物性評価には、引張圧縮試験機(東洋精機製作所、ストログラフV10-C)とシャルピー衝撃試験機(東洋精機製作所、シャルピー衝撃試験機DG-CB)を用いた。

表1 射出成形条件と成形後の熱処理条件

樹脂温	型温40℃			型温80℃		
190℃	室温 ●	冷却 △	加温 ■	室温 ●	冷却 △	加温 ■
210℃	室温 ●	冷却 △	加温 ■	室温 ●	冷却 △	加温 ■
230℃	室温 ●	冷却 △	加温 ■	室温 ●	冷却 △	加温 ■

2.2 結果及び考察

図1に、各条件の試験片の引張強さー引張破断ひずみの関係を示す。

射出成形条件および成形後の熱処理条件の違いにより、物性値が変化することを確認した。今回の実験では、引張強さと伸びを同時に大きくすることはできなかったが、引張強さを大きくする条件、引張破断ひずみを大きくする条件を見いだすことができた。

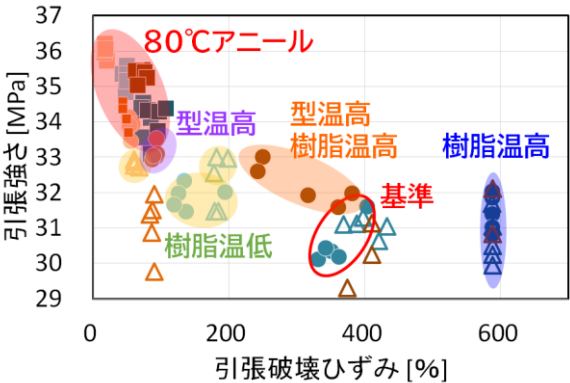


図1 引張強さと引張破断ひずみの関係

各試験片の引張試験の結果を表2にまとめた。引張強さについては、基準サンプルが最も低い値であった。

成形後の80℃で加熱した条件では、引張強さを向上させるものの、引張破断ひずみは小さくなることが分かった。

引張弾性率は、射出成形条件のうち、低い樹脂温度・低い型温度が最も高い値となった。また射出成形条件に関わらず、成形後に熱処理しない(室温保持)方が引張弾性率は高くなる傾向にあることが分かった。

表2 引張試験結果

引張強さ	基準比: 99~118% [MPa]					
	型温40℃			型温80℃		
樹脂温	室温	冷却	加温	室温	冷却	加温
190℃	31.9	32.3	35.3	33.9	32.8	36.0
210℃	30.5	31.0	34.2	33.1	31.1	34.1
230℃	31.4	30.7	34.0	32.2	30.7	35.3

引張破断ひずみ	基準比: 5~164% [%]					
	190℃	142	184	48	55	63
210℃	358	401	75	91	87	48
230℃	588	588	93	310	474	71

引張弾性率	基準比: 99~114% [MPa]					
	190℃	1449	1437	1439	1414	1327
210℃	1268	1307	1364	1392	1317	1397
230℃	1331	1326	1384	1399	1349	1352

曲げ試験及びシャルピー衝撃試験の結果を表3に示す。

曲げ強さも引張強さと同様、成形後80℃で加熱した条件が大きくなり、樹脂温度が低い成形条件であっても曲げ強さは大きくなる傾向にあることが分かった。

曲げ弾性率は樹脂温度が低い方が大きくなり、逆に樹脂温度が高いと小さくなることが分かった。また、成形後80℃で熱処理する条件の方が曲げ弾性率が高くなる傾向にあることが分かった。

シャルピー衝撃値は、成形後80℃の熱処理条件で大きくなり、型温度が高い場合は、成形後熱処理しない場合と水冷した場合において低くなる傾向にあることが分かった。

成形条件を変更することで、基準とした成形条件での物性値に対して、概ね20%程度向上できることが分かった。逆に成形条件や熱処理条件によっては、10~95%程度、物性値が低下する場合もあることが分かった。したがって目標とする物性値を考慮した上で、成形条件や熱処理条件を決める必要があると言える。

またこれらの物性値の変化は、結晶化度や材料組織・構造の変化が影響していると予想されるため、物性値と材料組織・構造の関係についても今後調査したいと考えている。

さらに、この成形条件によって変化した物性値が長期間（例えば1年間）維持されるかどうか、経時変化についても今後の検討課題と考えている。

表3 曲げ試験結果及びシャルピー衝撃試験結果

曲げ強さ	基準比: 91~127%						[MPa]
	型温40℃			型温80℃			
樹脂温	室温	冷却	加温	室温	冷却	加温	
190℃	44.0	43.6	48.7	42.0	40.8	50.5	
210℃	39.7	38.7	43.6	40.3	39.3	44.7	
230℃	38.0	36.5	41.2	39.3	38.6	47.9	

曲げ弾性率	基準比: 90~116%						[MPa]
190℃	1525	1514	1606	1451	1436	1642	
210℃	1407	1373	1460	1405	1390	1527	
230℃	1305	1262	1353	1349	1334	1585	

シャルピー衝撃値	基準比: 56~118%						[kJ/m ²]
190℃	1.69	1.70	1.90	1.13	1.00	1.89	
210℃	1.76	1.75	1.90	1.70	1.52	2.08	
230℃	1.82	1.84	1.94	1.49	1.72	1.97	

3 バイオマス複合樹脂再生工程における材料と押出条件が再生ペレットの性状に与える影響(実験)

バイオマス複合樹脂は、バイオマスの多くが親水性であることから、一般の樹脂と比べて水分を含みやすく、且つ放出しづらい性質を持っている。このため、これまで樹脂の再生を手掛けてきた業者からは、バイオマス含有率の高い樹脂の加熱加工(成形、混練等)は、材料に含まれる水分起因による発泡を伴うためにストランドが曳けず、マトリックス樹脂で希釈してバイオマス度を下げないと再生ペレット化・リサイクルは難しいという声を聞いている。しかしながら、今後、バイオマス複合樹脂の使用量が増えていくと、そのリサイクルは避けて通れないため、そのための物性や必要な成形条件を知っておくことは必要と考えている⁵⁾。

本実験では、バイオマス複合樹脂としてトウモロコシ澱粉を60 %含むポリプロピレン((株)コバヤシ製 ReseamST®)を例にとり、バイオマス複合樹脂における材料中の水分量及び加工条件と、得られる再生ペレットの性状の関係を調査した。なお、ReseamST®は(株)コバヤシより提供を受けたものである。

3.1 実験方法

3.1.1 材料調製

トウモロコシ生澱粉60 %/ポリプロピレン(PP)のシー

ト端材を粉碎した材料を、105℃に設定した熱風オーブンで24時間乾燥した。その後、材料に含まれる水分量が、ペレット再生への影響を調査するため、乾燥条件と湿潤条件の2組に分けた。前者は乾燥条件を変えずに更に1日保持した。後者は30℃・80%湿度に設定した恒温恒湿槽に移し、1日吸湿させた。それぞれの材料の水分量をカールフィッシャー水分計(日東精工アナリテック製、水分測定装置CA-310)により測定した。滴定法は電量滴定法を採用し、水分の滴定容器への輸送は気化法で行った。乾燥材料の水分量は0.15 wt. %、湿潤材料の水分量は3 wt. %であった。

3.1.2 ペレットの再生

単軸混練押出機(井元製作所製、一軸混練押出機 IMC-940E)を用いた押出ペレタイズにより、ペレットの再生を行った。スクリー径は20 mm、ベントポートは無い。基本的なシリンダ温度設定は、PPの融点と澱粉の変質の双方を考慮し180℃とした。スクリー回転数は30、60、90 rpmの3パターンとした。

押出には2種類のスクリーを使用した。1つは単軸押出機で一般的に使われるフルフライトスクリー(FF)である。FFは材料のスムーズな熔融と搬送に特化したデザインとなっている。このため材料の余分な剪断発熱を抑制し、発泡や樹脂の劣化を抑えることができ、リサイクルには向いていると考えられる。もう1つは井元製作所製の混練スクリー(KS)で、FFと比較して混練性能を高めたスクリーである。

3.2 結果及び考察

乾燥材料をペレットに再生するための押出条件及び加工中の状況を表4に示す。

FFを使って乾燥材料をペレットに再生すると、今回設定した条件においては滞りなく行うことができた。ガスや目ヤニもなく、ストランドは発泡したり切れたりすることなく曳くことができ、設定したシリンダ温度を変える必要もなかった。

なおストランドの発泡とは、ノズル以外に出口のない単軸押出機内に、水分や低分子量成分といった加熱によりガス化する成分を含む材料が入った場合に、ノズルからの材料吐出と同時に圧力開放されてガスが膨張すること、またはそのことで起きるストランドの膨張であると言われている(図2)。これが生じるとストランドが切れ易くなり、連続してペレタイズすることが困難になる。

表 4 乾燥材料の押出条件と加工状況

材料	乾燥（105℃熱風・1日）：水分0.15%		
回転	30rpm	60rpm	90rpm
FF	シリンダ温度設定：180℃		
	ストランド：曳けた		
	ガス：見えない		
	発泡：見えない		
KS	190℃（過負荷停止のため）		
	ストランド：切れ易い		
	ガス：見えない		
	発泡：見えない		
	臭気：気にならない		

表 5 湿潤材料の押出条件と加工状況

材料	湿潤（30℃・80%・1日）：水分3%		
回転	30rpm	60rpm	90rpm
FF	シリンダ温度設定：180℃		
	ストランド：切れ易い		
	ガス：少量	→増加	→更に増加
	発泡：完全発泡		
KS	シリンダ設定温度：185℃		
	ストランド：切れる		
	ガス：多め	→増加	部屋全体が煙る
	多少発泡	完全発泡	
	臭気：有	臭い	かなり臭い



図 2 健全なストランドと発泡したストランド

他方、KS を使って乾燥材料をペレットに再生すると、ガスやストランドの発泡は見えなかったものの、ストランドが切れ易くなった。この原因は材料粘度の低下と考えている。KS の構造に起因して材料圧力が上昇し、圧力上昇による機械過負荷によりスクリーンの回転が停止したため、シリンダの設定温度を上昇させて材料粘度を下げて混練したためである。

湿潤材料をペレットに再生したときの押出条件及び加工中の状況を表 5 に示す。

湿潤材料は、スクリー種別を問わず予想したとおりストランドの発泡が激しく、ストランドを曳くことが非常に困難であった。

特に KS では押出機のノズルからペレタイザの近くまで支持台を並べ、途中で切れないようにストランドをその上を滑らせるように切断機へ導いたが、それでも度々途中で切れる結果となった。再生業者としては歩留まりが悪く、非常に扱いづらい状況といえる。またガスや目ヤニの発生多く、KS 使用においては今回の条件のなかで最も臭気が強くなった。

次に、前述の押出操作により作製したペレットについて説明する。

乾燥材料の再生ペレットは、図 3 のとおり、スクリー種別及びスクリー回転数に依らず、色味、断面ともに健全なものであった。

また KS ではシリンダ設定温度を上げたが、それでも発泡や澱粉の α 化は見られなかった。水分率が低いことが要因と考えられる。

	乾燥（105℃熱風・1日）：水分0.15%		
	30rpm	60rpm	90rpm
FF			
KS			

図 3 乾燥材料の再生ペレット断面

	湿潤（30℃・80%・1日）：水分3%		
	30rpm	60rpm	90rpm
FF			
KS			

図 4 湿潤材料の再生ペレット断面

図 4 に湿潤材料のペレット断面を示す。いずれの条件でも発泡し、ペレット断面には全体に大小の気泡

が観察された。特に FF での発泡が大きいことがストランドの断面観察からも分かった。

また全ての条件で澱粉の α 化も観察され、断面には α 化澱粉の特徴である黄褐色の小さな粒が見える。乾燥材料と比べて臭気が強かった原因は澱粉の α 化によるものと考えられ、またストランドが切れ易かったのは、発泡に加えて澱粉の α 化による材料の軟化も原因であると考えられる。

澱粉 60 %PP の加熱加工には、何よりも材料乾燥が必須であるということが分かった。十分な乾燥を行えば、今回使用した単軸押出機とスクリューの組合せにおいては、澱粉 60 %というバイオマスを多量に含む材料であっても健全な再生ペレット化が可能であった。

但し、昨年度実施した他機関の単軸押出機を使用した実験では、今回と同条件で乾燥を行っても、再生業者と同様に発泡しストランドが曳けなかった。則ち、使用している機械の種類が同じ「単軸押出機・フルフライトスクリュ」の組合せであっても、メーカーや型式の違いにより加工範囲に差があることが伺える。ペレットに再生するには、対象とする材料組成によっても向き不向きが存在すると考えられ、押出機等加工機を選定する際は、十分検討することが必要である。

今回の澱粉 60 %PP をペレットに再生したときの結果を比較すると、KS は FF と比べて混練性能が良く、比較的強い圧力が得られ、またガスの排出能力が高いことが判った。樹脂をペレットに再生するリサイクル工程には、一般には FF が向くと考えられているが、湿潤材料の 30 rpm 等、条件によっては KS の方が良い場合もあることがわかった。材料等の条件を見て使い分けことが重要である。

4 サークュラーエコノミー研究会

未利用地域資源を利活用する地域資源循環モデルの構築を目的とし、地域資源を活用したマテリアルリサイクルやサーキュラーデザインに関する検討を行う「サーキュラーエコノミー研究会」を令和7年度に設立した。

令和7年度は、公立大学法人宮城大学、国立大学法人山形大学、地域の事業者2社の参画により研究会を発足し、3回の研究会を開催した。そのうち、第2回研究会では、地域資源現地調査として、資源となり得る廃棄物を排出する事業者と廃棄物を扱う事業者を訪問して状況を伺った。また、地域資源を利用したマテリアルリサイクルプロダクトの試作に向け、地域資源と樹脂を混

練した複合材の試作と、材料押出法の樹脂積層造形での試作を想定した天然資源複合材料の造形適合性の確認を行った。

5 結言

成形加工条件が樹脂成形品の力学的物性に与える影響について調査し、射出成形の成形条件と成形後の熱処理条件が成形品の機械的物性(引張強さ、引張破壊ひずみ、曲げ強さ、弾性率、シャルピー衝撃値)に影響を与えることが分かった。今後は、その要因と考えられる結晶化度や材料組織・構造との関係について調査を行う。

バイオマス複合樹脂再生工程における材料と押し出し条件が再生したペレットの性状に与える影響を調査し、材料を十分に乾燥することで、発泡の少ない再生ペレットを得られることがわかった。本研究で得られた知見を活用し、県内企業での再生材利用の拡大につなげる。

謝辞

本事業は産業廃棄物税を活用して実施しました。研究会の設立にあたり、宮城大学の益山准教授をはじめ、参画メンバーの皆様には様々な御協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省. 令和5年版環境白書.
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r05/>,
(参照 2026-05-27)
- 2) 宮城県循環型社会推進課. “サーキュラーエコノミーについて”.
<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/junkan/circular-economy.html>, (参照 2026-05-27)
- 3) Fusao. Ishikawa, Toshihiko. Takahashi,
The Formation of Intragranular Ferrite Plates in Medium-carbon Steels for Hot-forging and Its Effect on the toughness. ISIJ Int. 1995, 35, 1128–1133.
- 4) Satoshi. Kobayashi, Processing and characterization of forged poly (lactic acid) screw. Mater. Syst. 2011, 29, 23–30.
- 5) 推野敦子、遠藤崇正、佐久間華織、浦啓祐、佐藤勲征. みやぎアップグレードリサイクル推進事業.
令和6年度宮城県産業技術総合センター研究報

告. 2025、No.22

【短報】

【令和7～8年度 県単独試験研究】

県産サツマイモの品質調査 — 県特産品及び県育成新品種の特性評価と利用拡大に向けた検討 —

今野 知佐子、佐藤 信行^{*1}、畑中 咲子
食品バイオ技術部、(^{*1}現 企画・事業推進部)

宮城県ではサツマイモが県全体で取組拡大を図る品目である「重点振興品目」に定められ、食品関連産業との連携によるサプライチェーンの構築を進めながら生産振興を推進している。その中で、加工や販売を担う企業からは品質向上への要望が挙がっており、品質安定化が早急の課題となっている。加工上の問題について聞き取りした結果、糖度、黒変、シロタがあげられたため、本研究では県内で最も流通量の多い「べにはるか」について、これらに着目して調査を実施した。その結果、調査を行った県内7生産地のサツマイモは全て収穫後1か月の貯蔵によりスクロース含量3.2 %に達しており、「甘いいも」として出荷が可能な品質になると考えられた。また、干しいもに加工すると、貯蔵1、2か月後でもシロタの発生が見られたが、生育期間の高温、少雨の影響が要因の一つと考えられた。さらに、宮城県では収穫時期以降すぐに最低気温がサツマイモに不適とされる10℃を下回る。作業の遅れ等により低温に遭遇し、黒変や腐敗が生じるリスクがあるため、収穫以降の適正な温度管理が必要であると示唆された。

キーワード：サツマイモ、べにはるか、糖度、黒変、シロタ、低温

1 緒言

九州などでのサツマイモ基腐病のまん延や温暖化の影響で、東北でもサツマイモの栽培面積が拡大している。サツマイモは、宮城県では令和8年3月に定められたみやぎ園芸特産振興戦略プラン(R8～R12)において、県全体で取組拡大を図る品目である「重点振興品目」に定められた¹⁾。県では水田を活用した収益性の高い園芸作物として、導入及び作付拡大が推進されており、食品関連産業との連携による生産・加工・流通・販売までのサプライチェーンの構築が進められている。その中で、県内の各産地においては、令和5年より補助事業を活用して、キュアリング施設や貯蔵施設の整備が進められてきた。県内の令和5年の生産量は694 tであり、令和12年の目標生産量は1,271 tとされている。

一方、加工を担う食品企業にとっては、県産サツマイモの需要は高いものの数量が不足しているだけでなく、糖度不足や、腐敗、黒変、干しいも製造時に内部が白くなる生理障害のシロタなどによるロスが多いという課題がある。新興産地である本県においては、品質向上の要望が非常に高く、品質安定化が急務となっているが、これまで、サツマイモの収穫後の品質について調査されたことはない。そこで本研究では、県産サツマイモの品質安定化および利用拡大に向け、糖度、黒変および

シロタの発生実態と貯蔵条件との関係を明らかにすることを目的とし、特に県内流通の大部分を占める「べにはるか」を対象として、県内7生産地における品質特性を把握し、品質に影響を与える要因を整理した。

2 材料及び方法

2.1 サツマイモの品質調査(試験1)

試験には宮城県内7か所の生産地で栽培されたサツマイモを用いた。供試品種は「べにはるか」、全国農業協同組合連合会宮城県本部出荷規格のMサイズ(150 g～300 g)のものをを用いた。定植日は令和7年5月20日から令和7年6月6日、収穫日は令和7年10月8日から令和7年10月29日の範囲であった。各ほ場で収穫したものを直ちに当センターへ搬入し、温度13℃湿度90%の恒温恒湿槽(エスペック(株)、PSL-4K)で保存した。なお、キュアリング処理は行わなかった。収穫後の調査は各収穫日を基準として、収穫・貯蔵1週間後、1か月後、2か月後に実施し、各9本を分析に供した。

サツマイモは調査日に恒温恒湿槽から取り出し、洗浄後、生いものデンプン含量と正の相関があるといわれている²⁾比重を測定した。比重1.04及び1.06の塩水選により比重を1～5の5段階で評価した。比重評価値2が比重1.04相当、4が1.06相当である。塩水選の比重はハン

ドヘルト密度計(アントンパール社、DMA35)を用いて基準温度20℃で調整した。

サツマイモは縦に半割にして、一方を生いもの水分含量の分析に供し、残りはスチームコンベクションオーブン(フジマック(株)、FSCCWE61)を用いて温度100℃湿度100%で40分間蒸したものを蒸しいもとし、糖分析に供した。どちらも両端を除いた中央部分100g程度を3本分ずつ合わせて3反復とし、生いもはフードプロセッサで細断、蒸しいもはペースト状にして混和したものを試料として用いた。

生いも水分含量は、60℃での予備乾燥後105℃で48時間乾燥し、乾燥前後の重量から求めた。

蒸しいもの糖含量は高畑ら³⁾の方法に準じて調査した。蒸しいも1.5gに80%エタノール水溶液20mlを加え20秒間ホモジナイズ後、40℃で一晩振とう抽出して上清を得た。沈殿に80%エタノール水溶液20mlを再度加え超音波で15分懸濁後、遠心分離(4,000rpm、10min)した上清と合わせ50mlに定容した。得られた抽出液は0.22μmのフィルターでろ過後、5倍希釈して、高速液体クロマトグラフ((株)日立ハイテクサイエンス、HPLC Chromaster)で定量した。カラムはShodex asahipak NH2P-50を使用し、カラム温度は40℃、溶離液は75%アセトニトリル水溶液、流速は1.2mL/min、蒸発型光散乱検出器(ELSD)で検出した。また、甘さの官能評価と相関が高いと言われる甘味度について、「甘味度=フルクトース+0.55×グルコース+スクロース+0.35×マルトース」より求めた⁴⁾。

2.2 貯蔵方法の影響(腐敗、黒変)調査(試験2)

試験には宮城県農業・園芸総合研究所で栽培されたサツマイモを用いた。定植は令和7年5月29日、収穫は令和7年10月16日であった。収穫後、①当センターへ搬入し、温度13℃湿度90%で保存(試験区1)、②農業・園芸総合研究所の加温なしの倉庫で保存(試験区2)、③農業・園芸総合研究所でキュアリング処理後に簡易貯蔵庫で保存(試験区3)の3区について、2か月後の状態を生いもの腐敗及び蒸しいもの黒変で判断して比較した。

2.3 干しいものシロタの発生程度調査(試験3)

試験1の蒸しいも各9本を用いて、簡易的に干しいもを製造し、シロタの発生程度を調査した。半割の蒸しいもを2mm厚さ程度にスライスして、スチームコンベクションオーブン(フジマック(株)、FSCCWE61)を用いて温度100℃湿度0%で45分間乾燥した。干しいもの白くな

る部分の面積を、1(なし)、2(わずか)、3(軽度)、4(面積の半分未満)、5(面積の半分以上)の5段階で評価した。このうち3(軽度)以上をシロタと判断した。

3. 結果と考察

3.1 サツマイモの品質調査(試験1)

千葉県内の主要産地では、甘味がのった「べにはるか」を出荷するため、「べにはるか」30日以上貯蔵ルール⁵⁾を制定していることから、県内でも貯蔵1か月を出荷の目安としてよいか検討した。西中は蒸しいもが甘いと評価できる基準を長期保存の場合スクロース含量3.2%以上としている⁶⁾。このことを参考に、収穫後1か月貯蔵した各生産地(AからG)の蒸しいもの甘味度(図1)の評価結果を見ると、生産地間で甘味度に違いはあるものの、どの生産地もスクロース含量3.2%に達しており、甘さの評価基準を満たしていると考えられた。

収穫・貯蔵1週間後、1か月後、2か月後における蒸しいものフルクトース、グルコース、スクロース、マルトースの合計量(以下糖類総量)の推移を図2に示した。千葉県の試験⁷⁾では、「べにはるか」の焼いもの糖類総量は貯蔵期間4か月まで増加しているのに対して、県内生産地では、収穫・貯蔵1か月後以降の糖類総量の増加量は小さくなった。田中⁸⁾は夜間の地温が高いと、デンプンの合成が抑制されると報告している。令和7年は高温年であったため、気象条件が糖類蓄積に影響した可能性が考えられるが、その因果関係については、今後確認が必要である。

また、貯蔵2か月後の蒸しいもの糖類総量にも生産地間で違いがあったことから、どのようなサツマイモが貯蔵後に甘くなるのか、収穫1週間後の生いも水分含量及び比重と、収穫・貯蔵2か月後の蒸しいもの糖類総量の関係より検討した(図3、図4)。その結果、水分含量が少ないほど、また、比重が大きいほど糖類総量は増加した。千葉県では早掘りの「シルクスweet」の出荷判定に塩水選が用いられている⁹⁾。本県の「べにはるか」においても塩水選による比重が収穫時期の判断等に使用できると考えられる。

3.2 貯蔵方法の影響(腐敗、黒変)調査(試験2)

各試験区の生いも、蒸しいもの状態を図5に示す。試験区1は、キュアリングなしでも腐敗はなく、蒸しいものに黒変は見られなかった。一方、試験区2は、一部腐敗、蒸しいものは黒変し、試験区3は、腐敗は見られなかったが、蒸しいものは黒変した。

永田¹⁰⁾らは低温処理では酵素的褐変に関する遺伝子が発現し、5℃で低温処理したサツマイモは内部に褐変が生じたことを報告していることから、試験区2、試験区3は低温に遭遇していたと推定された。これより、生産現場においてサツマイモの外観に変化がない場合でも、低温遭遇した場合、内部組織に影響を受けている可能性があると考えられた。

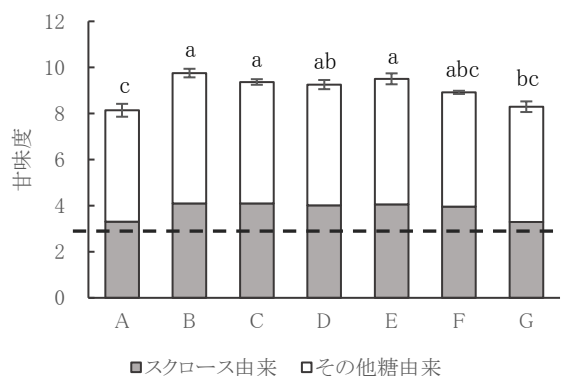


図1 各生産地の貯蔵1か月後の蒸しいもの甘味度

収穫後すぐに温度13℃湿度90%で保管（点線は「甘い」と判断されるスコ羅斯由来甘味度3.2に相当）
異なる英小文字はtukeyの多重検定で有意水準5%で有意差があることを示す。誤差線は標準誤差を示す。

3.3 干しいものシロタの発生程度調査(試験3)

県内生産地7か所のサツマイモで作った干しいものシロタの割合は、収穫・貯蔵1週間後では78～100%、1か月後では22～89%、2か月後では0～22%であった(図6、図7)。

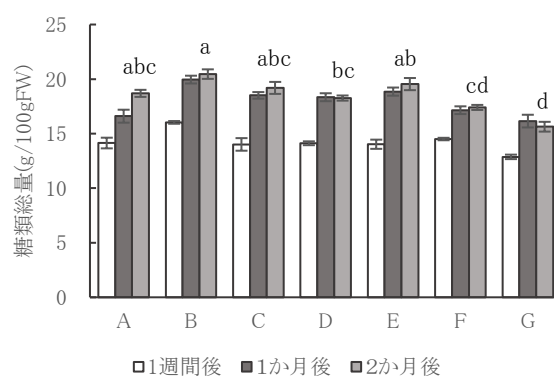


図2 収穫・貯蔵1週間後、1か月後、2か月後の蒸しいもの糖類総量の推移

A～Gは県内生産地収穫後すぐに温度13℃湿度90%で保管
異なる英小文字はtukeyの多重検定で有意水準5%で有意差があることを示す。誤差線は標準誤差を示す。

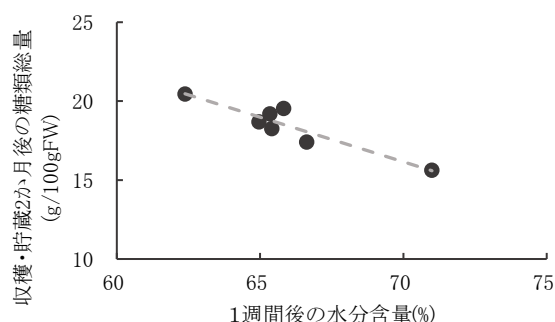


図3 収穫1週間後の生いも水分含量と収穫・貯蔵2か月後の蒸しいもの糖類総量の関係

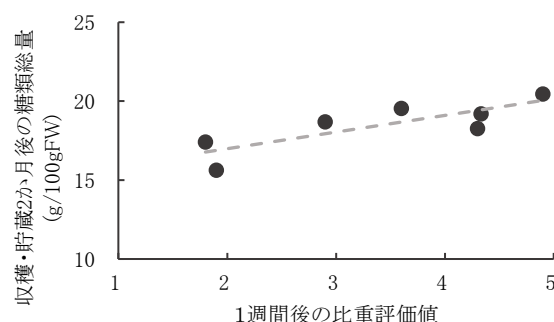


図4 収穫1週間後の生いもの比重と収穫・貯蔵2か月後の蒸しいもの糖類総量の関係

比重は塩水選により、比重評価値2が比重1.04相当、4が1.06相当



図5 保存条件の異なる収穫2か月後の生いも及び蒸しいもの状態(A:生いも、B:蒸しいも)

試験区1: 収穫後すぐに温度13℃湿度90%で保管

試験区2: 加温なしの倉庫で保存(低温遭遇)

試験区3: キュアリング処理を行い簡易貯蔵庫で保存(低温遭遇)

収穫・貯蔵1週間後はデンプンの糖化が進んでおらず肉質が粉質となるため白くなったと考えられるが、貯蔵により糖化が進んだと考えられる1か月後及び2か月後でもシロタの発生が見られた。

サツマイモ品種「タムユタカ」に関して、シロタ発生程度には収穫期直前の土壌水分の推移が関わっていると報告されている^{11),12)}ことから、今回の結果においても生育期間中の6月以降の高温及び7月、8月後半の少雨が影響していると考えられた。一方で、「べにはるか」の干しいものはシロタの発生はほとんどないとされている¹³⁾ため、県内生産地の「べにはるか」におけるシロタ発生状況や要因について、今後確認が必要であると考えられた。

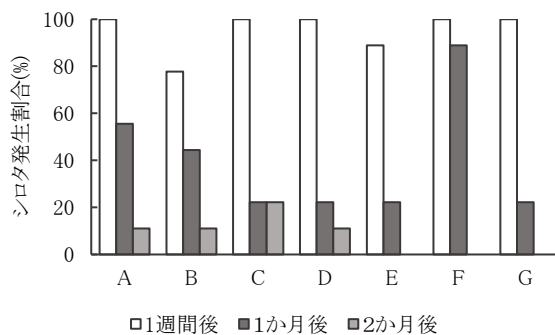


図6 収穫・貯蔵1週間後、1か月後、2か月後の干しいものシロタ(白い部分)発生割合



図7 収穫・貯蔵1週間後、1か月後、2か月後の干しいものシロタ(白い部分)発生の例

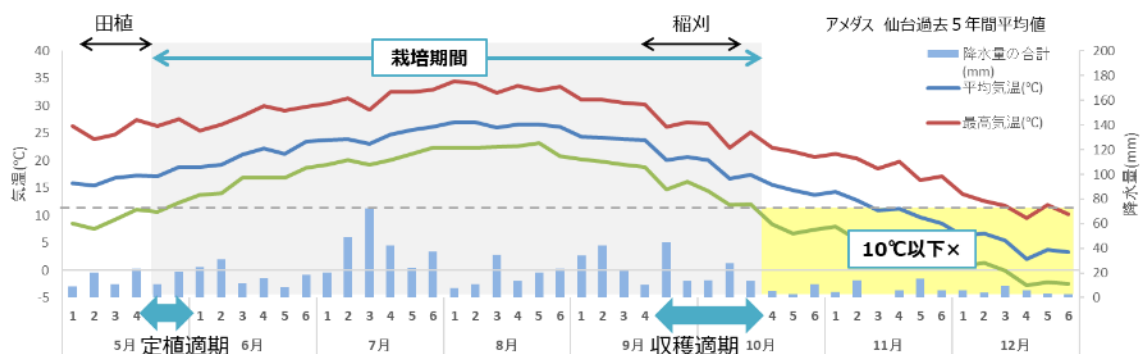


図8 県内における気温の推移とサツマイモ栽培作業時期の例

3.4 宮城県の栽培条件について

宮城県では水稲作業とサツマイモの作業の時期を比較すると、サツマイモの収穫は稲刈時期と重なる(図8)。このことから収穫時期の後すぐに、最低気温がサツマイモに不適とされる10℃¹⁴⁾を下回ることとなるため、収穫の遅れや選別、キュアリング施設持ち込みの遅れ、また、生産者が各自で保存する場合、貯蔵条件によっては貯蔵温度の不定などにより、低温に遭遇するリスクがあると考えられる。その場合、試験2の結果にあるように、外観からは判断が難しい内部品質の低下が起こっている可能性があると考えられた。

4 結言

宮城県におけるサツマイモの品質安定化・利用拡大を目的とし、県内7生産地の品質調査を加工上の課題である糖度・黒変・シロタに着目して行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ・糖度について、収穫後1か月の貯蔵により蒸しいもののスクロース含量は3.2%に達しており、甘さの評価基準を満たしていると考えられた。

・腐敗、黒変について、低温遭遇による影響が考えられ、サツマイモの外観に変化がない場合でも、内部組織に影響を受けている可能性があると考えられた。

・シロタについて、「べにはるか」では発生が少ないとされているシロタの発生が見られた。生育期間の高温、少雨の影響も要因の一つと考えられるが、今後確認が必要であると考えられた。

宮城県においては、10月下旬以降、地域によっては中旬頃から最低気温が10℃を下回るため、作業の遅れや貯蔵温度の不定などにより、低温に遭遇するリスクが高くなる。内部品質の低下は外観からはわからないため、まずは、リスクの認識、温度管理の徹底、同時に、生産現場での収穫後の選別から出荷までの温度経過についての検討が必要であると考えられた。

謝辞

本研究の遂行にあたり、サツマイモ生産法人の皆様、全国農業協同組合連合会宮城県本部、美里農業改良普及センター、石巻農業改良普及センター、大崎農業改良普及センター、園芸推進課の皆様にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献、引用URL

- 1) みやぎ園芸特産振興戦略プラン(R8～R12) . 2026, p.21-26. (<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/engei/engeisinkou.html>)
- 2) かんしょ「ベニアズマ」の蒸しいも食味特性と比重測定による簡易な評価法. 茨城県農業総合センター 農業研究所・園芸研究所 普及情報 . 2004. (<https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/noken/seika/h16pdf/documents/12.pdf>)
- 3) Yasuhiro Takahata, Takahiro Noda, Tdahihiro Nagata. Varietal Diversity of Free Sugar Composition in Storage Root of Sweet Potato. Japan.J.Breed. 1992, 42, P.515-521.
- 4) 高畑康浩, 野田高弘, 永田忠博. カンショ遊離糖類組成の地域間比較及び遊離糖類組成と食味の関連. 九州農業研究. 1993, 55, p.43.
- 5) サツマイモ栽培技術指針. 千葉県農林水産技術会議. 2023, p.42. (<https://www.pref.chiba.lg.jp/ninaite/seikafukyu/documents/r4-06-satumaimosaibai.pdf>)
- 6) 西中未央. サツマイモにおける蒸しいもの甘さの簡易推定法. いも類振興情報. 2020, 145, p. 24-29.
- 7) 安藤利夫. 「べにはるか」の貯蔵期間および貯蔵温度と焼きいもの食味. いも類振興情報. 2019, 139, p. 22-27.
- 8) 田中勝. かんしょの収量およびでん粉含量と気象条件の関係について. 砂糖類・でん粉情報2018, p. 45-50.
- 9) 高品質なさつまいもの安定生産・出荷を行う産地の育成. 農林水産省 協同農業普及事業の成果事例 (令和4年度). 2022. (https://www.maff.go.jp/j/seisan/gizyutu/hukyu/h_zirei/r4/attach/pdf/r4-173.pdf)
- 10) 永田雅靖, 渡邊高志, 荒木田尚広, 川村武, 福田弥生. サツマイモの低温感受性遺伝子と貯蔵に伴う発現パターンの変動について. 日本食品保蔵科学会誌. 2021,47, 6, p. 277-283.
- 11) 藏之内利和, 中村善行, 高田明子, 田宮誠司, 中谷誠, 熊谷亨. サツマイモ蒸切干加工用品種の収量・品質関連形質に及ぼすマルチ被覆および気象の影響. 日本作物学会紀事. 2010, 79, 4, p. 491-498.
- 12) 中村善行, 藏之内利和, 石田信昭, 熊谷亨. サツマイモ蒸切干の中白障害「シロタ」発生に関わる塊根のでん粉および水分の含量. 日本作物学会紀事. 2007, 76, 4, p. 576-585.
- 13) 荒木田尚広. 干しいも用品種「タマユタカ」の優良系統選定の取組みと今後の産地のあり方. いも類振興情報. 2016, 126, p.6-5.
- 14) サツマイモサトイモ大事典. 農文協. 2026, p.396.

【短報】

【令和7～8年度 県単独試験研究】

イチゴ「ころろんベリー」の果実特性の調査 ー 県特産品及び県育成新品種の特性評価と利用拡大に向けた検討 ー

今野 知佐子、佐藤 信行^{*1}、畑中 咲子
食品バイオ技術部（^{*1}現 企画・事業推進部）

「ころろんベリー」は、極大果で食味の優れる多収品種であり、「もういっこ」、「にこにこベリー」に続く育成品種として、令和8年冬の販売開始に向け準備中である。そこで、消費拡大、品質安定化につなげることを目的に、品種特性及び生産流通において重要な収穫後の硬さや色の経時変化について厳冬期（12月、1月）の果実を用いて調査した。その結果、食感の硬さは県育成3品種の中で最も軟らかく、ジューシー感が高いこと、香りには果物のようなフルーティー香を持つ低分子の香気成分の種類が多く含まれていることが明らかになった。収穫4日後までの調査では、果皮色の変化量は小さく、果皮硬度は「もういっこ」と同等で4日後でも変わらない結果となり、流通適性は「もういっこ」と同等と考えられた。

キーワード：イチゴ、「ころろんベリー」、食味、食感、香り、果皮色、硬度

1 緒言

イチゴは宮城県において、園芸作物の中で最も産出額が大きく、令和8年3月に見直されたみやぎ園芸特産振興戦略プラン(R8～R12)においては、「最重点振興品目」として、100億円産地に向けた技術向上と産地拡大が進められている¹⁾。さらなる生産拡大に向け、令和5年に宮城県農業・園芸総合研究所において極大果で食味の優れる多収品種「みやぎi3号」が育成され^{2) 3)}、令和7年12月に「ころろんベリー」として商標登録された。現在、新たな地域ブランドとして令和8年冬の店頭販売に向け、栽培データの収集及び普及戦略の構築が進められている。

近年、各県の独自品種が次々に開発され、「ころろんベリー」同様大玉で良食味の品種がトレンドとなっており、数多い品種の中から消費者に選ばれるためには、その特性をアピールしていくことが必要である。また、収穫後の硬さや色など、流通に関わる特性把握も重要である。

そこで、本研究では、消費拡大、品質安定化につなげることを目的に、外観、食感、食味といった消費者目線での品種特性、また、生産流通において重要な収穫後の経時変化について調査することとした。品種特性については、外観（果形及び果皮色）、食味（糖度、酸度及び糖含量）、食感（果皮及び果肉硬度、ジューシーさ）、香りについて、収穫後の経時変化については、宮城県農業・園芸総合研究所による生産者へのアンケートで、果実が「やわらかい」、「黒くなる」との声があった

ので、硬さや色について調査を行った。今年度は厳冬期である12月、1月に収穫したイチゴについて調査を行ったので報告する。

2 材料及び方法

2.1 品種特性調査（試験1）

2.1.1 イチゴ試料

試料は宮城県農業・園芸総合研究所のハウスで促成栽培されたものを用いた。

供試品種は「ころろんベリー」、対照として「もういっこ」を用いた。各品種とも正常果の完熟果実（全国農業協同組合連合会宮城県本部発行の「仙台いちごカラーチャート」7～8分着色の4番）とし、食感調査には「にこにこベリー」（完熟果実、4番）も対照として用いた。

調査は令和7年12月22日及び令和8年1月8日に収穫した試料を用いて、収穫1日後に調査を行った。

調査に供するまでは、生産者が収穫後出荷まで予冷库で保管しておくことを想定して同等の温度である7℃（恒温振とう培養器BR-300LF、タイテック(株)）で保存した。

2.1.2 外観（果形及び果皮色）調査

「ころろんベリー」の育成に関する既報^{2) 3)}では、「果形は心臓型」とされているが、その出現程度については不明であったため、ハート形の果形の割合を調査した。「ころろんベリー」の果実について、最も左右対称となる

位置で縦に2等分した断面30果の写真を撮影し、ハート型か否かを産業技術総合センター職員23名に3段階（ハート型、どちらでもない、ハート型でない）のアンケート調査の結果を基に判定した。果皮色は「ころろんベリー」及び「もういっこ」10果について、既報⁴⁾のとおりに、分光測色計（コニカミノルタジャパン（株）、CM-700d）でD65光源、SCI方式、10°視野として、各果の果実陽光面赤道部、陽光面から180度回転した陽裏面赤道部を測定した。

2.1.3 食味（糖度、酸度及び糖含量）調査

「ころろんベリー」及び「もういっこ」各6果を縦に2等分し、一方を1果ずつ搾汁し、Brix及び酸度測定用の試料とした。残りは凍結乾燥（凍結乾燥機FD-550P、東京理化器械（株））し、乾燥前後の重量から水分含量を算出した。凍結乾燥後の試料は粉碎後糖分析に供した。

Brixはポケット糖酸度計（PAL-BX/ACID121、アタゴ（株））で果汁を測定することで評価した。酸度は電位差自動滴定装置（京都電子工業（株）、AT-710M）を用いて、果汁2 mlに蒸留水10 mlを加え0.1 mol/L NaOHでpH8.2まで滴定し、クエン酸に換算して求めた。

糖分析は既報⁴⁾のとおりに、凍結乾燥試料2 gに80 %エタノール水溶液20 mLを加え、15分超音波処理、遠心分離（4,000 rpm、10 min）で上清を得る作業を2回繰り返し50 mLに定容し抽出液とした。抽出液は0.22 µmのフィルターでろ過後10倍希釈して、高速液体クロマトグラフ（（株）日立ハイテクサイエンス、HPLC Chromaster）、蒸発型光散乱検出器（ELSD）で検出、定量した。

2.1.4 食感調査

食感の調査には、「ころろんベリー」、「もういっこ」、「にこにこベリー」を供試した。

遠藤らは貫入または圧縮試験によるイチゴ果実の硬度測定においてプランジャーの大きさ及び形状は測定値に影響すると報告している⁵⁾。この報告を参考に、果実硬度が高い品種と低い品種の値の差が大きくなるプランジャーとして、直径20 mm円盤型プランジャーを選択し、圧縮試験で食感の評価を試みた。

圧縮試験はクリープメーター（（株）山電、RE2-33005）を用いた。縦に2等分した果実の表面の赤道部にプランジャーが接触するようにし、ロードセル200 N、速度1 mm/secで測定した。果皮を破断したときの破断荷重を果皮の硬度とし、破断荷重ともろさ荷重の差を果肉硬度とした。各品種6果を測定した。

また、ジューシーさの評価として、堀江のトマトのジューシーさを評価した方法⁶⁾を参考に、果実の赤道部を中心に1 cm厚さの輪切りにしたものから5 g程度を採取してにんにく搾り器で搾り、果肉重量に対する搾汁液重量の割合を求めた。各品種3果を測定した。

2.1.5 香りの調査

Brix、酸度測定用に搾汁した6果分の果汁を等量ずつ合わせた後、果汁3 mlをバイアルに封入して香氣成分分析用試料とした。既報⁴⁾のとおりに、ガスクロマトグラフ質量分析装置（（株）島津製作所、GCMS-QP2020NX、以下GCMS/O）で推定した成分をもとに、ヘッドスペースガスクロマトグラフ（（株）島津製作所、HS-20/Nexis GC-2030、以下HSGC）、水素炎イオン検出器（FID）により検出した成分を推定し、定量した。

GCMS/Oの分析条件は、固相マイクロ抽出法（以下、SPME法）でSPMEファイバーは80 µm、DVB/C-WR/PDMS（（株）島津製作所）を使用し、吸着は50 °C、30分、脱着は240 °C、2分で行った。カラムはDB-WAX（内径0.32 mm×60 m、膜厚0.5 µm、アジレント・テクノロジー（株））、キャリアガスはヘリウムを用い、カラム温度40 °Cから240 °C、昇温速度4 °C/minで行った。

HSGCの分析条件は、50 °C、30分加温、カラムはDB-WAX（内径0.25 mm×10 m、膜厚0.25 µm、アジレント・テクノロジー（株））、キャリアガスは窒素を用い、カラム温度40 °Cから240 °C、昇温速度3 °C/minで行った。

2.1.6 食味試験（官能評価）

「ころろんベリー」及び「もういっこ」各8果程度を縦に4から6等分したものをを用いて食味試験を行った。センター技術職員13名で、「果皮色」、「香り」、「食感」、「味（甘み）」、「味（酸味）」、「甘味酸味のバランス」、「果汁感（ジューシーさ）」、「総合評価」について、「もういっこ」を3としたときの「ころろんベリー」の評価を5点上位の5点法にて行った。

2.2 収穫後の経時変化調査（試験2）

2.2.1 イチゴ試料

試験1と同じく令和7年12月22日に収穫した試料を用いて、収穫1日後、2日後、4日後に収穫後の経時変化を調査した。調査に供するまでは、2.1.1同様、7 °C（（株）フジマック、ブラストチラー&フリーザーFRBCT6）で保存した。

2.2.2 果皮色の変化

収穫1日後、2日後、4日後に収穫後の果皮色の経時変化を調査した。「ころろんベリー」及び「もういっこ」各日10果ずつについて果皮色を測定した。

2.2.3 硬度の変化

硬度は、収穫1日後、2日後、4日後にクリープメーター((株)山電、RE2-33005)を用いて測定した。イチゴ果実の硬度測定のための貫入試験で最も一般的に用いられているのは、直径2～3 mmの円盤、円柱型プランジャーであり、輸送試験における損傷発生と相関が高いとされている⁵⁾。既報⁴⁾に従い、ロードセル19.6 N、3 mm円柱型プランジャー、測定速度1 mm/secで、プランジャー先端を果実表面の赤道部に瘦果を避けて垂直に貫入させて果皮硬度、果肉硬度を求めた。果皮色の評価と同様に「ころろんベリー」及び「もういっこ」について評価した。

3. 試験結果

3.1 品種特性調査(試験1)

3.1.1 外観(果形及び果皮色)調査

「ころろんベリー」の果形について 30果の断面のうち、

評価者の半数以上がハート形ではないとしたものは7 %、明確にハート型としたものは53 %だった(図1)。今回の試験でどちらでもないと判断された果形は、左右対称性や果実先端へ向かうV字収束程度が若干劣る傾向にあった。今回は12月収穫の果実について調査したが、果形については栽培時期の影響も考えられ、時期別の検討が必要であると考えられた。

果皮色について、既報^{2) 3)}では果皮色は赤色で「もういっこ」よりも着色がやや濃く光沢は強いとされている。今回の試験においても、「ころろんベリー」は「もういっこ」と比べ、明度(L*)がやや低く、彩度(c*)が高くなり、赤色(a*)が濃く、鮮やかな傾向であった(表1)。

3.1.2 食味(糖度、酸度及び糖含量)調査

糖度、酸度の測定結果を表2に、糖含量の測定結果を図2に示す。「ころろんベリー」は「もういっこ」と比較して、糖度は同等、酸度はやや低めであった。

糖組成について、スクロース、グルコース、フルクトースの組成割合で示した(「にこにこベリー」は令和5年度同時期の試験結果より)。「ころろんベリー」は他2品種と比べ、スクロース割合が高い傾向にあった。安部ら⁷⁾は、



図1 「ころろんベリー」果実断面のハート形判定

○:半数以上の人が明確なハート型と判定したもの、16 個/30 個

×:半数以上の人がハート形でないとしたもの、2 個/30 個

表1 収穫1日後の果皮色の比較

	品種	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	彩度c*
陽 光 面	ころろんベリー	38.7 *	31.2 *	20.2 *	37.2 *
	もういっこ	40.9	27.2	16.5	31.9
陽 裏 面	ころろんベリー	41.0 *	31.8 *	21.8 NS	38.6 NS
	もういっこ	42.9	29.2	20.2	35.5

*はt検定で有意水準5 %で有意差があることを、NSは有意差が認められないことを示す。

表2 収穫1日後の糖度及び酸度の比較

品種	糖度 (Brix度)	酸度(%)	糖酸比
ころろんベリー	8.1 NS	0.55 *	14.7 NS
もういっこ	8.5	0.62	13.9

*はt検定で有意水準5 %で有意差があることを、NSは有意差が認められないことを示す。

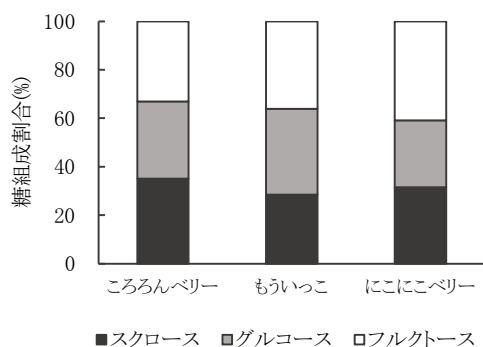


図2 糖組成割合

(にこにこベリーは令和5年度の試験結果より参考値)

グルコース、フルクトースはさわやかな甘みを、スクロースは濃厚な甘みを感じると言われているため、品種ごとの糖組成の違いが食味に影響を及ぼす可能性があると考えられ、今後時期別の検討も必要であると考えられた。

3.1.3 食感調査

各品種における果実の変形量と荷重の関係を図3、品種間の果皮硬度及び果肉硬度の比較結果を図4に示す。その結果、「ころろんベリー」は「もういっこ」、「にこにこベリー」と比較して、少ない変形量、小さい力で果皮が壊れ、果肉硬さも小さかった。食感の硬さについては、「ころろんベリー」<「もういっこ」<「にこにこベリー」の順となり、これらの果実を食べた時の硬さについてのアンケート評価(n=4、データ省略)とも一致した。

また、各品種の果肉重量に対する搾汁液重量の割合を図5に示す。その結果、搾汁液量は「ころろんベリー」が多く、ジューシーさについては、「もういっこ」=「にこにこベリー」<「ころろんベリー」の順となり、ジューシーさについてのアンケート評価(n=4、データ省略)とも一致した。

以上より、「ころろんベリー」は食感が他2品種に比べて軟らかく、ジューシー感が高いと判断された。メロン、蒸したニンジン、ナスなどで、糖含量は変化しなくても軟らかくジューシーなものの方がより甘味を感じることが報告されており⁸⁾⁻¹⁰⁾、「ころろんベリー」のジューシーさも食味に有利に働くと考えられた。

3.1.4 香りの調査

HSGCによる香気成分分析結果を図6に示す。また、GCMS/Oによる化合物推定結果をHSGCに適応した結果、図中①から⑭のような結果となった。これらから、「ころろんベリー」には果物のようなフルーティー香を持つ

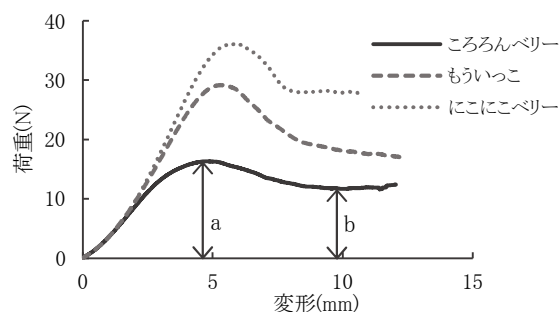


図3 圧縮試験における果実の変形量と荷重の関係 (直径 20 mm 円盤型プランジャー)

各品種6果平均値、果皮が壊れるときの荷重(破断荷重)aを果皮硬度、bを果肉硬度とした。

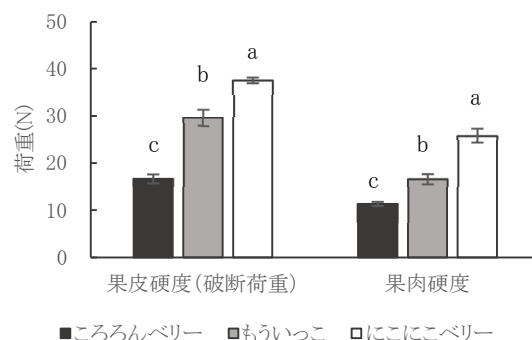


図4 各品種における果皮硬度と果肉硬度 (直径 20 mm 円盤型プランジャー)

異なる英小文字は tukey の多重検定で有意水準 5 % で有意差があることを示す。誤差線は標準誤差を示す。

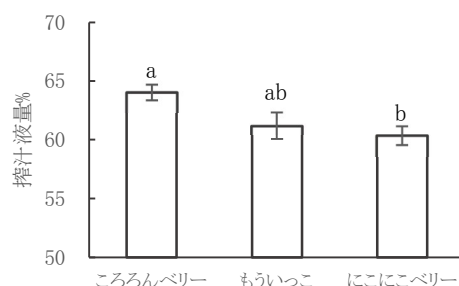


図5 各品種における果肉重量に対する搾汁液重量の割合

異なる英小文字は tukey の多重検定で有意水準 5 % で有意差があることを示す。誤差線は標準誤差を示す。

低分子の香気成分の種類が多く含まれており、「もういっこ」に比べ、①Ethyl Acetate(甘くてフルーティーな香り)、③Methyl Isobutyl Ketone(甘い香り)、④Butanoic acid, ethyl ester(バナナやパイナップルのようなフルーティー香)、⑤Ethyl isovalerate(リンゴやイチゴのようなフルーティー香)が多く含まれていることが明らかになった。一方、「もういっこ」では、⑦Hexanoic acid, methyl ester、⑨Hexanoic acid, ethyl esterのような中分子のフルーティーな香気成分のほか、⑥Hexanal、⑪trans-2-Hexenyl acetateといったグリーン香が多く含まれていた。

3.1.5 食味試験(官能評価)

食味試験のアンケート結果を図7に示す。「ころろんベリー」は「もういっこ」と比較した結果、「果汁感(ジューシーさ)」、「食感」の違いが大きかった。「果汁感(ジューシーさ)」は「もういっこ」の評価より高く、「食感」は低かった。「食感」については、小さめのカットした果実を用いたため、果肉部分が主となり、より軟らかく評価された可能性があったが、食味試験は3.1.3の食感調査の結果と同様の傾向となった。

3.2 収穫後の経時変化調査(試験2)

3.2.1 果皮色の変化

果皮色の測定結果(表3)、収穫4日後は1日後と比較して「ころろんベリー」、「もういっこ」ともやや赤く彩度が小さい方向に変化したが、見た目の変化量はわずかで、12月収穫の果実については、「黒くなる」とは判断できなかった。

3.2.2 硬度の変化

果皮硬度、果肉硬度の経時変化の評価結果(図8、図9)、「ころろんベリー」の果肉硬度は日数が経つとやや軟らかくなる傾向がみられたが、果皮硬度は「もういっこ」と同等で、4日後でも変わらない結果となった。「ころろんベリー」の流通適性は「もういっこ」と同等と考えられた。

4 結言

宮城県のイチゴ新品種「ころろんベリー」の消費拡大、品質安定化を目的として、厳冬期(12月、1月)に収穫したイチゴの品種特性及び収穫後の経時変化を調査した結果、以下のことが明らかとなった。

・糖度、酸度及び糖含量について、「もういっこ」と比較して、糖度は同等、酸度はやや低め、糖組成はスクロース割合が高い傾向にあった。

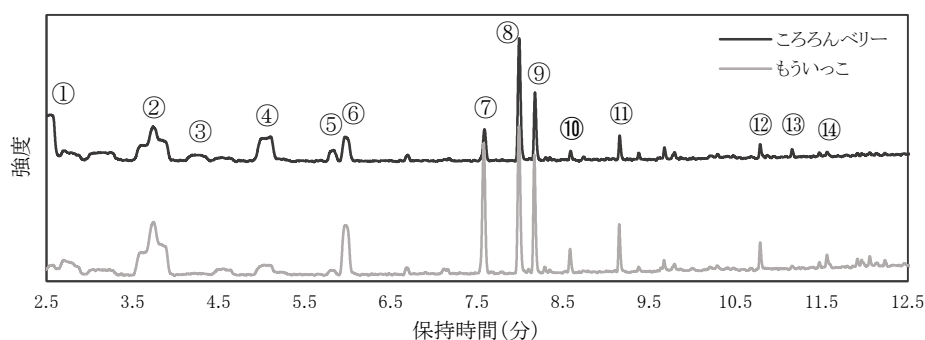


図6 HSGCによる香気成分分析結果

- ①Ethyl Acetate ②2-Pentanone ③Methyl Isobutyl Ketone ④Butanoic acid, ethyl ester
⑤Ethyl isovalerate ⑥Hexanal ⑦Hexanoic acid, methyl ester ⑧2-Hexenal ⑨Hexanoic acid, ethyl ester
⑩Acetic acid, hexyl ester ⑪trans-2-Hexenyl acetate ⑫Linalool ⑬Mesifurane ⑭Farnesene



図7 食味試験結果

「もういっこ」を3としたときの「ころろんベリー」の比較

表3 収穫1日後と4日後の果皮色の比較

	品種	ΔL^*	色相差 ΔH^*	彩度差 Δc^*	色差 ΔE^*
陽 光 面	ころろんベリー	-0.16	-4.37	-1.65	3.28
	もういっこ	-1.30	-5.65	-2.10	3.95
陽 裏 面	ころろんベリー	0.58	-3.49	-0.50	2.61
	もういっこ	-0.49	-4.93	-2.79	4.10

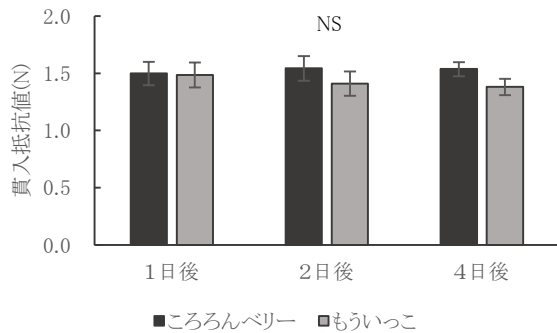


図8 収穫1、2、4日後の果皮硬度の比較
(直径3mm 円柱型プランジャー)

NSはtukeyの多重検定で有意水準5%で有意差が認められないことを示す。誤差線は標準誤差を示す。

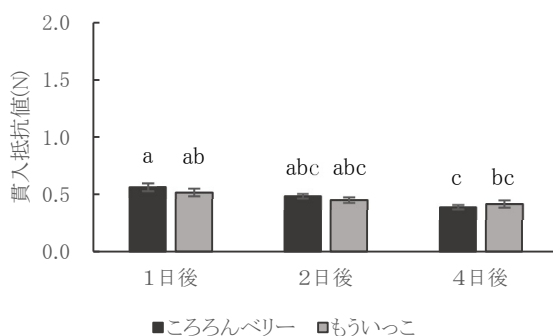


図9 収穫1、2、4日後の果肉硬度の比較
(直径3mm 円柱型プランジャー)

異なる英小文字はtukeyの多重検定で有意水準5%で有意差があることを示す。誤差線は標準誤差を示す。

・圧縮試験で測定した食感の硬さ及びジューシーさの評価について、「もういっこ」及び「にこにこベリー」に比べて食感が軟らかく、ジューシー感が高く、これらは食味試験と同様の傾向を示した。

・香りの評価について、果物のようなフルーティー香を持つ低分子の香気成分の種類が多く含まれており、フレッシュなフルーティー香が特徴であると考えられた。

・収穫後の経時変化について、果皮色の変化量は小さく、果皮硬度は「もういっこ」と同等で、4日後でも変わらない結果となり、流通適性は「もういっこ」と同等と考えられた。

これらについては、今後予定している春季の調査結果と合わせて検討が必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、農業・園芸総合研究所の皆様にはサンプリングにご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献、引用URL

- 1) みやぎ園芸特産振興戦略プラン(R8～R12) . 2026, p.21-26. (<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/engei/engeisinkou.html>)
- 2) 尾形和磨, 相澤正樹, 菊地友佳里, 鈴木俊矢, 斎藤健志, 高山詩織, 櫻井晃治. 極大果イチゴ品種「みやぎi3号」の育成. 農業・園芸総合研究所研究報告. 2024, 91, p.1-10.
- 3) 極大果イチゴ新品種「みやぎ i3号」. 宮城県「普及に移す技術」. 2023, 99, p.4-9.
- 4) 高山詩織. イチゴ「にこにこベリー」の収穫後の成分変化と輸送試験ーイチゴ「にこにこベリー」のケーキ用としての特性評価と利用拡大に向けた検討ー. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2025, 22, p.19-25.
- 5) 遠藤(飛川)みのり, 曾根一純. プランジャーの径および形状が貫入または圧縮試験によるイチゴ果実の硬度測定値に及ぼす影響. 美味技術学会誌. 2025, 24,1, p.28-37.
- 6) 堀江秀樹. 生食のおいしさリスク 第2章第3節第2項 生野菜の食味食感評価. NTS. 2013, p.251-258.
- 7) 安部良樹, 佐野一成, 高木喜保, 鶴岡克彦, 櫛野智也. イチゴ新品種の流通加工品質向上に関する研究. 大分県産業科学技術センター研究報告. 2019, p.1-4.
- 8) 堀江秀樹, 平本理恵. ニンジン蒸し加熱による甘味強化. 日本調理科学会誌. 2019, 42, 3, p. 194-197.
- 9) 平井剛. メロンの「おいしさ」を考えるー官能評価からわかることー. 農耕と園芸. 2007, 11, p. 24-26.
- 10) 堀江秀樹, 安藤聡. 調理を考慮したナスの品種特性評価. 野菜茶業研究書研究報告. 2014, 13, p. 9-18.

【短報】

【令和7年度～令和8年度 県単研究】

吟醸用宮城酵母泡無し株の開発

池田 匠、吉村 緑、中村 佳与、小山 誠司
食品バイオ技術部

吟醸用宮城酵母(通称”A酵母”)は宮城県酒造組合が県内の酒造場から分離した酵母菌株で、県内酒造場でよく利用されている。この酵母は酒母や醪で高泡形成する「泡あり酵母」であるため、泡無し変異株取得が求められてきた。昨年度は泡無し変異株の取得法を検討し、酸性シュガーエステル法によって泡無し候補株を取得した。今年度は取得した泡無し変異株について、シュガーエステル凝集法により77株まで候補株を選抜し、小仕込み試験によりその全株が高泡非形成株であることを確認した。さらに各種資化性試験、簡易検定試験により43株まで選抜した。

キーワード:吟醸用宮城酵母、泡無し化

1 緒言

吟醸用宮城酵母は宮城県酒造組合が県内の酒造場から分離した酵母で、県内各酒造場で広く普及している菌株の一つである。この酵母は醪で高泡形成する「泡あり酵母」であったため、2000年前後、既報¹⁾²⁾により泡無し変異株の取得が試みられてきたが達成できなかった。これは吟醸用宮城酵母の細胞壁上に何らかの、他の「泡あり酵母」とは異なる構造があることに由来すると推測されている。本研究では、昨年度、セライト吸着法、シュガーエステル(以下、SE)凝集法、有機溶媒分配法等の手法により泡無し変異株の取得に取り組み、低pH下でSE凝集を行うこと(酸性SE法)により取得された変異株が、泡無し標準株として用いた日本醸造協会清酒用601号、同701号、同901号と同様の挙動となることを報告した³⁾。今年度は、取得した変異株について小仕込み試験による高泡非形成の判別と、β-アラニン培地及び炭素源資化性培地での増殖性を確認し選抜を行ったので報告する。

2 実験方法

2.1 実験材料、調製法

酵母菌株は、当センター保有の吟醸用宮城酵母(MY95 株)、宮城マイ酵母(MY3102 株、泡無し株MY3216 株)と本研究課題³⁾で分離された250株、公益財団法人日本醸造協会の清酒用7号酵母(以下、協会7号)および清酒用701号酵母(以下、協会701号)を用いた。寒天、酵母エキス、酵母窒素ベース・アミノ酸/

硫酸アンモニウム不含(以下、YNB)、およびペプトンは日本ベクトン・ディッキンソン株式会社、TTC培地(上層・下層)については公益財団法人日本醸造協会、β-アラニン培地は日水製薬株式会社のものを、その他の試薬については富士フィルム和光純薬株式会社製の試薬特級またはそれに準ずるものを使用した。ショ糖脂肪酸エステル(以下、SE)については三菱ケミカル株式会社のリョートー®シュガーエステル P-1570 を使用した。α米、乾燥麹は徳島製麹株式会社のものを使用した。水、調製した培地及び水溶液は、121℃、20分間加熱蒸気滅菌し使用した。SE水溶液及びYNB水溶液についてはアドバンテック東洋株式会社の孔径0.2μm滅菌済みDISMIC®-25CSにてろ過滅菌し使用した。

2.2 SE凝集法

大内らの方法²⁾を改変して行った。即ち供試菌株をYPD培地(1%酵母エキス、2%ペプトン、2%グルコース)3mLに植菌し、20℃で2日間培養した。その培養液に0.25%SE溶液0.3mLを添加して1分間攪拌したのち、500rpm、5分間遠心して、その上清を純水で2:3の比で希釈した液の600nmにおける吸光度を測定した。選抜基準は、吟醸宮城酵母の培養液を同様に処理した希釈液の吸光度の2倍以上とした。

2.3 小仕込み試験

泡無し性確認のため、岩本ら⁴⁾の方法に準拠して小仕込み試験の条件検討を行った。YP培地(2%グルコ

ース、0.5 % 酵母エキス、0.5 % ペプトン、0.1 % リン酸二水素カリウム、0.02 % 硫酸マグネシウム)10mL にディスポールプ(1μL)を使用して酵母を約 1 μL 植菌し、20 °C で 4 日間培養した。この培養液 10 mL を滅菌した 300 mL 容トルビーカーに α 米、または蒸米とともに、麴米、水、乳酸を表 1 の通りに加え、25 °C で 5～7 日間培養した。高泡形成の有無は目視により判別した。蒸米については、白米 64 g を計量した後、9 分間水に浸漬し、6 分水切り、24 時間冷蔵庫(5 °C)での保管を経て、50 分間蒸すことで調製した。

表1 小仕込み試験配合表

	α 米 (g)	蒸米 (g)	麴米 (g)	水 (mL)	50 %乳酸 (mL)
①	70		20	120	0.16
②	70		20	140	0.18
③	70		20	160	0.20
④		91	20	119	0.16
⑤		91	20	139	0.18
⑥		91	20	159	0.20

2.4 MY95株との同一性の確認

2.4.1 炭素源資化性試験

資化性確認用培地(0.17 % YNB、1.7 % 寒天、0.5 % 硫酸アンモニウム、炭素源として、0.5 % のガラクトース、マルトース、ラフィノース、トレハロース、または 2.0 % 乳酸)に、ディスポールプを使用して、約 1 μL 分の酵母を 1 mL の水で懸濁した液をスポットし、20 °C で 1 週間培養した。培地上の増殖の有無または遅延を対照株と比較して目視で判断した。

2.4.2 清酒酵母簡易検定試験

清酒酵母の検定については2,3,5-トリフェニルテトラゾリウムクロリド(以下、TTC 重層法⁵⁾及びβ-アラニン試験⁶⁾で確認し、いずれも常法に従い行った。

3 実験結果及び考察

3.1 SE凝集法による泡無し候補株の選抜

初めに、SE凝集法を用いて、既存の泡あり/泡無し酵母の吸光度による判別が可能か確認した。協会7号、協

会701号、宮城マイ酵母、宮城マイ酵母泡無し株をそれぞれ培養し、2.2 に従って、600 nm における吸光度を測定したところ、協会701号は協会7号の5.98倍、宮城マイ酵母泡無し株は泡あり株の2.26倍であった。予備的に、泡無し候補株のうち20株について同様に吸光度を測定したところ、全て選抜基準の2倍を上回っており、令和6年度報告³⁾で記載した有機溶媒分配法での判別結果と一致した。よって、SEを用いた泡あり/泡無しの選抜は有効であると判断した。残りの株の培養液にSE溶液を加えて低速遠心後、上清の希釈液の吸光度を測定したところ、77株が2倍以上となったため、これらを次の確認試験に供することとした。

3.2 小仕込み試験

3.1で選抜した株について、醪中で高泡を形成しないか確認するため、小仕込み試験を実施した。予備的に実施した小仕込み試験結果では高泡の有無を確認できず、その原因は気泡吸着性の弱さが関係していると考えられた。そこで、泡無し性を明瞭に判断できる小仕込み試験の条件検討を行った。

岩本らの方法に従いα米(表1の①～③)で小仕込み試験を行ったが、高泡形成の有無を目視で確認できなかった。近年の高温障害の影響により平年よりα米原料のデンプン構造が変化して、醪中で溶けにくくなり、それが高泡形成に影響していることが考えられた。そこで、高温障害の影響を受けていないと考えられる平成20年産山田錦(精米歩合50 %)を使用して、表1の④～⑥の配合で小仕込みを行ったところ、⑥の配合で吟醸用宮城酵母の高泡形成の有無の判別が可能なが確認された(図1)。

そこで、得られた選抜株の高泡形成の有無を判別するため、この配合⑥で小仕込み試験を行った結果、全ての株で高泡が確認されず、泡無しまたは低泡性の酵母が取得されたと判断した。



図1 小仕込み試験による高泡形成の有無
左から吟醸用宮城酵母、協会7号、協会701号

3.3 MY95株との同一性の確認

MY95株との同一性の確認のため、炭素源資化性試験及びTTC重層法、 β -アラニン試験を実施した。ガラクトース、ラフィノース、あるいはトレハロースを唯一の炭素源とした場合、あるいはTTC重層法ではMY95株と比較して目立った差異は見られなかったもののマルトースや乳酸を唯一の炭素源とした培地で増殖させた場合や β -アラニン試験では34株にMY95株との違いが確認された。これらについては何らかの原因により親株の性質とは異なるものと疑われたため、これらを除いた43株を次期選抜試験の対象株とした。

4 結言

本研究では、吟醸用宮城酵母泡無し候補株の取得および選抜を行った。

- 1) 高泡形成の有無を判別するためにSE凝集法を実施、77株が選抜された。小仕込み試験を実施したところ、選抜株すべてが泡無し性または低泡性であることが確認された。
- 2) この選抜株について、TTC重層法、 β -アラニン試験、炭素源資化性試験によりMY95株との同一性を確認した結果、43株を次期選抜試験の対象株とした。

以上より、吟醸用宮城酵母泡無し株の候補43株が得られた。

参考文献

- 1) Kozo Ouchi, Hiroichi Akiyama, Non-Forming Mutants of Sake Yeasts Selection by Froth Flotation Method. *Agr.Biol.Chem.* 1971, Vol.35, No.7, p1024 - 1032
- 2) 大内弘造, 布川弥太郎. 清酒酵母泡なし変異株の新選抜法. 日本醸造学会誌. 1972 年. 67 巻. 1 号. p.54-57
- 3) 池田匠, 今野智佐子, 小山誠司. 吟醸用宮城酵母泡無し株の取得-県産清酒多様化のための酵母開発-. 令和6年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2025. p.27-30
- 4) 岩本恵梨子, 上野汐梨, 松本茜, 古田歩, 宮岡俊輔, 谷本昌太. 「さくらひめ」から分離した酵母の泡なし化とその醸造特性, 県立広島大学地域創生

学部紀要, 2024, 3号

- 5) 古川敏郎, 秋山裕一. 清酒醸造の微生物学的管理 (第4報) TTC重層法による酵母の分別について (1). 日本農芸化学会誌. 1963 年. 第37 巻. 第7 号. p398-402
- 6) 菅間誠之助, 山川浩一郎, 瀧岡巖一, 山村紘司, 野白喜久雄. 酒造場酵母について (第2報) 無機窒素源におけるパントテン酸要求性. 日本醸造協会誌. 第60 巻. 第5 号. p453-456

【ノート】

【ノート】

【令和7年度 先端技術等調査研究事業】

流体計測および可視化技術を活用した製品開発の高度化

野口 暁人、吉川 穰
自動車産業支援部

流れの可視化・計測手法である粒子画像流速測定法(PIV)を習得するため、汎用の半導体レーザや加熱式スモークマシンなどを組み合わせた簡易PIVシステムを構築した。PCファンが作る5 m/s以下の流れを計測対象として、粒子画像の撮影には既設ハイスピードカメラを用い、速度場の解析にはオープンソースソフトウェアであるOpenPIVを利用した。PIVと熱線流速計の測定値を比較したところ定性的には良好な一致が見られ、簡易的な構成であっても流れの時空間構造の概要把握にPIVが有用であることを確認した。

キーワード：粒子画像流速測定法、熱線流速計、周波数解析

1. 緒言(背景・目的)

当センターでは、流体機械の設計・開発、流体现象の把握に向けて、商用の数値流体解析ツールを活用した技術支援を行っている。平成9年の導入時には、ファンの気流解析や発熱体の伝熱解析など、気体または液体の単相流れを対象とした数値シミュレーションに対応してきた。近年では、混相流れにも対応すべく、令和3年度から2年間で気液二相流れのシミュレーション技術¹⁾、令和5年度からの2年間で凝固を伴う液体の流動シミュレーション技術²⁾を培ってきた。このように数値シミュレーション技術の習得に取り組んできたが、実測値との定性的な一致は確認できても、定量的に一致させることは困難な場合がある。そのため、流体现象の解明に対しては、数値シミュレーションだけでなく、実験的にも調査を行い様々な視点から現象を捉えることが必要であり、今後は数値シミュレーションと実験を相補的にすることが重要であると考えている。

こうした背景から、当センターでは、令和3年度に数値シミュレーションの検証を目的に熱線流速計を導入した。熱線流速計は時間応答性に優れることから、乱流のような非定常流れの計測³⁾に古くから利用されてきたセンサである。一方で、近年では画像解析技術やコンピュータの性能向上により、ハイスピードカメラを用いた流れの可視化・計測手法である粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, PIV)⁴⁾が多く利用されている。PIVは熱線流速計と比較して、時間分解能では劣るものの、速度の空間分布を一度に取得できる手法である。可視化・計測結果からは、

流れの全体構造を視覚的に詳細に把握可能であり、数値シミュレーションの比較検証にも活用しやすいため、当センターでも注目している技術である。

そこで本研究では、PIVに関する基礎技術の習得を目的として、汎用半導体レーザなどを用いた簡易PIVシステムを構築し、実際にPCファンが作り出す5 m/s以下の低速流れを可視化・計測することで、PIVに必要な機器から解析方法までを学んだ。計測値については熱線流速計の結果と比較し、PIVの誤差要因について考察した。

2. 調査内容

2.1. PIV の測定原理

PIVは、レーザ光シートを照射した断面における微細粒子の散乱光をデジタルカメラで捉え、連続する2画像から解析される粒子の移動量をもとに、二次元速度場を計算する流れの可視化・計測手法である。PIVを行うには、図1に示すように、トレーサ粒子、レーザ光源、シート光学系、デジタルカメラが最低限必要である。

PIV ではトレーサ粒子の動きから速度を計算するため、流れに追従するトレーサ粒子が必要となる。粒子の流れへの追従性が悪い場合、流体の流れと粒子の動きに乖離が発生し誤差の要因となる。追従性は代表速度 U 、代表長さ L 、粘性係数 μ 、粒子密度 ρ_p 、粒子直径 d_p で定義されるストークス数 $St = \rho_p d_p^2 U / 18 \mu L$ で評価され、 St が小さいほど粒子は流れに追従しやすい。作動流体が気体の場合には、ラ

スキンゾル⁵⁾を用いて霧化したグリセリン水溶液やセバシン酸ジオクチル、液体の場合には、酸化チタン、アルミニウム、ポリエチレン、ガラスビーズなどの微粒粉が用いられることがある。

光源には主にレーザが用いられる。光源から照射されるビームをシート状に変換するには、ビームエキスパンダおよびシリンドリカルレンズを用いた光学系の他、高速でレーザ光を揺動させるガルバノミラーやポリゴンミラーが用いられる場合がある。

撮影にはデジタルカメラが用いられる。例えば、高フレームレートで撮影可能なハイスピードカメラや、2フレームを連続して撮影可能なダブルフレームカメラがある。これらのカメラはフレーム時間間隔を正確に短く設定できるため便利である。一方、低フレームレートのカメラであっても、レーザ発振と撮影のタイミングを適切に制御するフレームストラドリングを行うことでPIVが可能であるが、この場合は正確な信号同期が必要である。

粒子の移動量は、2画像の相互相関係数に基づいて解析される。相互相関係数は、2画像のずれ量に対する類似度を表現しており、相関のピーク位置を調べることで、粒子の移動量を推定することが出来る。具体的には、図2のように、画像を32 pixel × 32 pixel程度の小領域に分割し、各領域における粒子パターンの移動量と2画像の撮影間隔から速度を計算する。

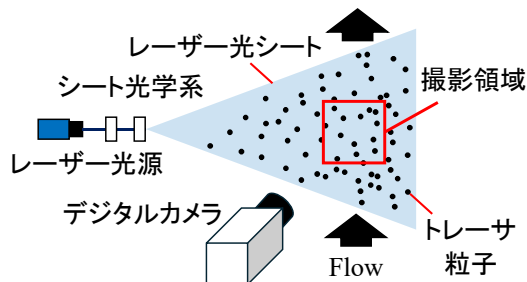


図1: PIVに用いる撮影系の概略図

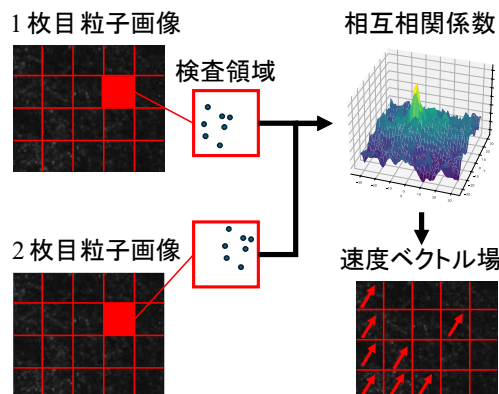


図2: PIVの解析概要

2.2. PC ファンによる吐出流れの概要

本研究で使用したPCファンは図3の通りである。座標系は、PCファン出口中心を原点とし、向きは図3、図4に示す方向に設定した。 x 、 y 、 z それぞれの速度成分を u 、 v 、 w 、時間平均速度を $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ とした。ファンの中央部には約 $\phi 20$ mmのハブおよびモータの筐体がある。翼は外周開口部にあり、翼が回転することで $+x$ 方向に空気が押し出される構造となっている。PCファンの回転周波数 N は6500 rpm、羽枚の数 Z は7枚、ケーシング外形寸法は40 mm × 40 mmである。PCファンには、 $+y$ 方向を0 deg.としてサポート1があり、反時計周りに120 deg.、240 deg.の位置にサポート2、3が配置されている。

PIVとの比較・検証用に、 $x = 10$ mm、 -30 mm $\leq y \leq -10$ mmおよび 10 mm $\leq y \leq 30$ mmの範囲を2 mm間隔で熱線流速計(Smart CTA 7250、日本カノマックス)を用いた速度計測を行った。プローブには速度2成分の同時計測が可能なX型熱線プローブを使用した。まず、図4のように x 軸に平行に設置し速度 u 、 v を測定した。 $y = 18$ mmにおいて、 $\bar{u}$ は4.2 m/sであり、 $\bar{v}$ は0.7 m/sであった。次に、X型熱線プローブを x 軸に平行のまま、 y 軸から z 軸に向かって90度回転させ速度 u 、 w を測定した。その結果、 $y = 18$ mmにおいて $\bar{w}$ は2.6 m/sであり、PCファンが作り出す流れが三次元的であることを確認した。

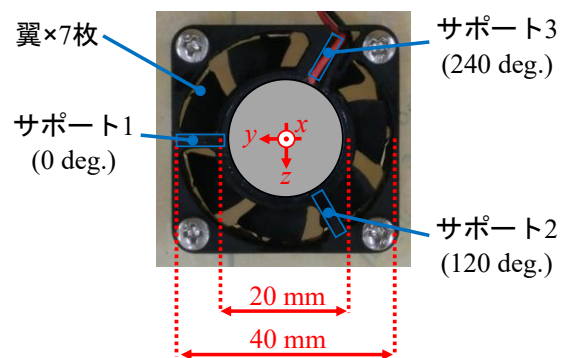


図3: PCファン

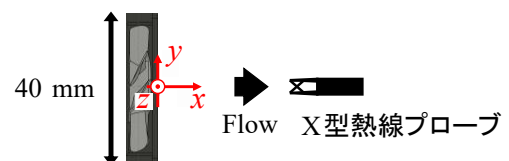


図4: PCファンの座標系

2.3. 簡易PIVシステムの構築および撮影条件

本研究で構築した簡易PIVシステムを図5に示す。トレーサ粒子には、加熱式スモークマシン(ケニス社製、L400WFLG)で霧化したグリセリン水溶液(ケニス社製、FLG-1)を利用した。光源には出力4.75 W、波長445 nmの半導体レーザー(Civil Laser社製、青レーザーモジュール)を利用した。シート光学系には、焦点距離40 mmの凹レンズと焦点距離80 mmのシリンドリカルレンズを用い、 $z = 0$ の xy 平面にレーザー光シートを照射した。この時、光シートの最小厚みは約1 mmであった。カメラにはハイスピードカメラ(Photron 社製、FastCam MINI AX200)を用い、焦点距離100 mmの単焦点レンズ(ケンコートキナ社製、atx-i 100 mm F2.8 FF MACRO)を装着した。レンズのF値は2.8とした。

ハイスピードカメラの撮影条件は、2画像の粒子移動距離が15 pixel以下、露光中の粒子の移動量が2 pixel以下となるように、60 mm × 60 mmの領域を解像度は768 pixel × 768 pixel、フレームレートは10,800 fps、露光時間は0.02 msと設定した。

ハイスピードカメラで取得した粒子画像をもとに、二次元速度場 u 、 v を計算した。解析にはオープンソースソフトウェアであるOpenPIV⁶⁾を用い、検査窓の大きさは32 pixel × 32 pixelとした。算出した速度場に対して時間平均を施し、流れの特徴的な空間構造を可視化した。また、速度変動 $\Delta u = u - \bar{u}$ に対して高速フーリエ変換(Fast Fourier transform、FFT)を用いた周波数解析を行い、速度変動のパワースペクトルを確認することで、流れに特徴的な速度変動周波数の特定を試みた。

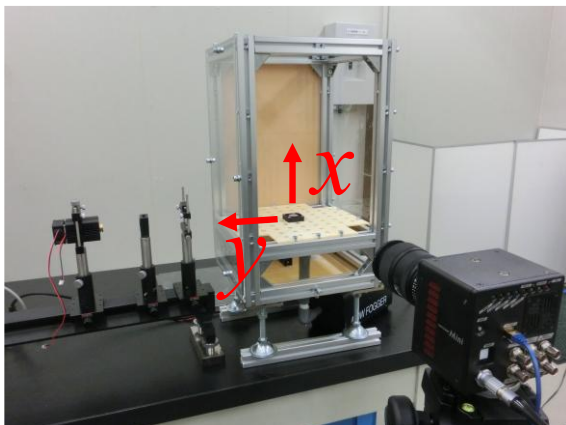


図5-1: 全体像

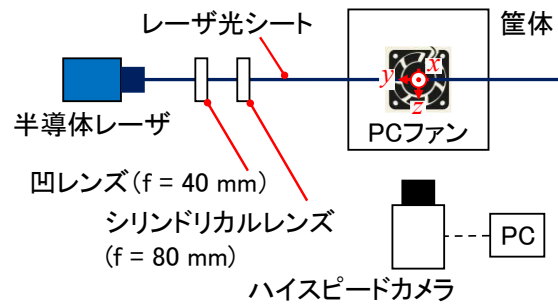


図5-2: 概要図

図5: 簡易PIVセットアップ

3. 調査結果

3.1. 時間平均速度場

$z = 0$ mmの xy 平面における時間平均速度について、速度成分のコンター図およびベクトル場を図6に示す。まず、図6-1の $\bar{u}$ 分布では、ハブとモータの直下流にあたる $-10 \text{ mm} \leq y \leq 10 \text{ mm}$ の領域で低速領域が形成された。開口部の $y = \pm 20 \text{ mm}$ 近傍からは、下流に向かって x 軸に対して非対称な放射状の高速領域が形成された。 $y \geq 0$ mmの領域においては、 $x = 10 \text{ mm}$ 付近で $\bar{u}$ は極大となり、下流に向けて徐々に減速した。一方、 $y < 0$ mmの領域では、開口部下流の $x = 5 \text{ mm}$ 付近で $\bar{u}$ は極大となるが、その下流で急激に減速した。ここで、図6-2の $\bar{v}$ 分布を見ると、 $10 \text{ mm} \leq x \leq 30 \text{ mm}$ の領域で $+y$ 方向へ向かう流れが発生していた。図6-3のベクトル図からも、 $y < 0$ mmの開口部から噴出する流れが $10 \text{ mm} \leq x \leq 20 \text{ mm}$ の領域で中心部に流入する様子が確認できた。中心部への流入は、ハブ・モータ直下で負圧領域が形成されているためであり、非対称な速度場の形成はサポート位置の非対称性に起因するものと考えられるが、物理的なメカニズムの解明には、他断面の速度場やハブ・モータ筐体表面の圧力など、追加の計測が必要であると考えている。

次に、 $\bar{u}$ 分布の $x = 10 \text{ mm}$ におけるプロファイルを、熱線流速計の測定結果とともに図7に示す。PIVで計測されたプロファイルの形状は、熱線流速計のそれと同様の傾向を示した。一方で、プロファイルの最大値は熱線流速計では4.4 m/sであったのに対して、PIVでは3.1 m/sであり、速度が小さく評価された。この原因としては、粒子画像の輝度不足と流れの三次元性が考えられる。PIVの画像解析では、連続する2画像から粒子の移動量を計算するため、2画像に共通す

る粒子を明瞭に撮影することが重要となる。そのため、撮影の輝度が不足し粒子とノイズの区別がつかない場合には、相互相関係数のピークが不明瞭になり、速度の誤差要因になり得る。また、流れに三次元性があり、シート面に対して奥行き方向の面外速度がある場合、シート面から粒子が発生・消失するため、2画像に共通する粒子を撮影することができない。この場合にも輝度不足の時と同様の理由で誤差が発生する。本研究においては、広い範囲の撮影を試みたため照明強度を十分確保できなかったこと、シート面に垂直な速度 w が存在することの2つが主な誤差要因と考えている。

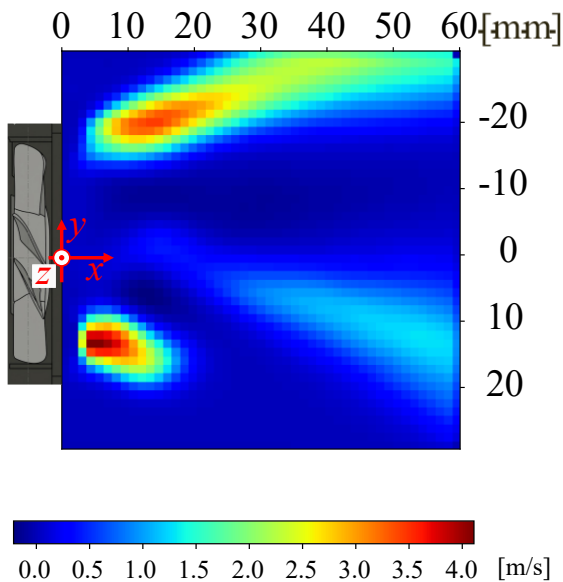
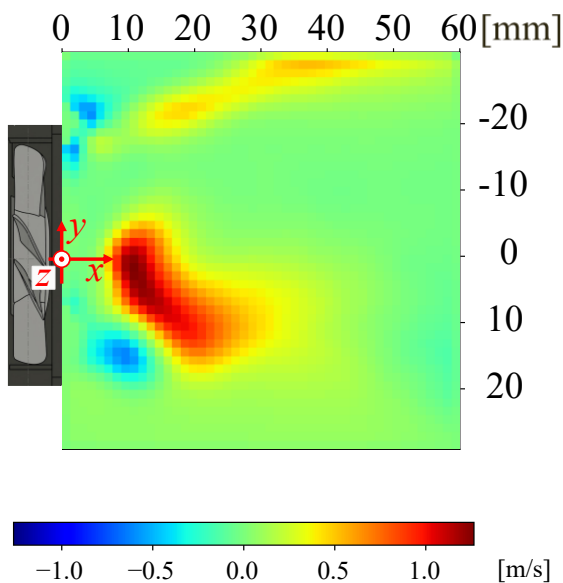
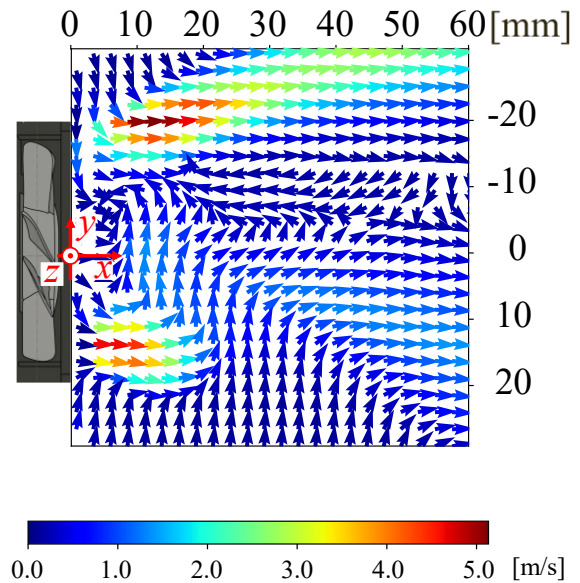
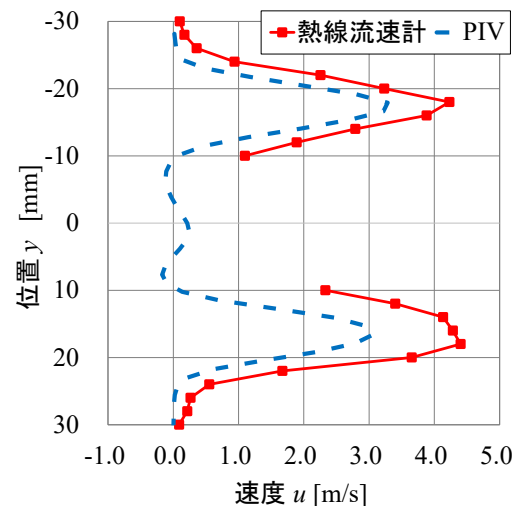
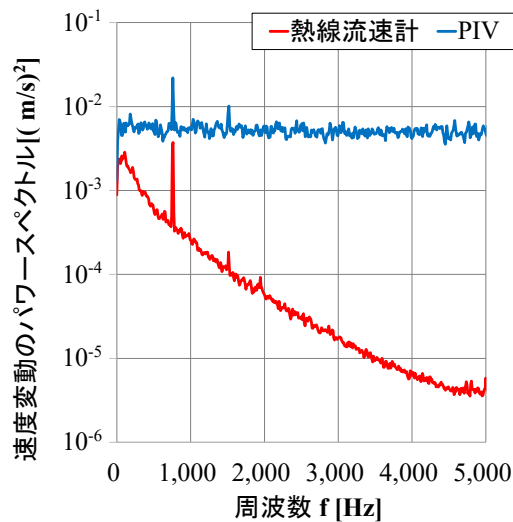
図6-1: 時間平均速度 $\bar{u}$ 分布図6-2: 時間平均速度 $\bar{v}$ 分布

図6-3: 時間平均ベクトル場

図6: 時間平均速度場 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 図7: $x = 10$ mmにおける速度 $\bar{u}$ のプロファイル

3.2. 速度変動のパワースペクトル

$\bar{u}$ が極大となる $x = 10$ mm、 $y = 18$ mmの位置における速度変動のパワースペクトルを図8に示す。PIVと熱線流速計のいずれのスペクトルにおいても、周波数 f が約750 Hzと約1500 Hzでピークが確認された。第一ピークは、ファンの回転周波数 N と翼枚数 Z の積で定義される、翼通過周波数 $f_{\text{BPF}} = N \times Z = 758$ Hzと良く一致しており、第二ピークはその倍音成分であると考えられる。第一ピークにおける、両者の変動強度および周波数に注目すると、強度の絶対値については定量的に一致していないものの、ピーク周波数については良好に一致することが確認できた。



(Version 0.25.3)," 2024. [Online]. Available:
<http://doi.org/10.5281/zenodo.5009150>.

図8: $x = 10 \text{ mm}$ 、 $y = 18 \text{ mm}$ における速度変動 Δu のパワースペクトル

4. 結言

半導体レーザなど汎用機器を利用した簡易PIVシステムを構築し、PCファンが作り出す5 m/s以下の低速流れを対象として可視化・計測を行った。構築した簡易PIVシステムでは、速度の定量評価は困難であるものの、熱線流速計の測定結果と定性的に一致した速度データを取得できたため、流れ場の概略把握に活用できることが確認された。今回はPCファンの中心を含む1断面のみを測定対象としたが、今後多角的な計測を行うことで、より詳細な流れ場の時空間分布特性の解明に貢献できるものと考えている。定量性については、その要因も含め今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 吉川穰ほか, 多相流シミュレーション技術の高度化研究. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2023, p. 9-15.
- 2) 吉川穰ほか, 固化流れシミュレーション技術の開発, 宮城県産業技術総合センター研究報告, 2025, p. 43-47.
- 3) 谷一郎ほか, "流体力学実験法", 岩波書店, 1977, p. 170-196.
- 4) 可視化情報学会, "PIVハンドブック第2版", 森北出版, 2018, p. 3-11.
- 5) W. H. Echols and J. Young, "Studies of portable air-operated aerosol generators", NRL Report 5292, 1963.
- 6) OpenPIV Consortium, "OpenPIV/openpiv-python:

【ノート】

【令和7年度 先端技術等調査研究事業】

無機材料分析評価用治具の開発

阿部 一彦、水上 浩一、鈴木 鋭二、林 正博
材料開発・分析技術部

本県内には無機材料製品を取り扱う企業が多数存在している。当センターには無機材料の焼結を行う機器や評価装置を揃えているが、今後も継続して支援を行うにあたり、現状の機器及び体制でどこまでの開発支援が出来るかについては、常に情報の収集とアップデートを重ねる必要がある。本研究では、企業調査を通して現状のニーズと当センターの課題を把握した。その中で、一部装置の治具開発については、年度内に一定の成果を出すことができたため、ここに報告する。

キーワード：無機材料、表面分析、スパーク放電発光分光分析装置

1 緒言

当センターには、無機材料製品の加工や評価について多数の技術相談がある。スパーク放電発光分光分析装置(OES)は、固体金属サンプルの表面に放電し、発生した光のスペクトルから含有元素の種類と含有量等を高速簡便に分析でき、主にサンプルの材質確認に用いられている。図1にOESの放電部の模式図を示す。

サンプル表面は平滑で放電孔を完全に塞ぐことが望ましい。また、サンプル表面と、放電電極との距離が一定であることが必要である。

しかし、当センターには図2に示すような、形状的に放電孔を完全に塞ぐことが困難なサンプルが持ち込まれる場合もある。

装置メーカーは、通常の放電孔φ13mmプレート(通常プレート)に代えて、金属小片(Small Parts:SP)用の放電孔φ8mmのプレートや、専用のアルミナリング(放電孔:φ6mm)を組み合わせることを推奨しているが、アルミナリングは高価な割に、特に細いサンプルの場合に、振動で割れてしまう(図3)ケースが多く、利用者の負担が大きかった。

そこで本研究では、測定可能なサンプルの幅を広げ、多様なニーズに応えられる治具として、サンプルのサイズに合わせて放電孔の径を変えることができ、プレート交換の時間を短縮できるアタッチメントを開発した。

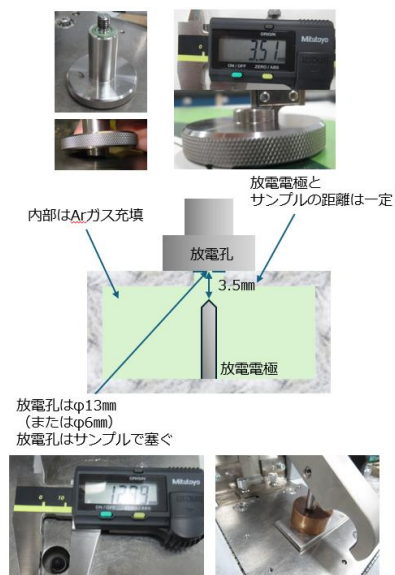


図1 OESの放電部模式図



図2 分析が困難なサンプルの例



図3 振動で割れたアルミナリング

表1 従来法と今回開発した治具(アタッチメント)の厚さとアルミナリング穴径

	厚さ(mm)	放電孔(φ,mm)	アルミナリング 用穴径(φ, mm)	アルミナリング孔(φ,mm)				
通常プレート(従来法)	—	13	—	—				
小片用プレート(従来法)	—	8	—	—				
SP用プレート(従来法)	—	—	20	6				
アタッチメント (今回開発)	1	0	20	3	5	6	8	13
	2	0	20	3	5	6	8	13
	3	0	20	3	5	6	8	13

2 手法

2.1 装置

装置は、当センターの OES (SPECTROMAXx: アメテック社製) を用い、SP 用のメソッドを用いた。サンプルには SUS と Al の標準試料を使用した。

2.2 治具の試作

装置のプレートに被せるアタッチメントは SUS304 板を加工して調製した。放電孔サイズは $\phi 13\text{ mm}$ 、 $\phi 8\text{ mm}$ 、 $\phi 6\text{ mm}$ 、 $\phi 5\text{ mm}$ 、 $\phi 3\text{ mm}$ とし、厚さは 1 mm 、 2 mm 、 3 mm とした(表1、図4)。

アタッチメント中心には $\phi 20\text{ mm}$ の孔を設け、アルミナリングを嵌めて放電孔のサイズを調整する。

3 測定結果

3.1 放電孔サイズの検討($\phi 3\text{ mm}$ ～ $\phi 8\text{ mm}$)

厚さ 1 mm のアタッチメントについて、放電孔サイズ $\phi 3\text{ mm}$ 、 5 mm 、 6 mm 、 8 mm の場合について測定したところ、 $\phi 8\text{ mm}$ では分析が完了したが、 $\phi 3\text{ mm}$ 、 5 mm 、 6 mm ではエラーで分析を完了できなかった。

分析エラーを起こしたアタッチメントの裏側を確認すると、孔周辺がスパーク放電により浸食されていた(図5)。また、 $\phi 8\text{ mm}$ の分析ではエラーが出なかったものの、Al が標準試料よりも多く検出されていたため、同様に裏側を確認したところ、こちらも浸食されていることが判った。これは小片用プレートでも確認できた。

以上から、放電孔が 8 mm より小さい場合には、メーカーの小片用プレートを使用しても、分析精度には影響を与えるため、適さないことが判った。

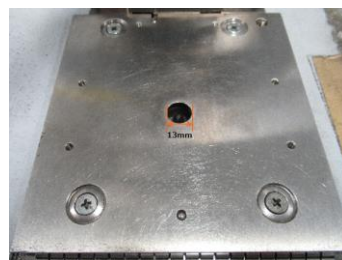
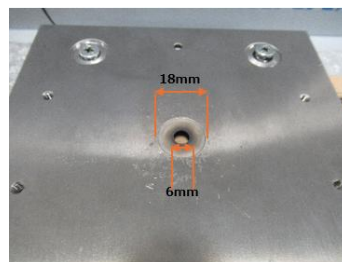
1. 通常プレート($\phi 13\text{ mm}$)2. 小片用プレート($\phi 8\text{ mm}$)3. SP 用プレート(アルミナリング装着状態 $\phi 6\text{ mm}$)4. 通常プレートにアタッチメントを装着した状態(図は $\phi 6\text{ mm}$)

図4 プレートとアタッチメント装着状態

表2 アルミナリング内径6mmと8mmSP条件での比較(wt%) Feの標準試料(Fe-20)

Cesky metrologicky institut 6016-CM-02033-15 7C	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
スモールパーツ (SP)プレートでの標準試料分析	1.600	1.790	0.431	0.028	0.022	0.441	0.903	1.530	0.050
アタッチメント+リング内径6mm	1.600	1.600	0.594	0.029	0.019	0.387	1.010	1.530	0.048
SPとの測定誤差	0.000	0.190	0.163	0.002	0.002	0.054	0.107	0.000	0.002
アタッチメント+リング内径8mm	1.600	1.710	0.523	0.030	0.022	0.390	1.000	1.540	0.048
SPとの測定誤差	0.000	0.080	0.092	0.002	0.001	0.051	0.097	0.010	0.002
Cesky metrologicky institut 6016-CM-02033-15 7C	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	N	Fe
スモールパーツ (SP)プレートでの標準試料分析	0.047	0.004	0.004	0.024	0.063	0.015	0.005	0.012	93.000
アタッチメント+リング内径6mm	0.040	0.001	0.004	0.021	0.058	0.015	0.005	0.013	93.000
SPとの測定誤差	0.007	0.003	0.000	0.004	0.004	0.000	0.000	0.001	0.000
アタッチメント+リング内径8mm	0.041	0.001	0.004	0.022	0.058	0.015	0.005	0.016	93.000
SPとの測定誤差	0.006	0.003	0.000	0.003	0.004	0.000	0.000	0.004	0.000

表3 アルミナリング内径6mmと8mmSP条件での比較(wt%) Feの標準試料(Fe-30)

Bureau of Analysed Samples LTD BCS/SS-CRM No466/2 Austenitic Stainless Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
スモールパーツ (SP)プレートでの標準試料分析	0.4350	0.2360	0.4570	0.0065	0.0061	0.1470	0.1950	1.7400	0.0824
アタッチメント+リング内径6mm	0.4100	0.1970	0.5700	0.0045	0.0057	0.1490	0.2020	1.7600	0.0834
SPとの測定誤差	0.0250	0.0390	0.1130	0.0020	0.0004	0.0020	0.0070	0.0200	0.0010
アタッチメント+リング内径8mm	0.4010	0.2070	0.5380	0.0056	0.0058	0.1490	0.2020	1.7700	0.0843
SPとの測定誤差	0.0340	0.0290	0.0810	0.0009	0.0003	0.0020	0.0070	0.0300	0.0019
Bureau of Analysed Samples LTD BCS/SS-CRM No466/2 Austenitic Stainless Steel	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	N	Fe
スモールパーツ (SP)プレートでの標準試料分析	0.0105	0.4080	0.0040	0.0066	0.0049	0.0150	0.0050	0.0095	96.2000
アタッチメント+リング内径6mm	0.0020	0.4020	0.0040	0.0043	0.0030	0.0150	0.0050	0.0096	96.2000
SPとの測定誤差	0.0085	0.0060	0.0000	0.0023	0.0019	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
アタッチメント+リング内径8mm	0.0022	0.4030	0.0040	0.0039	0.0030	0.0150	0.0050	0.0102	96.2000
SPとの測定誤差	0.0083	0.0050	0.0000	0.0027	0.0019	0.0000	0.0000	0.0007	0.0000

表4 アルミナリング内径6mmと8mmSP条件での比較(wt%) Alの標準試料(Al-20)

MBH Analytical LTD 54X G231H3	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ag	B	Be	Bi
スモールパーツ (SP)プレートでの標準試料分析	14.75	0.456	0.419	0.483	0.0441	0.0806	0.128	0.0884	0.155	0.0011	0.0019	0.0006	0.005
アタッチメント+リング内径6mm	14.15	0.598	0.423	0.478	0.0703	0.0672	0.118	0.0749	0.171	0.00092	0.0015	0.0006	0.005
SPとの測定誤差	0.6000	0.1420	0.0040	0.0050	0.0262	0.0134	0.0100	0.0135	0.0160	0.0002	0.0004	0.0000	0.0000
アタッチメント+リング内径8mm	13.63	0.58	0.414	0.477	0.0638	0.068	0.117	0.0775	0.17	0.001	0.0015	0.0006	0.005
SPとの測定誤差	1.1200	0.1240	0.0050	0.0060	0.0197	0.0126	0.0110	0.0109	0.0150	0.0001	0.0004	0.0000	0.0000
MBH Analytical LTD 54X G231H3	Ca	Cd	Co	Ga	Li	Na	Pb	Sn	Sr	V	Zr	Al	
スモールパーツ (SP)プレートでの標準試料分析	0.0028	0.0084	0.0088	0.0129	0.0002	0.0023	0.0104	0.012	0.0003	0.0191	0.0024	83.3	
アタッチメント+リング内径6mm	0.0035	0.006	0.006	0.0119	0.0002	0.0024	0.009	0.012	0.0003	0.0155	0.002	83.8	
SPとの測定誤差	0.0007	0.0024	0.0028	0.0010	0.0000	0.0001	0.0014	0.0000	0.0000	0.0036	0.0004	0.5000	
アタッチメント+リング内径8mm	0.0039	0.006	0.006	0.012	0.0002	0.0019	0.009	0.012	0.0003	0.0153	0.002	84.3	
SPとの測定誤差	0.0011	0.0024	0.0028	0.0009	0.0000	0.0004	0.0014	0.0000	0.0000	0.0038	0.0004	1.0000	



図5 アタッチメントの裏の写真

左: φ6 mmアタッチメント放電孔部分
右: φ8 mmアタッチメント放電孔部分

表5 誤差の平均値

誤差の平均	6mm	8mm
Fe-20	0.0300	0.0200
Fe-30	0.0127	0.0114
Al-20	0.0537	0.0935



図6 高さ調整治具

分析の一例（通常分析2回の後、SP分析を2回実施し、また通常分析に戻る場合）

通常プレート+	通常分析	通常分析	中間作業	SP分析	SP分析	中間作業	通常分析
SPプレート(従来法)							
8mmプレート(従来法)							
今回開発治具使用							
	分析	電極洗浄	プレート交換・外し	アタッチメントセット	高さ調整	AIリング外し	

図7 分析手順の例(通常分析を2回実施後、SP分析を2回実施し、その後通常分析に戻る場合)

3.2 アタッチメントの厚さ検討

次に、アタッチメントの厚さについて検討を行った。
スパーク放電の電極から放電孔の面までの距離は、付属の治具で3.5 mmに保つ必要がある(図6)。今回開発のアタッチメントは、従来のプレートに被せて使用することから、アタッチメントの厚さが増すと電極との距離が離れてしまう。一方、アルミナリングの強度を上げるためには、現行のリング(厚さ0.5 mm)よりもできるだけ厚くすることが望ましい。

そこで、放電孔φ13 mmのアタッチメントについて、厚さが1 mm、2 mm、3 mmの場合について測定を行った。その結果、1 mmでは分析が完了したが、2 mmでは40%～50%の割合で分析エラーとなり、3 mmでは全て分析エラーとなった。

以上から、アタッチメントの厚さを1 mmと決定した。

3.3 標準試料の分析結果

宮城県産業技術総合センターに持ち込まれるサンプルで、比較的利用の多いFe系とAl系について分析を行った。

表2、3にFe、表4にAlの分析結果を示す。

全ての分析で3回分析を行い、その平均値との測定誤差を絶対値で示す(表5)。その結果、誤差の平均は最大でも0.1以下であった。

以上から、SP用プレートでの分析と通常プレートに今回開発のアタッチメントを装着して分析した場合で、分析精度に問題が無いことが判った。

なお、Alの誤差の大半はSi由来であるため、仮にSi及びAlの分析値を除くと、全体の誤差の差は 6 mm:0.010 wt%、8 mm:0.0095 wt%と更に小さくなる。

3.4 開発治具の効果

図7に従来のSP標準プレートをを用いた場合と、今回開発治具を用いた場合の分析手順の違いを示す。



図8 各種プレートの電極洗浄の様子
左: SP 用プレート
中:小片用プレート
右:今回開発治具(アタッチメント)を付けた通常プレート(φ13 mm)

大きな差はプレート交換の有無で、プレート交換は手間がかかる上にアルミナリングを破損する恐れがある。

小片用プレートの場合はそれに加えてスパークが干渉する恐れがある上、電極洗浄棒が入りにくく、分析の度にプレートを外して洗浄する必要がある(図8)。

一方、開発した治具は、プレート交換が不要で、通常分析とSP分析との切り替えが可能である。

電極洗浄時は通常プレートの放電孔を使用するので、標準プレートやSPプレートと同様にスムーズに行える。

分析精度もSPプレートを使用した際と遜色なく、アルミナリングの強度も申し分ない。

今回開発治具には、測定可能なサンプルの幅を広げ、利用者の利便性を高める効果が期待される。

4 結言

OES 用の新規治具を開発した。

本治具には、アルミナリングの損傷を抑制し、かつ、分析精度を損なうことなく分析できる。

プレート交換の時間を省略でき、全体の分析時間を短縮できる。

本治具の利用により、利用者の多様なニーズに応えられることが期待される。

【ノート】

【令和7年度 放射光施設利用促進事業】

放射光の特性を生かした三次元物性イメージングの研究

伊藤 桂介、内海 宏和、曾根 宏
材料開発・分析技術部

放射光の特性を活用した非破壊三次元観察技術の県内製造業への応用可能性を検討した。本年度は、すずめっき銅線を対象として、ナノテラスBL09WにおけるX線CT測定を実施し、すず浴中で生じる銅食われの観察を試みた。その結果、高解像度かつ高コントラストな断層像が得られ、銅線がすずにより侵食される様子を可視化できた。また、放射光X線CTの活用支援に向けた前処理・スクリーニング技術として、超高エネルギーX線CTによる大型金属製品の非破壊内部観察について調査した。一体型自動車部品であるトランスアクスルを対象とした測定では、通常のラボX線CTでは観察が困難な大型金属部品の内部構造を確認でき、放射光実験に先立つ測定部位の絞り込みや相補的評価に有用であることが示された。

キーワード：放射光、X線Computed Tomography (X線CT)、すずめっき

1 緒言

X線コンピュータトモグラフィ(X線CT)は、試料を多方向からX線で透過撮影し、得られた投影像を再構成することで、内部構造を非破壊かつ三次元的に可視化する分析技術である。材料開発、不良解析、製品評価など幅広い産業分野で利用されており、実験室のX線CT装置および放射光施設のいずれにおいても同じ測定原理に基づいて実施される。一方で、ラボ機X線CTと放射光X線CTでは、使用するX線の性質が異なるため、得意とする測定対象や測定条件が異なる。ラボ機X線CTは、比較的大きな視野を確保しやすく、装置利用の自由度が高いことから、製品全体の確認や金属材料を含む試料の初期評価に適している。一方、放射光X線CTは、高輝度、高い指向性、単色化の容易さといった特徴を有し、高解像度・高S/Nの観察や、微小領域の詳細解析に有効である。

本研究では、放射光X線CTの県内製造業への活用可能性とそのための支援力向上を見据え、二つの観点から調査を行った。第一に、すずめっき銅線を対象として、放射光施設ナノテラスにおけるX線CT測定を実施し、微細な界面変化の可視化可能性を検討した。第二に、放射光実験に取り組む際の前処理、測定部位の選定、フォローアップに資する技術として、非破壊での三次元内部可視の限界を知るため、超高エネルギーX線CTによる大型金属製品の非破壊内部観察の有用性を調査した。

2 調査内容

2.1 ナノテラスにおけるすずめっき銅線の観察

すずめっきは、耐食性、防食性、はんだ付け性、装飾性の付与などを目的として、電子部品、自動車部品、建材など多様な分野で広く用いられている。めっき層の厚さや界面状態は、製品の信頼性や耐久性に影響するため、正確な評価が重要である。しかし、従来の評価では、試料を切断・研磨し、断面を電子顕微鏡等で観察する方法が一般的であり、作業に手間を要するうえ、試料が破壊されるという課題がある。本年度は、すずめっき銅線を対象として、ナノテラスBL09WにおけるX線CT測定を実施した。測定条件は、X線エネルギー4～30 keVの白色光、視野サイズ700 μm 、画素サイズ0.35 $\mu\text{m}/\text{pix}$ である。特に、銅がすずに溶け込むことで銅側が減肉する

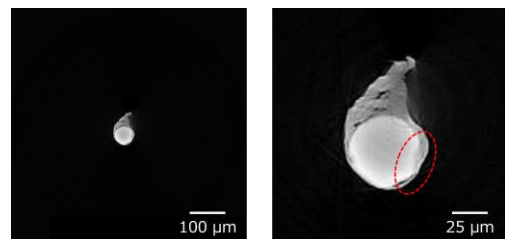


図1 ナノテラス BL09W により取得したすずめっき銅線の X 線 CT 像の断層像(左図)および拡大図(右図)。拡大像中の赤破線部において、銅がすずにより侵食された領域が確認される。

「銅食われ」に着目し、すず浴中で銅線が侵食される様子を非破壊に観察することを目的とした。

図1に、ナノテラスBL09Wで取得したすずめっき銅線のX線CT像を示す。断層像では、銅線およびその周囲のすず領域が明瞭に観察され、拡大像では銅線表面の一部が侵食されている様子が確認された。放射光に由来する高い輝度と良好な空間分解能により、銅とすずの界面形状が高コントラストに可視化されており、銅食われの進行状態を非破壊で把握できる可能性が示された。

2.2 放射光利用支援に向けたスクリーニング技術の調査

放射光X線CTは、高解像度かつ高コントラストな測定が可能であり、微小試料や局所構造の詳細解析に有効である。一方で、実際の製品をそのまま放射光施設で測定することは、多くの場合困難である。放射光CTの主な観察対象は、ミリメートルからマイクロメートルオーダーの比較的小さな試料であり、大型製品や複雑形状部品については、測定前に分解や切り出しを行う必要がある。しかし、製品の分解や試料加工には費用と時間を要し、企業にとって大きな負担となる。このため、放射光実験に先立ち、非破壊で製品内部のおおまかな構造を把握し、分析すべき部位を絞り込むスクリーニングが重要となる。一般的にはラボX線CT装置がこの役割を担うが、大型製品や金属部品が多用された製品では、X線の透過不足により良好な画像が得られない場合がある。そこで本研究では、超高エネルギーX線CTによる大型金属製品の内部観察について調査した。

超高エネルギーX線CTは、リニア加速器を線源とするX線CTであり、9 MV級の高エネルギーX線を用いることで、通常のラボX線CTでは透過困難な厚肉金属材料

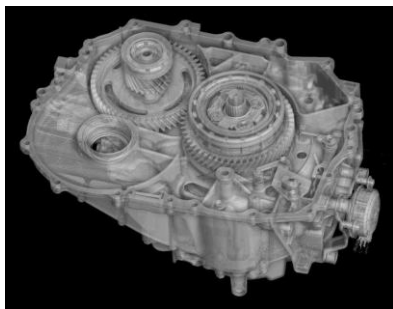


図2 超高エネルギーX線CTにより取得したトランスアクスルの透過像。大型金属部品内部のギア、軸、ケース構造が確認できる。

や大型構造体の観察が可能となる¹⁾。調査対象として、トランスミッションとディファレンシャルギアを一体化した自動車部品であるトランスアクスルを用いた。トランスアクスルは、金属製のケース内部にギア、軸、ベアリング等を含む複雑な構造を有しており、通常のX線CTでは内部全体の把握が難しい対象である。図2に、超高エネルギーX線CTにより取得したトランスアクスルの透過像を示す。撮影視野は $\phi 600\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 、画素サイズは 0.2 mm/pix である。大型金属部品であるにもかかわらず、内部のギアや軸、ケース形状などの構造を確認することができた。この結果から、超高エネルギーX線CTは、放射光X線CTの代替というよりも、放射光実験の前段階における部位選定や、測定後の相補的評価に有効であると考えられる。すなわち、まず大型製品全体を非破壊で観察し、内部構造や注目箇所を把握したうえで、必要に応じて局所的な試料を切り出し、放射光CTやその他の高分解能分析に進むという分析フローが有効である。

3 結言

本調査研究では、放射光の特性を生かした三次元物性イメージング技術の産業応用を目的として、ナノテラスにおけるすずめっき銅線のX線CT観察、および放射光利用支援に向けた超高エネルギーX線CTの調査を実施した。すずめっき銅線の観察では、ナノテラスBL09Wを用いることで、高解像度・高コントラストな断層像が得られ、銅食われにより銅線が侵食される様子を非破壊で可視化できた。この結果は、ナノテラスのX線CTが、微細なめっき界面や金属材料界面の評価に有効であることを示している。また、県内製造業の放射光利用支援に向けた技術調査として、超高エネルギーX線CTによる大型金属製品の内部観察を実施した。トランスアクスルの観察結果から、通常のラボX線CTでは困難な大型金属部品の内部構造把握が可能であり、放射光実験に先立つスクリーニング技術として有用であることが確認された。今後は、ラボX線CT、超高エネルギーX線CT、放射光X線CTを試料サイズや分析目的に応じて適切に組み合わせることで、県内企業に対する分析提案力を高め、材料評価や不良解析の高度化に貢献していく。

参考文献

- 1) W. Sun *et al.*, Rep. Prog. Phys. **85**, 016102 (2022).

【ノート】

【令和7年度 放射光施設利用促進事業】

HDDプラッタの層構造解析

内海 宏和、伊藤 桂介、曾根 宏
材料開発・分析技術部

放射光の特性を活用したX線光電子分光の応用可能性を検討した。対象として多層膜構造を持つハードディスクのプラッタを選定し、3GeV高輝度放射光施設 NanoTerasuにおいて硬X線光電子分光分析 (HAXPES) を実施した。高エネルギー放射光の特性を生かして分析を実施し、埋もれた界面である非磁性中間層を検出することができた。

キーワード: 放射光、光電子分光、角度分解HAXPES、ハードディスクプラッタ

1 緒言

X線光電子分光法(XPS)は、固体表面を分析する表面分析手法の一つである。固体表面にX線を照射し、光電効果によって放出される光電子の運動エネルギーを測定する。この電子のエネルギーを測定することで、表面原子の組成、化学状態を解析する。XPSにおける分析深さは、光電効果により放出される光電子の平均自由行程に依存する。ラボXPSでは、励起源としてMgK α 線(1253.6 eV)やAlK α 線(1486.6 eV)が用いられており、光電子の運動エネルギーはこれ以下であることから、電子の運動エネルギーと平均自由行程の関係より、分析深さは約2nm以下と見積もられる¹⁾。これよりも深い位置の分析は、イオン照射によるスパッタリングを併せて用いるが、これにより組成の変化や化学結合に関する情報が損なわれるおそれがある。一方、固体内における電子の平均自由行程は、その運動エネルギーとともに変化することから、放射光のような高エネルギーX線を用いると、非破壊でより深い領域まで分析が可能となる。本研究では、放射光の高エネルギーを生かした硬X線光電子分光分析(HAXPES)の有用性を検討した。

2 調査内容

2.1 ハードディスクプラッタの層構造観察における課題

ハードディスクドライブ(HDD)のプラッタは、データ記録密度の向上に伴い、より複雑で精密な多層構造を有している。特に、磁気記録層、中間層、下地層などの各相の組成や界面状態は、磁気特性や記録性能に直接

影響を与える重要な因子である。層構造を観察するには、試料を切断、研磨したうえで電子顕微鏡を用いるのが一般的であり、手間と時間を要するうえに試料が破壊されるという課題がある。ラボXPSによるデプスプロファイル測定では、スパッタリングによる膜質変化や界面混合が生じる可能性があり、埋もれた界面や深部層の解釈には注意を要する。そこで、検出角度を変化させてHAXPES測定を実施し、HDDプラッタの多層膜構造を非破壊で評価することを試みた。

2.2 放射光施設における測定

測定は、3GeV高輝度放射光施設 NanoTerasuのビームラインBL09Uにて実施した。使用したX線のエネルギーは5.95 keVとし、試料はメーカーと製造時期が異なる2種類のHDDプラッタで、それぞれ8mm角に切り出した。試料の厚さは1.5 mmで、基材はアルミニウムで表面には多層膜が形成されている。光電子検出角10°、20°、37.5°、55°、72.5°、88°のそれぞれでワイドスキャンを取得した。検出角が大きいほど、深い領域の情報が得られる。エネルギーステップは200 meV、積算回数は2~4回とし、検出器のダイナミックレンジに応じて入射フィルターを調整した。

図1に、検出角度を変化させた場合のワイドスキャンの結果を示す。検出角度88°では、2種類の試料でピーク位置は同一であった。試料Aは、検出角度が55°以上でRuが検出された。これより小さい角度ではRuが検出されなかった。また、試料Bは検出角20°からRuのピークが観察され、それより大きい角度では、試料Aに比べRuのピークがより強く観察された。これらから、両試料の多層膜は同一の構成元素から成ること、表面から

離れた層にRuが含まれていること、2種類の試料で多層膜を構成する各層の厚さが異なることが示唆された。試料AのラボXPS結果では、Ruが検出されなかったことから、HAXPESはラボに比べてより深い領域の情報を得ること可能であることを確認できた。このように、試料の前処理が簡便にも関わらず、表面多層膜の情報を得られることがわかった。

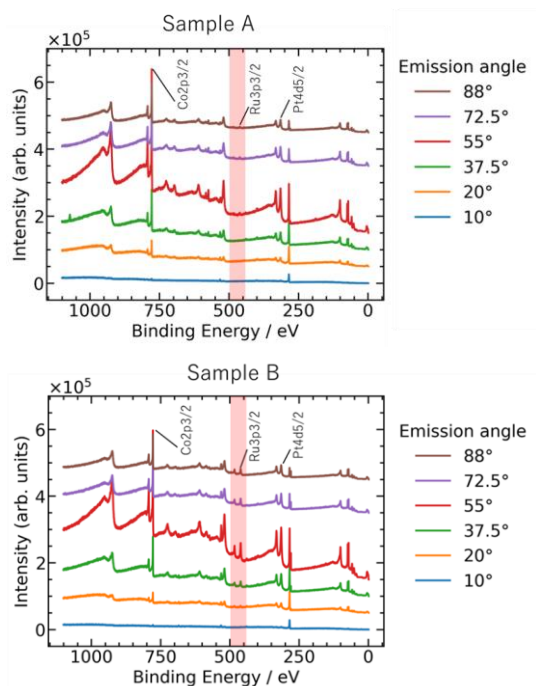


図1 検出角度を変化させた場合の
ワイドスキャン結果

3 結言

本調査研究では、放射光の高エネルギー特性を活かし、HDDプラッタの多層膜のHAXPES測定を実施した。特に、表面には存在しないRuを含む層を検出できることを示した。この手法は、表面近くの埋もれた界面の情報を非破壊で得るための分析手段として、性能評価や不良解析への応用が期待される。

参考文献

- 1) H.Yamamoto:BUNSEKI KAGAKU vol.69,No7・8 pp.399-409(2020)

【ノート】

【令和7年度 先端技術等調査研究事業】

UPLC-MSの新たな測定メニューの充実

星野 友花、佐藤 信行*

食品バイオ技術部(*現 企画・事業推進部)

当センター保有の超高速液体クロマトグラフ質量分析システム(UPLC-MS)では、これまで主にアミノ酸およびポリフェノールの測定を行ってきたが、他の食品成分に対する測定ニーズも増加している。本調査では果実、野菜、発酵食品等に多く含まれ、食品の風味形成や保存性に寄与する成分である有機酸に着目し、UPLC-MSでの分析条件を検討した。既報を参考に、Phenyl-hexylカラム、水およびアセトニトリルにギ酸を添加した移動相を用い、質量分析装置での検出条件を最適化することにより、乳酸、リンゴ酸、クエン酸、グリコール酸、コハク酸、フマル酸、ピルビン酸、フェルラ酸、酢酸の分離、および定量性を確認した。

キーワード：成分分析、超高速液体クロマトグラフ質量分析システム(UPLC-MS)、有機酸、逆相カラム(Phenyl-hexylカラム)

1 緒言

食品に存在する有機酸は、天然由来のほかには酸味料あるいはpH調整剤として添加されたものなどがある。これらの有機酸は、食品の風味や鮮度、保存性に大きく関与している¹⁾。

当センターでは超高速液体クロマトグラフ質量分析システム(UPLC-MS)を保有しているが、これまでは主にアミノ酸およびポリフェノールの測定を行ってきた。一方で有機酸をはじめとしたその他の食品成分に対する測定ニーズも増加している。

そこで、本調査ではUPLC-MSを用いた有機酸の分析手法を検討し、測定メニューの拡充に向けた分析条件を構築することを目的とした。

従来はWaters社のアプリケーションノート²⁾(以下、従来法)を参考に分析を行っていたが、分離能の向上およびより実用的な分析条件の確立を目指して、本調査では、新たに公開されたアプリケーション³⁾(以下、新手法)を参考に検討を行った。具体的には、有機酸の分離状況を検証するとともに、測定例に記載のない有機酸についても分離の可否を確認した。さらに、各有機酸の定量性についても評価を行った。

2 調査内容及び方法

2.1 使用機器

Waters社製ACQUITY UPLC H-Class PLUSシステム

およびSQ DETECTOR 2を用いて分析を行った。装置の制御およびデータ解析には、同社製ソフトウェアMassLynxを使用し、測定ならびに保持時間およびピーク面積の解析を行った。

2.2 有機酸類の分析

1)測定方法

分離カラムにはWaters社製ACQUITY Premier CSH Phenyl-Hexyl(内径2.1 mm×長さ100 mm、粒径1.7 μm)を用いて、カラム温度は50℃に設定した。移動相は、A液:0.1%ギ酸水溶液(LC-MSグレード)、B液:0.1%ギ酸アセトニトリル溶液(LC-MSグレード)を用いてグラジエント分析を行い(表1)、流速は0.4 mL/分、試料注入量は1 μLとした。質量分析の条件は、イオン化法はESI法、キャピラリー電圧2.2 kV、コーン電圧30 V、ソース温度150℃、デソルベーション温度500℃、コーンガスフロー50 L/h、デソルベーションガスフロー1000 L/hとした。

2) 主な有機酸の分離状況の確認

新手法に測定例として記載のあった乳酸、リンゴ酸、クエン酸、コハク酸、フマル酸に加え、過去に測定ニーズのあった酢酸、グリコール酸、ピルビン酸、フェルラ酸について、分離状況の確認を行った。フマル酸、フェルラ酸は95%エタノールに溶解し、残りは超純水に溶解して1%(w/v)溶液を調製した。これらを等量混合後、超純水で希釈し、1000、500、100、50、10 ppmの標準液を調

製した。分析は乳酸、リンゴ酸、クエン酸混合液と酢酸、グリコール酸、コハク酸、ピルビン酸、フマル酸、フェルラ酸混合液で行った。

各有機酸の分離状況は、BPIクロマトグラム(各保持時間において最も強度の大きい m/z のイオン強度をプロットしたクロマトグラム)により確認した。

表 1 グラジエント条件

時間 (分)	流速 (mL/min)	A液%	B液%
0	0.4	100	0
0.5	0.4	100	0
3.5	0.4	75	25
3.6	0.4	5	95
4.6	0.4	5	95
4.7	0.4	1	99
7	0.4	1	99
7.1	0.4	100	0
11.0	0.4	100	0

3) 定量性の確認

コハク酸、グリコール酸、フマル酸、ピルビン酸、フェルラ酸の測定結果に基づき、10 から 1000 ppm の範囲における検量線の直線性(定量性)を評価した。検量線は、各有機酸の SIR クロマトグラム(特定の単一 m/z 値($m/z=[M-H]$)について抽出したクロマトグラム)におけるピーク面積と濃度の関係について、一次近似式、二次近似式、累乗近似式を最小二乗法により算出して作成した。また、各近似式について、決定係数(R^2)を比較した。

3 結果と考察

3.1 従来法と新手法の比較

従来法では移動相として50 mMギ酸アンモニウム0.9 % 含有ギ酸水溶液、0.9 %ギ酸アセトニトリル溶液、0.9 %ギ酸水溶液の3種類を使用する。このうち、ギ酸アンモニウムを含む移動相は分析中に塩が析出する可能性があり、カラム閉塞の懸念がある。一方、新手法では移動相は2種類で構成されており、塩を使用しないことから、より実用性が高く、安定した分析が可能であることが分かった。

3.2 主な有機酸の分離状況の確認

各混合液のBPIクロマトグラム(図1)および有機酸の

保持時間(表2)を示す。酢酸以外の有機酸について、Negativeモードでの分離を確認した。一方で、詳細な定量についてはSIRクロマトグラムを得るなどの工夫が必要であると考えられた。

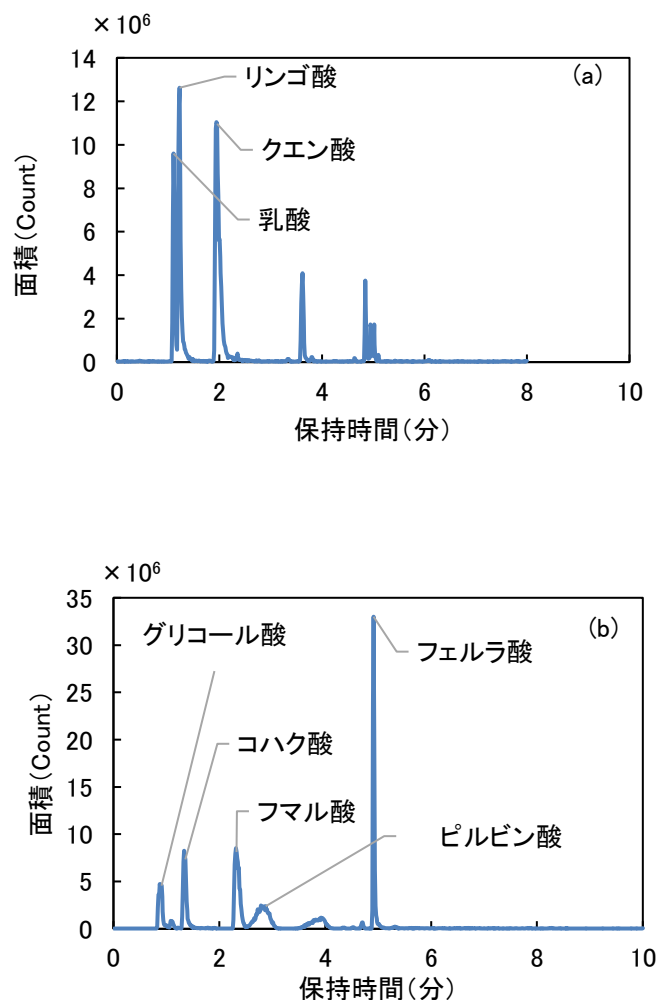


図1 標準試料のBPIクロマトグラム((a): 乳酸、リンゴ酸、クエン酸、(b): グリコール酸、コハク酸、ピルビン酸、フマル酸、フェルラ酸)

表 2 各有機酸の保持時間

物質名	分子量	保持時間 (分)
グリコール酸	76.05	0.87
乳酸	90.08	1.11
リンゴ酸	134.09	1.22
コハク酸	118.09	1.33
クエン酸	192.12	1.94
フマル酸	116.07	2.31
ピルビン酸	88.06	2.78
フェルラ酸	194.19	4.91

また、Negative モードで検出できなかった酢酸標準試料について、Positive モードで検出を行ったところ、保持時間約 1 分付近に濃度に応じて面積が変化するピークが確認された(図 2)。この結果から、酢酸については Positive モードでの検出が適していることが示された。

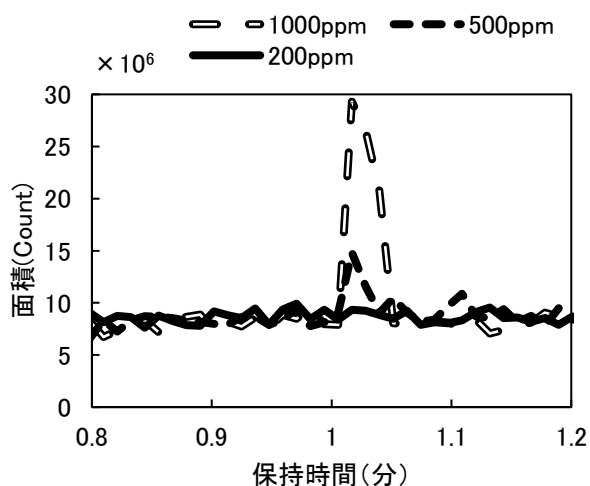


図 2 酢酸の BPI クロマトグラム(200~1000ppm)

3.3 定量性の確認

作成した検量線について、各有機酸の決定係数を表 3 に示す。コハク酸、グリコール酸、フマル酸では累乗近似式において最も高い決定係数が得られた。一方、ピルビン酸、フェルラ酸では二次近似式において最も高い決定係数が得られた。例としてコハク酸について、一次近似式、二次近似式、累乗近似式により作成した検量線を示す(図3~5)。これらの結果から、一次近似式と比較して、累乗近似式および二次近似式で高い定量性が得られる可能性が示唆された。

表 3 検量線の決定係数

	決定係数(R ²)		
	一次近似式	二次近似式	累乗近似式
コハク酸	0.9644	0.9927	0.999
グリコール酸	0.9896	0.9953	0.9964
フマル酸	0.9768	0.9966	0.9969
ピルビン酸	0.9937	0.9998	0.9952
フェルラ酸	0.9522	0.995	0.99

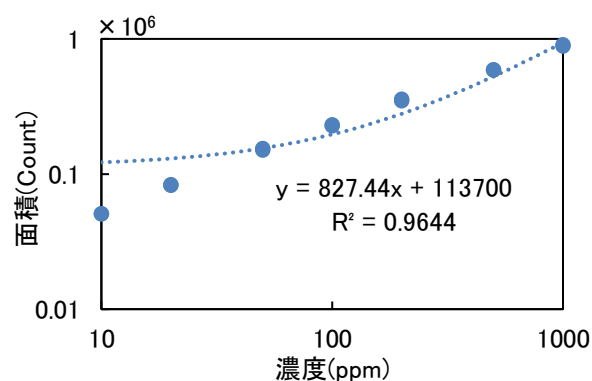


図 3 一次近似式による検量線(コハク酸)

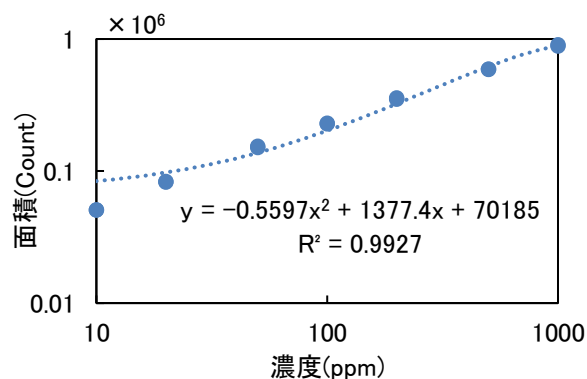


図 4 二次近似式による検量線(コハク酸)

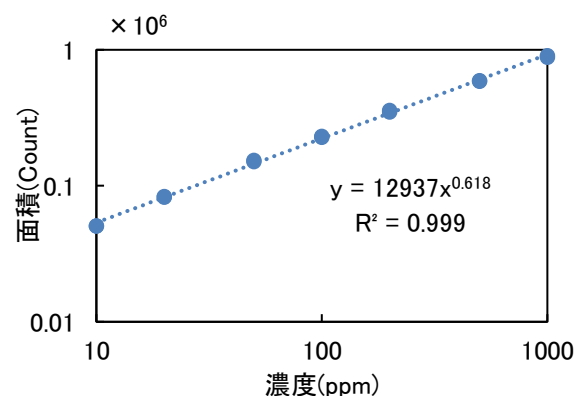


図 5 累乗近似式による検量線(コハク酸)

4 まとめ

従来法ではギ酸アンモニウムを含む移動相を使用するため、分析中に塩が析出する可能性があり、カラム閉塞の懸念がある一方、新手法では移動相は2種類で構成されており、塩を使用しないことから、より実用性が高く、安定した分析が可能であることが分かった。

また、乳酸、リンゴ酸、コハク酸、クエン酸、フマル酸に加え、測定例に記載のないグリコール酸、ピルビン酸、フェルラ酸についても、Negativeモードで検出可能であることを確認した。一方、酢酸についてはPositiveモードでの検出が適していることが示された。

定量性については、累乗近似式および二次近似式で検量線を作成することにより、高い定量性が得られる可能性が示唆された。

参考文献、引用URL

- 1) 天川映子、大西和夫、西島基弘、坂井千三, 日本食品衛生学雑誌, 1988, 29(4), p.267-272.
- 2) Waters アプリケーションノート,720006938-JA (<https://www.waters.com>(参照2026-05-20))
- 3) Waters アプリケーションノート,720007289-JA (<https://www.waters.com>(参照2026-05-20))

【ノート】

【令和7年度 放射光施設利用促進事業】

NanoTerasuの活用に向けた食品測定事例の蓄積

羽生 幸弘、星野 友花

食品バイオ技術部

3Gev高輝度放射光施設「NanoTerasu」の食品分野への応用を検討するため、笹かまぼこやチーズ等の加工食品を対象にX線CTによる内部構造の観察を行った。また、当センター保有機器であるX線分析顕微鏡(XRM)との比較を行い、放射光測定の有用性・可能性を調査した。その結果、NanoTerasuではXRMと同程度の解像度の測定が短時間でできること、位相回復処理を行うことで構造をより明確に表すことができることが分かった。さらに、笹かまぼこに関する企業ニーズへ適応した結果、冷凍条件下での観察で凍結方法の違いによると思われる構造の差を確認できた。

キーワード：放射光、X線Computed Tomography(X線CT)、食品

1 緒言

令和6年度に運用が開始された3Gev高輝度放射光施設(NanoTerasu)は軟X線領域の性能に特徴があり、硬X線と比較して物質を透過する力は弱いが生体試料を構成するような軽元素の可視化が可能で、また元素や分子の電子状態を可視化することができるという特徴を有している。そのため食品、農畜水産物、生体試料、化成品などへの応用が期待されている¹⁾。当県には食品関連企業が多いことから施設の活用が期待されているものの、放射光施設の利用経験が乏しいため、施設の利活用促進のためには有効性・可能性を確認する必要がある。

そこで本調査では、特産品である笹かまぼこや過去の調査²⁾においてラボ機(X線分析顕微鏡(XRM))でX線CT像を取得した食品(チーズ等)を対象にNanoTerasuで得られた画像との比較を行った。さらに、冷凍保存した笹かまぼこを解凍した際、冷蔵保存品と比較して硬くなる現象を構造面から評価したいというニーズに対して放射光測定を適用し可能性を検討した。

2 調査方法および内容

2.1 ラボ機と放射光の比較

2.1.1 試料

県内の特産品として製造者の異なる笹かまぼこを2種

(以下、笹かまぼこ①、笹かまぼこ②)、過去の調査で取り上げた食品のうち、チーズ、米を試料とした。チーズについては、カマンベールチーズ、チェダーチーズ、ミモレットチーズの3種類を用いた。米は精米後の酒米とアルファ化米を用いた。

2.1.2 X線分析顕微鏡(XRM)

ラボ機としてX線分析顕微鏡((株)リガク、Nano3D)を用いた。測定条件は、解像度1.25 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ (ビニング2 $\times$ 2)とし、露光時間3.6 秒/枚、投影枚数800 枚のフルスキャン、測定温度を室温とした。サンプルは試料を ϕ 3.5 mmのストローでくり抜き、試料台に設置した。かまぼこ測定時には上部を乾燥防止のため紫外線硬化樹脂で蓋をした。画像の再構成には機器付属の再構成ソフトウェアを用いた。

2.1.3 放射光測定

放射光を用いたX線CT測定をNanoTerasuのBL09Wで行った。測定条件は、高倍率ユニットを用いて解像度を0.65 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ とし3 mmのAlフィルターを設置の上、露光時間60 ms/枚、投影枚数1,800 枚、測定温度を4 $^{\circ}\text{C}$ (冷蔵条件)とした。サンプルは試料を ϕ 2 mmの生検トレパンでくり抜き、試料台に設置した。画像の再構成にはビームラインに付属のソフトを用いた。

2.2 企業ニーズへの適用可能性調査

県内の蒲鉾製造業者より、製品を冷凍保存し、需要に応じて解凍、冷蔵温度帯で販売することを検討しているが、解凍品では冷蔵保存品と比較して食感が硬くなるなどの相談があった。今後製品改良を進めるに当たり現在用いている硬さの評価に加えて、内部構造の違いも含められないか検討したいということであった。このため、凍結品と冷蔵品の硬さ評価をテクスチャー評価装置で、内部構造観察をラボ機及びNanoTerasuのBL09Wにて行った。

2.2.1 試料

測定サンプルとして、冷蔵温度にて保存した笹かまぼこ(以下、チルド品)、および異なる方法で冷凍を行った笹かまぼこ(以下、凍結品①、凍結品②、凍結品③)を用いた。

2.2.2 テクスチャー評価

テクスチャー評価装置((株)山電、クリープメータ)により、笹かまぼこの応力ひずみ曲線の取得を行った。笹かまぼこを3等分に切断したものを測定サンプルとして用いた。測定条件はプランジャーとしてφ20 mmの円盤、圧縮速度10 mm/sec、歪率90 %とし、サンプルの中央部分を加圧した。サンプルについて、チルド品は室温で静置して常温に戻し、凍結品①から③については冷蔵庫内に一晩静置した後、室温で静置して常温に戻した

ものを用いた。

2.2.3 X線分析顕微鏡(XRM)

測定条件は2.1.2に述べたものと同様とした。

2.2.4 放射光測定

測定条件は解像度および露光時間を2.1.3に述べたものと同様とし、測定温度を4℃(冷蔵条件)および-20℃(冷凍条件)とした。

3 結果と考察

3.1 食品を対象としたラボ機と放射光の比較

各試料のラボ機での測定結果(図1)を示す。笹かまぼこは構造の違いによるコントラストの差は見られず、サンプル全体の吸収が同様となっていた。また、サンプルの端にズレが見られたことから測定中に試料が動いていると考えられた。これは、照射したX線をサンプル中の水分が吸収することによって熱が発生したことによるものと考えられた。一方チーズでは、ミモレットチーズ、チェダーチーズ、カマンベールチーズすべてでX線の吸収によるサンプルへの影響は見られなかった。観察の結果、カマンベールチーズでは全体が同様となっていたが、ミモレットチーズ、チェダーチーズでは部分的に吸収が強

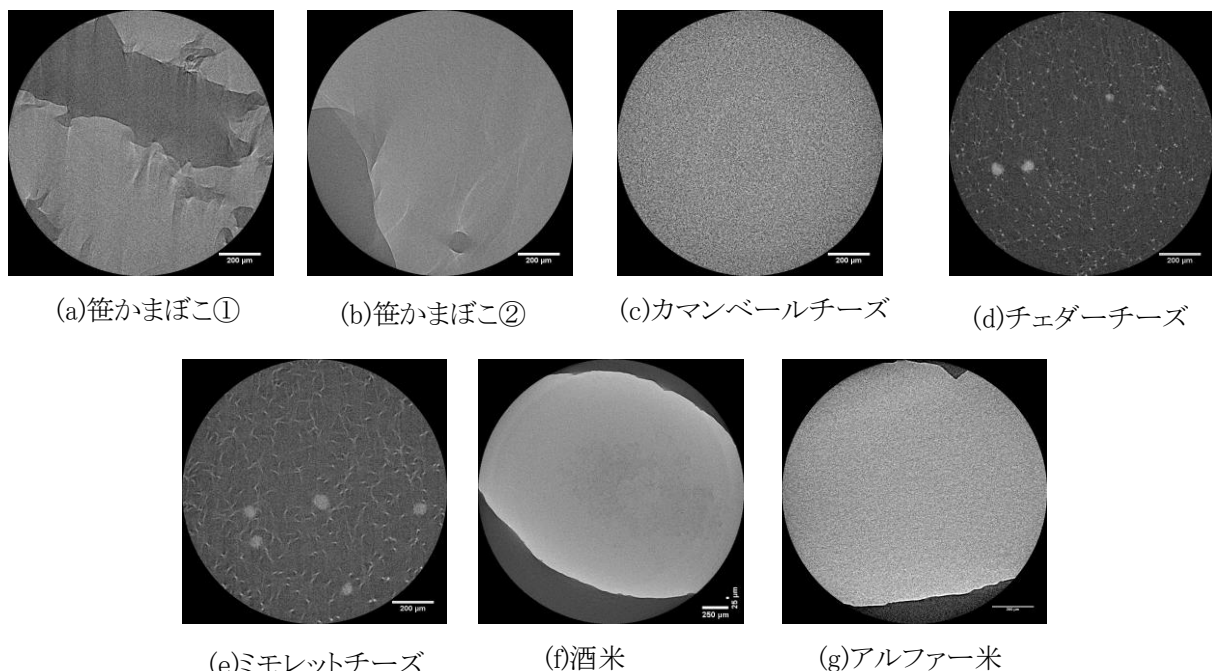


図1 加工食品等のラボCT測定結果(酒米の画像は過去の報告より引用)

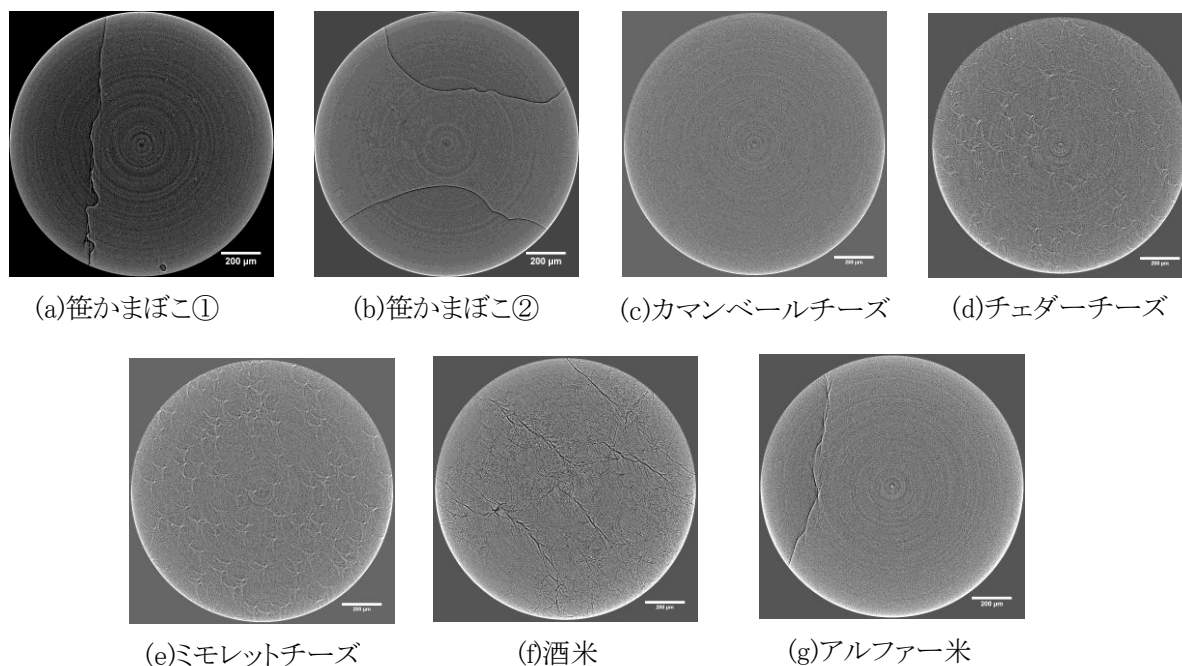


図 2 加工食品等の放射光 CT 測定結果

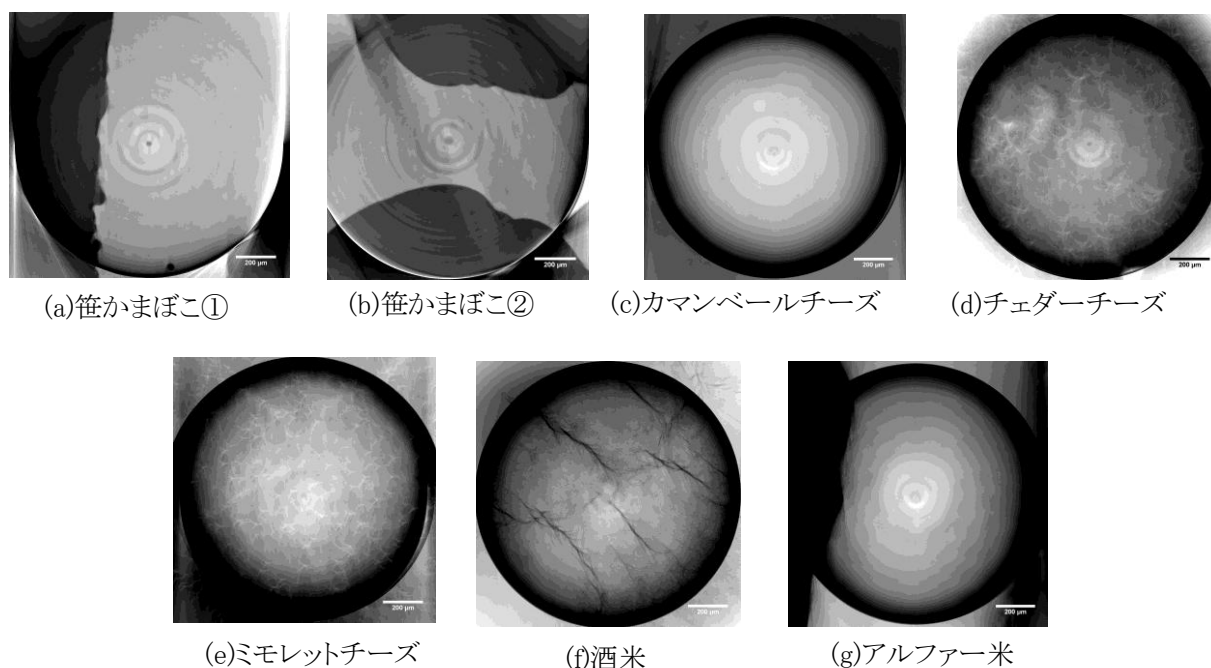


図 3 加工食品等の放射光 CT 測定結果(位相回復処理像)

い構造を有していることを確認した。

NanoTerasuではX線照射による影響を低減するため、サンプルを4℃に保持し測定した。測定結果を図2に示す。カマンベールチーズとアルファーマイではサンプル内部でコントラストの差が見られず、全体が一樣となっていた。一方、笹かまぼこ、ミモレットチーズ、チェダーチーズ、酒米ではサンプル内でコントラストの差が見られ、構造または構成する物質に違いがあるものと考えられた。さらに、各サンプルについて位相回復処理を行ったとこ

ろ(図3)、酒米において吸収像では確認が難しかった吸収の小さい構造が強調された。

3.2 企業ニーズへの適応可能性調査

3.2.1 かまぼこの応力ひずみ曲線の取得

チルド品と凍結品①から③の応力ひずみ曲線を図4に示す。これより、凍結品はチルド品と比較してかかる

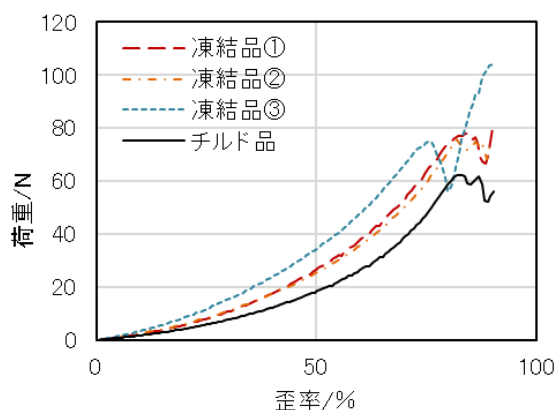


図4 笹かまぼこのテクスチャー評価結果

荷重が大きいことが分かった。特に凍結品③は凍結品①、凍結品②よりも大きく、産業技術総合センター職員12名による官能評価の結果(表1)と同様の傾向を示した。

3.2.2 内部構造観察

ラボ機を用いてチルド品および凍結品の内部構造観察を行ったが、チルド品と凍結品とでは構造の違いは確認できなかった(図5)。XRMによる測定では詳細な構造の観察が難しかったことから、NanoTerasuにて放射光を用いた観察を実施した。4℃での測定結果(図6)ではチルド品、凍結品ともに試料のコントラストが均一となっており詳細な内部構造の観察には至らなかった。そのため、小さい密度差を強調して微細な構造の観察を試みるため位相回復処理を施したが同様の結果となった。

チルド品と凍結品の比較が難しいことから、冷凍方法による内部構造の違いの評価を試みるため-20℃でX線CT測定を行った。その結果(図7)、吸収像および位相回復処理像において吸収の弱い構造(図中点線矢印(以下、構造①))と強い構造(図中実線矢印(以下、構造②))が見られた。先の調査にて、凍結状態のかまぼこをSPring-8にてX線CT測定した際、X線吸収の濃淡が見られたという報告³⁾があり、今回の結果と類似の吸収像が得られた。また、特に構造①において、凍結方法によりその大きさの違いが確認でき、構造②は網目構造状となっているのが確認できた。凍結方法により内部構造の違いを確認できたが、冷凍方法に起因する違いであるかは他の手法で得られる分析結果と併せて検討する必要があると思われた。

4 まとめ

表1 冷凍品の硬さの官能評価結果

サンプル	硬さ (噛み始め)				
	硬い	やや硬い	普通	やや柔らかい	柔らかい
凍結品①	2	10			
凍結品②	1	8	3		
凍結品③	7	5			

放射光の食品への応用を検討するため、ラボ機のX線分析顕微鏡(XRM)およびNanoTerasuで測定を行った。XRMでは水分の多いサンプルではX線の吸収によって発生する熱の影響で微細な構造を確認することは難しかったが、NanoTerasuにてサンプル温度を低温に保つことによって内部構造の観察を行うことが可能であると分かった。また、食品の様に含まれる成分間の密度差が小さいサンプルにおいて位相回復処理を適応することで構造が明確になる場合があったが、さらなる事例の蓄積が必要であることが分かった。

さらに、宮城県の特産品である笹かまぼこについて冷凍方法による硬さの違いの評価について、硬さに起因する構造の把握には至らなかったが、冷凍方法によって内部構造が異なることを確認できた。

以上の結果から、NanoTerasuにおいて食品のX線CT測定は温度制御を行うことによって試料への影響を低減できることが分かった。このことから他の分析手法と組み合わせることで内部構造の違いを評価できる可能性があることが分かった。

謝辞

本調査の放射光測定に当たり、東北大学大学院農学研究科 教授 原田昌彦先生、教授 高山裕貴先生、准教授 日高将文先生をはじめとする皆様に多大なる御協力をいただきました。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献、引用URL

- 1) 原田昌彦、高田昌樹、村松淳司. 次世代放射光施設の特徴と利活用に向けた取り組み. オレオサイエンス. 2022、22(2)、pp.55-60
- 2) 活用支援FS事例集. “食品企業ニーズに基づく

放射光利用に関する調査”。宮城県産業技術総合センターWebサイト.

https://www.mit.pref.miyagi.jp/wp-content/uploads/2024/03/2-20XRM_food_tomography_R4.pdf (2026-02-24 参照)

- 3) 令和2年度仙台市既存放射光施設活用事例創出事業(トライアルユース)創出事例報告書

https://www.city.sendai.jp/renkesuishin/jigyosha/kezai/sangaku/documents/r2_tohoku_agriscience_innovation_report.pdf (2026-5-21 参照)

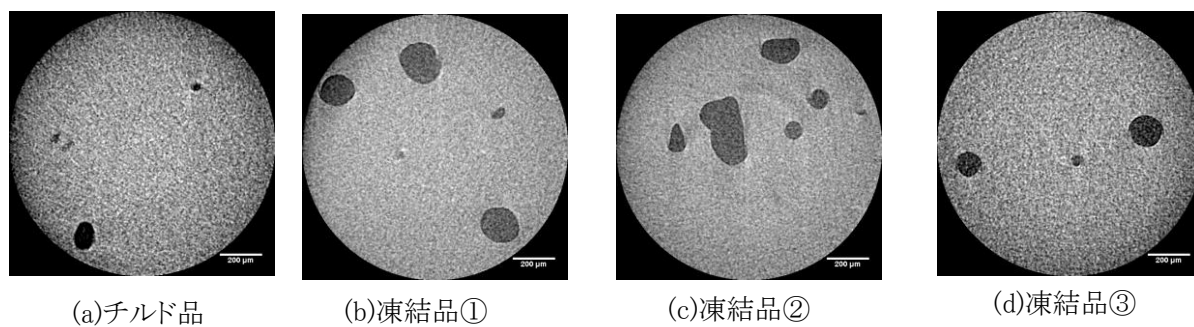


図 5 笹かまぼこのラボ CT 測定結果

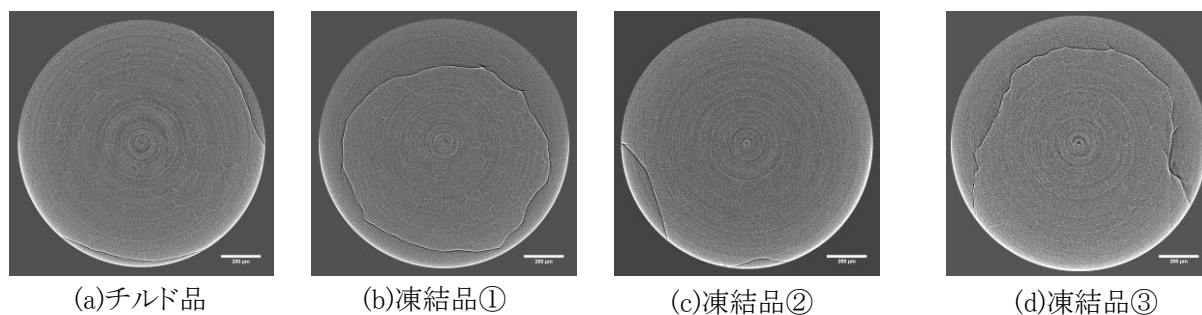


図 6 笹かまぼこの放射光 CT 測定結果(冷蔵条件)

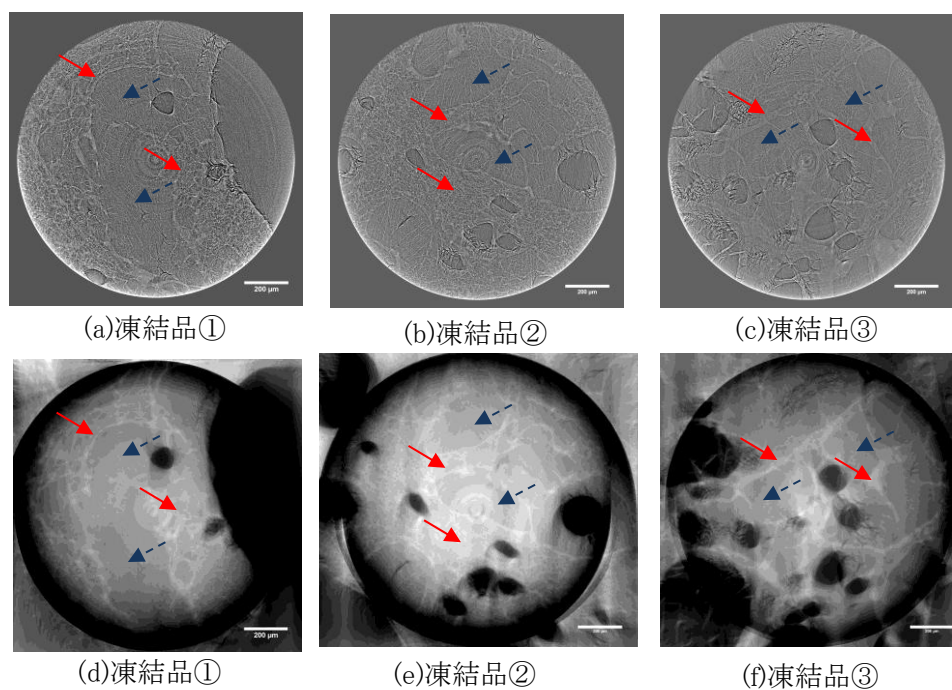


図 7 笹かまぼこの放射光 CT 測定結果(冷蔵条件、(a)~(c):吸収像、
(d)~(f):位相回復処理像)

宮城県産業技術総合センター研究報告

ISSN 2759-0038

令和7年度 No.23

2026年8月発行(年1回発行)

発行

宮城県

(産業技術総合センター)

〒981-3206

宮城県仙台市泉区明通二丁目2番地

TEL 022 - 377 - 8700

FAX 022 - 377 - 8712

URL <https://www.mit.pref.miyagi.jp/>
