

ISSN 2759-0038

令和5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.21

2024年8月発行

---

宮城県

MIYAGI Prefectural Government



## 目次

### 【研究論文】

1	メタサーフェスデバイスの研究 .....	1
	小松 迅人、佐藤 裕高	
2	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 .....	7
	坂下 雅幸、佐藤 裕高、安齋 哲	

### 【短報】

1	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 .....	15
	益田 佳奈、伊藤 利憲、篠塚 慶介	
2	固化流れシミュレーション技術の開発 .....	19
	吉川 穰、内海 宏和	
3	不整列データセットを用いた異常検知アルゴリズムの性能検証 ー 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 ー .....	23
	高野 寛己、太田 晋一、高久 悠杜	
4	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 ー 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 ー .....	29
	高久 悠杜、高野 寛己、太田 晋一	
5	適応的実験計画法による開発加速化 .....	33
	内海 宏和	
6	みやぎアップグレードリサイクル推進事業 .....	37
	推野 敦子、遠藤 崇正、佐久間 華織、佐藤 勲征	
7	小仕込み試験による優良菌株の選抜 ー 県産清酒多様化のための酵母開発 ー .....	41
	石川 潤一	

8 多変量解析を活用した工程管理技術の検討 .....	45
	羽生 幸弘
9 イチゴ「にこにこベリー」の特性評価と品質向上に向けた検討	
－ 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 － .....	51
	高山 詩織

【ノート】

1 パラメトリック設計によるラティス構造生成 .....	57
	篠塚 慶介、伊藤 利憲、益田 佳奈
2 ラマン分光法による有機化合物分析	
－ ラマン分光・赤外分光の測定手法に関する調査 － .....	61
	千葉 亮司
3 GC-MS のデータ解析用プログラムの作成	
－ ガスクロマトグラムの解析における高度化・省力化の検討 － .....	63
	浅野 壮宏
4 宮城県産「セリ」の冷凍条件の検討 .....	65
	高山 詩織



# 【研究論文】



【研究論文】

【令和4～5年度 県単独試験研究】

## メタサーフェスデバイスの研究

小松 迅人、佐藤 裕高  
機械電子情報技術部

無線通信の利用は、スマートフォン等の通信機器の普及に伴い、通話だけでなく情報検索、娯楽、決済手段として生活様式にまで拡大されQOL (Quality of life) の向上に貢献している。一方、急速なスマートフォンなどの携帯端末の普及は、データ量の世界的な利用増加、情報のボーダレス化も重なり、4Gの規格の周波数帯域の利用のままでは、データ通信に係る速度遅延による質の低下が考えられる。この課題には、高速データ通信化および大容量化技術が欠かせなく、5Gに見られる新たな周波数帯の活用としてミリ波の研究および応用展開が急がれている<sup>1)</sup>。

しかし、5G等に使用される高い周波数帯域の電波は、到達距離が数十から数百メートル<sup>2)</sup>などと短いことと、指向性が増すことから建物などの陰の部分に電波の回り込みが出来ない特有の課題がある。これらに対応には、目的の角度に反射する機能を持ったアンテナをある間隔ごとに必要であると言われており、この機能性を持たせるには、メタサーフェスを活用したアンテナが有効との研究報告がされている<sup>3), 4), 5)</sup>。また、応用展開には、メタサーフェスの機能を発現するためには何が寄与しているかなどの関係性の把握が必要である。本研究では、メタサーフェスの機能を発現するためのディメンジョンと反射角度の関係性を明らかにすることを目的とする。

今年度は、各論文からグラジエントメタサーフェスをモチーフとして、電磁界シミュレーション (HFSS) を用いて機能が発現するパターンを推測し、その結果から機能評価用サンプルを作製し、フリースペース法によりサンプルに垂直に電波を照射し反射された角度を計測した結果、目的どおりの機能が確認できたので報告する。

キーワード: 5G、メタサーフェス、電磁界シミュレーション、光反応メタロイド材料、光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システム

## 1 緒言

近年、スマートフォン等のモバイル端末は、携帯電話の通話機能に加え手のひらでインターネットに繋がる情報収集・発信、娯楽や決済の手段となり利用増加の傾向が見られる。ある通信会社のデータでは、2010年数%台であった普及比率が2022年には90%台になるなどの大幅な普及が報告されている<sup>1)</sup>。

携帯端末による無線通信の利用は、生活様式に欠かせない技術のひとつとなってきており、個々の生活の向上に貢献しているが、急速なスマートフォンなどの無線携帯端末の普及は、データ量の世界的な利用増加、情報のボーダレス化も重なり、4Gの規格の周波数帯域のままでは、データ通信速度遅延による質の低下が考えられるまでになってきている。

この課題には、高速データ通信化および大容量化技術が欠かせなく、5Gに見られる新たな周波数帯の活用

としてミリ波の研究および応用展開が急がれている。

5G等に使用される高い周波数帯域の電波は、波長が短いことや指向性が高いことなどの特徴があるため、長い距離を伝播させるにはどうするか、建物などの陰になる部分への電波の回り込みをどう回避するかなどの課題がある。これらの課題に対応するには、複数の機能性を持ったアンテナが必要と考えられており、また、機能性を持たせるには、メタサーフェス(図1)を活用したアンテナが有効との研究報告がされている<sup>3), 4), 5)</sup>。

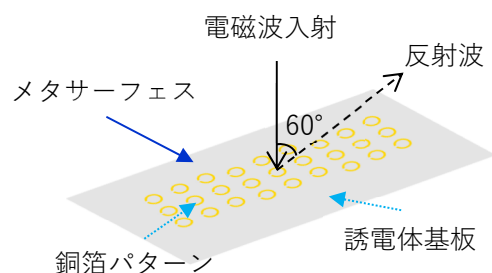


図1 メタサーフェスの反射イメージ

本研究では、高い周波数帯域の電波に対して、設計者が意図する反射方向の制御などの機能性が付与できるとされているメタサーフェスにおいて、機能が発現するためのディメンジョンと反射角度の関係性を明らかにすることを目的とする。

今年度は、各論文からグラジエントメタサーフェスをモチーフとして、HFSS(電磁界解析)シミュレーションを用いて機能が発現するパターンを推測し、その結果から機能評価用サンプルを作製、フリースペース法によりサンプルに垂直に電波を照射し反射された角度を計測した結果、目的どおりの機能が確認できたので報告する。

## 2 実験方法

### 2.1 メタサーフェス論文検索から計測までの一連の検証について

メタサーフェスとは、自然界の現象には存在しない反射の特性を備えた人工表面のことである。微細な形状パターンにより、通常の物質とは異なる反射・屈折を発現させることが出来る。計算で割り出した目的に合う形状パターンは、目的通りの電波の反射や屈折が可能となる。メタサーフェスは、ジオメトリとディメンジョンの緻密な設計が必要である。そこで、メタサーフェスとなる条件を、報告されている研究論文から把握し、目的の屈折を発現させる形状の設計研究を行った。

今年度は、研究論文<sup>(6)-10)</sup>からモチーフ形状を割り出し、電磁界シミュレーション、パターン作製、反射計測までの一連の検証を、下記の手順で行った。

- ① メタサーフェスに関する論文検索
- ② 論文からモチーフ形状の割り出し・データ作成
- ③ 電磁界シミュレーション
- ④ アンテナパターンサンプル作製
- ⑤ サンプルの反射特性評価

### 2.2 モチーフ形状の決定と電磁界シミュレーションについて

メタサーフェスの形状は、Split Ring Resonance(SRR)など様々あるが、任意の角度に形状で反射制御が可能とする報告があるグラジエントメタサーフェスをモチーフ形状に決め論文を元に検証を進めた。

電磁界シミュレーションは、Ansys HFSS(Ver 13.0)を使用した。

28 GHzにおける60度反射のグラジエントメタサーフェスのユニットセルを論文<sup>7)</sup>に基づき設計した。

ユニットセル(図2)の周期は、 $D_x = \lambda_0 / \sin\theta_R$  および  $D_y = \lambda_0 / 2$  ( $\lambda_0 = 10.7\text{mm}$ ) から  $D_x = 12.35\text{ mm}$ 、 $D_y = 5.35\text{ mm}$ とした。

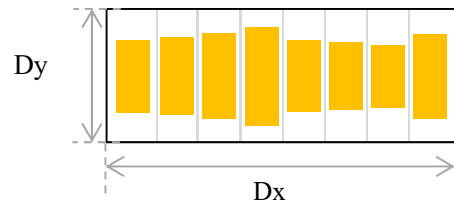


図2 ユニットセルのイメージ

また、ユニットセル内のパッチエレメントの数は8とした(図3)。

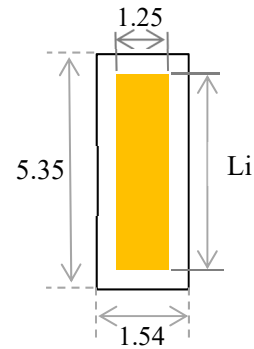


図3 パッチエレメントのイメージ

シミュレーションで用いたPETの材料パラメータは、比誘電率3.2、誘電正接 $\tan\delta = 2.0 \times 10^{-2}$ とし、基材(PET)の厚みを188  $\mu\text{m}$ 、パッチおよびグランドプレーンの厚みをそれぞれ100 nmとした。

まず、自由空間インピーダンス( $\eta_0$ )、i番目のパッチエレメントの中心座標を( $x_i$ )として、局所位相が下記のRの位相と一致させるようにLiの値を決めた。

$$R(x_i) = (Z_s(x_i) - \eta_0) / (Z_s(x_i) + \eta_0)$$

ここで、複素表面インピーダンス( $Z_s$ )は次式で求まる。

$$Z_s(x) = \frac{\eta_0}{\sqrt{\cos 60^\circ}} \frac{\sqrt{\cos 60^\circ} + \exp(-j k_0 x_i \sin 60^\circ)}{1 - \sqrt{\cos 60^\circ} \exp(-j k_0 x_i \sin 60^\circ)}$$

$k_0$  は自由空間波長(m)

次に、上記の局所反射位相設計で決められたLiの値を初期値として準Newton法に基づく最適化を行い、メタサーフェス反射板の構造最適化を実施した。

### 3 実験結果及び考察

#### 3.1 メタサーフェスの電磁界シミュレーションについて

パッチの長さ(Li)とその長さでの位相の関係を、図3のパッチモデルを作成し、Wは固定した条件で、パッチの長さを0.1から5.35 mmまでスイープさせシミュレーションにより求めた(図4)。

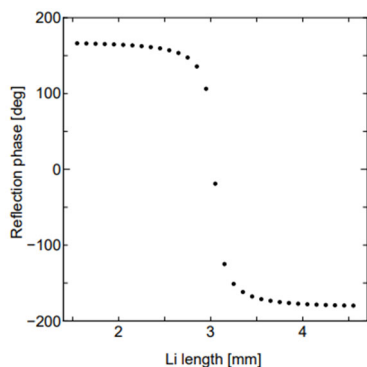


図4 シミュレーションによる Li 長さ  
と位相の関係

この位相とパッチ長さの関係を求めたシミュレーション結果から、それぞれの長さや位置が決定されたパッチをセルに配置し、28 GHzに対応する60度反射のグラディエントメタサーフェスモデルを作成した(図5)。

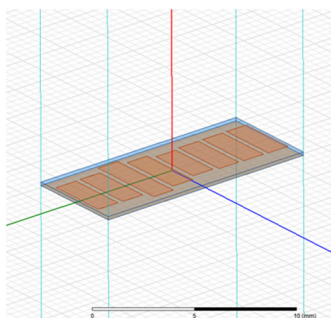


図5 グラディエントメタサーフェスモデル

基材の材質はポリエチレンテレフタレート(PET)、パッチ部およびグランドプレーン部の材質は銅とし、ユニットセルを5×5の縦横配置にして、28 GHzの周波数の電波をメタサーフェス面に垂直に入射させた際の、面から反射する電波の位相を求めるシミュレーションを行った。

ユニットセルの長手方向面を-90~90度の範囲で10度ごとの位相でのアンテナ特性(ゲイン値)のシミュレーションを行った(図6)。

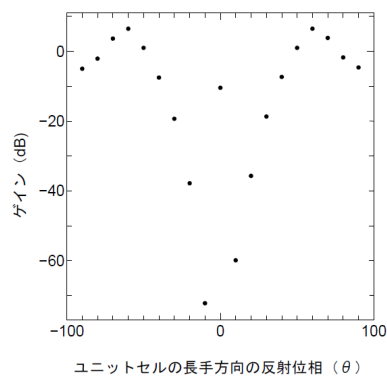


図6 ユニットセルの長手方向に関する位相  
とアンテナのゲインのシミュレーション結果

また、ユニットセルを5×5の縦横配置のアンテナの遠方界の電場の特徴を求めるシミュレーションを行った。

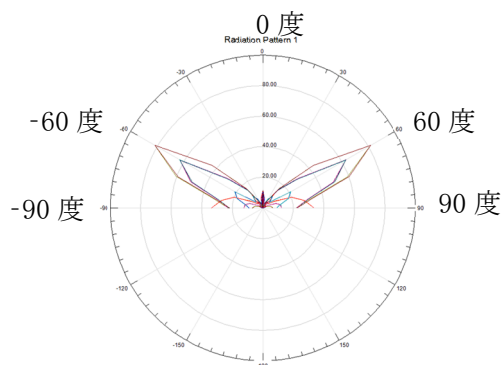


図7 ユニットセル長手方向の遠方界シ  
ミュレーション結果

28 GHzの周波数を垂直方向(0度)から入射させた際に、電場がサーフェス面から60度にピークとなる特徴を持ったシミュレーション結果であった(図7)。

ところで、位相と長手方向の配置距離(Dx)の関係性を把握するためシミュレーションによる検証を行った。

28 GHzで45度反射の機能を持つDx'を求め28 GHzで60度反射を発現するDxの間隔でセルを配置して、どちらの傾向が強いのかを検証した。

具体的には、短手方向は、 $\lambda/2$ の関係式からDyは5.35 mmと一定とし、45度の反射を発現する長手方向の長さ(Dx'=15.12 mm)を持ったセルを、HFSSのコマンド「Antenna Array Setup」の「Distance Between Cells のIn U Direction」を用いて、60度反射を発現するセルの距離での配置(Dx=12.35 mm)にして、ユニットセルを5×5の縦横配置したアンテナの遠方界の電場の特徴を

求めるためシミュレーションを行った(図8)。

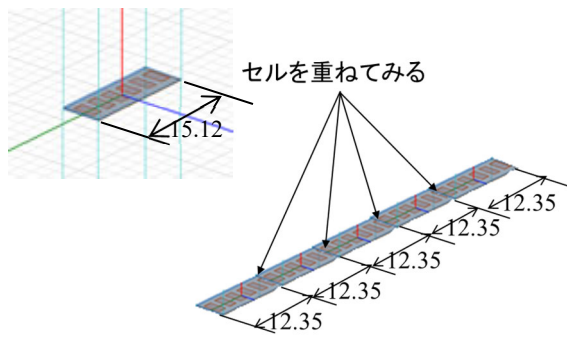


図8 45度反射用のユニットセルの配置間隔を60度反射のセル長の間隔に配置したイメージ

45度反射のパッチ配置でのユニットセルの配置間隔を、60度反射のセル長の間隔に配置すると、電場がサーフェス面から60度にピークとなる特徴を持ったシミュレーション結果であった(図9)。

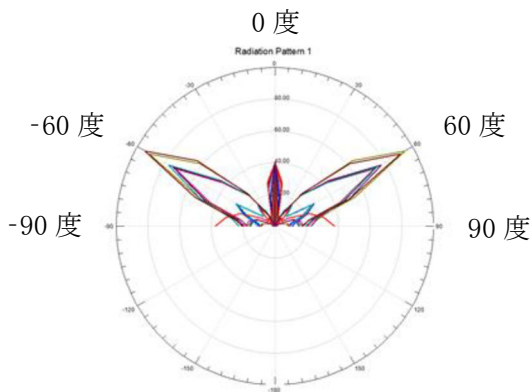


図9 45度反射用のユニットセルの配置間隔を60度反射のセル長の配置間隔にした場合の遠方界シミュレーション結果

このことにより、パッチ寸法やパターンの違いがあっても、条件を満たせばスネルの法則( $Dx = \lambda_0 / \sin\theta_R$ )が有効と推測できた。

### 3.2 アンテナパターンサンプル作製について

評価用サンプルには、厚さ188  $\mu\text{m}$ のPET<sup>(11)</sup>(東レ株式会社製)を基材に用いて、パッチ部およびグランドプレーン部には光反応メタロイド材料<sup>(12)</sup>(株式会社イオックス社製)を塗布したシートを使用した。光反応メタロイドは、UV照射された部分のメッキ特性が失活する材料である。

パターン露光には、フィルムマスクと露光ユニット

(ESKO社製 XPS CRYSTAL5080)の高精度な露光機を使用した。

パターンの露光後にパッチの厚みを1  $\mu\text{m}$ になるよう無電解メッキを行い評価用28 GHz60度反射メタサーフェスサンプルの作製を行った(図10)。

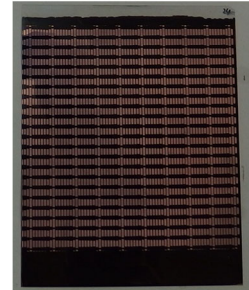


図10 評価用28GHz60度反射メタサーフェスサンプル例

### 3.3 サンプル反射測定について

測定には、京都府中小企業技術センター<sup>(13)</sup>保有の光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システムを使用した(図11)。評価サンプルを中心に配置し、左側は電波を入射するアンテナ、右側は反射波を受信するアンテナ、入射波から角度60度に受信アンテナを設置し計測を行った。

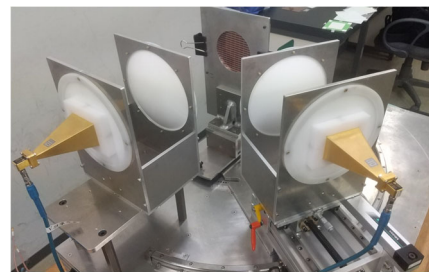


図11 光・マイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システム

作製した4枚の28 GHz 60度反射メタサーフェスを評価した。サンプルごとのばらつきは見られるが27.5 GHz付近での反射特性が得られた(図12)。

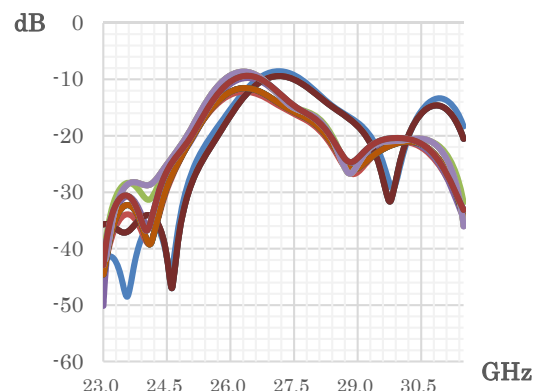


図12 4サンプルを測定した反射特性のグラフ



メタサーフェス面を90度として受信側のアンテナの角度のみを5度ずつ45度まで変化をさせて、角度による反射強度を測定した(図13)。

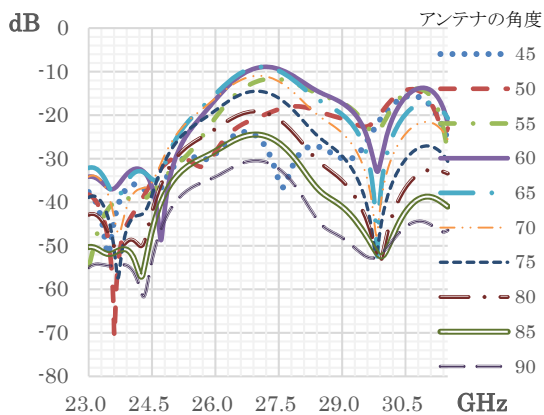


図 13 受信側アンテナの角度を変更した際の反射特性のグラフ

受信側のアンテナが60度の時にピークが見られ反射の特性が確認できた。

表 1 周波数から計算される波長およびセルの長さ

周波数 (GHz)	波長(mm)	60度反射のセルの長さDx(mm)
26	11.53	13.27
26.5	11.312	13.04
27	11.103	12.81
27.5	10.901	12.58
28	10.706	12.35

ところで、反射特性のグラフ(図13)でそれぞれのピークが、28 GHzから下方の周波数帯にシフトしている。また、0.5 GHzごとに200  $\mu$ mの寸法差で影響が出ると推測される(表1)。パターン露光で200  $\mu$ mの寸法差が発生すると考えられたが、表面粗さ・形状測定機(テラーホブソン社製 フォームタリサーフPGI1250A)を用いて、27.5 GHz付近にピークが出現したサンプルを計測した結果では、パッチの位置および配置で200  $\mu$ mの寸法差は見られなかった。

#### 4 結言

本年度は、下記のとおり、論文からモチーフとするメタサーフェスの形状を割り出し、シミュレーションによる検証、メタサーフェス作製、測定までの一連の流れの検証を行った。

- (1) 研究論文からモチーフ形状の割り出し
- (2) 電磁界シミュレーション
- (3) パターン作製
- (4) 反射計測

結果、140GHzの帯域で任意の反射角度を発現するメタサーフェス形状を元に、スネルの法則や論文に掲載されている式からHFSSを活用したメタサーフェスモデルのディメンションの決定、シミュレーションによる事前の機能検証が可能となった。

また、光反応メタロイドを用いたサンプル作製とマイクロ波・ミリ波ネットワーク測定システムでの測定で、実際のメタサーフェスの機能とシミュレーションの結果が同等となる結果が得られた。

今後は、形状の測定方法やシミュレーションに使用する各パラメータ含めシミュレーションと実測値の精度を高める手法の検討を行っていく。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、メタサーフェスの設計、シミュレーション技術に関しては、産業技術総合研究所 センシングシステム研究センター センサ基盤技術研究チーム 日下研究チーム長、物理計測標準研究部門 電磁気計測研究グループ 加藤主任研究員、マスク作製、パターン露光およびサンプル作製に関しては、株式会社イオックス中澤様、測定に関しては、京都府中小企業技術センター小山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) 株式会社 NTTドコモ モバイル社会研究所 データで読み解くモバイル利用トレンド2022-2023 ―モバイル社会白書―  
<https://www.moba-ken.jp/whitepaper/>, (参照 2024-05-29).
- 2) Yaniv Azar, George N. Wong, Kevin Wang, Rimma Mayzus, Jocelyn K. Schulz, Hang Zhao, Felix Gutierrez, Jr., DuckDong Hwang, and Theodore S. Rappaport "28 GHz propagation measurements for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in New York city", 2013 IEEE International Conference on

- Communications (ICC), 09-13 June 2013, DOI: 10.1109/ICC.2013.6655399
- 3) 株式会社KDDI総合研究所、“世界初、5G本格展開時代に向けた28GHz/39GHz帯デュアルバンド透明メタサーフェス反射板の開発に成功”、2021年1月20日、  
<https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2021/012001.html>, (参照 2024-05-29).
  - 4) 株式会社NTTドコモ AGC株式会社、“メタサーフェス技術により窓ガラスの電波レンズ化に世界で初めて成功-屋外から屋内へ効率的にミリ波を誘導-”、2021年1月26日、  
[https://www.docomo.ne.jp/info/news\\_release/2021/01/26\\_00.html](https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2021/01/26_00.html), (参照 2024-05-29).
  - 5) (株)R&D支援センター、“メタマテリアル、メタサーフェスの設計・作製と応用技術”、2020、ISBN 978-4-905507-46-8
  - 6) 村上 靖宜、“メタ・サーフェス反射板を用いたアンテナの高性能化に関する研究”、福井大学学位論文、September 2015
  - 7) Yuto Kato, Kohei Omori, Atsushi Sanada, “D-Band Perfect Anomalous Reflectors for 6G Applications”、IEEE Access、vol. 9、23 November 2021、157512-157521、DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3130058
  - 8) A. Díaz-Rubio, V. S. Asadchy, A. Elsakka, and S. A. Tretyakov, “From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors”、Sci. Adv., vol. 3, no. 8, Aug. 2017, Art. no. e1602714.
  - 9) 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, and Din Ping Tsai, “High-Efficiency Broadband Anomalous Reflection by Gradient Meta-Surfaces”、Nano Lett. 2012, 12, 6223-6229, DOI: 10.1021/nl3032668
  - 10) Olli Luukkonen, Constantin Simovski, Member, IEEE、Gérard Granet、George Goussetis、Member, IEEE、Dmitri Lioubtchenko、Antti V. Räsänen、Fellow、IEEE、and Sergei A. Tretyakov, Fellow, IEEE, “Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches”、IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume: 56, Issue: 6, June 2008, 1624 – 1632
  - 11) ルミラーU4 東レ株式会社  
[https://www.films.toray/products/lumirror/lum\\_009.html](https://www.films.toray/products/lumirror/lum_009.html), (参照 2024-05-29).
  - 12) メタロイド 株式会社イオックス  
<https://www.iox.co.jp/>, (参照 2024-05-29).
  - 13) 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](https://www.kptc.jp/mtc/wp-content/uploads/2016_09-20.pdf), (参照 2024-05-29).



【研究論文】

【令和4～5年度 県単独試験研究】

## 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

坂下 雅幸、佐藤 裕高、安齋 哲  
機械電子情報技術部

令和3年度に整備した10m法電波暗室(図1)によってEMC評価の代表的な評価のひとつである10 m距離での放射電磁ノイズ測定が可能となり、国際標準の測定距離で放射電磁ノイズ測定が可能となった。しかし、これまで地域企業に利用いただいていた3m法電波暗室(図2)との相関性や他機関の電波暗室との相関性に対する技術相談が地域企業から寄せられることが予想されたことから、10m法電波暗室を中心に既存3m法電波暗室や他機関の電波暗室との放射電磁ノイズの測定環境依存を調査し、測定距離や試験機関による差異、留意点を実測することで定量的に把握し、放射電磁ノイズ測定を実施する地域企業にこれらの結果を展開するとともに、10m法電波暗室の利用促進を目指した。

キーワード: EMC、放射電磁ノイズ測定、10m法電波暗室、3m法電波暗室

## 1 緒言

EMC総合試験棟整備により長年にわたり地域企業からの要望が非常に高かった10m法電波暗室を導入した。

新たに可能となった10m法での放射電磁ノイズ測定とこれまで実施していた3m法電波暗室での3m法による放射電磁ノイズ測定との相関性等についての知見を得ることで、利用企業の3m法から10m法への移行促進や、予約状況に応じてどちらの電波暗室を選択しても同等の測定が実施できるよう、測定環境依存に関する調査を実施した<sup>1)</sup>。また他機関の電波暗室との相関性の検証を実施し、測定環境による差異に関する知見を得るとともに、他機関と情報共有などの連携強化を図った。

## 2 EMC評価について

## 2.1 EMCとは

EMCはElectroMagnetic Compatibilityの略で、日本語では「電磁両立性」と呼ばれており、JIS規格では装置又はシステムの存在する環境において、

① 許容できないような電磁妨害をいかなるものに対しても与えず、

かつ、

② その電磁環境において満足に機能するための装置又はシステム

と定義<sup>2)</sup>されている。

①を満足しているかの評価を「エミッション(EMI: ElectroMagnetic Interference)測定」といい、電子機器が周囲の電子機器などに影響を与える可能性のある電磁妨害波を放出しているか評価する必要がある。

また②を満足しているかを評価する「イミュニティ(EMS: ElectroMagnetic Susceptibility)試験」があり、電子機器が周囲の電磁環境の影響を受けても誤作動しないかを評価する必要がある。電子機器はこれらの試験をクリアし、①と②が両立していることを証明する必要があり、それら試験を総称してEMC評価という。

## 2.2 電波暗室について

電波暗室とは、外部からの電磁波の影響を遮断し、外部にも電磁波を漏らさない金属板の部屋に、電磁波が内部で反射しないように電波吸収体を隙間なく張り付けた試験設備であり、EMC評価などの電磁波やアンテナの電波を扱う試験や実験を行う際、外界の様々な電波と切り離すために重要な設備となっている。

EMC評価で用いる電波暗室の国際標準は測定距離10 mを確保できる10m法電波暗室であるが、当センターの既存設備としてこれまで運用していた電波暗室は小型機器のEMC試験に限定した3m法電波暗室であった。この度EMC総合試験棟整備により10m法電波暗室を整備したことで、当センターにおいても国際標準の測定環境でのEMC試験が可能となった。



図1 EMC総合試験棟に導入した10m法電波暗室

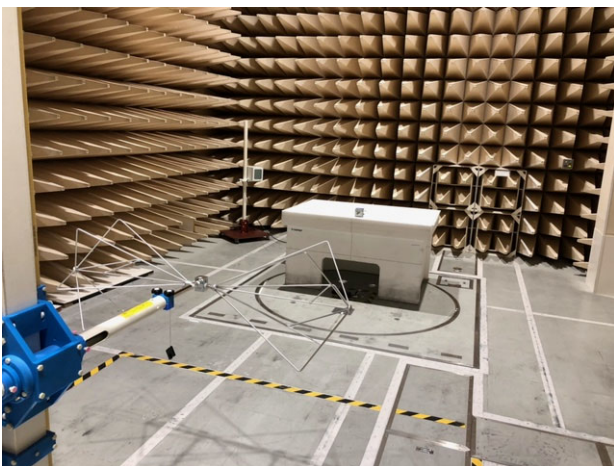


図2 既存の3m法電波暗室

### 3 調査

#### 3.1 測定距離による環境依存調査

宮城県産業技術総合センターに整備された10m法電波暗室と3m法電波暗室を用いて、測定距離による電磁ノイズ測定結果の差異について調査した。

測定については、10m法電波暗室において測定距離を10 mと3 mで実施し、3m法電波暗室では測定距離3 mで実施した。

##### 3.1.1 測定方法

10m法電波暗室では30 MHz～1 GHzの周波数範囲をパイログアンテナ：VULB9168(Schwarzbeck社製)を用い、3m法電波暗室では同様の周波数範囲をバイコンカルアンテナ：BBA9106+VHA9103B(Schwarzbeck社製)とログペリオディックアンテナ：UHALP9108(Schwarzbeck社)を用いて評価した。使用したアンテナについては普

段の測定で使用しているアンテナの組み合わせとした。ノイズ発信源としてコムジェネレータ：CG-515(COM-POWER社製)を10 MHz間隔で発信させ、各電波暗室にてピーク検波で放射電磁ノイズ測定を実施し、測定距離による違いを比較した。

なお、測定方法についてはCISPR16-2-3<sup>3)</sup>を参照し実施した。

#### 3.2 測定環境による環境依存調査

同一測定距離の電波暗室で測定環境の差異による影響を調査した。測定については、宮城県産業技術総合センターに整備された電波暗室および他機関の電波暗室で実施し、測定距離は10 m距離、3 m距離の2通りで実施した。

##### 3.2.1 測定方法

測定距離10 mについては、当センターの10m法電波暗室のほか2機関のデータを用いた。測定距離3 mについては、当センターの3m法電波暗室をはじめ、6機関のデータを用いた。また当センターの10m法電波暗室内で測定距離を3 mまで近づけることで同じ測定距離3 mでの評価も実施した。

測定に使用したアンテナは3.1.1で示した組み合わせとした。ノイズ発信源については、測定距離10 mではコムジェネレータ：RSG1000+DPA4000(SCHAFFNER社製)、測定距離3 mではコムジェネレータ：CGO-515(COM-POWER社)を用いて、各電波暗室にてピーク検波で放射電磁ノイズ測定を実施し、測定距離による違いを比較した。

なお、測定方法についてはCISPR16-2-3を参照し実施した。

### 4 調査結果及び考察

#### 4.1 測定距離による環境依存調査結果

10m法電波暗室(測定距離10 m)と3m法電波暗室(測定距離3 m)での測定結果を図3に示す。

ただし、10m法電波暗室と3m法電波暗室では測定距離が異なり、それに伴い受信強度も異なるため、距離換算(補正值10 dB)を行い、検討を実施した。距離換算を行ったグラフを図4に示す。

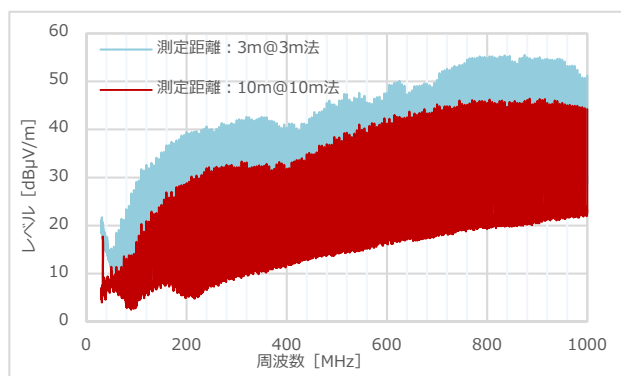
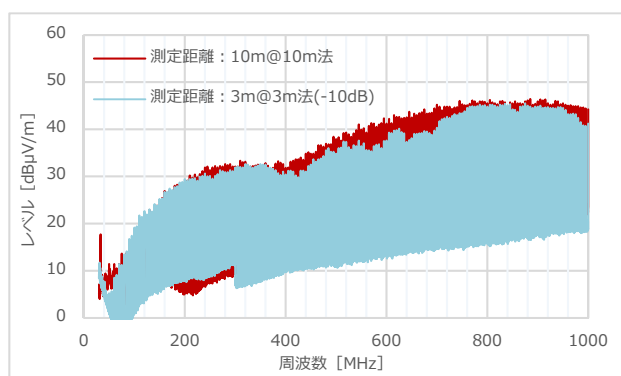
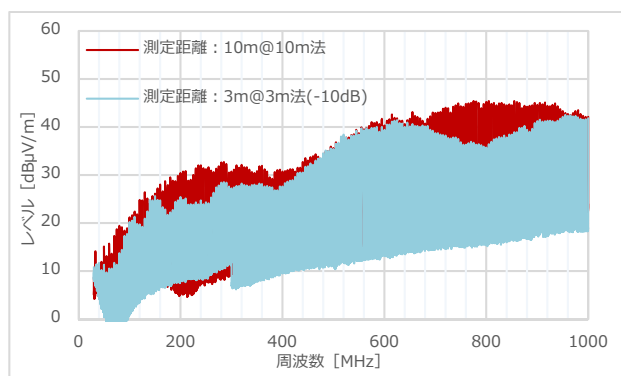


図3 10m法と3m法電波暗室の測定結果(水平偏波)



(A) 水平偏波



(B) 垂直偏波

図4 10m法と3m法電波暗室の測定結果(距離換算後)

水平偏波(図4(A))では400 MHz~800 MHz、900 MHz後半の帯域において、3m法電波暗室での測定結果が低く、垂直偏波(図4(B))では500 MHz以下、650 MHz~950 MHzの帯域において、3m法電波暗室での測定結果が低いことがわかる。

測定結果から、当センターの10m法と3m法電波暗室での比較では3m法電波暗室での測定結果が過小評価となる傾向があることがわかった。

測定差異の要因としては測定距離が異なることでの電磁ノイズの床反射の影響が考えられる。規格上、EMC評価の電磁ノイズ測定では電波暗室の床面は反射面と

するため、測定では試験対象品からの直接波と床反射波の合成波を測定することになる。そのため、測定距離が異なることで床からの反射波が変わり、アンテナ受信時の合成波が変わることで、測定結果にも影響を与えたと推測される。

また、各電波暗室で使用したアンテナが異なっていることも要因の可能性がある。10m法電波暗室で使用したパイログアンテナは、3m法電波暗室で使用したバイコンカルアンテナとログペリオディックアンテナを連結したような形状および周波数特性となっており、30 MHz~1 GHzの測定時にはアンテナの交換が不要になるなどのメリットがある。しかし、ログペリオディックアンテナの後ろにバイコンカルアンテナを連結したような形状となっており、周波数毎の受信ポイントが異なるため、床反射の影響と相まって測定結果への影響を増大させている可能性が考えられる。

今後の展開としては、共通のアンテナを使用して10m法電波暗室と3m法電波暗室での電磁ノイズ測定を実施し、比較評価することが考えられる。

## 4.2 測定環境による環境依存調査結果

### 4.2.1 センター内電波暗室での調査

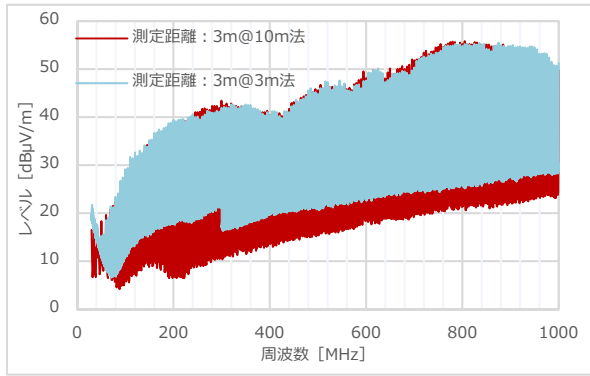
センター内の2つの電波暗室にて調査を実施した。なお、この2つの電波暗室は同じメーカーである。

3m法電波暗室と同様の測定距離になるよう、10m法電波暗室の中でアンテナ距離を調整し、測定距離3 mにして電磁ノイズ測定を実施した。本評価でも10m法電波暗室はパイログアンテナ、3m法電波暗室ではバイコンカルアンテナとログペリオディックアンテナを使用した。結果を図5に示す。

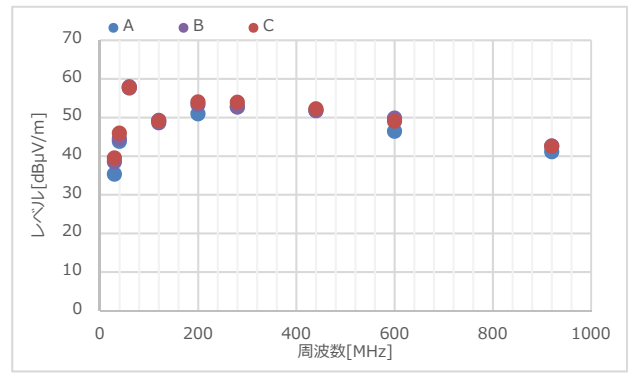
水平偏波(図5(A))においても垂直偏波(図5(B))においてもほぼ同等の測定結果となった。

アンテナの違いや電波暗室仕様の違いなどによる影響は必ずしも排除できないが、測定距離が大きく影響していることが示唆される結果を得た。

こちらも今後の展開としてアンテナを共通にして電磁ノイズ測定を行い、比較評価の実施を想定している。

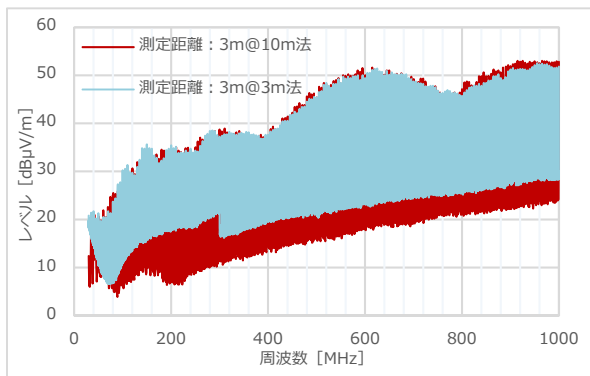


(A) 水平偏波



(B) 垂直偏波

図6 10m法電波暗室での測定結果



(B) 垂直偏波

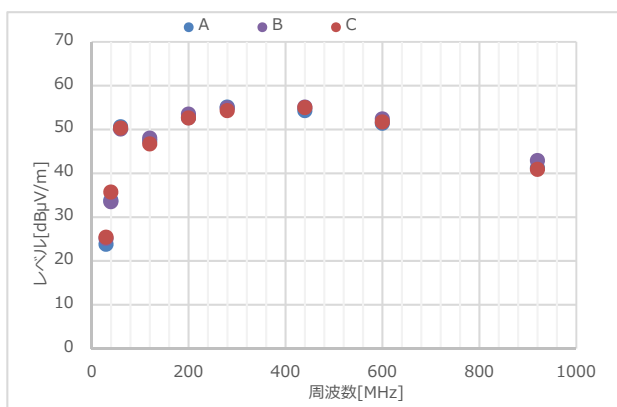
図5 各電波暗室での測定結果

水平偏波(図6(A))も垂直偏波(図6(B))も比較的近い値となった。そこで、多数の試験機関での技能試験で使用される評価指標の一つである、Z-scoreによる評価を行った。結果を図7に示す。Z-scoreは分布の平均値からのずれを示す統計指標であり、判定基準は下記となる。

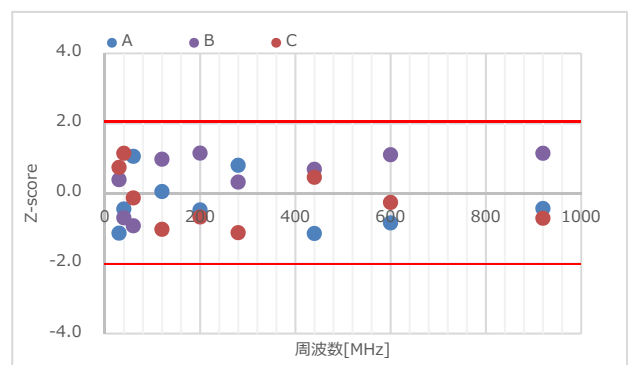
- 判定基準:  $|Z| \leq 2$  : 満足
- $2 < |Z| < 3$  : 疑義
- $|Z| \geq 3$  : 不満足

#### 4.2.2 10m法電波暗室での調査

当センターのほか2機関の10m法電波暗室にて、測定距離10mを統一し電磁ノイズ測定を実施した結果を図6に示す。なお、3機関分のデータを整理しやすくするため、周波数を限定し測定を実施した。

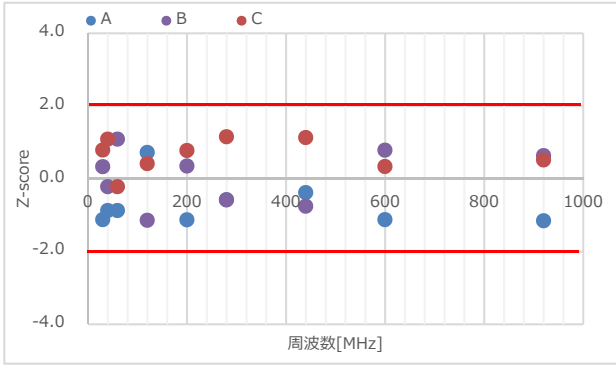


(A) 水平偏波



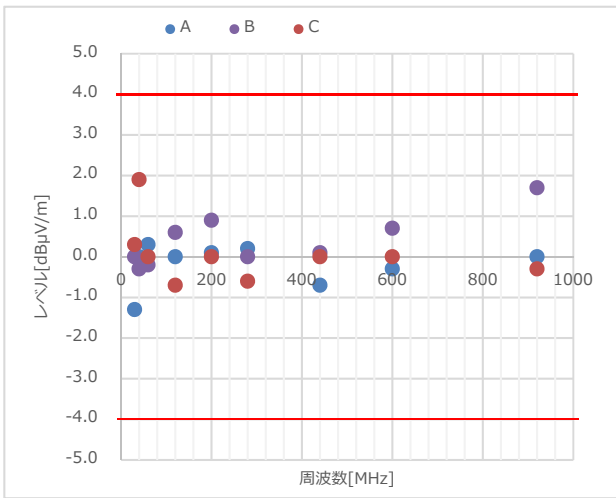
(A) 水平偏波

また、中央値による評価も実施した。図8に示す。サイト評価方法において、測定結果のばらつきを $\pm 4$  dB内の範囲に収めることが一般的なため、参考値として評価基準を $\pm 4$  dB内とした。

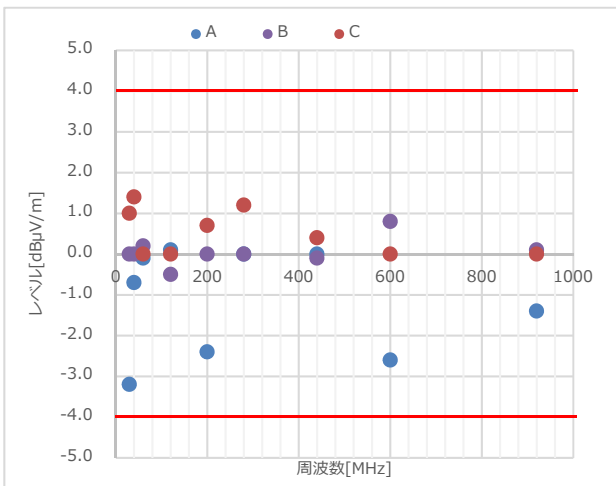


(B) 垂直偏波

図7 Z-scoreによる評価(10m法電波暗室)



(A) 水平偏波



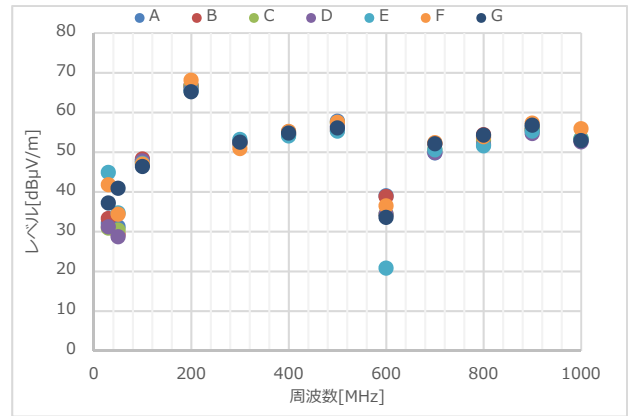
(B) 垂直偏波

図8 中央値による評価(10 m法電波暗室)

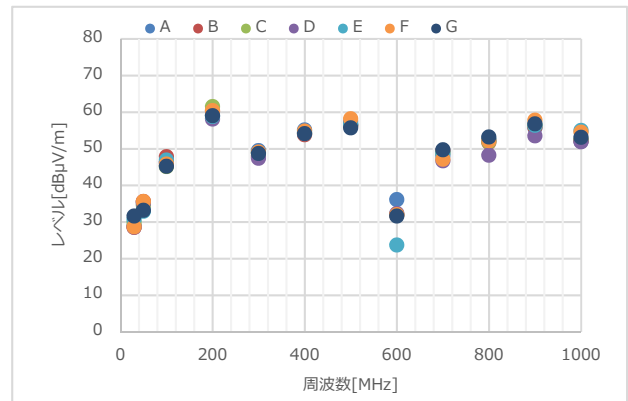
図7より、判定基準 $|Z| \leq 2$ を満足しており、また図8より中央値での評価も $\pm 4$  dBの範囲内に収まっていることから、今回評価した3機関でのサイト間のばらつきは許容内であることが確認できた。

#### 4.2.3 3m法電波暗室での調査

当センターのほか6機関の電波暗室にて、測定距離3 mを統一し電磁ノイズ測定を実施した。結果を図9に示す。なお、7機関分のデータを整理しやすくするため、周波数を限定し測定を実施した。



(A) 水平偏波

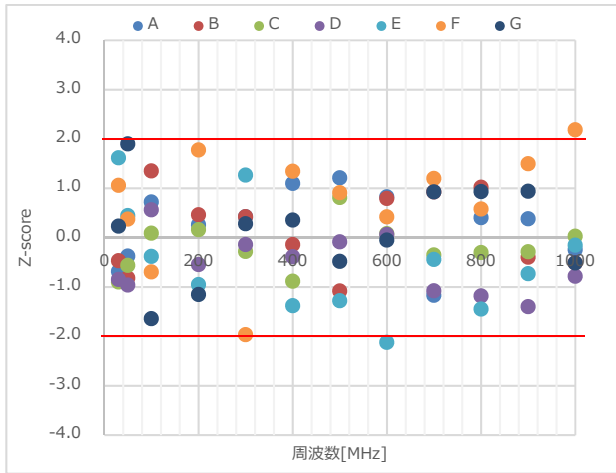


(B) 垂直偏波

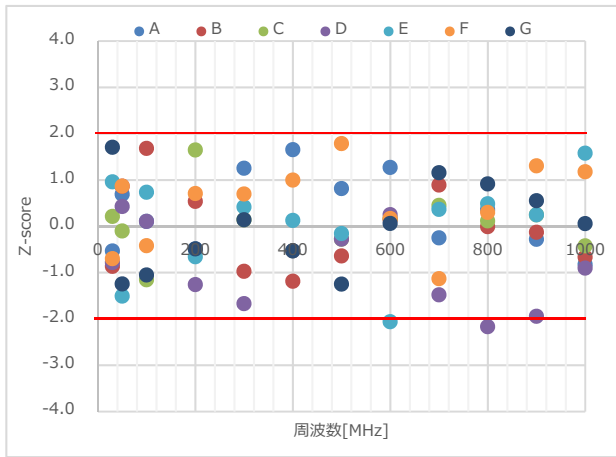
図9 測定距離3m法での測定結果

水平偏波(図9(A))では30 MHz付近と600 MHz、垂直偏波(図9(B))600 MHzで測定結果に差がでた結果となった。そこで4.2.2と同様、Z-scoreおよび中央値による評価を行った。Z-scoreを図10、中央値評価を図11に示す。



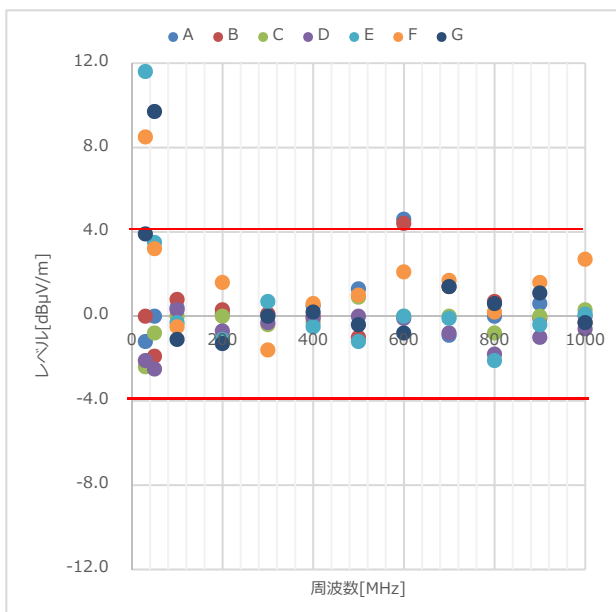


(A) 水平偏波

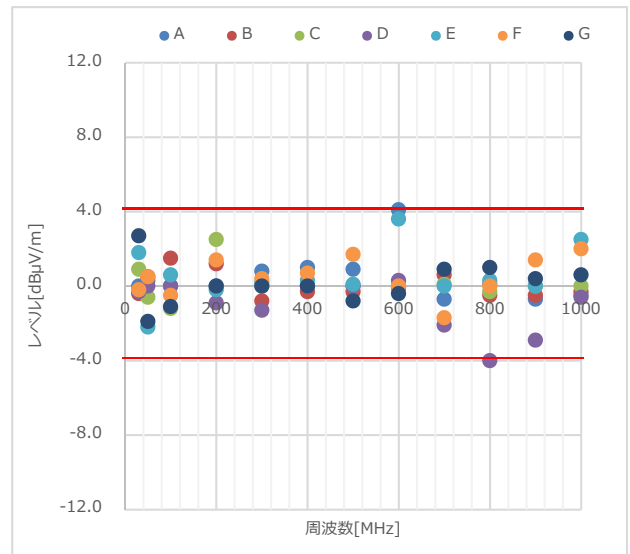


(B) 垂直偏波

図10 Z-scoreによる評価(測定距離3m)



(A) 水平偏波



(B) 垂直偏波

図11 中央値による評価(測定距離3m)

図10より、Z-scoreでは $|Z| \leq 2$ を超えて判定が「疑義」となる機関が数か所あったが、測定値が大きくばらついていた30 MHz付近については $|Z| \leq 2$ を満足していた。Z-scoreは平均値等を使用して評価するため、値がまばらにばらついている場合は平均値などが影響され、結果、あまり問題ないように見えてしまうことが分かった。

そのため、中央値(図11)でも確認したところ、水平偏波のばらつきが大きく、中央値比較では最大11.6 dBの差分が見られた。上記の最大差分が見られた周波数は30 MHz(水平偏波)であり、50 MHz(水平偏波)でも9dB程度の差分が見られた。この結果を参考に測定環境を比較したところ、①測定アンテナのモデルの違い、②電波暗室メーカーの違いが影響していることが推察された。だが、4.2.1より、測定アンテナが異なっても電波暗室メーカーが同じであれば測定結果は近い値になる傾向が確認できたことから、各電波暗室メーカーによる、電波吸収体の違いやグラウンドプレーンの違いなどが影響している可能性が高いことが推察された。

今後は差異が大きい電波暗室にて測定アンテナを統一した追加評価が詳細な検証に効果的と考えられる。

なお、本調査は各機関毎の電波暗室の特性由来による影響を調査したものであり、電波暗室メーカー毎の是非を問うものではない。

## 5 結言

当センターの2つの電波暗室、他機関の電波暗室にて比較評価した結果を下記にまとめる。

(1)測定距離による環境依存

①当センターの 10m 法と 3m 法での放射電磁ノイズ測定の結果を比較すると 3m 法での結果が過小評価となることが分かった。特に垂直偏波の結果が顕著であり、3m 法で評価したものを 10m 法に持ち込むと、場合によっては 10m 法では限度値を超える可能性があることが把握できた。

(2)測定環境による環境依存

①当センターの 2 つの電波暗室において測定距離を統一 (3 m) にして比較したところ、同等の測定結果となることが分かった。

②10m 法電波暗室において測定距離 10 m で比較検証したところ、測定結果のばらつきは許容内であることが確認できた。今後さらに測定機関を増やして継続的な検証を実施したい。

③測定距離 3 m にて複数機関で比較検証したところ、測定値のばらつきが確認された。差異が大きい機関の要因として、測定アンテナの違いも可能性としてはあるものの、電波暗室メーカーが異なるゆえの電波吸収体の種類等の違いによる影響が大きいと推察した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、測定協力いただいた各試験機関担当者には多大なる御協力をいただきました。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 令和4年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2023, No. 20, P57
- 2) EMCに関するIEV用語 (JIS C 60050-161:1997)
- 3) CISPR16-2-3 Ed.4.0:2016 無線妨害及びイミュニティ測定装置並びに測定方法の仕様書—第2-3部:妨害及びイミュニティの測定方法—放射妨害の測定





# 【短報】



【短報】

【令和5～6年度 県単独試験研究】

## 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

益田 佳奈、伊藤 利憲、篠塚 慶介  
企画・事業推進部

宮城県は、令和3年度を始期とする「新・宮城の将来ビジョン(2021～2030)」<sup>1)</sup>において、富県宮城を支える県内産業の地域資源を活用した高付加価値な商品・サービス創出支援を推進している。観光庁においても近年観光産業におけるDXを推進しており、デジタル技術を活用しながら新たな観光地経営のモデルを模索している。センターでも、地域性のある商品開発の相談が増えていることから、「デジタルファブリケーションによる地域商品開発(令和3～4年度)」<sup>2)</sup>において、地域商品開発を推進する支援システム構築に取り組んできた。

その中で開発した地域デザインエレメント生成システムは、デジタルファブリケーション機器を使用しない商品やサービスにも広く活用できることから、新たな商品開発プロセスの可能性が見えてきた。地域企業だけではなく、地域企業を支援する側が本システムの使い方を習得・活用することで、支援の幅が広がりコストの削減も期待できる。

そこで、本研究では地域デザインエレメント生成システムの実用化に向けたシステム開発および商品開発プロセスの実践を行う。

キーワード: 地域商品、地域性、商品開発、デザイン、デジタル化、Chiikit (チイキット)

### 1 緒言

近年、県内産業においても、地域の特色ある資源を活用した商品・サービスの開発需要が高まっている。これに対応するため、「デジタルファブリケーションによる地域商品開発(令和3～4年度)」では、地域商品開発を推進する支援システムの構築に取り組んだ。その中で開発した地域デザインエレメント生成システム「Chiikit (チイキット)」は、「みやぎデジタルフォトライブラリー」<sup>3)</sup>に掲載されている写真を宮城の代表的な地域風景と定義し、それらを基に作成した単位形状パターンと配色パターンを組み合わせることで、自動的に宮城らしさを感じられるパターンを生成する。操作は全てwebブラウザ上で完結するため、インターネット環境さえあれば誰でも気軽に使用することが可能である。(現在は試験運用中のため、IDとパスワードを付与した限定公開としている。)

デジタル庁もまた、一貫したデザインや操作性でwebサイトやアプリを提供するための仕組み「デザインシステム」<sup>4)</sup>の構築に取り組んでおり、誰でも効率的にデザインや開発を行うことができる支援をしている。こうした政府の政策背景からも、デザインとデジタル技術を組み合わせた業務の効率化は非常に需要が高まっていることが

分かる。

このような政策的支援と市場の動向を考慮すると、地域デザインエレメント生成システム「Chiikit」は、地域らしさを具現化する商品開発において、より一層ニーズと広がり可能性が見えてくる。そこで、本研究では「Chiikit」の実用化に向けて、実際の商品開発プロセスを通してシステムの実用性と効果を検証する。

### 2 検証方法

本研究の成果を普及するため、県内事業者への積極的な企業訪問や研修会での講師活動を行った。これらの活動を通じて、商品開発に関して地域企業・県庁内各部署が抱える悩みをヒアリングした結果、商品開発の初期段階におけるいくつかの共通した課題が明らかになった。以下に示す各課題について、「Chiikit」を活用して解決を図るための仮説を立て、実証を行った。

#### (1) 新しいアイデアの創出の困難さ

- 課題: 新しいコンセプトやデザインを発想することが難しい。特に地域らしさを具体的に視覚化するアイデアが不足している。
- 仮説: 「Chiikit」を利用することで、宮城の地域資

源を活かした独自のパターンやデザインが簡単に生成できるため、商品アイデアの具体的イメージ創出が促進される。

- 実証: 事業者が選定した写真を基に「Chiikit」でパターンを生成し、商品のパッケージデザインやブランドイメージの方向性を検討した。
- 結果: 具体的に何から手を付ければ良いのか分からず、取り掛かる前から停滞している開発において、まずは「Chiikit」で関連する地域資源のパターンを選択し、客観的に“地域らしさ”の要素を再確認することで、コンセプト立案の道筋が明確になった。

#### (2) 人手不足による開発リソースの制約

- 課題: 限られた人員での開発作業により、商品開発プロセスが遅延する。また、専門的なデザインや技術スキルを持つ人材が不足している。
- 仮説: 「Chiikit」は直感的な操作でパターンを生成できるため、専門的なスキルを持たない人でも効果的な商品開発が行える。
- 実証: 事業者が「Chiikit」で生成したパターンを画像としてダウンロードし、WordやPowerPointのような文書作成ソフトでイメージを試作し、開発プロジェクトの企画書作成に活用した。
- 結果: 開発プロジェクトの初期段階において、「Chiikit」で生成したパターンを活用することで、専門的なデザインスキルを持たなくても商品イメージの視覚化が容易になった。

#### (3) 開発予算や期間の制約

- 課題: 限られた予算内で効果的な開発が求められる。また、期間も限られている場合は開発のスピード感も求められる。
- 仮説: 「Chiikit」の導入により、デザイン作成の外注費用や時間が削減され、開発コストを抑えつつ効果的な商品開発が実現できる。
- 実証: 開発に携わる関係者全員に「Chiikit」で生成したパターンを共有し、全ての制作物はそのグラフィックパターンに則るようルールを定めた。
- 結果: 複数人で作業分担をしても成果物に統一感が出た。細かな指示を出さなくてもデザインの方向性が分かるため、作業の依頼指示やリテイクの費用と時間が削減できた。

### 3 検証事例

#### 3.1 「Chiikit」を活用した簡易ブランディング

宮城県産材の利用拡大や木材産業の振興をしている林業振興課みやぎ材流通支援班に、本システムを実践活用する協力を得ることができた。みやぎ材流通支援班では、県産材の普及活動事業の一環で展示会やイベント出展等を予定しているが、これまで事業のブランドイメージが確立されていないことに課題を抱えていた。ブランディングに必要な予算にも制約があり内製化で対応する必要があったが、専門的なデザインスキルを持った人材がおらず、どこから手を付けて良いか分からない状態であった。そこで、「Chiikit」を活用した簡易ブランディングに挑戦することになった。

まずは「Chiikit」にて、みやぎ材の形状パターンと配色パターンを生成した。「Chiikit」のライブラリ内で適切なデザインをシミュレーションできなかったため、みやぎ材流通支援班から提供されたみやぎ材の写真から単位形状と配色を抽出してデータベースに追加し、新たな形状パターンと配色パターンを作成した(図1)。



図1 左:「みやぎ材」の形状パターン  
右:「みやぎ材の机」の配色パターン

生成した形状パターンと配色パターンを基に検討を重ね、WordやPowerPointのような汎用的な文書作成ソフトで使用できるデザインパーツを整備した。これにより、担当者はデザインパーツを用いて自らチラシやポスター等の広報資料を作成することが可能となった(図2)。

さらに、生成したパターンを基に外部デザイナーに依頼した場合を想定して、デザインスキルを持ったセンター職員が広報物をデザインする実験も行った(図3)。その結果、みやぎ材流通支援班の担当職員らとセンター職員がデザインした広報物には全体的に統一感があり、簡易的なブランディングが実現できたことが分かった。

この事例を通して、事業の担当者から「自分自身の力でデザインによる課題解決を図れたことで自信を得ることができた」との感想を得た。また、予算の不足を理由に諦める姿勢から、自ら進んで創り出すという積極的な姿

勢への意識改革が見られた。現在、本取り組みに興味を持った庁内の他部署からも「Chiikit」を活用した簡易ブランディングに挑戦したいという依頼が相次いでいる。これを受けて、次年度は県内事業者の他に庁内の職員向けにも「Chiikit」の操作研修会や普及活動を計画している。地域企業を支援する側である庁内の職員が「Chiikit」の使い方を習得することで、地域資源の活用とブランディング支援をさらに広げ、地域産業の発展に大きく貢献することが期待される。



図5 軽食用の包装紙やカップスリーブに活用した場合の例



図2 みやぎ材流通支援班の職員が制作したポスター、キャプション、のぼり旗



図6 左:「仙台七夕まつり」の形状パターン／右:「広瀬川灯ろう流し」の配色パターン



図3 センター職員が制作した木育イベントのショッピングモール用館内サイン広告

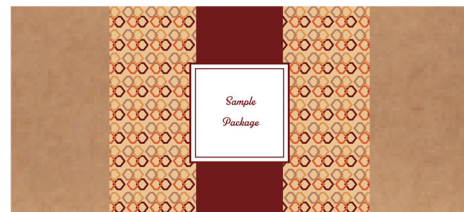


図7 ギフトボックスの掛け紙に活用した場合の例

### 3.2 県内事業者・各種団体への情報提供

県内事業者・団体へ訪問した際に紹介した「Chiikit」の活用事例の一部を下記の通り示す(図4～7)。



図4 左:「古川地方初夏の田園」の形状パターン／右:「薬菜山」の配色パターン

## 4 結言

本年度は研究の成果普及として、企業訪問や研修講師を務め、「Chiikit」の活用を広める活動に尽力した。その結果、地域企業を支援する側である県庁内の事業におけるシステムの有効性は確認できたが、実際に商品化した事例の検証が今後の課題として残されている。

次年度は、さらなる実証実験と普及活動を進め、目標値である機能評価調査10件以上、商品提案5件以上、商品化2件以上を目指す。

## 参考文献

- 1) 宮城県. “新・宮城の将来ビジョン”.  
<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/seisaku/vision2021.html>, (参照 2024-05-23).

- 2) 益田 佳奈, 篠塚 慶介, 伊藤 利憲. “デジタル  
ファブ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](https://www.mit.pref.miyagi.jp/wp-content/uploads/2023/12/seeds-r4_research01-r.pdf), (参照 2024-05-23).
- 3) 宮城県観光プロモーション推進室. “みやぎデジタ  
ルフォトライブラリー”.  
<https://digi-photo.pref.miyagi.jp/>, (参照2024-05-  
23).
- 4) デジタル庁. “デザインシステム”  
[https://www.digital.go.jp/policies/servicedesign/d  
esignsystem](https://www.digital.go.jp/policies/servicedesign/designsystem), (参照 2024-05-23).

【短報】

【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、内海 宏和

自動車産業支援部、材料開発・分析技術部

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、そのシミュレーション技術の開発を目的とし、鑄造プロセスに見立てた溶融金属の流動性評価試験をモデル化するための要素技術となる「潜熱を考慮した伝熱」及び「突発的な吸引による流れ」をシミュレーションにて再現した。前者からは潜熱によって顕エンタルピー変化が緩やかになる現象が、後者からは型内部に吸引された水流の上昇が確認され、令和5年度の進捗として要素技術の開発を完遂した。

キーワード：固液相変化、凝固モデル、多相流、鑄造、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、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溶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、固体が混ざりながら流れる多相流(混相流)問題については、当センターにおいても知見がなく、現状においては対応が難しい。このような場合には、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、場合によっては対応不可とせざるを得ないケースがあった。

我々は、このような状況を打開し、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。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でも、できるだけ一般的な物理モデルとして「液滴振動問題」「ノズル濡れ問題」「液滴飛散問題」の3つの具体的なテーマを対象として設定した。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、液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<sup>2)</sup>。

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、鑄造シミュレータの中で既に取り扱われているが、本研究では鑄造に限らず、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、鑄造プロセスに見立てた溶融金属の流動性評価試験を、後半では落下液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。研究期間前半に取り組む溶融金属の流動性評価試験は、当センターで平成26年度～27年度に実施した実験研究を基にしている<sup>3)</sup>。この試験では、型の内部を真空に



引くことで熔融金属を吸引し、その過程の伝熱で金属が凝固する位置を、熔融金属の温度や添加物をパラメータとして比較することで、対象とする熔融金属の流動性を評価するというものである。この現象をシミュレーションで扱うためには、液体の「潜熱を考慮した伝熱」問題と、「突発的な吸引による流れ」問題を要素技術として確立し、それらを組み合わせる必要がある。令和5年度は研究期間3年の初年度に当たり、要素技術である上記2つの問題をシミュレーションにて取り扱った。

## 2 計算方法

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 2022 R2を用いて実施した。なお、流れは非圧縮性を仮定し、作動流体には熔融金属に代えて物性値が取得しやすい水を採用した。

### 2.1 「潜熱を考慮した伝熱」問題の計算方法

まず、本計算における凝固の取り扱いについて述べる。Ansys Fluent 2022 R2では熔融・凝固モデルとしてエンタルピー・空隙率法を採用している<sup>4)</sup>。この方法では、流体要素を多孔質体としてモデル化し、要素内部の液体分率 $\beta$ を多孔質体の空隙率に対応させる。その空隙率は流体要素内部の温度が固相線温度以下では $\beta = 0$  (要素内部は全て固相)、液相線温度以上では $\beta = 1$  (要素内部は全て液相)とし、その間の温度では半熔融領域 $0 < \beta < 1$ とする。固体から液体へと融解する際に物体が受け取る熱は、温度変化に利用される顕エンタルピーと、相変化に利用される潜熱の和として表される。したがって、エンタルピー・空隙率法では、発熱項を含む比エンタルピーの移流拡散方程式の形式でエネルギー方程式を記述し、設定した固相線温度、液相線温度、潜熱と液体分率との対応を満たすように、両式を反復計算にて解く。また $\beta = 0$ の要素では、要素内部が全て固相であることに対応するよう速度を0とする。半熔融領域 $0 < \beta < 1$ においては、液体分率に応じた運動量のシンク項が設けられており、その程度を調整する「半熔融領域パラメータ」を設定する必要がある。なお、そのパラメータ値が大きいほど、固化するまでの時間が早まる。

図1に「潜熱を考慮した伝熱」問題における初期条件を示す。半径150 mm、高さ400 mmの円筒容器内に0 °Cの水を満たし、その中心部に-18.15 °Cの円筒状の氷を配置した。x方向を軸方向、y方向を半径方向とする軸対称2次元計算とし、使用するメッシュはx方向、y

方向に $\Delta x = \Delta y = 1.0$  mmの分解能を持つ直交等間隔格子とした。また時間刻みを $\Delta t = 0.1$  sとして、時刻 $t = 3600$  sまで計算を行った。

本計算では、固相線温度を-0.3 °C、液相線温度を0 °C、潜熱を333.5 kJ/kgとし、半熔融領域パラメータを $1 \times 10^5$ と与えた。なお水と氷の密度は、表1に示す点を通る区分線形分布とした。

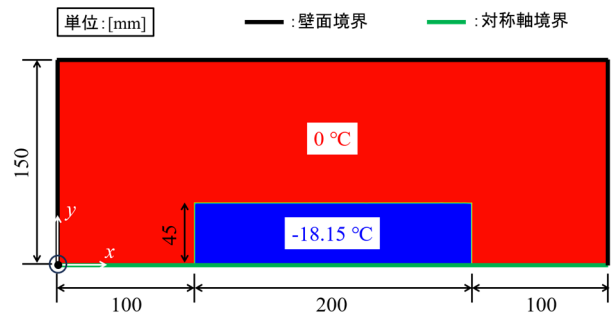


図1 「潜熱を考慮した伝熱」問題の初期条件

表1 参照点温度における水と氷の密度

点	温度[°C]	密度[kg/m <sup>3</sup> ]
1	-20	920
2	-0.3	917
3	0	999.8395
4	4	999.972

### 2.2 「突発的な吸引による流れ」問題の計算方法

流動性評価試験では、型下部を液面に付着させた後、ある瞬間に型上部の圧力を引くことで、型内部に液体が突発的に流入する。本節では、型を内径2 mm、高さ100 mmの中空円筒とし、水が突発的に流入するシミュレーションを、VOF法を用いた水と空気の気液二相流問題として扱う。なお、本計算では型内部での液体の凝固は取り扱わないため、エネルギー方程式は解かず、表面張力モデル及び乱流モデルも使用しない。図2にシミュレーションの問題設定(a)と使用したメッシュ(b)を示す。本計算でも「潜熱を考慮した伝熱」問題と同様に、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。また型への等方的な水の流入を表現するために、水の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。初期条件では、場全体の速度と圧力を0として、液体の体積分率を $x < 0$ でのみ1とした。計算に使用したメッシ



は、円筒型内部で0.1 mm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粗大化させた。また時間刻みを $\Delta t = 0.01$  msとして、時刻 $t = 10$  msまで計算を行った。

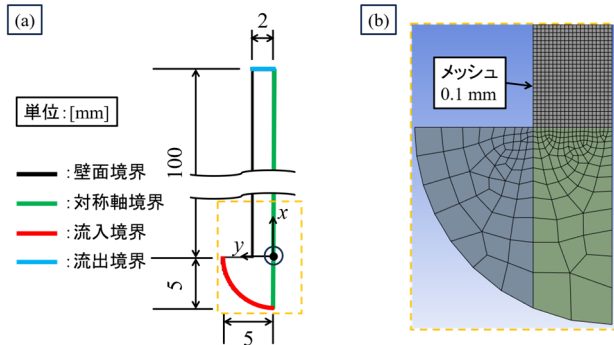
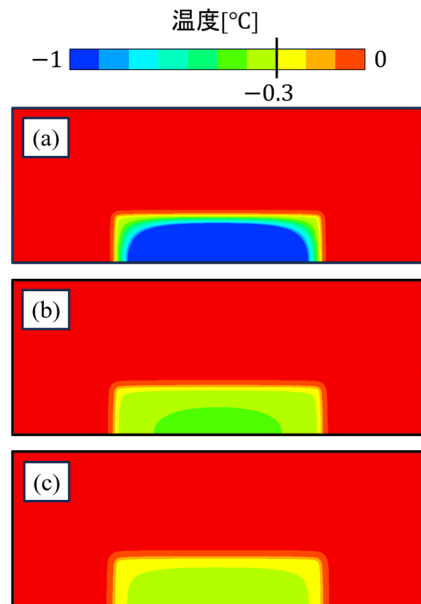


図2 「突発的な吸引による流れ」問題の設定とメッシュ

### 3 計算結果

#### 3.1 「潜熱を考慮した伝熱」問題の計算結果

図3に水と氷の温度分布の時間変化を示す。本計算では密度の温度変化を仮定しているが、運動方程式に浮力項を考慮していないため、密度変化に由来する対流は生じない。したがって、速度場が常に0であるため対流は生じず、熱伝導によってのみエンタルピーが輸送され、初期条件で与えた氷の位置が変化せずに温度変化を観察することができる。水から熱を得た氷は、時間の経過に伴って急激に温度が上昇するものの、固相線温度として設定した $-0.3$  °Cに到達すると、温度上昇が緩やかになることがわかる。これは、固相線温度と液相線温度の間では、輸送されたエンタルピーが潜熱として利用され、顕エンタルピーへの変換割合が減少するためである。以上の結果から、潜熱を考慮した伝熱による凝固のモデル化が可能であることを確認できた。



(a)  $t = 1200$  s, (b)  $t = 2400$  s, (c)  $t = 3600$  s

図3 水と氷の温度分布

#### 3.2 「突発的な吸引による流れ」問題の計算結果

図4に速度分布と水の存在位置の時間変化を示す。速度ベクトルは長さを等しく描画し、色付けによってその大きさを表した。(a)~(f)それぞれの図では速度の最大値が異なることに注意を要する。なお、(a)~(c)では全ての格子点でベクトルを描画した一方で、より広い領域を観察した(d)~(f)においては可視性向上のため、ベクトルを描画する格子点を20%に間引いた。また、図中には同時に水の体積分率が0.5以上の領域を黒く表示することで、吸引による水流を速度ベクトルと併せて描画した。

まず $t = 0.2$  msでは、一様に吸引を行ったにも関わらず、型の壁面近くでより早く水位が上昇することがわかる。この傾向は $t = 0.5$  msまで続くものの、 $t = 1.0$  ms以降では壁面側よりも対称軸側の方が水位が上がり、その傾向を保ったままその後は水位が上昇した。また $t = 0.5$  msでは、水流が壁面から離れているが、 $t = 1.0$  msでは再度壁面に水流が付着し、気孔を巻き込んだ形となった。

次に、上記のような水流となった原因を考察するため、速度場を観察する。 $t = 0.2$  msでは壁面境界の角部近傍で、 $+x$ 方向かつ $-y$ 方向に向いた斜めの高速領域が生じている。これは、角部近傍において生じる局所的な低圧部による加速が原因で形成されるもので、その速度場によって $t = 0.5$  msまでは、壁面近くで水位が高くなったと考えられる。一方で $t = 0.5$  msでは、型内部に

流入した水面近傍において、中心軸側の方が壁面側よりも高速となっており、反時計回りに回転するような速度場となっている。この速度場に乗って水が移流したため、 $t = 1.0$  ms以降では一度壁面から離れた水が壁面に付着し、中心軸側の水位の方が高くなったと考えられる。 $t = 2.0$  msにおける水面の速度は壁面近傍の低速領域を除けばほぼ一様となっている。つまり、壁面に形成された境界層外部の一様流に相当する領域では、それまでに形成された水面の形状を保ちながら、その後水位が上昇することが見て取れる。また $t = 2.0$  ms以降では、一度巻き込まれた気孔が渦にトラップされた形となって上昇していることがわかる。本シミュレーションにおいては液体の凝固を考慮していないが、このような気孔が熔融金属内部に取り込まれた場合には、そのまま凝固することで casting 品の脆弱化につながるものと考えられる。以上より、流動性評価試験を模した突発的な吸引による水流のモデル化が可能であることを確認できた。

り扱いを可能とするために、当センターで過去に実施した熔融金属の流動性評価試験をモデル化するための要素技術となる「潜熱を考慮した伝熱」及び「突発的な吸引による流れ」のシミュレーションを実施した。「潜熱を考慮した伝熱」シミュレーションでは、融解・凝固の取り扱いの際に重要となる潜熱が、伝熱現象において考慮されている様子が確認できた。「突発的な吸引による流れ」シミュレーションでは、水流が型内部に吸引されて上昇の様子が確認され、その際に角部の存在によって気孔を巻き込み得ることが示唆された。以上より、令和5年度の研究では、流動性評価試験のモデル化に必要な要素技術を培うことができた。令和6年度はこれら2つの要素技術を組み合わせて流動性評価試験の傾向を再現するとともに、落下溶滴の凝固のシミュレーションを実施する予定である。

#### 参考文献

- 1) 宮城県. “「みやぎ発展税」の活用について”. 宮城県公式ホームページ. 2024-3-15.  
<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/fukensui/hatenzei.html>, (参照 2024-6-6).
- 2) 吉川穰, 荒木武, 齋藤佳史, 家口心. 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, 20, p. 9-15.
- 3) 内海宏和, 千代窪毅, 氏家博輝. 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, 13, p. 24-26.
- 4) Ansys, Inc.. Ansys Fluent 理論ガイド, 2022, p. 683-685.

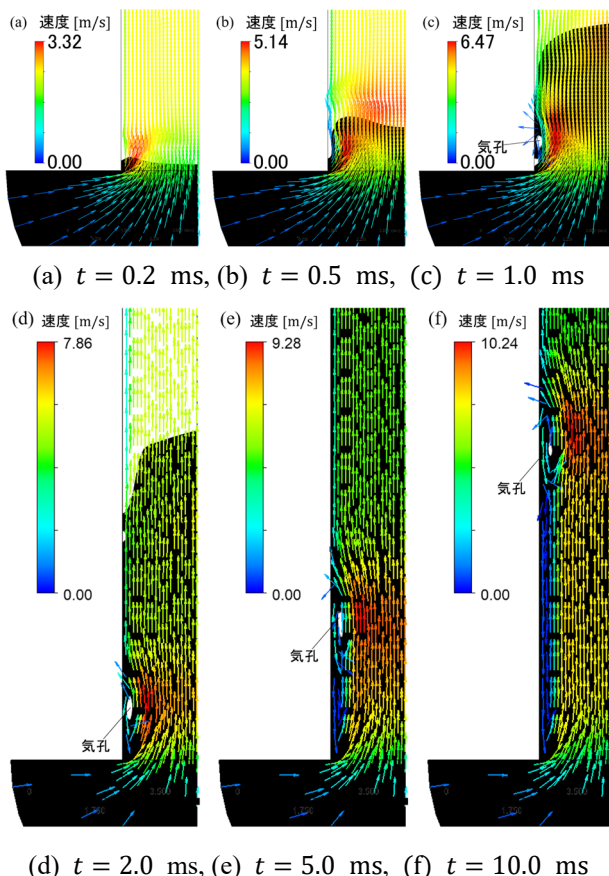


図4 速度分布と水の存在位置

#### 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

【短報】

【令和5～7年度 地域企業競争力強化支援事業】

## 不整列データセットを用いた異常検知アルゴリズムの性能検証 ー 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 ー

高野 寛己、太田 晋一、高久 悠杜  
機械電子情報技術部

本稿では、実際の外観検査画像処理に異常検知アルゴリズムを活用するにあたり、現場での収集を模擬した比較的整列されていない不整列データセットを作成し、アルゴリズムがどの程度有効であるか評価検証を行った結果について報告する。実験結果より、学習データセットにおける画像類似度の大小により異常検知アルゴリズム性能が大きく異なることが分かった。

キーワード：AI、画像処理、外観検査AI、異常検知AI

### 1 緒言

製造業における現場での外観検査は、製品の品質保証のために必要不可欠な作業である。一方、人手による外観検査は時間とコストがかかるため、深層学習を代表とした画像処理AIを用いた良否判定手法の開発が盛んとなっている。このうち製造現場では大量の異常画像を収集することは困難であるため、正常画像のみから良品判定を行う異常検知アルゴリズムのニーズが大変大きい。異常検知アルゴリズムは様々提案されており、高い性能を示すことが報告されている。一方、製造現場における画像データは多種多様であり、アルゴリズムの適用にあたってはそれぞれのデータセットに対してどの程度有効であるか確認する必要がある。

### 2 関連研究

深層学習を用いた異常検知の手法は、再構成ベースの手法と特徴量の距離に基づく表現ベースの手法の2つに大別される<sup>1)</sup>。

#### 2.1 再構成ベース手法による異常検知

再構成ベース手法による異常検知アルゴリズムとしてオートエンコーダ (Auto Encoder) が有名である<sup>2)</sup>。Auto Encoderは、入力データを潜在変数に変換し、再び出力データに復元するニューラルネットワークである。訓練中に、Auto Encoderは、入力データを表現する特徴を学習し、その表現を使用してデータを再構成すること

ができるようになる。そして、入力データと再構成されたデータとの間の再構成誤差を最小化するように訓練が行われる。正常なデータで訓練したAuto Encoderに、異常なデータを入力すると、再構成誤差が大きくなることが予測される。この仕組みを利用し、再構成誤差の閾値を設定することで、異常を検知することができる。

#### 2.2 表現ベース手法による異常検知

PaDiM (Patch Distribution Modeling)は、深層学習を用いた表現ベース手法による異常検出アルゴリズムの一つである<sup>3)</sup>。PaDiMの学習の仕組みについて、まず学習データから取り出した画像のパッチを ImageNet で事前学習済の ResNet<sup>4)</sup>等畳み込みニューラルネットワークの中間層 3 層程度に入力し、抽出された各層での特徴量を連結し埋め込みベクトルを生成する。ここで得られた特徴量から、ランダムに次元を削減し、平均ベクトルと共分散行列をそれぞれ算出する。こうして得られたテンソルについて、平均と共分散行列を用いてマハラノビス距離を計算し、求めたマハラノビス距離マップをガウス分布としてモデル化することで正常値の特徴を獲得する。ここでマハラノビス距離とは、データの異常検知等に使用される統計的な距離尺度である。データの分布の形状や相関関係を反映し、異常点は通常点から遠ざかった位置として計算されるものである。

PaDiMの異常検出は、テスト画像パッチを学習済ニューラルネットワークに入力し得られた特徴量について、前述の正常画像の学習で得られた、マハラノビス距離のマップを用いて正否判定を行うものである。異常画像

の距離は正常画像の距離よりも大きくなるため、閾値を超える場合、そのパッチは異常と判定される。

PaDiM は、再構成ベース手法による異常検出アルゴリズムと比較して、高い精度を達成している<sup>3)</sup>。また、推論時において推論時間が短く、学習データセットのサイズに依存しないため実用性も高い。さらに、特徴量抽出に多種ニューラルネットワークモデルを使用することができるため、様々なタスクに対応した画像データセットに適用可能と考えられる。

## 2.3 課題

外観検査向けオープンデータセット MVTecAD は外観検査の画像処理アルゴリズムの性能評価に広く使われているものである(図1)<sup>5)</sup>。オブジェクトは常に中心に置かれ、データセット全体で同じように配置されており、良品画像はクラスごとに200~300枚程度用意されている(表1)。実際の製造現場において、100枚を超えるデータ収集は大変煩雑な作業となる場合が多く、またサンプル撮像において、外光の映り込みや中央化などが反映されない場合が多い。異常検知アルゴリズムを様々なデータセットに対し適用するにあたり、データセット内の画像の類似具合を定量的に調査し、それぞれのデータセットに対して、アルゴリズムがどの程度有効であるかを検討する必要がある。

表1 MVTecAD のデータ枚数

	Train	Test(良品)	Test(不良)
Bottle	209	20	63
Cable	224	58	92
Capsule	219	23	109
Metal Nut	220	22	93
Pill	267	26	141
Screw	320	41	119
Transistor	213	60	40



図1 MVTecAD の画像例

## 3 不整列データセットの作成

本節では、実際の外観検査現場における異常検知アルゴリズムの性能検証を行うべく、現場でのデータ収集の際の課題を反映した不整列データセットについて詳述する。なお、データセット内の整列具合として2つの画像間の類似度を表す cosine 類似度および LPIPS<sup>6)</sup> を定量評価指標として採用した。

### 3.1 cosine 類似度

cosine 類似度はベクトル空間モデルにおける2つのベクトル間の類似性を測定するために用いられる指標の一つである。2つのベクトル間の  $\cos\theta$  ( $\theta$  はベクトル間の角度) の値を求め、これを類似度として扱う。 $\cos\theta$  の値は、-1 から 1 の間を取り、-1 に近いほどベクトルの向きが反対、1 に近いほど同じ向きであることを意味する。 $\cos\theta$  の値が 1 に近い場合、ベクトル同士が非常に類似していることになり、類似度が高いとみなせる。画像の特徴量をベクトルとして表現することで画像の類似度の定量指標として用いることができる。

### 3.2 LPIPS

LPIPS (Learned Perceptual Image Patch Similarity) は、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を使用して、2つの画像間の距離を評価するための指標である。LPIPS は人間の知覚に基づいて学習された距離尺度を提供し、具体的には、VGG ネットワークから派生した CNN を使用して、2つの画像のパッチの距離を計算するものである。LPIPS は、画像品質評価、画像生成、画像編集などのタスクに使用され、従来のピクセル単位の距離尺度よりも優れた指標であることが報告されている<sup>6)</sup>。LPIPS スコアは 0 から 1 の値を取り、スコアが 1 に近いほど画像が大きく異なり、0.1 程度であれば画像が非常に類似していることを表す。

### 3.3 MVTecAD の画像類似度と異常検知性能

MVTecAD は、Texture 画像 5 クラスおよび Object 画像 15 クラスからなるが、そのうち Object 画像の工業製品として Bottle、Cable、Capsule、Metal Nut、Pill、Screw、Transistor について、訓練画像 (良品) における画像 2 枚ごとの組み合わせについての類似度平均を表 2 に示す。なお Metal Nut については工業用画像で



はあるが、アノテーション領域が画像全体にわたるものなど他カテゴリとは様相が異なるため、今回の検討では省略する。

表 2 各カテゴリの画像類似度

	cosine 類似度	LPIPS
Bottle	0.99	0.10
Cable	0.92	0.38
Capsule	0.99	0.10
Pill	0.99	0.18
Screw	0.97	0.36
Transistor	0.94	0.29

また MVTEC AD の工業用画像について筆者が PaDiM を適用した結果を表 3 に示す。特に cosine 類似度が 0.99、LPIPS が 0.10 程度である Bottle、Capsule、Pill についてはデータセット内の画像が非常に類似しており、PaDiM の性能は画像単位の AUROC がそれぞれ 0.99、0.91、0.99、ピクセル単位の AUROC はそれぞれ 0.98、0.98、0.97 と高い異常検知性能を示した。一方 cosine 類似度が 0.92~0.97、LPIPS が 0.30 程度の Cable、Screw、Transistor については画像単位の AUROC についてはそれぞれ 0.92、0.94、0.84、ピクセル単位の AUROC については 0.96、0.96、0.98 と前者に比べて異常検知性能がやや低下していることが分かった。ここで AUROC は ROC 曲線の曲線下面積であり、値が 1.0 に近いほど高い検出性能であることを示す。

表 3 MVTEC AD を用いた PaDiM の性能

	AUROC (画像単位)	AUROC (ピクセル単位)
Bottle	0.99	0.98
Cable	0.92	0.96
Capsule	0.91	0.98
Pill	0.99	0.97
Screw	0.94	0.96
Transistor	0.84	0.98

### 3.4 不整列データセットおよび整列データセットの作成

工業製品を模擬した六角ボルトおよびプラスチックキャップの 2 点について撮像を行い、学習データセットを作成した。工業製品サンプルはそれぞれ 100 点ずつあり、後述の条件の下、撮像を行った。

異常箇所について、六角ボルトはネジのつぶれ(なめ)、プラスチックキャップは表面の擦り傷であり、それらサンプルを異常品として撮像を行った(図 2、図 3)。

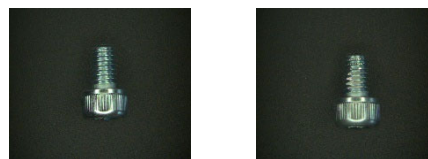


図 2 六角ボルト例  
(左: 正常品、右: 異常品)

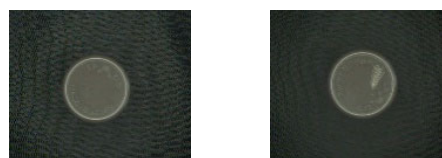


図 3 プラスチックキャップ例  
(左: 正常品、右: 異常品)

製造現場においてサンプル撮像をする際に生じる課題として、主に対象物のランダムな配置、外光の影響、照明強度やコントラストの相違などが挙げられる。こうした実際の撮像現場で十分に起こりうる外乱を、撮像時に 2 割程度の頻度で反映させた不整列データセットを作成した(図 4)。

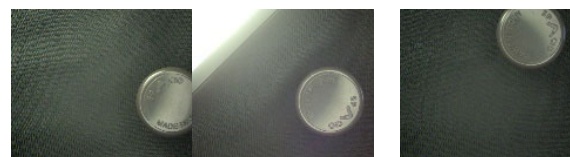


図 4 学習データ収集時における撮像外乱の例(左から照明照り返しが強い、照明等映り込み、物体位置の相違)

また不整列データセットとは異なり、サンプル位置および向きを固定し、外乱や振動を極力除去し、照明を一定強度に保った整列データセットの 2 種を用意した。

撮像環境として、産業用イーサネットカメラ(Basler acA2440-20gc)の、リング照明(CCS HPR2-100SW)を用い、拡散反射にて撮像を行った。

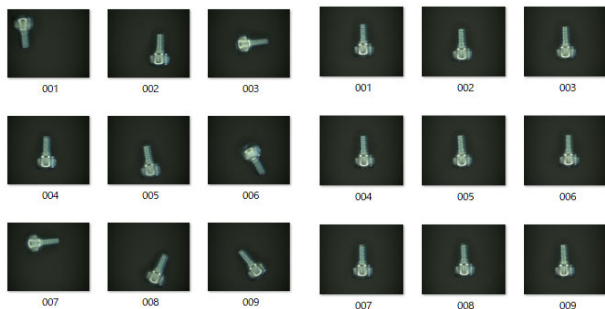


図5 六角ボルト学習データ例  
(左:不整列データ 右:整列データ)

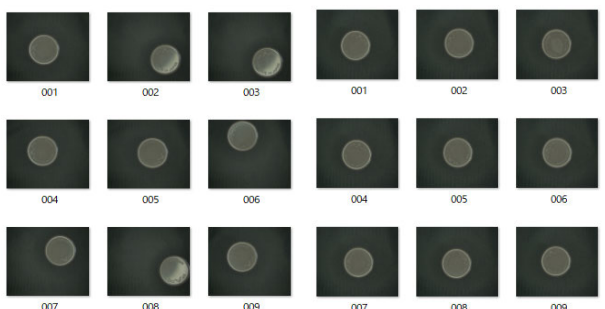


図6 プラスチックキャップ学習データ例  
(左:不整列データ 右:整列データ)

### 3.5 不整列データセットおよび整列データセットの画像類似度

筆者が作成した不整列データセットおよび整列データセットについて、画像類似度は表4、表5のとおりである。

表4 不整列データセットの画像類似度

	cosine 類似度	LPIPS
六角ボルト	0.81	0.32
プラスチックキャップ	0.92	0.33

表5 整列データセットの画像類似度

	cosine 類似度	LPIPS
六角ボルト	0.92	0.16
プラスチックキャップ	0.98	0.17

不整列データセットの六角ボルトについて、MVTecAD の工業画像の主なカテゴリと比べても、学習データ内の画像類似度が大きく異なることが定量的にも示された。また同データセットのプラスチックキャップでは、MVTecAD 内において類似度が比較的低い Cable に近い値となった。

一方、撮像環境を十分に整備し、同サンプルを撮影したデータセットである整列データセットについては、学習データ内の類似度が高い水準となった。

## 4 実験

異常検知アルゴリズムの Auto Encoder (再構成ベース手法) および PaDiM (表現ベース手法) を六角ボルトおよびプラスチックキャップの不整列データセット、整列データセットを用いて実験を行った。

Auto Encoder はオープンソースの PyTorch を用いて構築した。入力サイズは、256 ピクセル、エンコーダ部 6 層、デコーダ部 6 層からなり、入出力の差分で閾値を設定することで正常異常の判定を行った。また PaDiM については特徴抽出に使用するニューラルネットワークとして ResNet50<sup>4)</sup> を用いた。

訓練画像として、六角ボルト、プラスチックキャップそれぞれに関し、学習データを正常品 90 枚、テストデータを正常品 10 枚、異常品 10 枚用意した。性能指標として画像単位の AUROC を採用した。

## 5 結果および考察

### 5.1 六角ボルトの AUROC

六角ボルトの画像単位の AUROC を表 6 に示す。六角ボルトの不整列データセットでは Auto Encoder、PaDiM でそれぞれ 0.72、0.61 となった。一方、整列データセットではそれぞれ 0.80、0.92 となった。特に PaDiM について、データセットの差異で大きく性能が異なることが確認された。

表6 六角ボルト AUROC

	Auto Encoder	PaDiM
不整列データセット	0.72	0.61
整列データセット	0.80	0.92

### 5.2 プラスチックキャップの AUROC

プラスチックキャップの画像単位の AUROC を表 7 に示す。プラスチックキャップの不整列データセットでは Auto Encoder、PaDiM でそれぞれ 0.91、0.83 となった。一方、整列データセットではそれぞれ 0.90、0.97 となっ

た。Auto Encoder ではデータセットでの相違による性能差はほとんど見られなかった一方、PaDiM では大きく異なり、整列データセットで 0.97 と高い性能を示した。

表 7 プラスチックキャップ AUROC

	Auto Encoder	PaDiM
不整列データセット	0.91	0.83
整列データセット	0.90	0.97

図 7、図 8 に出力画像の例を示す。特に図 8 では、正常品画像に対し、照明強度の強い箇所を異常と誤判定する例を示している。PaDiM の異常検知性能は、学習データセット内の画像類似度の相違が大きく影響することが実験結果より分かった。

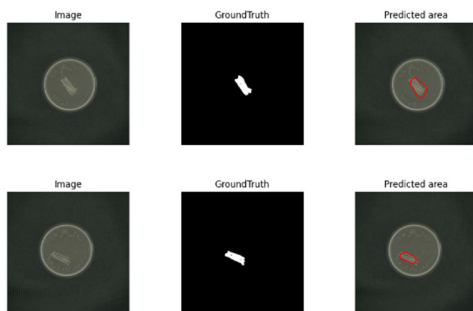


図 7 整列データセットにおける  
判定例  
(左から元画像、欠陥正解位置、予測箇所)

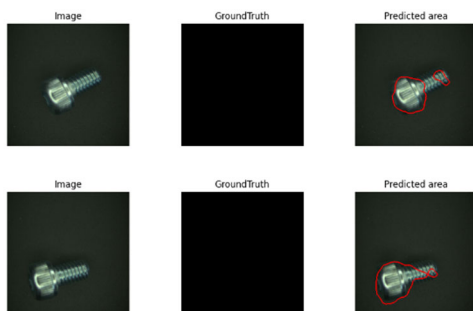


図 8 不整列データセットにおける  
誤判定例  
(左から元画像、欠陥正解位置、予測箇所)

### 5.3 画像類似度と不整列具合に関する考察

不整列データセットにおける異常検知性能は整列データセットに比較して大きく低下していることが分かった。

特に不整列データセットの六角ボルトは MVTecAD の主なカテゴリと比べ画像類似度が低く、MVTecAD の異常検知性能より大幅に低い値となった。一方同データセットのプラスチックキャップでは、画像類似度は MVTecAD の Cable に近い値ではあるが、異常検知性能は Cable のそれに比較し低下した。このことから、データセット間の画像の多様性(画像間の類似度)に加え、それらの不整列具合が、異常検知性能により大きく影響することが考えられる。

### 6 おわりに

本研究では、深層学習を用いた異常検知アルゴリズムについて、現場での撮像環境を模擬した比較的整列されていない画像間の類似度が小さい不整列データセット、および撮像等の工夫により類似度を大きくした整列データセットを用いて、異常検知アルゴリズムの評価を行い、性能が大きく異なることを示した。異常検知アルゴリズムは、日々最新のもの提案されているが、それらの性能がどのようなデータセットにおいて達成されたかを考慮するとともに、撮像時の工夫に加え、適切なアルゴリズムの選定・改良が必要になると考えられる。

### 7 結言

本稿では最新の異常検知 AI アルゴリズムを実際の製造現場で活用するにあたり、実験的検証を実施した。本内容は MIRU2023 学会に投稿し、画像ラボ 2024.2 月号に採択済である。今後も最新の異常検知アルゴリズムの導入や異常データの生成について調査を行い、製造現場での更なる AI 普及を目指す。

### 参考文献

- 1) J.Yang, R.Xu, Z.Qi, Y.Shi, “Visual Anomaly Detection for Images:A Systematic Survey”, The 8th International Conference on Information Technology and Quantitative Management(ITQM), pp 471-478 (2022)
- 2) T P. Bergmann, S. L. Lowe, M. Fauser, D. Sattlegger, and C. Steger, “Improving unsupervised defect segmentation by applying structural similarity to autoencoders”, in VISIGRAPP (2019)
- 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) K.He, X.Zhang, S.Ren, J.Sun, “Deep Residual Learning for Image Recognition”, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp 770-778 (2016)
- 5) P.Bergmann, M.Fauser, D.Sattlegger, C.Steger, “MVTecAD—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)
- 6) R.Zhang, P.Isola, A.A.Efros, E.Shechtman, O.Wang, “The Unreasonable Effectiveness of Deep Features as a Perceptual Metric” Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp 586-595 (2018)



【短報】

【令和5～7年度 地域企業競争力強化支援事業】

## 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 ー 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 ー

高久 悠杜、高野 寛己、太田 晋一  
機械電子情報技術部

製造現場での画像処理AI導入について、システムの構築が難しい、活用のイメージが湧かないなどの課題がある。そこで本事業では、実際の製造現場の環境を模した、AI活用イメージが把握できるベルトコンベヤシステムを作製した。本システムはベルトコンベヤ上の検査物を物体検出AIと画像分類AIにより、検出と良品判定を行うものである。開発には、オープンソースやフリーソフトを使用した。完成した本システムは展示会等に多数出展し、県内企業へのAI活用例の紹介を行った。

キーワード： AI、画像処理、外観検査AI、物体検出、画像分類

### 1 緒言

昨今、製造現場での部品の傷や異物を目視で確認する検査業務において、人手不足による技能継承の遅れ、高い要求水準の検査物への対応といった課題が挙げられる。その解決策として画像処理AIを用いた自動化・デジタル化が進められているが、中小企業では外観検査システムの構築が難しい、AIの活用のイメージが湧かないなどの課題により、AIの導入が進んでいないことが多い。

本稿では、こうした課題を解決するために作製した、AI活用のイメージをつかめる外観検査AI活用ベルトコンベヤシステムについて報告する。本システムはベルトコンベヤを使用し、実際の製造現場の環境を模すことで、動作している様子を見るのが可能である。また、制御プログラムやAIの開発には、オープンソースやプログラムレスのフリーソフトを使用した。

### 2 本システムの構成

本システムはベルトコンベヤ上を流れるボタン電池の傷をAIで検査するものである。AIがボタン電池の傷の有無を推論し、傷がある場合はベルトコンベヤを停止し、異常があることを示す。

ベルトコンベヤはノートPCから動作を制御する。ノートPCにはマイコンボードを接続しており、そのマイコンボードからベルトコンベヤへの電源供給を制御することで、ノートPCのシリアル信号を起点にベルトコンベヤの動作

及び停止を行う。

ノートPCではシステム全体の制御とAIの推論を行う。産業用カメラと照明を用いて、ベルトコンベヤの上のボタン電池を撮影し、画像をノートPCに取り込みAIの判定を行う。また、ノートPCには三色のLED回転灯も接続され、AIの判定結果を視覚的に示すことが可能となっている。

AIはデスクトップPCで学習を行い、ノートPCに学習済みモデルを移動させ推論を行った。また、検査物のボタン電池のうち、およそ半分には事前に傷をつけ、不良品として使用した。

以上の構成を図1に示す。

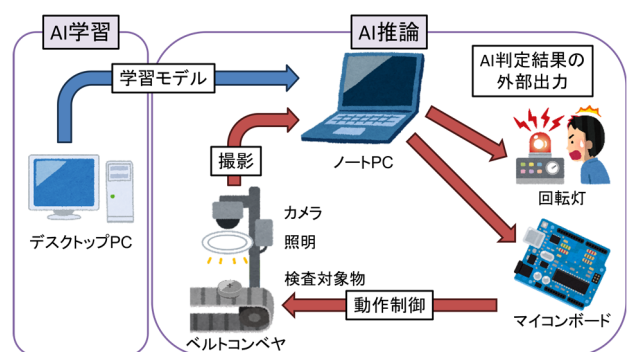


図1 外観検査 AI システムの構成

AIは2種類のアルゴリズムを使用して処理を行う。まず、カメラにボタン電池が写りこんだことを判定するために、物体検出を行う。ボタン電池が検出されたのであれば、次にそのボタン電池の傷の有無を画像分類で判定

する。傷がある不良品と判定された際は、ベルトコンベヤを停止し、回転灯を赤く点灯させ異常があることを示す。不良品の判定から 10 秒経過後、ベルトコンベヤを再び動かし、次のボタン電池の判定を行う。以上の AI の処理を図 2 に示す。

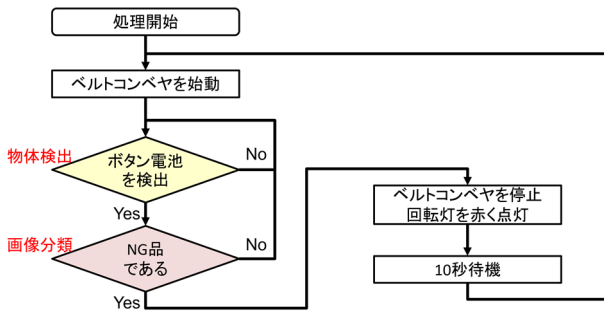


図 2 AI 処理の流れ

### 3 ハードウェアの構成

#### 3.1 PC

本システムの開発にはシステムを動作させるノートPCとAI学習を行うデスクトップPCを使用した。各機種のスペックを表1に示す。

表 1 使用 PC のスペック

	ノートPC	デスクトップPC
CPU	Intel Core i7	Intel Core i7
GPU	NVIDIA GeForce RTX 2060	NVIDIA GeForce RTX 3060
RAM	16 GB	32 GB

#### 3.2 外部出力の制御

ベルトコンベヤの動作はマイコンボード(Arduino)を介してノートPCから制御される。ベルトコンベヤにはDCモータードライバが付属しており、電力を供給することでベルトコンベヤの動作や停止、速度の変更を行うことができる。マイコンボードにはGROVEベースシールドを介してリレー素子(GROVE)が接続されている。このリレー素子は24 VのAC/DCコンバータと共にベルトコンベヤのDCモータードライバに接続され、電力供給の切り替えを行う。

ノートPCには回転灯、産業用カメラ(東芝テリー社製BU132M)、マイコンボードが接続され、システムの制御プログラムから各機器の動作を制御する。カメラの制御

のために、東芝テリー社が提供しているソフトウェア開発キットTeliCamSDKを使用した。

### 4 ソフトウェアの構成

システムの制御プログラムの構築には Python を、AI 学習には SONY 社が提供する Neural Network Console<sup>1)</sup> (以下、NNC)を使用した。

#### 4.1 制御プログラム

制御プログラムの開発にあたり、Python のライブラリとして、操作環境の作成に Tkinter、画像処理に OpenCV と Pillow、AI 推論後の画像表示に Matplotlib、AI モデル読み込みに Neural Network Libraries、外部出力の制御として pySerial をインストールした。

作成したシステム操作画面を図 3 に示す。

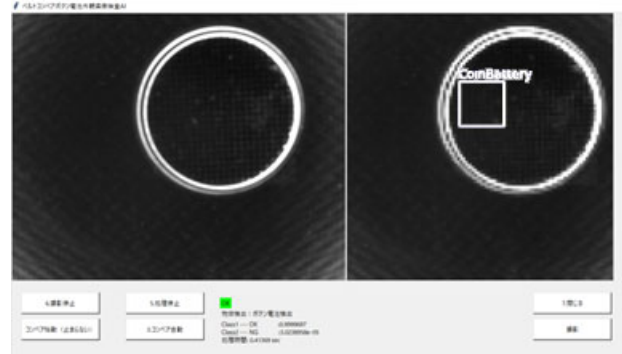


図 3 操作画面

画面左側にはカメラで撮影したボタン電池の画像が、右側には物体検出の AI 推論結果が表示され、下側には操作用のボタンと画像分類の推論結果が表示される。操作用のボタンには撮影開始、AI 推論開始、及びベルトコンベヤ動作があり、システムを動作させる際はこの順番でこれらのボタンを操作する。

#### 4.2 物体検出 AI

物体検出 AI とは、入力された画像からある物体の位置や種類を推論するものである。代表的な物体検出 AI として YoloV5<sup>2)</sup>などの Yolo シリーズが挙げられる。本システムでは SONY 社が公開している物体検出のサンプルを元に、ネットワーク部分を YoloV5 を参考にしたネットワークに置き換えた物体検出 AI を構築した。

Yolo シリーズのアルゴリズムでは推論結果として、大

中小 3 種類の大きさの検出結果が出力される<sup>3)</sup>。これにより、様々なサイズの物体を検出することができるが、本システムでは同じ大きさのボタン電池のみを検出するため、小サイズ用のバウンディングボックスのみが出力されるようにした。また、出力結果のデータを物体検出のサンプルと同様になるように整形した。

物体検出 AI の学習モデルの作成の際には、検出する物体の学習画像と、その物体がどの位置にあるのかを示すアノテーションデータの 2 種類の学習データが必要となる。学習画像はボタン電池の良品画像と不良品画像をそれぞれ 120 枚ずつ、計 240 枚の画像を撮影して使用した。画像は傷のないボタン電池を 10 個、傷があるボタン電池を 9 個用意し、ベルトコンベヤ上で位置を変えながら撮影した。また、アノテーションデータの作成にはオープンソースのアノテーションツールである LabelImg を使用した<sup>4)</sup>。LabelImg では物体を長方形(矩形)で囲むことでアノテーションデータを作成することができる<sup>5)</sup>。

用意した学習データの内 9 割(216 枚)を学習データ、1 割(24 枚)を評価データとして使用した。

#### 4.3 画像分類 AI

画像分類 AI とは、画像を入力するとその画像のカテゴリを推論する AI である。代表的な画像分類 AI としては ResNet<sup>6)</sup>などが挙げられる。本システムでは ResNet-18 を参考にしたネットワークに置き換えた物体検出 AI を構築した。

学習モデルの作成の際は、学習データとして物体検出 AI での学習画像を使用した。計 240 枚の画像の内、8 割(192 枚)を学習データ、2 割(48 枚)を評価データとして使用した。

### 5 結果

開発した外観検査 AI 活用ベルトコンベヤシステムを図 4 に示す。ベルトコンベヤ上にボタン電池をスポンジと両面テープで固定したため、ボタン電池はベルトコンベヤから落ちず、人の手を介さずとも処理を続行できる。

システム動作中に傷のあるボタン電池を検出した例を図 5 に示す。図中の青い矩形は物体検出 AI がボタン電池の位置を推論した結果を表す。図 5 のように、ボタン電池の検出と不良品の検出が可能であることを確認した。また、ボタン電池の検出と分類の処理時間は 1 回あたり約 0.4~0.5 秒ほどだった。

本システムは令和 5 年 10 月 1 日の第 16 回登米市産業フェスティバル<sup>7)</sup>、同年 11 月 10 日の 2023 仙南地域ものづくり推進セミナー・展示交流会<sup>8)</sup>にて展示を行い、県内企業への AI 活用例の紹介を行った。また、当センター内で展示を行い、当センター主催の AI 外観検査ハンズオンセミナー(体験会)<sup>9)</sup>などへの参加者へ向けて説明を行った。

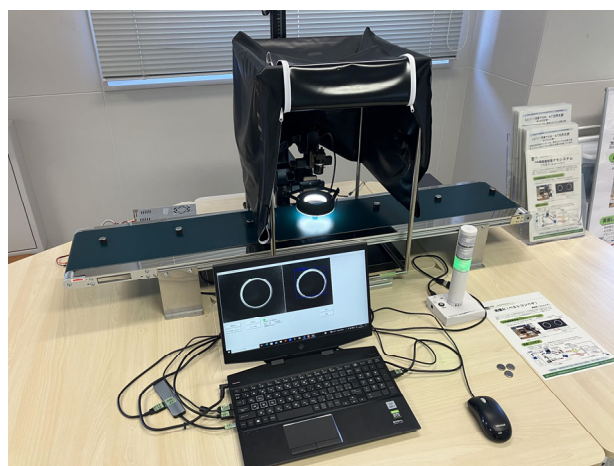


図 4 外観検査 AI 活用ベルトコンベヤシステム

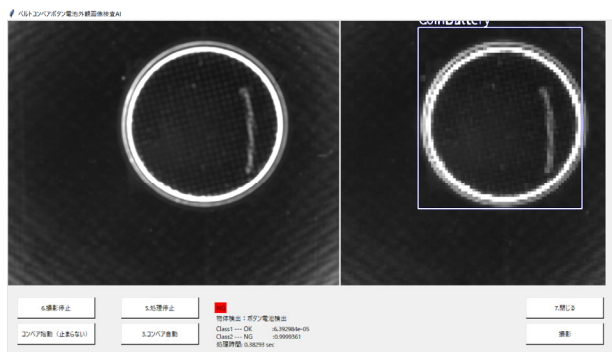


図 5 AI の推論結果

### 6 結言

ベルトコンベヤを使用して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を開発した。物体検出 AI と画像分類 AI の推論が実行可能であることを確認し、展示会出展等で県内企業への AI 活用例の紹介を行った。今後は作業用ロボットアーム等の他の環境を模した AI システムの作成を進め、県内企業へのさらなる AI 普及促進に取り組む。一般に AI の学習では、訓練用の画像が多数必要である。本システムの開発においても、学習に使用したボタン電池の数は比較的少なく、製造業の現場においても、こうした少量の検査物しか用意できない場合もある。そこで今後の展開として、

少量の画像を元に、生成 AI を用いて画像枚数を増やす技術について検討している。

#### 参考文献

- 1) <https://dl.sony.com/ja/>, (参照 2024-05-24).
- 2) <https://github.com/ultralytics/yolov5>, (参照 2024-05-24).
- 3) Joseph Redmon ほか: YOLOv3: An Incremental Improvement (2018)
- 4) <https://github.com/HumanSignal/labelImg>, (参照 2024-05-24).
- 5) 小野 仁 ほか: 環境発電、多点センシング、ビッグデータ処理を活用した県内産業の高度化, 宮城県産業技術総合センター研究報告, 2023, 20, p.31
- 6) Kaiming He ほか: Deep Residual Learning for Image Recognition (2015)
- 7) <https://www.city.tome.miyagi.jp/business/event/2023sanfes.html>, (参照 2024-05-24).
- 8) <http://www.senkou-miyagi.jp/business.html>, (参照 2024-05-24).
- 9) <https://www.mit.pref.miyagi.jp/event/r5aigaikan/>, (参照 2024-07-03).

【短報】

【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。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。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。今年度は、焼結プロセスの最適化に、本手法を適用した結果を報告する。

キーワード：適応的実験計画法、ベイズ最適化、加圧加熱焼結

### 1 緒言

県内のものづくり企業を取り巻く環境は、コロナ禍も相まって急激に変化している。顧客ニーズの多様化や、SDGsといった社会的要請に加えて、生産年齢の急激な減少から、製品とプロセスの変容を効率よく進めることが求められている。

従来、製品やプロセスの開発は、これまでに得られている経験や知識に基づいて仮説を立て、その仮説を検証するための実験計画を設計し、その計画に従って実験して様々なデータを得て、仮説を検証するといった手法を取ることが多い。これに対して、近年、データから研究対象に関する仮説を生成・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<sup>1)</sup>。

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<sup>2)</sup>。特徴的なのは、モデル構築と次の実験の提案を繰り返すことで、効率よく目標に到達することを目指す点である。さらに、次の実験条件を選択する際に、ベイズ最適化を用いることで、より挑戦的な候補を選択することも可能である。

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

の課題の効率的な解決に貢献することを目的とする。

今年度は、焼結条件の最適化に本手法を適用した結果について報告する。なお、本手法を実行するためのプログラムは、無償で配布されているもの<sup>3)</sup>を、カスタマイズして用いた。

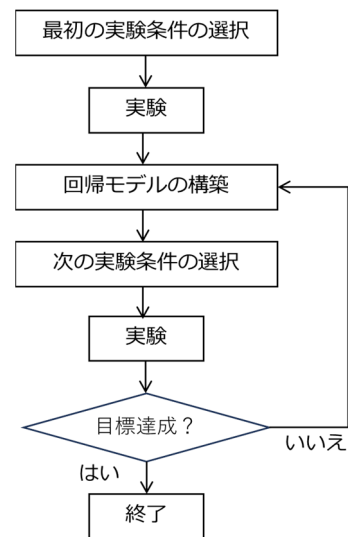


図1 適応的実験計画法の流れ<sup>2)</sup>

### 2 適用事例

#### 2.1 焼結条件最適化への適用

原料粉末は、株式会社フジミンコーポレド製の高純度イットリア(Y2O3、純度99.99%)を用いた。粒度は、



-63 + 10 μmである。焼結には放電プラズマ焼結機（住友石炭鉱業、Dr.Sinter SPS-7.40）を用いた。カーボン型（内径20 mm、外径50 mm）を用いた加圧加熱焼結法において、焼結条件の最適化に適応的実験計画法を適用した。最適化する焼結条件は図2に示す温度プロファイルと荷重、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。

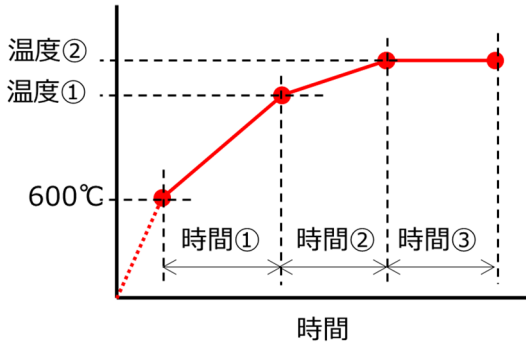


図2 最適化する温度プロファイル

2.2 D最適化基準による実験条件の選択

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。作成する実験候補数、実験候補は任意に設定可能である。本事例では、実験候補数を20000個とした。なお、温度プロファイルには温度① < 温度② かつ 時間① + 時間② + 時間③ = 50分の制約を設けたので、実際に作成された候補は17000個程度となった。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

2.3 実験結果

図3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。ここで、各条件の重要度と相関係数をRandom Forestに基づき計算した結果を図4に示す。これより、温度②の重要度が極めて高く、また充填量は少ない方が望ましいと考えられる。

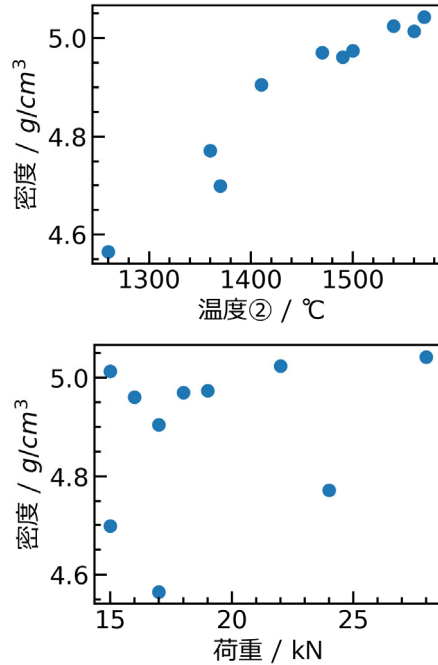


図3 選択された実験条件における結果 (7個のパラメータのうち、温度②および荷重の結果のみを示した)

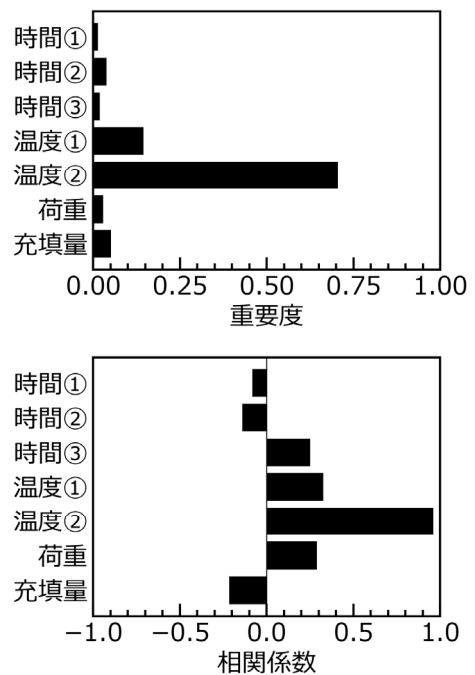


図4 Random Forestに基づき計算された各パラメータの重要度と相関係数

## 2.4 回帰モデル構築

回帰モデルは、線形回帰、非線形重回帰、ガウス過程回帰など、多くの選択肢がある。ここでは、ベイズ最適化を用いるため、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することで、モデル精度を確認できる。その結果を図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。

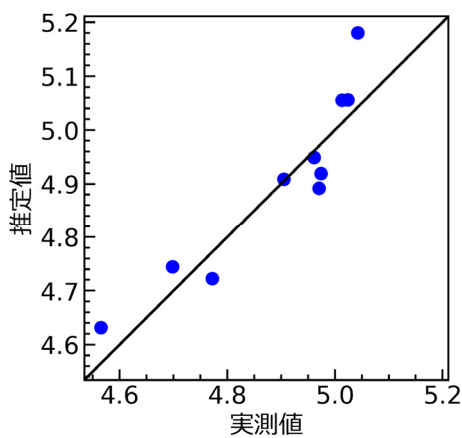


図5 ガウス過程回帰を行った際の、密度の実測値と推定値の関係

## 2.5 ベイズ最適化による次の実験条件の選択

本報告で使用したプログラムは、獲得関数を4種類 (PTR、PI、EI、MI) から選択できる。表2に、これらの獲得関数のうち、最も予測密度が高かったEIによる次の実験候補と、予測される密度と分散を示す。

表2 ベイズ最適化により予測された次の実験候補

実験条件	実験候補	予測値	分散
時間① (分)	11	5.26	0.07
時間② (分)	34		
時間③ (分)	5		
温度① (°C)	1510		
温度② (°C)	1580		
荷重 (kN)	15		
充填量 (g)	10.1		

いずれの獲得関数においても、温度②は設定した上限値に近い値が選択された。その他の条件に共通した傾向は認められなかった。獲得関数は目的によって選択することが望ましい。本事例では、なるべく密度を高くしたいことから、密度の推定値が最も大きくなるEIで選択された条件が、次の実験条件として適正であると考えられる。

## 2.6 実験計画の修正と得られた最適な焼結条件

最初に選択された表1に示す実験条件のうち、温度②が1500°Cを超える場合、図6に示すように型由来の炭素が焼結体に拡散し、焼結体が黒くなった。今回作成した試料の用途に支障があるため、温度②を1500°C以下とする制約を新たに設けて、最適な条件を探索した。表3に、最終的に得られた最適な焼結条件を示す。この条件で実際に試料を作成した結果、炭素拡散は見られず、密度も理論密度に近い値となった。

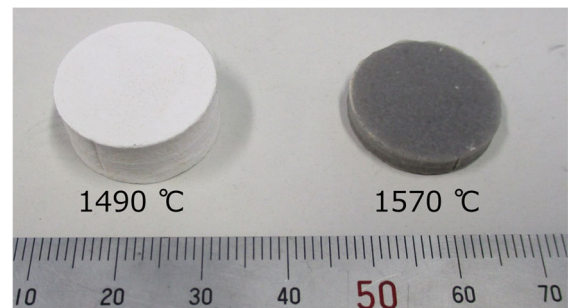


図6 温度②の違いによる焼結体の色の変化

表3 最終的に得られた最適条件

実験条件	最適値	予測値	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 今後の課題

本事例は、目的変数が密度のみとしたが、用途によっては、結晶粒径に目標値がある場合が考えられる。今回、参照したサンプルプログラムには、目的関数が複数ある場合も対応可能である。今後はそのような複雑な事例についても検討する予定である。



#### 4 結言

本年度は、適応的実験計画法を焼結条件最適化に適用し、その有用性を検証した。その結果、効率良く目標を達成する条件に到達できた。また、本事例のように、計画を見直す必要性に迫られても、修正して最適な条件を見出すことができる手法であることも確認できた。今後は、さらに複雑な事例について検討していく。

#### 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, 2021, 175p.
- 3) [https://github.com/hkaneko1985/python\\_doe\\_kspub](https://github.com/hkaneko1985/python_doe_kspub), (accessed 2022-04-14)

【短報】

【令和3～6年度 みやぎ二酸化炭素排出削減支援事業】

## みやぎアップグレードリサイクル推進事業

推野 敦子、遠藤 崇正、佐久間 華織、佐藤 勲征  
材料開発・分析技術部

宮城県の環境保全と経済の両立を目指し、バイオマス材料を複合化した樹脂材料のリサイクルシステムを検討するため、宮城県と企業が共同開発した澱粉系樹脂複合材料を取り上げ、リサイクル性の検証を行った。

今回は、澱粉系樹脂複合材料で作製した容器をイベントで使用し、回収、洗浄、粉砕、再生実験を行った。この再生材料の物性値を調べた結果、未使用品と比較して引張強さに大きな変化がないことを確認し、リサイクルによる再利用の可能性を示した。

キーワード：バイオマスプラスチック、デンプン、劣化、再生

## 1 緒言

石油を原料とする樹脂の浪費を看過できない情勢と言われて久しい。石油系樹脂の際限のない消費を回避するため、抜本的・或いは過渡的なアイデアがそれぞれの立場から提案・実行されている。<sup>1)</sup>、本稿では株式会社コバヤシと宮城県、山形大学の協力により開発された澱粉系樹脂複合材料に注目する。この材料は、既に15年以上にわたり市販され、石油由来樹脂使用量の削減に寄与している材料である。

既報<sup>2)3)</sup>のとおり、産業技術総合センターでは令和3年度よりバイオマスプラスチックのアップグレードリサイクルに取り組んでいる。この中で、バイオマスプラスチックの使用拡大を図るための普及活動を実施しており、澱粉系樹脂複合材料を用いた容器を作製((株)コバヤシ製)し、各種イベントで使用してもらっている。

しかし、澱粉含量の多い材料であっても、石油の使用は避けられない。そこで、我々は澱粉系樹脂複合材料の使用量増加に応じた種々の再生利用推進を考えている。

材料の再生利用可能性を評価するためには、最低限再生工程で受けるダメージを把握し、再生利用に適した状態を維持しているか確認する必要がある。今回は、未使用の澱粉系樹脂複合材料を原料とし、容器(お皿、どんぶり)を(株)コバヤシに作製依頼した。この作製した容器をイベントで食器として使用し、使用済みの容器を回収、洗浄、粉砕、再生までを行った。この回収材について、当センターで物性を調査した結果を報告する。

## 2 実験

## 2.1 材料

株式会社コバヤシから提供された生澱粉60%のポリプロピレン(PP)(S60PP)で作製した容器(図1 皿、どんぶり)を令和5年11月に開催された東松島市産業祭に、食器として提供した。使用済みの容器は回収・洗浄・粉砕・乾燥し、再生材として使用した。



図1 澱粉含有PP製容器(どんぶり、皿)

## 2.2 回収材を用いた物性評価用試験片の作製

回収材は射出成形機(JSW J50E-C5)を用いて、JIS K7139に規定されるA1形ダンベル試験片に成形した。

ダンベル試験片は平行部長さ80 mm、平行部幅10 mm、平行部厚さ4 mm、全長約190 mmであった。成形条件を表1に示す。

表1 各試料の作製条件

		S60PP
組成	澱粉	生澱粉 60 wt.%
	樹脂	PP
押出	押出(再生)回数 [回]	0, 1, 3, 5
	シリンダ温度 [°C]	180
	樹脂温度 [°C]	195
	スクリュ回転数[rpm]	45
成形	シリンダ温度 [°C]	190
	型温 [°C]	50

### 2.3 評価方法

#### 2.3.1 引張試験

作製したダンベル試験片について、引張圧縮試験機（東洋精機製作所、ストログラフ V10-C）を用いて引張強さ、引張破断ひずみを測定した。試験速度は 50 mm/min、チャック間距離は 115 mm とした。試験本数は n=5 であった。

#### 2.3.2 シャルピー衝撃試験

作製したダンベル試験片にノッチ加工機（東洋精機製作所、ノッチングツールA-10）を用いてノッチ加工を行った。Vノッチカッターの先端形状は、JIS K7111-1に規定される形状Aであった。加工後、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）を用いてシャルピー衝撃試験を実施した。打撃方向はエッジワイズ、試験数はn=10であった。外れ値として試験結果の最大及び最小値を除き、残りをデータとして採用した。

### 3 評価結果

回収により材料物性が低下する場合、引張破断伸びおよびシャルピー衝撃強度が低下する。今回回収した材料の引張破断伸びの結果を、過年度の回収材の結果とあわせて図 2 に示す。図 2 には、引張破断伸びの傾向を把握するため、過年度に実施した単純押出負荷材の結果も併せて示した。図 2 により、今回の回収材は過年度の回収材と同様の結果を示し、単純押出負荷材の 1 回負荷材とほぼ同一の結果を示すことが確認された。

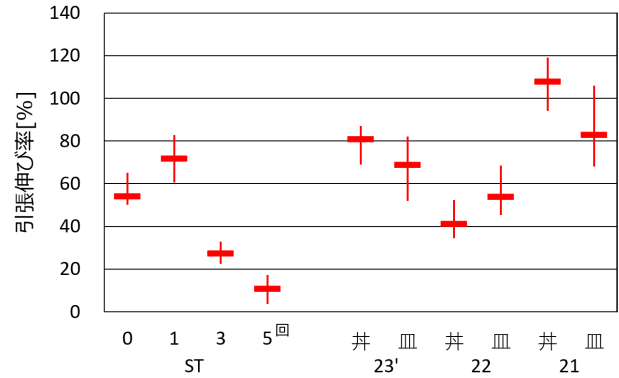


図 2 引張伸び率

次に、図 3 にシャルピー衝撃試験の結果を示す。図 2 と同様に、過年度の回収材および単純押出負荷材の結果も併せて示している。試験片は全て部分破壊であった。引張伸びの結果と同様に、今回回収した材は過年度の回収材と同等の結果を示し、単純押出負荷材の 1 回負荷材と同程度の結果を得たことから、再利用可能であると考えられる。

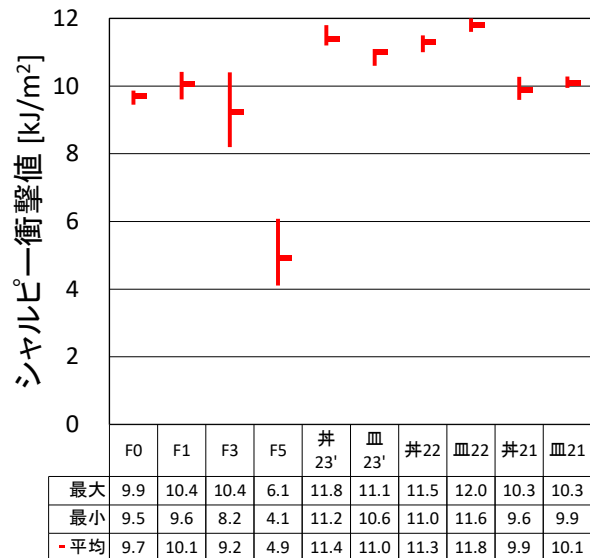


図 3 シャルピー衝撃試験結果

### 4 結言

宮城県発のバイオマスプラスチックである澱粉樹脂複合材料を原料として容器を作製し、イベントにおいて食器として使用した。使用済みの容器から回収した材料の物性を調査した。その結果、今回回収した材料は過年度の回収材と同等の結果を示し、単純押出負荷材の 1 回負荷材と同程度の結果を得たことから、再利用可能であると考えられる。

## 謝辞

本事業は、みやぎ環境税を活用して実施された。また、株式会社コバヤシ技術研究所の山田知夫氏、阿部奈緒美氏、大屋万季氏には試料の提供およびご協力を賜り、ここに深謝の意を表する

## 参考文献

- 1) 工藤 謙一, 高原 純一. 澱粉を原料とした環境調和型プラスチック-グリーンインダストリーを目指して - 環境技術. 2005, 34(6), p.411-415. など
- 2) 佐久間華織, 推野敦子, 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3年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2022, No.19, p.87-90.
- 3) 推野敦子, 佐久間華織, 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4年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2023, No.20, p.61-64.



【短報】

【令和4～6年度 県単独試験研究】

## 小仕込み試験による優良菌株の選抜 — 県産清酒多様化のための酵母開発 —

石川 潤一\*

食品バイオ技術部(\*現 産業デジタル推進課)

酢酸イソアミルを主体とした香りの特徴とする清酒酵母を育種することを目的に、宮城マイ酵母を親株としてUV照射による変異誘導を行い、候補菌株を40菌株に選抜した。今年度は、選抜した菌株について総米200 gの小仕込み試験を行い、得られた製成酒を評価した。香気成分や酒質の分析及び利き酒を行い、酢酸イソアミルを高生産し、優良な清酒の醸造が見込まれる候補菌株を選抜した。

キーワード：宮城マイ酵母、酢酸イソアミル、小仕込み試験

### 1 緒言

当センターでは主に県内の酒類製造業者に培養酵母を有償で配付する培養微生物配布事業を平成13年度から継続的に実施している。この事業では当センターで開発し、保有している純米酒向けの宮城マイ酵母泡なし株 *Saccharomyces cerevisiae* MY3227 株及びMY3216 株など種々の酒造用酵母を配付している。一方、製造業者からは純米吟醸酒用の酵母としてより香りが豊かで扱いやすい酵母を望む声が聞こえてくるが、現状では必ずしもその需要を満たしているとは言えない。

そこで、本研究では宮城マイ酵母泡なし株MY3227 株及びMY3216 株を親株として、醸造特性が良好でかつ、酢酸イソアミルを主体とした豊かな香りを有し、純米酒及び純米吟醸酒の製造に適する新たな宮城県産酵母を育種することを目的とした。

本報では実醸造試験の前段階として、候補菌株40 菌株について総米200 gの小仕込み試験を行ったので報告する。

### 2 材料と方法

#### 2.1 供試菌株

本研究で使用した微生物は全て *S. cerevisiae* であることが推定されるため、菌株名のみ記載した。育種の親株は、MY3227 株、MY3216 株を選択した。対照の標準株は、当センターで保有しているきょうかい7号系の酵母を使用した。総米200 gの小仕込み試験には前報<sup>1)</sup>の結果を踏まえて選抜した候補菌株40 菌株を用いた。

#### 2.2 小仕込み試験

小仕込み試験は親株や対照の標準株を含めた43株について、難波らの方法<sup>2)</sup>に準じて行った。すなわち、1,000 mL容のガラス製広口瓶にポリエチレン製の内袋をセットし、その中で乾燥麹(I-60、徳島製麹(株))をアルコール脱水した麹と乳酸水を混合し、予め麹汁培地で1週間培養した供試菌株を植菌して2日間培養したものを水麹とした。水麹に $\alpha$ 化米(AA-60、徳島製麹(株))、グルコアミラーゼ(グルクSG、天野エンザイム(株))、ミネラルウォーター(Crystal Geysler、CGロクサーヌLLC)を加えて振盪して混合後、蓋を半回転ほど緩めて静置し、これをもろみとした。総米200 g小仕込み試験の配合を表1に示した。もろみを恒温恒湿槽(PSL-4J、エスペック(株))にて図1のとおり温度経過するよう設定した。もろみの重量測定は毎日行い、重量減少の目標は60 gとした。もろみ期間が終了した検体は直ちに遠心分離機(Avanti JXN-26、Beckman-Coulter(株))を用いて15,960×g、15 minで上槽した。上槽後、清酒は

表1 小仕込み試験の仕込配合

日数 操作	1 水麹	2 添え	3 踊り	4 仲	5 留	合計
$\alpha$ 化米[g]	0	17	-	39	56	112
A麹[g]	8	0	-	8	16	32
補水 <sup>†)</sup> [mL]	2	7.2	-	18.8	28	56
総米[g]	10	24	-	66	100	200
酵母液[mL]	10	-	-	-	-	10
酵素液[mL]	-	2	-	-	-	2
汲水[mL]	20	20	-	78	130	248
設定温度[°C]	20	15	15	10	8	-

†)  $\alpha$ 化米の30%重量、A麹の20%重量をそれぞれの補水量とした

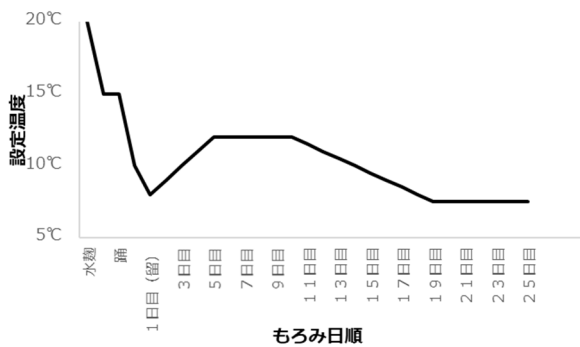


図1 小仕込み試験の温度経過

720 mL清酒瓶に入れ、水浴中で63°C、30 minの火入れを行い、-5°Cにて保存した。

### 2.3 酸度・アミノ酸度測定

国税庁所定分析法に従った。

### 2.4 香気成分分析

火入れ後の清酒を 1 mL 採取し、10 mL 容ヘッドスペースバイアル ((株) 島津製作所) に入れ、1,000ppm の 4-メチル-1-ペンタノール 0.1 mL を内部標準液として添加して密栓し、測定サンプルとした。ヘッドスペース GC 分析は GC-8010 ((株) 島津製作所) を用いた。標準物質 (酢酸イソアミル、イソアミルアルコール) は富士フィルム和光純薬 (株) の特級を使用した。分析条件は表 2 に示した。

表2 ヘッドスペースGCの分析条件

検出器	FID
キャピラリーカラム	DB-WAX10m (10 m, i.d. 0.1 mm, 0.1 μm)
カラムオープン温度	40°C-5°C/min-240°C
試料導入部温度	250 °C
検出器温度	250 °C
キャリアガス	N <sub>2</sub>
ヘッドスペース温度	80 °C
バイアル保持時間	15 min

### 2.5 利き酒

選抜菌株と親株 (MY3216) 及びきょうかい 7 号系酵母で製成した火入れ後の清酒サンプル 43 種について利き酒による評価を行った。サンプルの提供は盲検

法とし、評価方法は 4 点法とした。利き酒は日を変えて 2 回行った。1 回目のサンプルの並び順は酢酸イソアミル濃度順とし、2 回目は、1 回目で評価の高かった 29 サンプルと親株を含めた 31 サンプルをランダムに並べた。評価者は産業技術総合センター職員から募り、1 回目 4 人 (内、技術者 2 人)、2 回目は 6 人 (内、技術者 4 人) であった。評価については、味を重視せず、吟醸酒としてふさわしい香気を有するものを優良とした。評価点数は、清酒評価の慣例に倣い、点数の低いサンプルほど良評価とした。評価の結果は審査員の評点の平均値とし、順位付けにおいて同率の場合は最良点の 1 点の数と最悪点 4 点の数を傾斜的に考慮して決定した。

### 3. 結果と考察

図2に総米200 g小仕込み試験における重量減少量を示した。全ての菌株は、試験期間中に重量減少量が目標の60 gに到達せず、もろみ日数が 25 日で試験を打ち切って上槽した。前報で<sup>3)</sup>、もろみの減少量が 14 日で 60 g に到達した 1-1B 株は、今回の吟醸小仕込みにおいてももろみの経過自体は早めで推移したものの、減少量は 60 g には到達しなかった。親株も含めて全ての菌株は、重量減少量が 50 g を超えており、重量減少速度が極端に遅い菌株はなかった。前報の15°C一定の小仕込み試験と比較してもろみの経過が遅かったのは、もろみの温度条件が期間中低く、菌株の発酵速度が比較的緩慢であったためと考えられる。しかしながら、選抜菌株はいずれも実用株である親株と同等の経過が観察できたため、基本的な発酵能力は親株と同等であると推察した。

表 3 に利き酒の評価上位 8 菌株の酒質・香気分析の結果を示した。日本酒度やアルコール度数などの酒質に、菌株間の大きな差異は観察されなかった。一方、

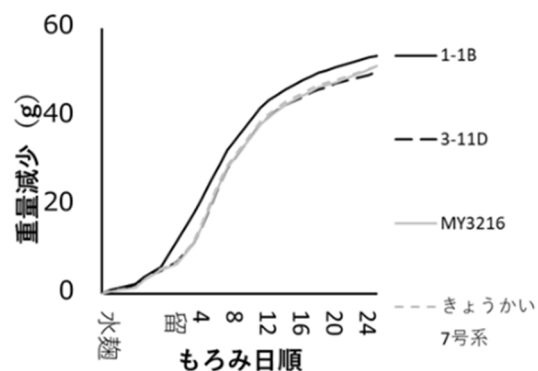


図2 各もろみの重量減少曲線



表3 利き酒結果上位8サンプルの酒質分析

株名	日本酒度	アルコール度数	酸度	アミノ酸度	グルコース濃度	酢酸エチル	酢酸イソアミル(E)	イソアミルアルコール(A)	EA比 (100*E/A)	利き酒評価点 (平均)	
		[%]		[%]	[%]	[ppm]	[ppm]	[ppm]		1回目	2回目
3-17C	8.5	16.4	3.1	1.4	0.9	154	11.7	388	3.0	1.75	1.50
2-1H	7.5	16.2	2.5	1.4	0.9	169	15.3	499	3.1	2.50	1.50
3-3H	5.3	16.3	2.9	1.2	1.0	216	10.0	392	2.5	2.00	1.67
<b>2-12G</b>	3.3	15.9	3.1	1.3	1.1	190	22.6	514	4.4	2.50	1.67
<b>3-6B</b>	6.4	16.5	2.7	1.3	0.9	218	13.9	405	3.4	2.00	1.83
3-1C	6.6	16.2	2.7	1.3	1.0	176	11.8	439	2.7	2.25	1.83
<b>3-14E</b>	5.6	16.2	2.8	1.2	0.9	192	18.3	475	3.9	2.25	1.83
2-1C	4.9	16.3	2.6	1.4	1.1	168	14.3	490	2.9	2.25	1.83
MY3216	6.3	16.4	2.6	1.4	1.1	185	4.0	222	1.8	3.25	3.33
7号系酵母	7.8	16.5	2.8	1.4	1.0	162	4.8	217	2.2	3.25	3.33

※太字は酢酸イソアミル濃度上位8サンプル以内

#### 参考文献

香気成分は酢酸イソアミルの濃度と EA 比が大きいサンプルの評価が良好であった。しかしながら、酢酸イソアミル濃度・EA 比とも全サンプル中で最も高かった 3-11D 株は利き酒の評価では上位 8 サンプルには入らなかった。更に、酢酸イソアミルの濃度が 10 ppm、EA 比が 2.54 と上位サンプルの中では酢酸イソアミル濃度と EA 比が共に低かった3-3H 株が 3 番目に良い評価であったことから、単純に酢酸イソアミルの濃度や EA 比だけで利き酒評価が決まるとは言えず、他の香気成分が評価に影響を与えているものと推察した。今後は、スケールアップした醸造試験を行うとともに、他の香気成分、特に通常の吟醸香と同時に生じ、AATase とも関係が深い酢酸エチルやイソアミルアルコールといった<sup>4)</sup>、オフフレーバーの濃度と利き酒の評価との関係に注目していきたい。

#### 4 結言

- ・選抜した 40 菌株について総米 200 g小仕込み試験を行った。
- ・小仕込みの温度条件とグルコアミラーゼ添加により、すべての菌株で酢酸イソアミルの濃度増加とイソアミルアルコールの濃度低下が観察された。
- ・利き酒の結果、酢酸イソアミルの濃度の高い傾向にある菌株が良好と判定された。

- 1) 石川潤一, 吉村緑, 瀬尾直美, 稲生栄子, 有住和彦. 新たな宮城県産酵母の育種 - 清酒製造技術の高度化 -. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2022, 19, p. 49-54.
- 2) 難波康之祐, 小幡孝之, 萱島進, 山崎与四良, 村上光彦, 下田高久. 1978, 73 (4), p. 295-300.
- 3) 石川潤一, 瀬尾直美, 稲生栄子, 有住和彦. 新たな宮城県産酵母の育種 - 県産清酒多様化のための酵母開発-. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2023, 20, p. 65-67.
- 4) 藤井 敏雄. 酢酸エステルの生成とアルコールアセチルトランスフェラーゼ遺伝子. 日本醸造協会誌. 1995, 90 (12) p. 912-918.



【短報】

【令和4～6年度 県単独試験研究】

## 多変量解析を活用した工程管理技術の検討

羽生 幸弘

食品バイオ技術部

食品の香味の評価に際しては、官能評価と機器分析による定性または定量的評価が広く用いられるが、前者は評価者の個人の技能に依存し、かつ外的要因の影響を受けやすく、後者は特定の成分比較にとどまって網羅的な評価が難しいなど、それぞれ課題がある。

本研究では、熟成途中の仙台味噌を定期的に採取し得られた機器分析値を多変量解析することで、熟成の程度を類推するための指標を構築し、数値管理の一助とすることを目標に検討を行った。今年度は、熟成途中の味噌の香気分析結果から判別分析による熟成状態の判定を試み、機器分析データを用いた判別分析が可能であることが示唆された。

キーワード：多変量解析、官能評価、仙台味噌、ヘッドスペースガスクロマトグラフ (HSGC)、ガスクロマトグラフ質量分析装置 (GCMS)

### 1 緒言

食品の製造管理に際しては、多くの場合、熟練工による官能評価が欠かせない。これはあらゆる要素を網羅的に評価できるが、個人の能力差が大きく、温度、照明の明るさなど外的要因の影響も少なくない。一方、味や香りを高速液体クロマトグラフィー (HPLC) やガスクロマトグラフィー (GC) に代表される装置を用いての成分評価も広く用いられているが、網羅的に評価するには限界がある。

そこで、官能評価との相関の高いパラメーターを多変量解析で抽出し、それを以て数値化して管理する試みがマヨネーズ (2020年)<sup>1)</sup>、レモン飲料 (2017年)<sup>2)</sup> などでなされている。こうした取組みは、産業のデジタル化であるデジタルトランスフォーメーション (DX) として、農林水産省の「農業DX構想」<sup>3)</sup> の策定、経済産業省等の「ものづくり白書<2021年版>」<sup>4)</sup> における「技能継承」などへの一助とする期待から国においても推進されており、今後、食品分野でも促進されることが想定される。

本研究では、本県特産品である仙台味噌においても熟練工が官能的に判断している熟成の程度について、多変量解析を用いて可視化し、製造現場の判断の一助とすることを目標とした。前報<sup>5)</sup> では、官能検査で熟成の程度を評価した味噌を試料として、味覚センサーでの評価と香気成分分析を行い、得られたデータを結合して実施した主成分分析により、官能評価との相関を検討した。その結果から、機器分析により味噌の熟成を評

価できる可能性が示唆された。

本報では、さらに詳細な検討を行うため、特に香りの評価の精度向上を目指し、香気成分分析データの判別分析への活用により、未知サンプルの熟成程度の判定と香気物質推定を試みたので報告する。

### 2 実験方法

本研究では、熟成期間中の仙台味噌を試料としてヘッドスペースガスクロマトグラフ (HSGC) により分析したデータについて、熟成期間をグループとした判別分析 (Discriminant Analysis, DA) を行った。DAによる未知サンプルの熟成期間の推定結果と実際の熟成期間を比較することで、熟成の進行状況の評価した。

さらに、HSGCおよびガスクロマトグラフ質量分析装置 (GCMS) で保持指標 (Retention Index, RI) をそれぞれ算出、比較することで、GCMSによる化合物推定結果をHSGCに適応させた。

#### 2.1 供試試料

製造ラインの熟成工程より、仕込時および熟成1か月ごと3か月までの仕掛品、および出荷可能と判断された状態 (以下、出荷時) の味噌を県内味噌製造業5社から約1 kg提供されたものを用いた。試料は、約100 gに分け、試験に供するまで-20℃で保管した。

## 2.2 香気成分分析

### 2.2.1 HSGC

HSGC (株式会社 梶島津製作所、GC2030+HS-20) を用いて味噌の香気成分分析を実施した。

味噌5 gをサンプル瓶に入れ密封し、香気成分の捕集はヘッドスペース法を用いた。HSGCの分析条件を表1に示した。また、直鎖アルカンの標準物質 (C6-C18、RESTEK社) を同条件で測定し、RIを算出した。RIの算出は付属の解析ソフト (株式会社 梶島津製作所、Labsolutins) を用いて行った。

表1 HSGC分析条件

検出器: 水素炎イオン検出器 (FID)
温度: 40 °C、5 min-10 °C/min-240 °C、5 min
カラム: DB-WAX (30 m, i.d.0.3 mm、膜厚0.25 μm)
注入口温度: 240 °C
FID温度: 240 °C
キャリアガス: 窒素 (N <sub>2</sub> )
サンプル加温: 50 °C、20 min

### 2.2.2 GCMS

GCMS (株式会社 梶島津製作所、GCMS-QP2010 Plus) を用いて味噌の香気成分分析を実施した。

味噌3 gをサンプル瓶に入れ密封し、香気成分の捕集は、固相マイクロ抽出法 (SPME法) を用いた。測定サンプルを40°Cで加温しながら、香気成分をSPMEファイバー (Divinylbenzene/Carboxen/ Polydimethylsiloxane (DVB/CAR/PDMS)、膜厚50/30 μm) に20分吸着させ、GCMSに供した。GCMSの分析条件は表2の通りとした。また、2.2.1のHSGCと同様に直鎖アルカンの標準物質の測定結果を用いてRIの算出を行った。

表2 GCMS分析条件

検出器: 質量分析装置
温度: 40°C-2.5°C/min-240°C
カラム: DB-WAX (60 m, id 0.32mm、膜厚 0.50 μm)
注入口温度: 200°C
フィラメント温度: 250°C
キャリアガス: ヘリウム (He)

## 2.3 DAによる味噌の熟成状態の判定

HSGCで得られたピークの保持時間およびピーク面積 (以下、HSGCデータ) を用いて、味噌の熟成状態の判定をDAにより行った。DAはAlphaSoft (アルファ・モス株式会社) を用いて行った。

供試サンプルの熟成期間 (仕込時、1か月、2か月、3か月) をグループとして設定した後、各期間の味噌のHSGCデータをソフトウェアの判別分析機能を用いて処理し、グループの分離状況を確認した。その後、熟成期間の判定を行いたいサンプル (以下、未知サンプル) AからFのHSGCデータを読み込み、未知サンプルが帰属するグループを判定した。

## 2.4 GCMSによる化合物推定結果のHSGCへの適応

本研究で用いたHSGCの検出器はFIDであるため、検出されたピークの化合物を同定するには標準物質が必要である。しかし、入手が困難な化合物もあることから、GCMSで実施した化合物推定結果の適応を試みた。

GCMSの化合物推定は、GCMS solutionのシミュラティ検索機能を用いて実施し、相関係数が最も高いものをそのピークの化合物とみなし、HSGCへの適応はそれぞれの測定結果から算出したRIの値を比較することにより行った。

## 3 実験結果及び考察

### 3.1 DAによる味噌の熟成期間の判定

DAは、あらかじめ既知のサンプルモデルを構築し、未知サンプルがどのグループに属するかを調べる手法である。あらかじめ、品種、産地、ブランドのような既知の試料を用いて判別モデルを作製することで、判別が可能とされている<sup>6)</sup>。また、HSGCはサンプルを加温して気相に移行した香気成分をそのまま測定することから、気相での成分組成を反映したデータが得られるとされている<sup>7)</sup>。このため、得られたデータはサンプルが持つ香りのバランスを維持していることが期待できることから、未知サンプルの熟成期間を判定し、得られた判定結果と実際の熟成期間を比較することで、未知サンプルの熟成の進行状況を客観的に評価することを試みた。

判別分析結果を図1、また、未知サンプルの判定結果と実際の熟成期間を表3に示した。

図1を見ると、熟成期間の異なる各グループについて、

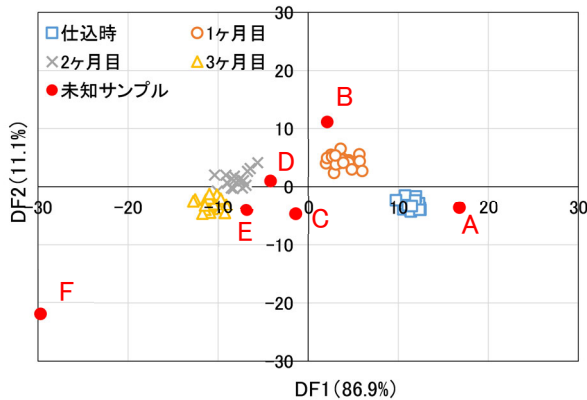


図1 判別分析結果のマッピング

表3 未知サンプルの判定結果と実際の熟成期間

サンプル	判定結果	実際の期間
A	0 か月	0 か月
B	1 か月	1 か月
C	2 か月	3 か月
D	2 か月	2 か月
E	3 か月	3 か月
F	3 か月	出荷時(4 か月)

まとまって配置され、さらに熟成が進むと変化量が変化することが確認できた。また、表3をみると、未知サンプルA、B、D、Eについては、判定された熟成期間が実際の期間と同一の結果が得られており、これらについては熟成工程で温度が変化し、熟成を促進、あるいは抑制するような影響が見られていないと考えることができる。一方、未知サンプルCについては、実際の熟成期間は3か月であるが、判別分析による判定では2か月となっていることから、3か月のグループと比べて熟成の進捗が遅れている可能性が考えられる。

また、サンプルFについては、表3にもあるように、出荷時(熟成4か月)のサンプルで、図1では設定したどのグループからも大きく離れた位置にプロットされているが、DAの結果、3か月と判定された。これは、DAが、あらかじめ決められたどの既知試料グループにも属さないような未知試料でも強制的にどれかの既知試料グループに属させてしまう特徴を持つ<sup>9)</sup>ことが原因と考えられる。これについては、実際に出荷した味噌のグループを設定したDAを行うことで、熟成状態の判定を精度よく行うことも可能と考えられるが、各社の出荷のタイミングが異なることから、出荷時の味噌の熟成状態の判定を精度よく行うためには、グループの設定条件について検討する必要がある。

さらに、今回はHSGCの結果のみでDAを行ったが、

他の評価結果、例えば仙台味噌の色調の評価に用いる明度(Y%)やタンパク質の分解程度を示すホルモール窒素の値等を含めたDAを行うことで熟成状態の判定精度の向上が期待でき、熟成温度の測定結果も組み合わせることで客観的な工程管理につなげられる可能性がある。

### 3.2 GCMS結果を用いたHSGC結果の推定

DAに用いる成分の絞込や、寄与する香りの質を推定し、官能評価との比較を容易にするため、GCMSの化合物推定結果のHSGCへの適応を試みた。

まず、熟成3か月の味噌のGCMS測定で得られたクロマトグラムを図2に示す。また、検出されたピークのRIおよび化合物推定結果を表4に示す。同じサンプルのHSGCで得られたクロマトグラム(図3)中のピーク(a~p)について、RIを算出し、GCMSで得られたRIとの比較を行った。RIはKovatsが提唱した直鎖アルカンの保持時間から算出される指標であり、液相濃度、キャリアガス流速、カラム温度などの操作条件に影響されることが少ないとされている<sup>9),10)</sup>。このことから、GCMSとHSGCにて同程度のRIであるピークは同じ化合物と考えられることから、GCMSによる化合物の推定結果を適応した(表5)。

GCMSで推定できた化合物38種のうち、HSGCで検出されたものは16種で、一部の化合物がHSGCで確認できなかった。GCMSとHSGCのクロマトグラムを見ると、一部のピークについて、その強度が異なっていることがわかる。その原因として、HSGCではヘッドスペース部分そのまま分析に供したのに対して、GCMSではSPME法を用いていることから、微量成分がSPMEファイバー上で濃縮されたことにより検出下限値を上回ったことが推察される。また、今回RI算出に用いた標準物質は、炭素数6から18までであることから、RIの値が1800以降は推定値となっている。今後、さらに精度を高めるには、より炭素数の多い直鎖アルカンを含む標準物質を用いたり、入手可能な標準物質を用いた推定結果の妥当性の検証が必要であると考えられる。また、熟成による香气成分の消長を考慮して対象とする香气成分の絞込が必要であると考えた。本研究で用いているGCMSとHSGCの分析条件を比較すると、HSGCの方が分析に要する時間も少なく、さらには、過去の調査より、分析条件を精査することによってより短い時間で分析が可能になる<sup>11)</sup>ことから、データの収集効率が上がることも期待できる。

#### 4 結言

本研究では宮城県の特産物として知られている仙台味噌の熟成工程に着目し、味や香りの機器分析結果について、統計処理の一つの手法である多変量解析を用いた熟成度の可視化、さらに製造現場の判断との組み合わせによる、経験やノウハウの共有に向けたデータ提供と管理手法の検討を行ったところ、以下が明らかになった。

(1) 県内味噌製造業者5社より提供のあった味噌サンプルのHSGC測定データを用い、熟成期間をグループとした判別分析により未知サンプルの熟成期間の判定を行った。その結果、判別分析により判定した期間と実際の熟成期間を比較することで、熟成の進捗状況の判断ができる可能性が示唆された。

(2) RIの比較によってGCMSの化合物推定結果のHSGCへの適用を試みた。その結果、GCMSで推定され

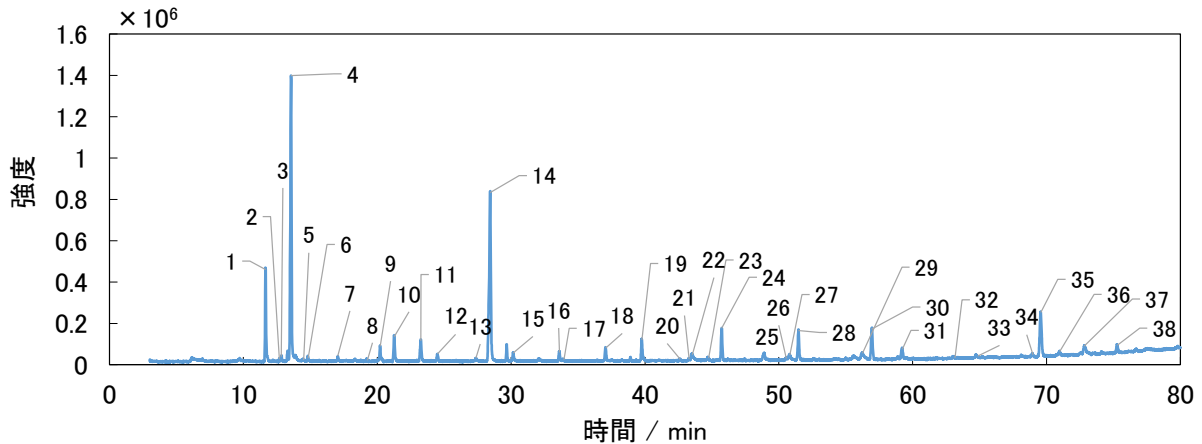


図 2 GCMS クロマトグラム

表 4 GCMS クロマトグラム中のピークの RI と推定化合物

No	RI	化合物	No	RI	化合物
1	893	Ethyl Acetate	20	1432	Octanoic acid, ethyl ester
2	921	Butanal, 2-methyl-	21	1443	1-Octen-3-ol
3	924	Butanal, 3-methyl-	22	1446	Acetic acid
4	941	Ethanol	23	1466	Furfural
5	962	Propanoic acid, ethyl ester	24	1483	Heptadecane
6	970	Propanoic acid, 2-methyl-, ethyl ester	25	1537	Benzaldehyde
7	1018	Isobutyl acetate	26	1566	Propanoic acid, 2-methyl-
8	1057	Butanoic acid, 2-methyl-, ethyl ester	27	1570	2,3-Butanediol
9	1072	Butanoic acid, 3-methyl-, ethyl ester	28	1582	Heneicosane
10	1094	1-Propanol, 2-methyl-	29	1666	Butanoic acid, 3-methyl-
11	1127	1-Butanol, 3-methyl-, acetate	30	1679	Benzoic acid, ethyl ester
12	1147	1-Butanol	31	1718	1-Propanol, 3-(methylthio)-
13	1193	Dodecane	32	1785	Benzeneacetic acid, ethyl ester
14	1210	1-Butanol, 3-methyl-	33	1816	Acetic acid, 2-phenylethyl ester
15	1236	Hexanoic acid, ethyl ester	34	1889	Butylated Hydroxytoluene
16	1290	Hexadecane	35	1900	Phenylethyl Alcohol
17	1294	Acetoin	36	1925	Benzeneacetaldehyde, .alpha.-ethylidene-
18	1343	Propanoic acid, 2-hydroxy-, ethyl ester	37	1958	Maltol
19	1386	Tetradecane	38	2001	Tetradecanoic acid, ethyl ester

た化合物38種のうち、HSGCでは16種検出されていることを確認した。

### 謝辞

本研究の推進に当たり、宮城県味噌醤油工業協同組合および組合員の皆様にはサンプル提供やご助言を頂くなど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) キューピー株式会社. マヨネーズの「ロどけ」の定量化に成功. キューピー株式会社. 2020-10-09. <https://www.kewpie.com/newsrelease/2020/1912/>. (参照 2023-03-24).
- 2) サッポロホールディングス株式会社. レモン飲料における、味、香りの特長とおいしさとの関係性を確認！. サッポロホールディングス株式会社. 2017-

03-21.

<https://www.sapporoholdings.jp/research/news/dit/?id=7711> (参照 2024-05-22).

- 3) 農林水産省 農業DX検討委員会. 農業DX構想 ～「農業×デジタル」で食と農の未来を切り拓く～. 農林水産省. 2021-03-31. <https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/joho/attach/pdf/210325-18.pdf>. (参照 2023-03-24).
- 4) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省編. ものづくり白書<2021年版>. 2021.
- 5) 羽生幸弘, 浅野壮宏, 小山誠司. 多変量解析による工程管理手法の検討. 令和4年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2023, 20, p. 69-73.
- 6) 滝埜昌彦. データ処理手法及び多変量解析によるLC/MS分析の視覚化. 分析化学. 2014. 63(6). p.497-513.
- 7) 中川勝博, 田中幸樹, 宮川治彦. GC-MS を用いた異臭分析について. におい・かおり環境学会誌. 2013. 44(1). p.28-37.

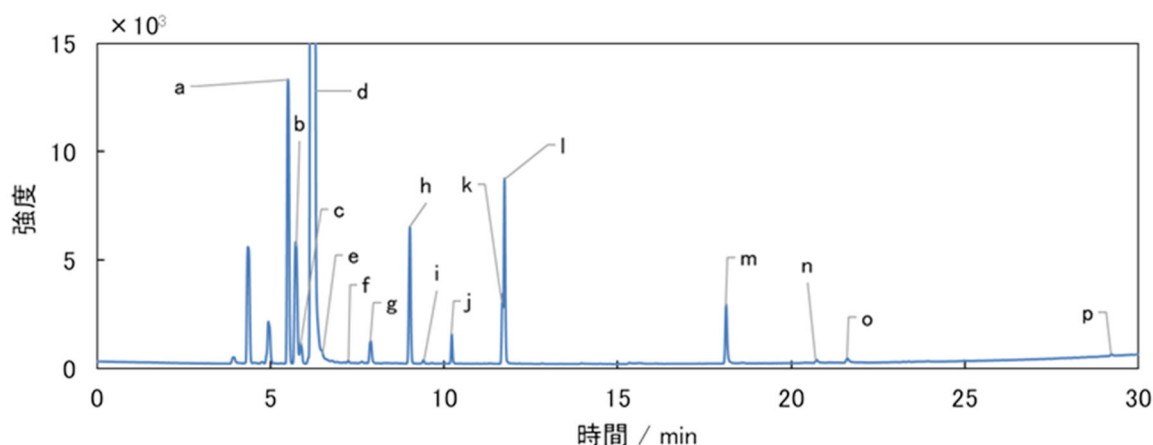


図3 HSGC クロマトグラム

表5 HSGC クロマトグラム中のピークのRIと推定化合物

No	RI	化合物	No	RI	化合物
a	893	Ethyl Acetate	i	1125	1-Butanol, 3-methyl-, acetate
b	914	Butanal, 2-methyl-	j	1160	1-Butanol
c	925	Butanal, 3-methyl-	k	1218	1-Butanol, 3-methyl-
d	952	Ethanol	l	1221	Hexanoic acid, ethyl ester
e	970	Propanoic acid, 2-methyl-, ethyl ester	m	1467	Furfural
f	1019	Isobutyl acetate	n	1569	2,3-Butanediol
g	1053	Butanoic acid, 2-methyl-, ethyl ester	o	1571	Butanoic acid, 3-methyl-
h	1107	1-Propanol, 2-methyl-	p	1733	1-Propanol, 3-(methylthio)-



- 8) 三井利幸, 奥山修司, 肥田宗政. 多変量解析法を用いる定性および定量分析. 分析化学. 2004. 53(8). p. 773-791.
- 9) 重藤敦嗣, Erinna Nindi Nurasti, Anton Sugiarto, 戸川真, 熊沢賢二. バニラの収穫時の熟度が香気に及ぼす影響. 日本食品科学工学会誌. 2017. 64(10). p. 502-506.
- 10) 宇野豊三, 宮嶋孝一郎, 奥田秀毅. 保持指標と沸点の間関係. 薬学雑誌. 1968. 88(1). p. 33-38.
- 11) 羽生幸弘, 大坂正明, 浅野壮宏. 香気分析・香り評価に関する技術調査. 令和2年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2021. 18. p. 101-104.

【短報】

【令和4～6年度 県単独試験研究】

## イチゴ「にこにこベリー」の特性評価と品質向上に向けた検討 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

高山 詩織  
食品バイオ技術部

宮城県育成イチゴ品種「にこにこベリー」は、果形が円錐形で揃いが良く、果肉が硬い特徴を持つ。そこで、高単価で取引されるケーキ用(業務用)としての販路拡大に向けて品質の均一化を目指すため、着色程度と果実性状、収穫時期及び生産者と果実性状について調査した。その結果、着色程度5番(9～10分着色)は糖含量が多いが硬度が低いため、3～4番(5～8分着色)での出荷が望ましいことがわかった。また収穫時期により果実性状に特徴があり、特に硬度、糖含量、有機酸含量は時期により差がみられた。生産者間でも果実性状にばらつきがみられたことから、生産者の着色程度の認識の統一化を行うことで産地の品質の均一化が期待される。

キーワード: イチゴ、「にこにこベリー」、着色程度、硬度

### 1 緒言

宮城県の園芸品目の中でイチゴは最も産出額が多く(農水省「令和3年生産農業所得統計」64億円)、令和3年に見直された園芸推進プランにおいて、「令和12年までに産出額100億円」を目標に掲げ、県を挙げて振興している品目である。

本県育成イチゴ新品種「にこにこベリー」は、収量が多く、果実の色・果形が美しく揃いが良い品種である。既存の品種と比較して、春先まで果肉が硬く、中玉率(L～Mの割合)がやや高いため、幅広い利用の可能性を持つ。

イチゴの販売形態は、生鮮用と業務用があり、小売店などで販売される生鮮用は、出荷量の約80%を占め、ケーキ等に用いられる業務用は約20%である。業務用は、出荷量は少ないものの販売単価は高く、特に12月及び4月以降Lサイズ以下(11 g未満)の果実は、業務用として出荷するメリットが高い。しかしながら、すべての品種で業務用を出荷できるわけではなく、果形が円錐形でサイズがL～M規格のイチゴが多く収穫できる品種のみ業務用として出荷可能である。前段で述べたとおり「にこにこベリー」は、業務用に適する特性を持つが、一方で利用企業からは、購入時期により品質にばらつきがあるという声もあり、取引拡大において課題もある。

そこで本研究では、品質の均一化と品質の向上による販売価格の安定とケーキ用取引の拡大を目指し、①着色程度と果実性状、②収穫時期及び生産者と果実

性状について調査することとした。

### 2 調査内容及び方法

#### 2.1 着色程度と果実性状

##### 2.1.1 試料採取及び供試品種

「にこにこベリー」(対照品種として「とちおとめ」)のLサイズ11 g以上15 g未満の正常果を試料とした。外観の着色については、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」のとおり5～6分着色を3番、7～8分着色を4番、9～10分着色を5番とした。試料は各試験の用途ごとに12月、2月、4月に採取し、センターへ搬入後直ちに5℃とし、収穫1日後に含水率、硬度、色調、Brix、香气成分の測定及び食味試験(官能評価)を実施した。

##### 2.1.2 含水率、硬度、色調の測定

含水率は、試料を1果ずつアルミ容器に入れ、送風乾燥機を用いて90℃で常圧加熱乾燥法により測定し、各分析において3反復の平均値を算出した。

硬度は、クリープメーター((株)山電、RE2-33005)を用い、ロードセル19.6 N、測定速度1 mm/sec、貫入させるプランジャーの直径は3 mmで測定した。貫入箇所は果実表面の赤道部とし、プランジャーの先端は瘦果を

避け果皮部に垂直に貫入するようにした<sup>1)</sup>。既報<sup>2)</sup>に従い、果皮硬度、果肉硬度、果芯の硬度を求めた(図1)。各測定において6果の平均値を算出した。

色調は、分光測色計(コニカミノルタジャパン(株)、CM-700d)を用い、表色系はCIE Lab色空間、D65光源、正反射光除去方式(SCE)、10°視野として、各測定において、5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、平均値を算出した。

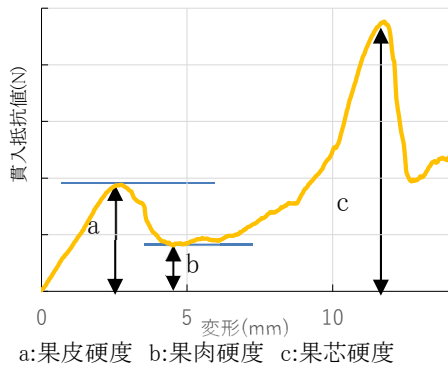


図1 イチゴ果実各部位の硬度

### 2.1.3 Brix、糖及び有機酸の分析

個体差を低減するため、条件ごとに20~25果を縦に4等分し、Brix、糖、有機酸、香気成分分析、食味試験を行った。Brixは、前述の果実の1/4をまとめて搾汁し、ポケット糖酸度計(アタゴ(株)、PAL-BX|ACID121)を用いて測定、2反復の平均値を分析値とした。

糖及び有機酸の分析用試料の調製は、以下のとおり行った。前述の果実1/4をまとめて凍結乾燥<sup>3)</sup>し、試料2 gに75%エタノール20 mlを加えて15分超音波処理し、その後遠心分離(3,000 rpm、10min、15°C)を行い、抽出液を得た。遠心分離による抽出作業は2回行い、上澄み液を合わせ50 mlに定容した。得られた抽出液は0.22 μmのフィルターでろ過後、分析試料とした。

糖分析は、高速液体クロマトグラフィー((株)日立ハイテクサイエンス、HPLC Chromaster、以下「HPLC」という。)により分離し、蒸発型光散乱検出器(ELSD)により検出、定量した。カラムはAsahipak NH2P-50 4E((株)レゾナック)を使用、移動相は75%アセトニトリル、カラムオープン温度40°C、流量1.2 ml/min及び注入量10 μLとした。

有機酸分析は、既報<sup>4)</sup>の通り行った。超高速液体クロマトグラフィー(ACQUITY UPLC H-Class PLUS システム/SQ Detector2、Waters Corporation。以下「UPLC」という。)により分離し、ACQUITY シングル四重極質量検

出器2により検出、イチゴの有機酸の主成分であるクエン酸とリンゴ酸について定量した。

### 2.1.4 官能評価付きガスクロマトグラフ質量分析装置(以下、GCMS/O)による香気成分分析

香気成分分析は、MonoTrap®(ジーエルサイエンス(株)、MonoTrap RGPS TD)を用いた固相吸着-加熱脱着法により実施した。Brixの測定に用いた果汁3 mlをバイアルに封入し、MonoTrap®に気相(以下、ヘッドスペース)の成分を吸着させ、ガスクロマトグラフ質量分析計((株)島津製作所、GCMS-QP2010 Plus)に供した。吸着は40°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40~240°C、昇温速度4°C/minで行った。分析により得られた質量スペクトル及び保持時間を、米国標準技術研究所(NIST)ライブラリと照合することで、成分を推定した。

### 2.1.5 ヘッドスペースガスクロマトグラフ(以下、HSGC)による香気成分分析

香気成分分析は、2.1.4と同様に果汁3 mlをバイアルに封入した試料について、ヘッドスペース法により実施した。試料を50°C、30分加温した後、ヘッドスペースオートサンプラー付ガスクロマトグラフ((株)島津製作所、HS-20/Nexis GC-2030)により分離し、水素炎イオン検出器(FID)により検出、定量した。カラムはDB-WAX(内径0.25 mm×30 m、膜厚0.25 μm、アジレント・テクノロジー(株))、キャリアガスは水素を用い、カラム温度40~240°C、昇温速度20°C/minで行った。

### 2.1.6 食味試験(官能評価)

食味試験は、2.1.3の1/4にカットした果実6粒を用いて行った。センター技術職員6名で、「外観の光沢」、「断面の赤色」、「香り」、「甘み」、「酸味」、「総合評価」について5点上位の5点法にて行った。

## 2.2 収穫時期及び生産者と果実性状

### 2.2.1 試料採取及び供試品種

供試品種は「にこにこベリー」を用いた。県内2産地に

において、それぞれ5名の生産者の果実について調査した。試験には、Lサイズ11 g以上15 g未満の正常果のうち、4番(7~8分着色)を用いた。試料は12月~5月まで月1回(各月10日頃)採取し、当センターへ搬入後直ちに5°Cで保存し、収穫1日後に含水率、硬度、色調、Brix、香气成分の測定及び食味試験を実施した。

含水率、硬度、色調、Brix、香气成分の測定及び食味試験は2.1と同様に行った。

### 3. 試験結果及び考察

#### 3.1 着色程度と果実性状

##### 3.1.1 硬度

「にこにこベリー」は、外観の着色が進むに伴い果皮硬度、果肉硬度は低くなる傾向がみられた(図2)。「にこにこベリー」は、「とちおとめ」と比較して果肉硬度が高く、特に着色程度3番と4番では「とちおとめ」より有意に高かった。

##### 3.1.2 外観の色調

「にこにこベリー」は、着色が進むに伴って、明るさの程度を表す $L$ 値は低下し、赤~緑を表す $a$ 値は大きくなったが、黄~青を表す $b$ 値は一定の傾向は認められなかった(図3)。既報<sup>6)</sup>では、他の品種も同様の傾向がみられ、イチゴの着色特性と一致した。

##### 3.1.3 糖及び有機酸

Brix及び糖含量は、両品種とも果実の着色が進むに伴い増加する傾向がみられた。「にこにこベリー」では、5番でスクロース含量が有意に高かった(図4)。

クエン酸とリンゴ酸の含量は、「にこにこベリー」では、果実の着色程度によらず変化はみられなかった。「とちおとめ」は、3番、4番では変化がみられなかったが、5番でクエン酸が減少する傾向がみられた(図5)。

##### 3.1.4 香气成分

着色程度が異なる「にこにこベリー」のHSGCの測定結果を図6に示す。クロマトグラムを比較すると、この分析条件で認められた香气成分の構成は一致しているが、着色程度によって各成分量(ピーク面積)に差がみられ

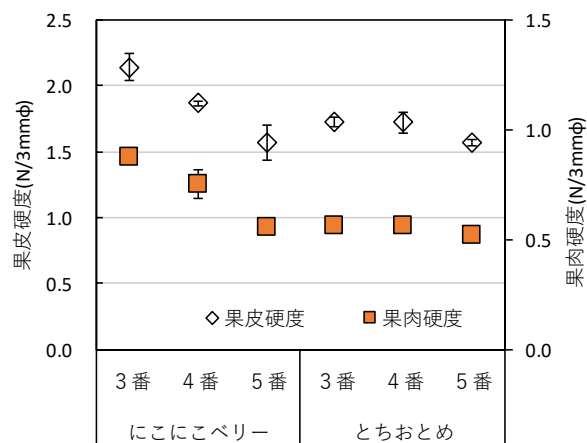


図2 着色程度と硬度

エラーバーは標準誤差

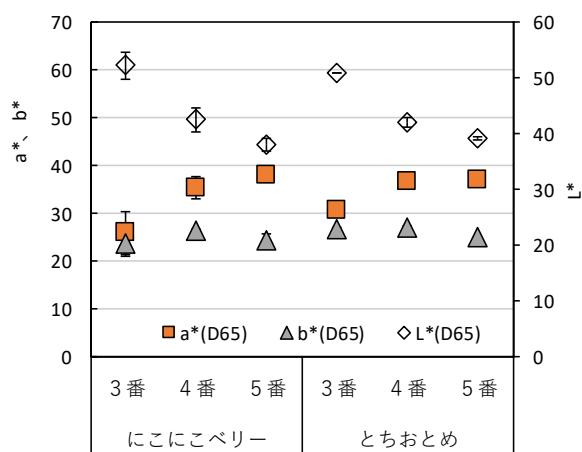


図3 着色程度と果実色

エラーバーは標準誤差

た。GCMS/Oの結果から香气成分を推定し、HSGCの結果と合わせてピーク面積の比較を行ったところ、生果の主要香气成分<sup>7)</sup>の②Hexanoic acid, methyl esterとイチゴ特有の香りの⑨Mesifuraneは着色が進むに伴い増加する傾向がみられた。果実香、イチゴの酸味の強い香りと言われる④Acetic acid, hexyl ester、⑤trans-2-Hexenyl acetateと、若葉様と言われる⑥1-Hexanol、⑦2-Hexen-1-olは、着色程度3番で最も成分が多く、着色が進むに伴い減少する傾向がみられた。

##### 3.1.5 食味試験(官能評価)

着色程度の異なる「にこにこベリー」の食味試験結果を図7に示す。3番は、5番と比較して「光沢」、「酸味」が強、「断面の赤さ」が弱い結果となった。一方5番は、「香り」が強、「硬さ」が低い結果となり、香气成分や硬

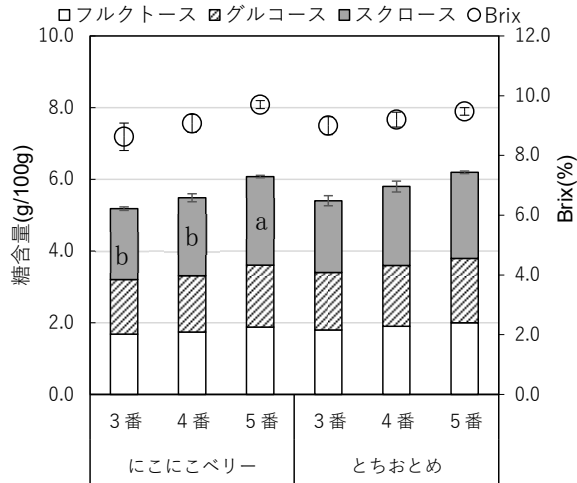


図4 着色程度と糖含量及び Brix

エラーバーは標準誤差  
異なる英小文字は tukey の多重検定により有意差あり

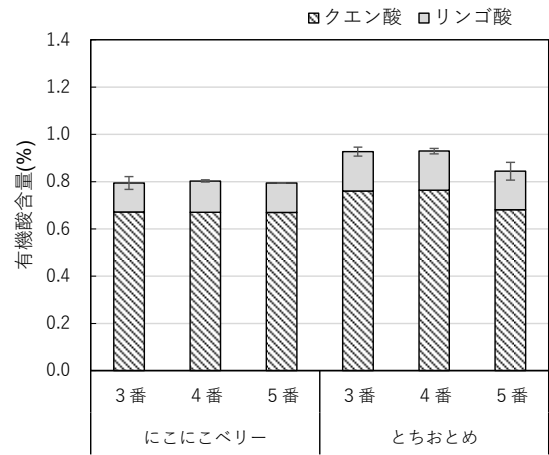


図5 着色程度と有機酸含量

エラーバーは標準誤差

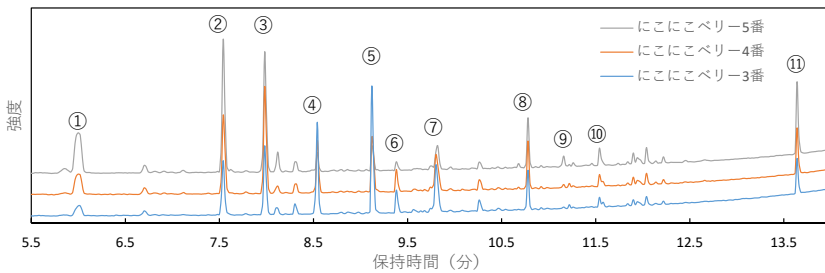


図6 「にこにこベリー」における着色程度と香り成分

- ①Butanoic acid, methyl ester    ②Hexanoic acid, methyl ester    ③2-Hexenal
- ④Acetic acid, hexyl ester    ⑤trans-2-Hexenyl acetate    ⑥1-Hexanol
- ⑦2-Hexen-1-ol    ⑧Linalool    ⑨Mesifurane    ⑩Farnesene    ⑪Nerolidol

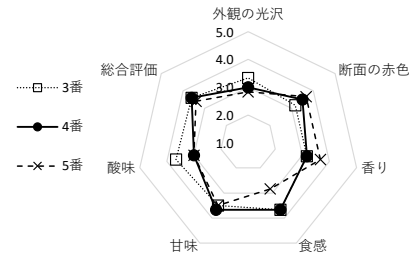


図7 「にこにこベリー」における着色程度と食味試験

度の分析結果と一致した。

### 3.2 収穫時期及び生産者と果実性状

#### 3.2.1 収穫時期と果実性状

生産者 10 名の果実性状の時期別分析結果を互理と山元に分けて図 8 に示す。含水率は、12 月から 5 月に向け一定～やや減少する傾向が認められた。Brix 及び糖含量は、3 月に減少する傾向が認められ春先に味落ちすると言われることを支持する結果となった。果皮硬度は、12 月から 5 月に向け、低下する傾向がみられ、L 値、a 値は、12 月から 5 月まで変動は少ないが、5 月に L 値はやや高く、a 値はやや低くなる傾向がみられた。これは、5 月の高温期に着色が早まるため、他の時期よりやや未熟な果実を出荷していることが推察された。有機酸は時期による変動が大きく、12 月と 5 月に多く、4 月に減少する傾向が認められた。

#### 3.2.2 生産者と果実性状

図8に示す「にこにこベリー」生産者10名の間には、含水率、果皮硬度、糖含量、L値、有機酸含量でばらつきが認められた。分析項目間の相関については、含水率とBrixには負の高い相関があった(相関係数-0.90)。また、2月と3月は、L値とBrixには負の相関があった(相関係数-0.72、-0.67)。

#### 3.2.3 香り成分

4月のBrixが大きく異なるE氏とF氏の、HSGCによる香り分析結果を図9に示す。ピーク面積の比較を行ったところ、この分析条件で認められた香り成分の構成は一致しているが、着色程度によって各成分量(ピーク面積)に差がみられた。特に、生果の主要香り成分の②Hexanoic acid, methyl esterと④Hexanoic acid, ethyl esterに差が認められ、果実香と言われる⑤Acetic acid,

hexyl esterと若葉様と言われる⑥ trans-2-Hexenyl acetate、⑦2-Hexen-1-olは差が認められなかった。同一品種において、生産者間で香気成分組成や香気成分が変化する要因については不明であるが、イチゴの香気成分は季節や栽培条件により変化するという報告<sup>7)</sup>がある他、3.1の結果から着色程度でも香気成分の構成や成分量が変わることから、同一品種、同一生産者でも香気成分の構成や成分量が異なることが明らかとなった。

### 3.2.4食味試験(官能評価)

4月のBrixが大きく異なるE氏とF氏の、食味試験結果を図10に示す。Brixが高いF氏は、「甘味」と「総合評価」が高くなり、分析結果と一致した。

## 4 結言

着色程度と果実性状の関係を調査した結果から、「にこにこベリー」は、着色程度3番、4番では「とちおとめ」と比較して硬いが、着色程度5番では差がなかった。また、Brix及び糖含量は着色に連動して高くなることが確認された。特に着色が進むほどスクロースが多くなるため、完熟果の食味が良いと言われる要因の一つである可能性が示唆された。

香気成分は、生果の主要成分と言われるエステル類と特徴的な甘い香りのMesifuraneは着色に連動して増加する傾向がみられ、酸味の強い香りの酢酸エステル類と若葉様と言われるアルコール類は、着色が進むに伴い減少する傾向が認められた。着色が進むとイチゴの爽やかな甘い香りの香気成分が増加した。

イチゴの出荷に際しては、硬度の低下に由来する果実損傷の懸念から、完熟して糖酸度が高まった果実を出荷対象としないのが通常である。本研究の結果から、「にこにこベリー」は3～4番で出荷することが望ましいと考えられるが、出荷時期や輸送にかかる時間等も考慮した判断が求められる。

収穫時期及び生産者と果実性状の関係を調査した結果から、「にこにこベリー」は、収穫時期によって、含水率、硬度、果皮の色、糖、有機酸が変動することが明らかとなり、一般的なイチゴの時期別の傾向と一致した<sup>10)</sup>。

生産者10名の果実特性は、含水率、果皮硬度、糖含量、L値、有機酸含量でばらつきがみられた。特に果皮硬度は、生産者間での差が大きく、L値もばらつきがみ

られた。L値が高い(白い)果実は、Brixが低い傾向が認められ、生産者によって着色程度(熟度)にばらつきがあったことが要因の一つと考えられた(図11)。

本研究では、生産者に口頭で4番(7～8分着色)の果実の用意を依頼したが、生産者間で着色程度の認識にズレがあった。出荷開始時に、農業協同組合等の関係機関で目揃い会の開催や、出荷カラーチャートの配布が行われているものの、さらに生産者の着色程度の認識の統一化が必要であり、産地の品質の均一化と品質の向上につながると考えられた。この結果を元に、農政部園芸推進課と協力して「イチゴ収穫出荷チェックシート」の作成を行い、県内生産者へ配布した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、みやぎ亘理農業協同組合いちご部会の皆様、みやぎ亘理農業協同組合、亘理農業改良普及センター、園芸推進課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) 門馬信二, 上村昭二. イチゴ果実の硬さ測定法と品種間差異. 野菜試報. 1977, B.1, p. 1-11.
- 2) 遠藤(飛川)みのり, 曾根一純, 藤田敏郎, 森下昌三. イチゴ果実における見かけ弾性率の貯蔵、収穫時期による変化及び遺伝資源評価. 九沖農研報告. 2018, 67, p. 1-14.
- 3) 高山詩織, 小山誠司, 畑中咲子. 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. 宮城産技セ研報. 2023, No.20, p. 75-79.
- 4) Jinchuan Yang, Paul D. Rainville. ミックスモードLCラムとACQUITY QDa 質量検出器を用いた有機酸の分析. Waters アプリケーションノート.
- 5) 日置隆一, 佐藤雅子. 表色系, 日本色彩学会編, 色彩化学ハンドブック. 東京大学出版会, 1985, p. 83-146.
- 6) 前川寛之. イチゴ品種“とよのか”の着色に関する研究(第1報)着色特性の品種間差異及び“とよのか”の果実熟成に伴う着色様相の変化. 奈良農試研報. 1992, 2, p. 13-20.
- 7) 北村八祥, 大久保直美, 小堀純奈, 森利樹. 香気成分解析によるイチゴ‘かおり野’の香りの評価. 園芸学研究. 2014, 13別1, p. 317.
- 8) 望月麻衣, 河田智明, 池ヶ谷篤, 井狩徹, 五藤由



香理, 竹内隆. イチゴ新品種‘きらび香’の果実特性. 静岡県農林秘術研究所研究報告. 2018, 11, p. 49-53.

9) 稲葉昭次, 伊東卓爾, 中村怜之輔. イチゴの作型と果実中の糖および有機酸組成. 岡山大農学報. 1977, 50, p. 37-42.

10) 堤智博, 山下純隆, 大森薫. イチゴ‘あまおう’の品質特性 第1報 収穫時期、着色程度別の果実品質. 福岡県農業総合試験場研修報告. 2005, 24, p. 1-4.

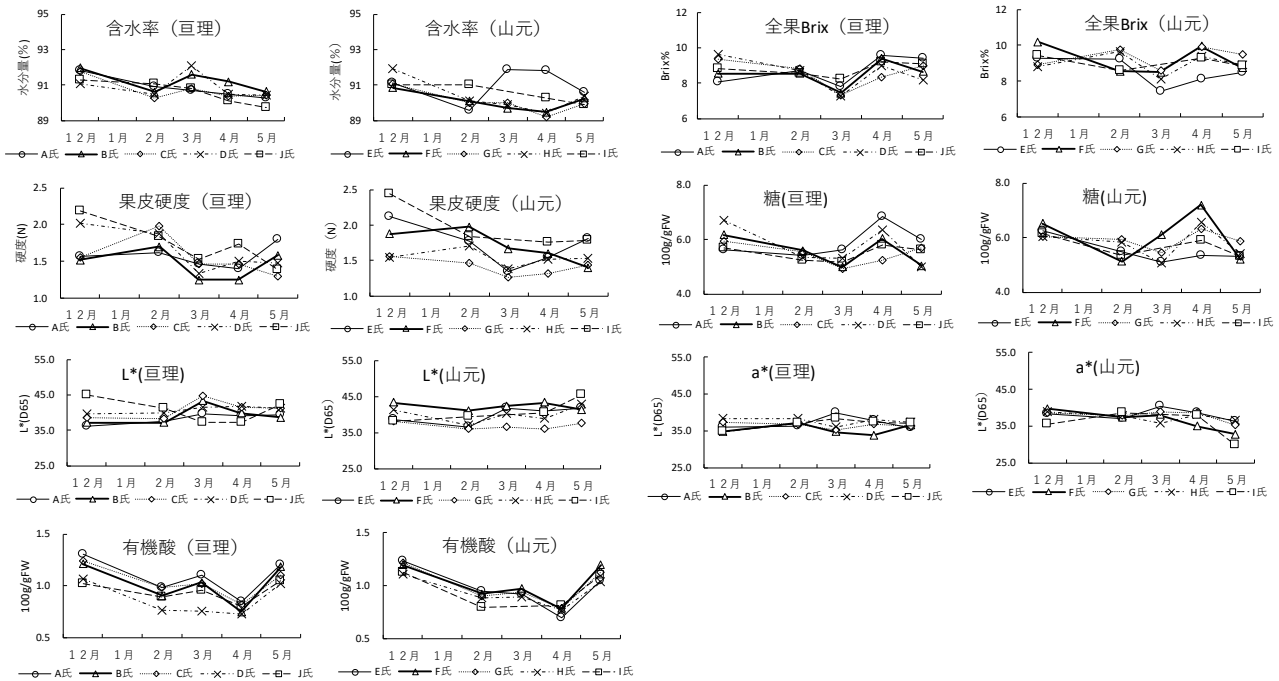


図 8 生産者 10 名の果実特性の時期別変動

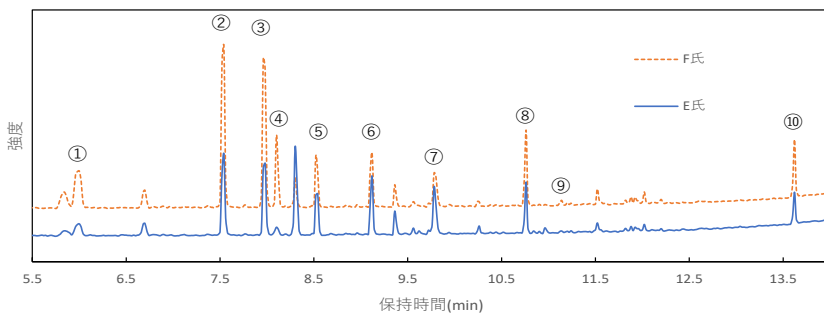


図 9 生産者と香り成分(4月)

- ①Butanoic acid,methyl ester ②Hexanoic acid, methyl ester ③2-Hexenal
- ④Hexanoic acid, ethyl ester⑤Acetic acid, hexyl ester ⑥trans-2-Hexenyl acetate ⑦2-Hexen-1-ol ⑧Linalool ⑨Mesifurane ⑩Nerolidol

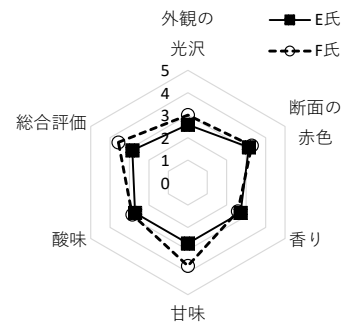


図 10 食味試験(4月)



A氏 B氏 C氏 D氏 J氏 E氏 F氏 G氏 H氏 I氏  
図 11 生産者 10 名の果実(7~8 分着色)

【ノート】



【ノート】

【令和5年度 先端技術等調査研究事業】

## パラメトリック設計によるラティス構造生成

篠塚 慶介、伊藤 利憲、益田 佳奈  
企画・事業推進部

AM(Additive Manufacturing)技術の発展により、従来の加工法では作ることが出来なかった形状が製造できるようになった。加えて、3次元設計ソフトウェアの高機能化やコンピューターの高性能化が進み、機能性を持った複雑な形状を設計し、AM技術で製造する手法が注目されている。

ラティス構造を取り入れた設計もその一つで、軽量化や放熱性向上などの効果が期待されるが、構造が複雑なため、設計者が3次元設計ソフトウェアの手動操作のみで形状を作り上げることは現実的ではない。

そこで本研究では、ビジュアルプログラミング言語を使ったパラメトリック設計でラティス構造を簡便に生成する手法について検討を行った。

キーワード：ラティス構造、パラメトリック設計、AM技術

### 1 緒言

一般的に3Dプリントや付加製造とも呼称される「AM技術」は、日本産業規格(JIS)で、3Dモデルデータを基に、材料を結合して造形物を実体化する加工法<sup>1)</sup>として定義されている。従来型の成形加工(射出成形、鍛造、鋳造など)や除去加工(切削、切断、放電加工など)と比較して、AM技術固有の制約条件はあるものの、作ることができる形状の自由度が高い。

デジタル化が進む製造業界に目を向けてみると、高機能な3次元設計ソフトウェアと高性能のコンピューターを用いて、高い機能性を持つ、従来型の加工法では作ることが出来ない複雑形状部品を設計し、AM技術で製造する手法が注目されており、その一つにラティス構造がある。本研究では、そのラティス構造を簡便に生成する手法について検討を行った。

- ・ 弾力性の向上
- ・ 材料の節約
- ・ AMによる造形時間の削減
- ・ 他の部材との親和性向上(アンカー効果の向上)
- ・ 負のポアソン比など、素材単体では実現できない物性の再現

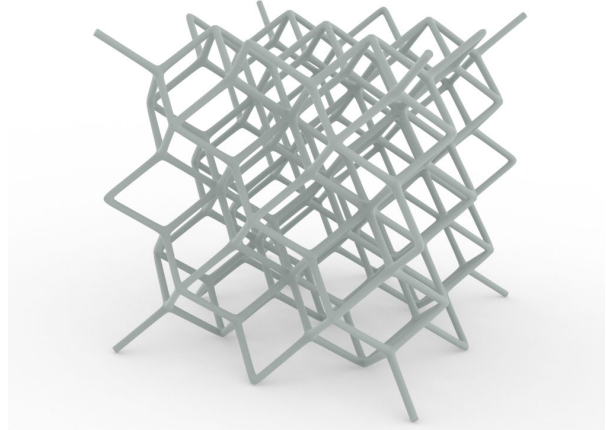


図1 ラティス構造の例

### 2 ラティス構造について

ラティス構造とは、頂点(点)間を連結するリンクを幾何学的に3D配置した機能構造<sup>2)</sup>である(図1)。

構造物の一部(あるいは全体)をラティス構造にすることで、以下のような機能の向上と効果付与などが期待できる。

- ・ 軽量化
- ・ 放熱性の向上
- ・ 通気性の向上

一方、ラティス構造は形状が複雑なため、設計者が3次元設計ソフトウェアの手動操作のみで作成することは、時間とコストの面からみて現実的ではない。

そこで本研究では、ビジュアルプログラミング言語を使ったパラメトリック設計によりラティス構造を簡便に生成する2つの手法について検討し、そのメリットとデメリットについて調査した。

なお、ここではラティス構造が持つ機能や効果の評価には言及せず、生成方法のみに着目する。

### 3 ビジュアルプログラミングによるパラメトリック設計

ビジュアルプログラミングとは、ある機能を持った図形・記号を組み合わせるプログラミングする手法のことである(図2)。コードを文字で記述するテキストプログラミングと比べ、初心者でも直感的にプログラミングしやすいという利点がある。

パラメトリック設計とは、3D-CAD等で生成したモデル形状が、可変するパラメーター値(変数)と連動し、その設計の整合性を保ったまま、形状や個数が自動変更するように設計する手法であり、プログラムを用いて実行することが多い。

今回のラティス構造の設計には、3次元モデリングソフトウェア「RhinoCeros (Robert McNeel & Associates社)」上で動作するビジュアルプログラミング言語「Grasshopper」を用いて、パラメーターに連動して、ラティス構造の各部の寸法と配置数が変わるパラメトリック設計を行った。

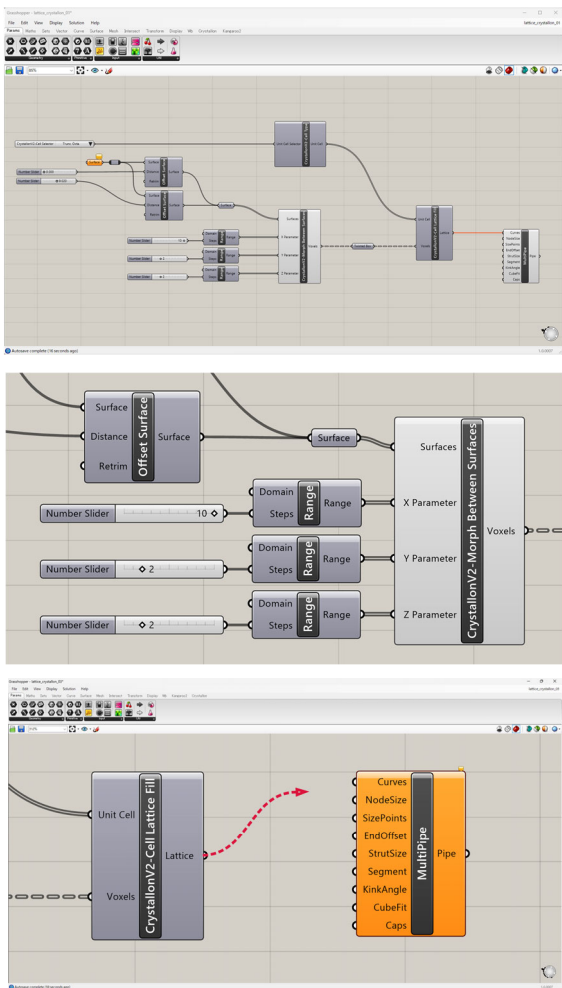


図 2 ビジュアルプログラミングの操作画面例

### 4 ラティス構造の生成

#### 4.1 ラティス構造の生成方法

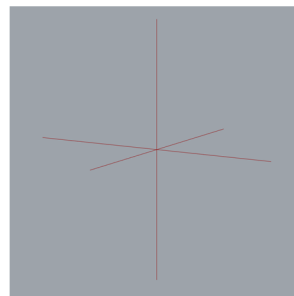
ラティス構造の生成については様々な方法が考えられるが、本研究では比較的容易に生成可能な、①「同形状のラティスをXYZ方向にそれぞれ配列複製」、②「3次元空間を六面体で区切り、その区画ひとつひとつにラティスを配置」、の2つの方法を採用した。

#### 4.2 プログラムの実行

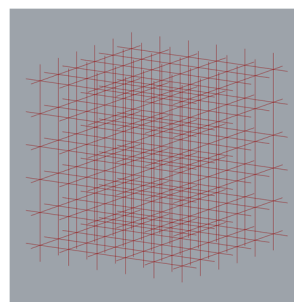
①「同形状のラティスをXYZ方向にそれぞれ配列複製」するプログラムは、以下の手順で実行される。

変更できるパラメーターは、ラティスの梁の長さ、梁の径、梁が交差する部分の形状、隣接するラティスとの接合部の径、配列複製する数とし、梁の断面形状は全て円形とした。

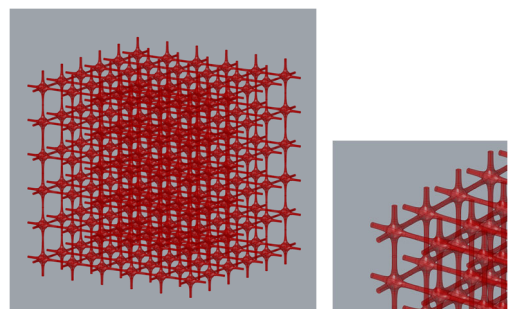
- 1) ラティスの梁の中心線(骨組み)を作図



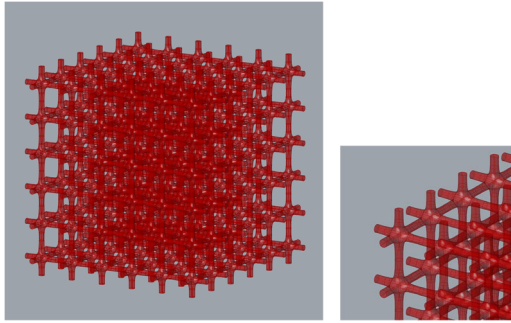
- 2) 中心線を配列複製



- 3) 中心線に厚み付け



4) パラメーターの調整



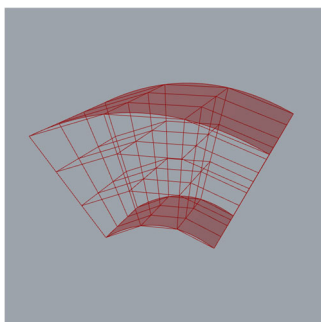
生成したラティス構造は、不要な部分をトリミングし、3D-CAD等のブーリアン演算機能を用いて土台となる形状と結合する。

②「空間を六面体で区切り、その区画ひとつひとつにラティスを配置」するプログラムは、以下の手順で実行される。変更できるパラメーターは、①と同様とした。

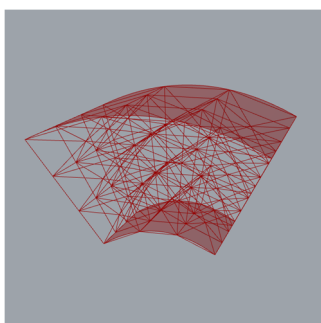
1) ラティス構造化する領域を指定



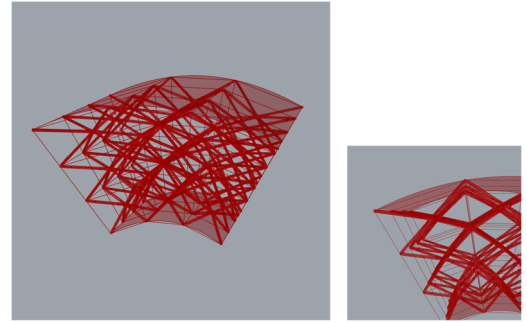
2) 領域を六面体で分割



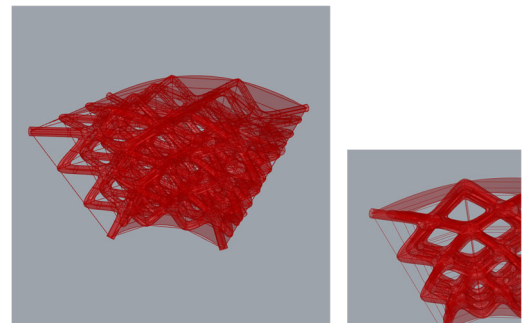
3) 各六面体の内部に、中心線(骨組み)を配置



4) 中心線に厚み付け



5) パラメーターの調整



ラティス構造を生成後、必要に応じて、土台となる形状とブーリアン演算機能で結合する。

5 考察

今回、作成した①②のプログラムによるラティス構造の生成方法は、それぞれ以下の特性を持つことが確認できた。

① 「同形状のラティスをXYZ方向にそれぞれ配列複製する生成方法の特性

- ・ 同形状の構造を配置複製しているため、単純形状の空間をラティス構造で充填することに向いている。ただし、トリミングする場合、その位置によって、構造の途中でラティスが途切れる可能性がある(図3)。

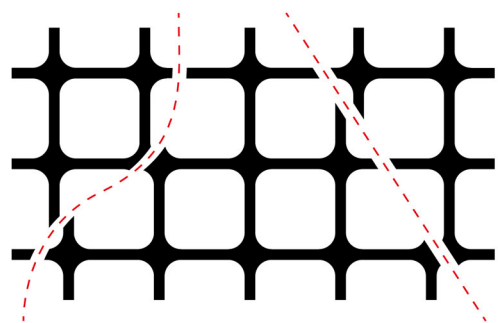


図3 構造の途中で途切れたラティス構造の模式図



- ・ 中心線(骨組み)の形状を変えるだけで、様々なラティス構造を簡便に生成できる。
- ・ プログラミングの手順を変更すると、計算処理が極端に重くなる。具体的には手順2)と3)の処理の前後関係を入れ替えると計算が収束しない。

② 「空間を六面体で区切り、その区画ひとつひとつにラティスを配置」する生成方法の特性

- ・ トポロジーを保ったまま、領域に合わせてラティス構造が変形する(図4)。
- ・ 曲面で囲まれた空間も、構造が途中で途切れることなくラティス構造で充填できる。
- ・ 中心線(骨組み)の形状を変えるだけで、様々なラティス構造を生成できる。

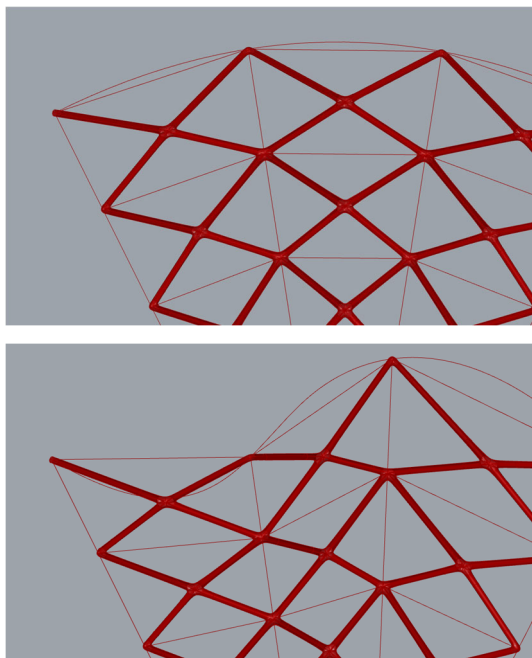


図4 領域に合わせて変形する

6 結言

今回の調査研究では、ビジュアルプログラミング言語を用い、比較的簡単にラティス構造を生成するプログラムを作成した。生成したラティス構造は、異なる3D-CAD間でも互換性を持つ中間ファイル(IGES、STEPなど)に変換できるため、県内企業が多く導入している一般的な3D-CADでも扱える。

設計の現場では、コストや操作の難易度の面でラティス構造を生成するためのソフトウェアの導入や設計ノウハウの蓄積は進んでいない状況が見受けられるが、本

研究の終盤に、今回作成したプログラムを用いて企業支援を行い、AM造形部品設計に有効活用できることが確認できた。今後も、本技術の活用と県内企業への普及を進めたい。

残された課題として、データ量が重くなる複雑なラティス構造は、強度解析や熱流体解析などのシミュレーションが難しいことが挙げられる。コンピューター性能のさらなる向上により解決する可能性もあるが、ラティス構造の物理特性を単純なひとつのボクセル形状に置き換えることでデータ量を軽くし、シミュレーションする等の対応策も同時に検討していきたい。

現在、県内企業の間でAM技術の理解が徐々に進んだこともあり、ラティス構造への関心が高まってきている。

宮城県産業技術総合センターでは県内企業向けにAM技術を発信する「宮城AM研究会」を開催し、ラティス構造などのAM関連技術を、研究会会員が相互に学ぶ場を設けている。興味のある方は、是非、次のURLをご覧ください。

<https://www.mit.pref.miyagi.jp/mde/mde-labs/>

参考文献

- 1) 一般財団法人日本規格協会. JIS B 9441:2020. 付加製造(AM)ー用語及び基本的概念. 2020. p. 5.
- 2) 一般財団法人日本規格協会. JIS B 9441:2020. 付加製造(AM)ー用語及び基本的概念. 2020. p.16.



【ノート】

【令和5年度 先端技術等調査研究事業】

## ラマン分光法による有機化合物分析 — ラマン分光・赤外分光の測定手法に関する調査 —

千葉 亮司

企画・事業推進部兼材料開発・分析技術部

ラマン分光法は、有機化合物の化学構造の情報を得ることができる分析法であり、顕微ラマン分光装置を用いることにより、微小な測定対象物を採取することなく特定部位を狙った分析ができるという利点がある。このラマン分光法を地域企業から寄せられる分析相談への対応に活用することを想定して、分析対象となることが多いセルロースを主成分とする複数の試料の測定を行い、試料の種類及びレーザー波長による測定可否と赤外分光法との違いを示した。

キーワード：ラマン分光、赤外分光、有機物分析

### 1 緒言

ラマン分光法は、無機物から有機物まで様々な物質を対象に、元素情報のみではわからない化学結合や分子構造、結晶構造の情報を得ることができる分析法である。当センターでは有機物の分析に赤外分光法を用いることが多いが、ラマン分光法は、赤外分光法と比較してより微小な測定対象物を採取することなく特定部位を狙った分析ができるという利点があり、有機物の分析において赤外分光法では対応できない領域を補完できる分析法である。

本稿では、地域企業から寄せられる分析相談への対応を想定して先端技術等調査研究事業において実施したラマン分光分析と赤外分光分析に関する取組の中から、当センターが保有するラマン分光光度計を用いて天然繊維(セルロース)を測定した事例を紹介する。

### 2 測定方法

#### 2.1 装置

ラマン分光分析にはラマン分光光度計(堀場製作所、XploRA PLUS)を、赤外分光分析にはフーリエ変換赤外分光分析装置(日本分光、FT/IR6700)をそれぞれ用いた。

#### 2.2 試料

測定試料は、粉末セルロース(日本製紙株式会社、

KCフロック W-100GK)、コピー用紙(PPC紙、ECF漂白パルプ100%)、綿(綿生地から採取、素材表示=綿100%)の3点とした。

### 3 測定結果

#### 3.1 赤外分光分析

初めに、赤外分光分析により主成分を確認した。セルロース粉末は粉末のまま測定し、コピー用紙と綿生地については試料表面を測定した。

測定により得られた赤外吸収スペクトルを図1に示す。3試料とも、主な吸収スペクトルは概ね一致しており、試料はいずれもセルロースを主成分とする物質であることが確認できる。

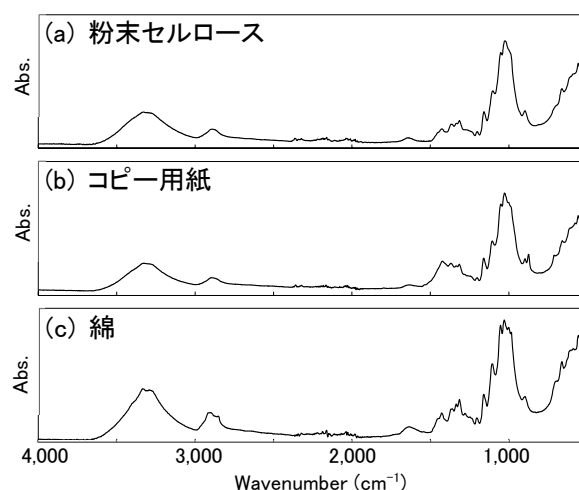


図 1 試料の赤外吸収スペクトル(測定方法：一回反射 ATR 法、ダイヤモンドプリズム)

### 3.2 ラマン分光分析

ラマン分光分析では、顕微鏡観察により、粉末セルロースの粉末、コピー用紙と綿の繊維部分をそれぞれ指定し、測定点とした。当センター保有のラマン分光光度計は波長が異なる3つのレーザー(473 nm、532 nm、785 nm)を備えており、このうちレーザー波長532 nmと785 nmを用いて測定した。測定結果を図2、図3、図4に示す。

粉末セルロースの測定(図2)では、どちらのレーザーを使用した場合もピークを確認できるスペクトルが得られ、ライブラリ検索でセルロースが検索されることを確認した。

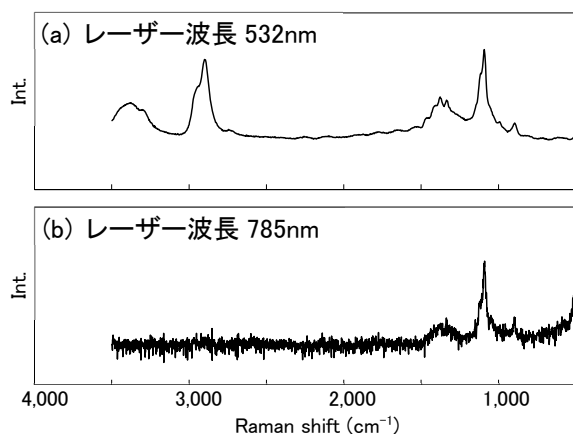


図2 「粉末セルロース」のラマンスペクトル

コピー用紙の測定(図3)では、ベースラインが増大し、確認できるピークはわずかだった。このベースラインの増大は蛍光の影響と考えられる<sup>1)</sup>。レーザー波長785 nmの結果においてセルロースに由来すると見られるピークを確認できるものの、セルロース以外の不明なピークも見られ、これらのスペクトルから成分を推定するのは困難である。

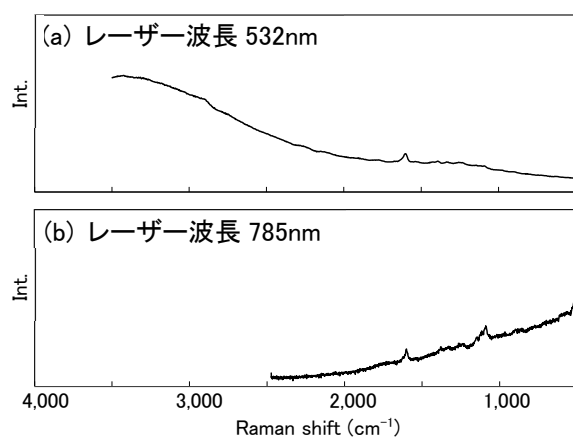


図3 「コピー用紙」のラマンスペクトル

綿の測定(図4)では、どちらのレーザーを使用した場合も蛍光の影響によりベースラインが増大したスペクトルとなり、成分推定に有効な情報は得られなかった。

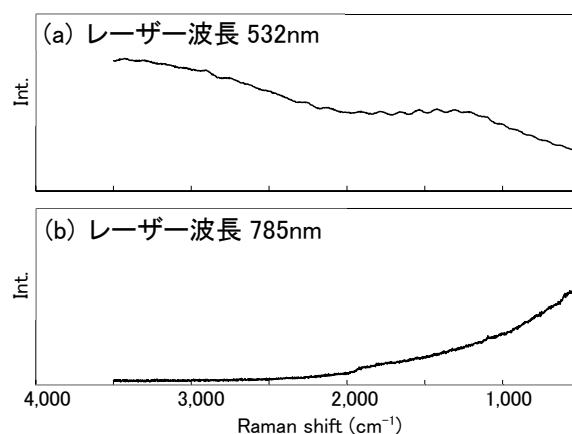


図4 「綿」のラマンスペクトル

主成分がセルロースである3つの試料の測定結果が異なるのは、共存成分によるものと推測される。有機物の成分分析においてラマン分光法と赤外分光法で得られる情報は似ているが、ラマン分光法では、測定対象範囲の違いや蛍光の影響、試料とレーザー波長の関係などにより、主成分の情報を正しく得られない場合もある<sup>1)</sup>。赤外分光法では概ね主成分の情報が得られるが、ラマン分光法ではこれらの点を考慮して分析を進める必要がある。

### 4 結言

地域企業から寄せられる分析相談への対応を想定し、分析対象となることが多いセルロースを主成分とする試料について、当センターが保有するラマン分光光度計を用いた測定を行った。

その結果、主成分が同様の試料でも、試料によっては当センター保有装置が対応できる測定条件の範囲では蛍光の影響を回避できず、化合物の情報が得られない場合があることがわかった。

本測定事例のような事象があることを考慮に入れ、赤外分光法を併用することで、ラマン分光法を有機物分析における有効な方法として活用することができる。

### 参考文献

- 1) 情報技術協会. ラマン分光スペクトルデータ解析事例集. 2022

【ノート】

【令和5年度 先端技術等調査研究事業】

## GC-MSのデータ解析用プログラムの作成 ー ガスクロマトグラムの解析における高度化・省力化の検討 ー

浅野 壮宏\*

食品バイオ技術部(\*現 企画・事業推進部)

ガスクロマトグラムのデータ解析において、GC-MSおよびGC-FIDの結果を複合的に解析することを目指し、まず、GC-MSのm/z毎の保持時間と強度の解析プログラムの作成に取り組んだ。その結果、データ変換・整形、ノイズ除去、ピーク検出、ピークのリスト化まで可能となったが処理時間は目標を上回った。

キーワード: GC-MS、クロマトグラム解析、Python

### 1 緒言

ガスクロマトグラフ(以下、GC)は香気分析等に広く利用されている。検出器の質量分析器(以下、MS)は定性・定量に広く用いられているが定量には標準物質が必要である。一方、汎用的に用いられる水素炎イオン化検出器(以下、FID)は定性に標準物質が必要だが、化合物の構造がわかっている場合には有効炭素数による半定量が可能である。そのため、MSとFIDのデータを組み合わせれば、標準物質がなくとも定性・半定量が行える。しかし、この解析では化合物毎に手動による照らし合わせが必要で、その作業は煩雑である。

そこで、GC-FIDとGC-MSの分析結果の照合を手作業に寄らず行うために、まずGC-MSのm/z毎の保持時間と強度の解析を行うプログラムの作成を試みた。

### 2 実験方法

#### 2.1 解析プログラムの作成

GC-MSの解析を行うプログラムの作成にはPythonを使用し、ChatGPTを援用した。メーカー純正の解析ソフトでは保持時間と全イオン信号強度(トータルイオンカレント、TIC)のデータは得られるが、GC-MSの特徴である質量電荷比(m/z)分布の情報が出力されない。そこで、m/z 毎の保持時間と強度の解析プログラムの作成を以下の順番で行うこととした。

- ①データ変換・整形(汎用形式への変換)
- ②ノイズ除去(スムージング:Savitzky-Golay 法)
- ③ピーク検出(高次微分法による検出)
- ④ピークのリスト化(ピークと時間を整理)

- ⑤ピークの帰属(時間ごとにピークを整理)
- ⑥ピーク面積計算(カーブフィッティング)
- ⑦化合物推定(データベース MSbank を利用)
- ⑧ピークアライメント(分析データ間での位置あわせ)
- ⑨基準ピーク選択(装置間での位置合わせ)

作成プログラムは EXEフォーマット(.exe型式)とすることで環境に依存せず実行可能とし、また、グラフィカルユーザインタフェース(GUI)で操作できるようにした。

解析に用いたモデルデータは昨年度実施した研究課題<sup>1)</sup>で得た枝豆のデータを利用した。

### 3 結果と考察

メーカーの解析ソフトでは、内部情報として保存されている時間毎のm/zの値を出力するには煩雑な手作業が必要である。また、解析ソフトでは、総和であるTICに基づくクロマトグラム解析となるため、微小なピークや重なったピークを見落としたり一つのピークに誤認したりする可能性がある。そこでGC-MSで得られるm/z毎のクロマトグラムを手作業に寄らず得ることを目標に、まずGC-MSの専用形式から汎用書式であるCSV形式への変換を行った。GC-MSのメーカーに依存しないファイル形式のうち、mzXML形式からの変換を行った。出力されるCSVの書式は、m/z を行、保持時間を列、強度をセルに持つピボットテーブルとした。次に、得られた配列に対し、スペクトルに対するノイズ除去として広く知られているSavitzky-Golay 法によるスムージングを行った。

さらに、ピーク検出のため、スペクトルの解析手法として一般的な高次微分法によるピーク分離では2回微分を行った。高次微分後の波形に対しピークの検出およびリスト化を試みた結果、GC-MSで75分間の分析デー

タに対し、処理時間は3時間半以上かかり、目標時間を上回ったため、⑤以降の作業を断念した。時間短縮には異なるアルゴリズムによる処理が必要と考えられた。表1にGUIからの操作および任意ファイル名での読み込み、出力の要素を追加したプログラムを記載した。

強度のデータ解析プログラムを作成した。データ変換・整形、ノイズ除去、ピーク検出、ピークのリスト化まで可能となったが、処理時間が目標時間を上回り、計画した全機能を搭載するには至らなかった。

#### 参考文献

#### 4 まとめ

GC-MS と GC-FID を組み合わせた解析を容易にすることを旨し、まず GC-MSのm/z毎の保持時間と

1) 浅野壮宏, 小山誠司. 熱脱着法による香気成分の基礎調査. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2023. 20. p. 105-108.

表1 作成したソースコード

```
import os
import numpy as np
import pandas as pd
from scipy.signal import savgol_filter, find_peaks
from tkinter import Tk, filedialog, Button, Label, Entry, StringVar

def open_file_dialog(window_size_var):
    root = Tk()
    root.withdraw() # Hide the root window
    file_path = filedialog.askopenfilename(
        title='Open CSV file',
        filetypes=[('CSV Files', '*.csv')]
    )
    root.destroy()
    if file_path:
        window_size = int(window_size_var.get())
        process_csv(file_path, window_size)

def process_csv(csv_file_path, window_size):
    df = pd.read_csv(csv_file_path, index_col=0)

    # Convert the column labels to numeric type if possible to ensure correct sorting
    df.columns = pd.to_numeric(df.columns, errors='coerce')

    # Ensure window_size is odd and greater than polynomial order
    if window_size % 2 == 0:
        window_size += 1

    poly_order = 3 # The polynomial order must be less than window_size - 1
    peaks_results = []

    for mass, intensity in df.iterrows():
        intensity_sg = savgol_filter(intensity.values, window_length=window_size, polyorder=poly_order, deriv=2)
        peaks, _ = find_peaks(-intensity_sg)

        for peak in peaks:
            # Add all peaks to results, we will filter out the zero-intensity ones later
            peaks_results.append({
                'Mass': mass,
                'Time': df.columns[peak],
                'Intensity': intensity_sg[peak]
            })

    # Convert the peaks results to a DataFrame
    peaks_df = pd.DataFrame(peaks_results)

    # Create a pivot table for all peaks
    pivot_peaks = peaks_df.pivot(index='Mass', columns='Time', values='Intensity').fillna(0)
    # Sort the columns
    pivot_peaks = pivot_peaks.reindex(sorted(pivot_peaks.columns), axis=1)

    # Output the pivot table to a CSV file
    peaks_output_file_path = f'{os.path.splitext(csv_file_path)[0]}.peaks.csv'
    pivot_peaks.to_csv(peaks_output_file_path)
    print(f'Peaks were successfully saved to {peaks_output_file_path}')

    # Filter out the zero-intensity peaks
    non_zero_peaks_df = peaks_df[peaks_df['Intensity'] != 0]

    # Group by Time and list Masses for each Time where intensity is non-zero
    grouped_mass = non_zero_peaks_df.groupby('Time')['Mass'].apply(list).reset_index()

    # Output the non-zero intensity Mass list to a CSV file
    mass_output_file_path = f'{os.path.splitext(csv_file_path)[0]}.Mass.csv'
    grouped_mass.to_csv(mass_output_file_path, index=False)
    print(f'Mass list was successfully saved to {mass_output_file_path}')

def create_gui():
    root = Tk()
    root.title('CSV Peak Detection')

    # Window size entry
    Label(root, text='Enter Window Size:').pack()
    window_size_var = StringVar(root, value=51) # Default value for window size
    window_size_entry = Entry(root, textvariable=window_size_var)
    window_size_entry.pack()

    # Button to open file dialog
    open_file_btn = Button(root, text='Open CSV File', command=lambda: open_file_dialog(window_size_var))
    open_file_btn.pack(expand=True)

    root.mainloop()

if __name__ == '__main__':
    create_gui()
```

【ノート】

【令和5年度 先端技術等調査研究事業】

## 宮城県産「セリ」の冷凍条件の検討

高山 詩織

食品バイオ技術部

セリは宮城県の特産品で、全国一の収穫量を誇る産地だが、特徴である香りや食感、色を保った加工・流通は難しく、加工品が少ないことが課題だった。そこで、一次加工としてセリの冷凍条件を検討したところ、冷凍前にブランチングすることで、解凍後の緑色が維持されることが明らかとなった。

また、冬セリと春セリを比較したところ、春セリは冷凍後も甘み、香りが強く加工に適する可能性が示唆された。

キーワード：セリ、香气成分、冷凍、ブランチング

### 1 緒言

セリ(*Oenanthe javanica*)は清爽な香りと、シャキシャキとした茎の食感が特徴で、県内作付面積26 ha、収穫量424 t、出荷量383 t<sup>1)</sup>で全国一位であり、宮城県の特産品である。県内のセリは、10月から冬場は「根セリ」と言われる根付きの姿で出荷し(以下、冬セリ)、4~5月中旬は「春セリ」と呼ばれ、早春に芽吹いた茎葉を刈り取って根を落とした状態で出荷する(以下、春セリ)。春セリは香高いと言われているが、根を落とした状態で出荷するため鮮度維持が難しく、食することができる地域は生産地近隣に限定されている。

また、セリはほとんど生鮮品として流通し、加工品は少ない。これは、セリの特徴である香りや食感、色を保った加工・流通が難しいことが理由と考えられる。加工品は、セリの知名度向上やブランド価値向上に有効であるため、県内企業からも冷凍や粉末などの一次加工品が望まれている。

そこで、本研究では、一次加工としてセリの香りや食感、色を維持した冷凍条件について検討するとともに、冬セリと春セリの食味や香りの違いについて調査した。

### 2 調査内容及び方法

#### 2.1 冷凍前のブランチングの検討

試料は市販品の県産セリを用いた。試験区は、冷凍前処理としてブランチングを行い、対照区はブランチングを行わず生で冷凍した。試験区は、沸騰した1%食塩水6 Lで、セリ100 gを1分間加熱した。氷水で冷却、脱水

後、根元から1 cmで根と茎に分けて真空包装した。-30℃、1時間急速冷凍(ブラストチラー&フリーザーFRBCT6、(株)フジマック)後、-20℃にて保存した。対照区は、ブランチング以外は試験区と同様に処理した。食味試験(官能評価)は、保存開始から4か月後、30分間流水解凍し、当センター技術職員3名で「色」、「食感」、「香り」、「ボリューム感」について3点上位の3点法にて評価した。

#### 2.2 ブランチング条件の検討

##### 2.2.1 ブランチング方法の検討

試料は県産セリ(品種「みやぎVWD1号」)を用いた。2023年11月24日に収穫したものを、根元から1 cmの茎を含んだ根を「根」、葉が展開するまでの茎を「茎」、葉が展開している茎葉を「葉」に分けた(図1)。ブランチングの方法として2処理区を設定した。

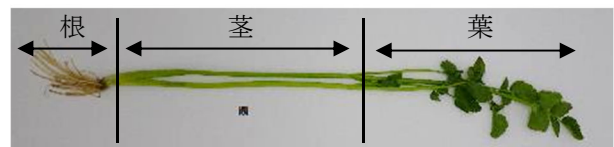


図1 根茎葉の分け方

- 1) 熱湯処理区: ステンレス製の網にセリを挟み、沸騰状態の熱湯に10秒及び1分浸漬した。
- 2) 水蒸気処理区: スチームコンベクションオープン(コンビオープン、FSCCWE61、(株)フジマック)に穴あき棚を設置し、湿度100%、温度100℃で10秒及び1分加熱した。

処理後、2.1と同様に冷却し、-20℃の冷凍庫で保存した。色調、香気成分の分析は冷凍前に実施し、食味試験は、冷凍保存から3か月後に2.1と同様の方法で行った。

色調は、茎について分光測色計(CM-700d、コニカミノルタジャパン(株))を用いて測定径3 mmで測定した。表色系はCIE Lab色空間、D65光源、正反射光除去方式(SCE)、10°視野とした。測定したLabより、明度(L\*)、彩度(C\*)、色相(h)及び色差(ΔE)を算出した。測定は、茎の10か所で行い平均値を求めた。

香気成分の分析は、約5 mmに切断した茎葉3 gをバイアルに封入した試料について、固相マイクロ抽出法(Supelco StableFlex2cmSPMEファイバーDVB/CAR/PDMS(Merck(株)))を使用。以下「SPME」という。)により60℃、30分香気成分を濃縮し、ガスクロマトグラフ質量分析計(GCMS-QP2010 Plus、(株)島津製作所、以下「GCMS」という。)にて行った。表1に分析条件を示した。分析により得られた質量スペクトル及び保持時間を、米国立標準技術研究所(NIST)ライブラリと照合することで成分を推定した。

**表1 GCMS測定条件**

検出器: 質量分析装置
カラムオープン温度: 40℃-4℃/min-240℃
カラム: DB-WAX(内径0.32 mm×60 m、0.5 μm) (アジレント・テクノロジー(株))
注入口温度: 200℃
フィラメント: 250℃
キャリアガス: ヘリウム(線速度一定、39.3 cm/sec)

食味試験は、当センター技術職員10名で、熱湯10秒処理区を対照とし、「緑の鮮やかさ」、「香り」、「咀嚼時の香り」、「甘み」、「苦み」、「歯ごたえ」、「総合評価」について、対照と比較した5点上位の5点法にて評価した。

### 2.2.2 ブランチング温度の検討

試料は2.1と同ロットのセリを用い、60℃及び沸騰した1%食塩水に、セリ100 gを入れてブランチングした。試験区は、ブランチング温度、時間を「60℃、1分」、「60℃、3分」、「60℃、7分」に設定、「100℃、1分」を対照区として比較した。試験区及び対照区の加熱は、温度設定が可能な加熱調理器(ガストロパック、(株)エフ・エム・アイ)で行い、ブランチング後は、2.1と同様に処理した後、真空包装を行い、-20℃にて保存した。食味試

験は、保存開始から4か月後に2.1と同様の方法で行った。

## 2.3 冬セリと春セリの比較

### 2.3.1 試料

試料は同一生産者の冬セリ「島根みどり」、春セリ「飯野川在来」を用いた。

### 2.3.2 ヘッドスペースガスクロマトグラフ(以下、「HSGC」という。)による香気成分分析

香気成分の分析は、約5 mmに切断した茎葉3 gをバイアルに封入した試料について、ヘッドスペースオートサンプラー付ガスクロマトグラフ(HS-20/Nexis GC-2030、(株)島津製作所)にて行った。表2にHSGCの分析条件を示した。

**表2 HSGC測定条件**

検出器: 水素炎イオン検出器(FID)
カラムオープン温度: 40℃-3℃/min-130℃-20℃/min-240℃
カラム: DB-WAX(内径0.25 mm×30 m、0.25 μm) (アジレント・テクノロジー(株))
トランスファーライン温度: 150℃
FID温度: 240℃
試料導入量: 1000 μl
キャリアガス: 窒素(線速度一定、9.5 cm/sec)

### 2.3.3 食味試験(官能評価)

冬セリと春セリを同時に評価するため、冷凍保存したセリを用いた。

2.1の方法でブランチング後、根、茎、葉の3つに分けて真空包装し、-20℃で保存した。冬セリは2024年1月15日、春セリは2023年4月24日に収穫したものを、収穫翌日にブランチングし、冷凍保存した。

食味試験は、2024年1月24日に行った。真空包装した冷凍セリを30分流水解凍した。冬セリを対照とし、春セリとの違いについて当センター技術職員10名で、「緑の鮮やかさ」、「香り」、「咀嚼後の香り」、「甘み」、「苦み」、「歯ごたえ」、「総合評価」を5点上位の5点法にて行った。

Brixは、食味試験(官能評価)に用いたセリを搾汁し、ポケット糖酸度計(PAL-BX|ACID121、アタゴ(株))で測

定し、2反復の平均値を算出した。

### 3. 試験結果および考察

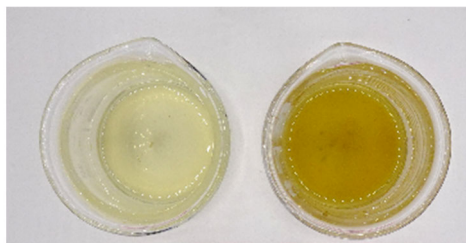
#### 3.1 冷凍前のブランチングの検討

試験区(ブランチング有)は、ブランチング後、茎葉が鮮やかな緑色を呈し、解凍後も鮮やかな緑色の状態が保持された。一方対照区(ブランチング無)では、解凍後全体的に褐変し、茶色いドリップが出た(図2、図3)。食味試験では、試験区で色の評価が高かった。食感は、試験区で対照区より低かった(柔らかい)が、対照区は歯切れが悪く、苦みも強いという評価だった。以上の結果から、冷凍前のブランチングは必要と判断した。



試験区(ブランチング有) 対照区(ブランチング無)

図2 解凍後のセリ



試験区(ブランチング有) 対照区(ブランチング無)

図3 解凍後のドリップ

#### 3.2 ブランチング条件の検討

##### 3.2.1 ブランチング方法の検討

熱湯処理区では、10秒、1分共に鮮やかな緑色となり、十分に加熱された状態であった。一方、水蒸気10秒処理区では茎葉が全体的に褐変し、加熱が不十分な状態だったが、水蒸気1分処理区では、鮮やかな緑色を呈し、十分に加熱されていた(図4)。ハウレンソウやコマツナで報告<sup>2)</sup>されているように、直接湯に触れる熱湯処理よりも、水蒸気処理は品温上昇に時間がかかるため、熱湯処理よりも長い時間が必要であることがわかった。



図4 ブランチング後のセリ

a:生 b:熱湯 10秒処理 c:熱湯 1分処理  
d:水蒸気 10秒処理 e:水蒸気 1分処理

表3 ブランチング方法の異なるセリの色調

試験区	処理時間	L*	C*	h	ΔE
生	—	67.3	37.8	103.7	—
熱湯処理	10秒	60.2	51.1	109.6	15.7
	1分	61.0	51.6	108.0	15.5
水蒸気処理	10秒	64.9	37.9	104.1	2.4
	1分	57.9	47.1	111.1	14.3

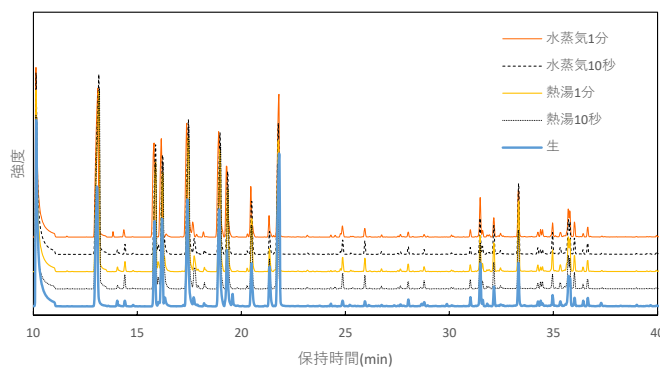


図5 ブランチング方法の異なるセリの GCMS 分析結果

色調の結果から、水蒸気10秒処理区では、「生」と比較した $\Delta E$ (色差)が小さく、「生」に近い色であることが示された(表3)。熱湯10秒処理区及び1分処理区と水蒸気1分処理区では、 $\Delta E$ は10以上となり、「生」と色調が大きく異なった。

香気成分は、「生」とすべてのブランチング処理区において構成する香気成分に差はみられなかった(図5)。食味試験では、水蒸気10秒処理区以外は対照と同等



の評価だったが、食感、ボリュームはなくなり、茹でたセリの状態となった。水蒸気10秒処理区は、「緑色の鮮やかさ」、「苦み」、「歯ごたえ」が他の3処理より劣り、「総合評価」も基準である熱湯10秒処理区と比較して有意に低い結果となり、水蒸気10秒処理区はブランチングとして適さないことが明らかとなった(図6)。

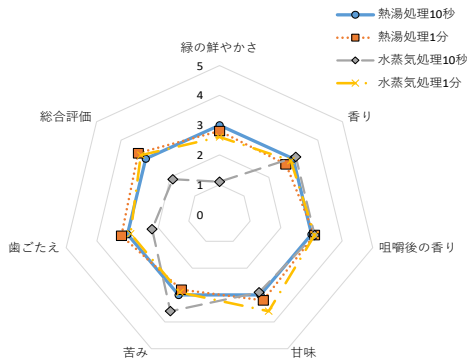


図6 ブランチング方法の異なるセリの食味試験

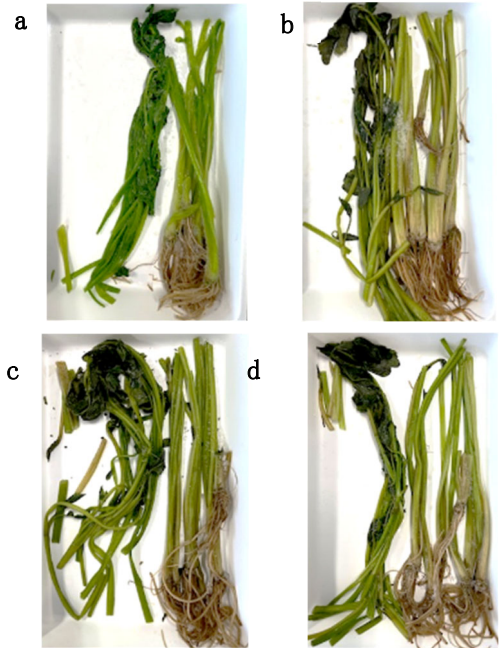


図7 ブランチング温度の異なるセリ(解凍後)

a:100°C、1分 b:60°C、1分  
c:60°C、3分 d:60°C、5分

### 3.2.2 ブランチング温度の検討

野菜は60°C付近で加熱することで硬化し、組織強度の保持に寄与するという報告<sup>3)</sup>があるため、冷凍後もボリュームを保持する可能性を期待し、60°Cのブランチングを試みた。「60°C、1分」区は、生に近い状態で、歯ごたえはあるが、苦みが強く、葉の色が褐変した。「60°C、3分」および「60°C、7分」は、どちらも「100°C、1分」と食感は近いが、緑の鮮やかさが劣っていた(図7)。食味試験では、すべての「60°C」区で「100°C」より色が劣る結果となった(データ未掲載)。

### 3.3 春セリと冬セリの比較

#### 3.3.1 香気成分分析

冬セリと春セリの HSGC 測定結果を図8に示す。

得られた春セリのピークは①から⑪までであり、冬セリのピークは④と⑩以外は同様のピークがみられたため、香りを構成する成分は似ていることがわかった。各ピーク面積を比較すると、春セリが冬セリより大きく、春セリの香高さを示す結果となった。GCMSでの定性結果<sup>4)</sup>と合わせると、① $\alpha$ -Pinene、③ $\beta$ -Pinene、⑤ $\beta$ -Myrcene、⑦D-Limonene、⑨ $\gamma$ -Terpinene、⑩p-Cymeneであると推定され、セリ特有の香気<sup>5)</sup>を有することがわかった。

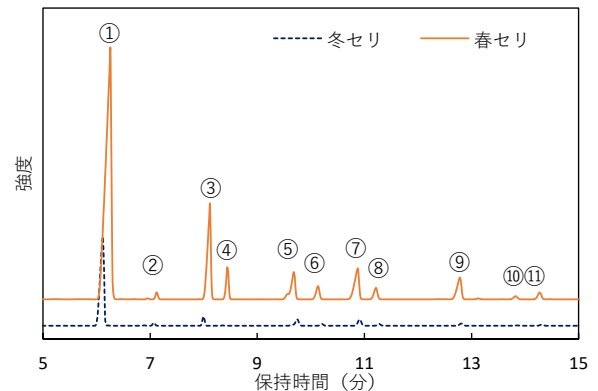


図8 冬セリと春セリの HSGC 分析結果

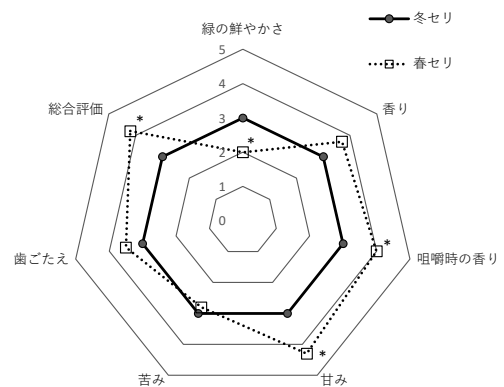


図9 冬セリと春セリの食味試験結果

### 3.3.2 食味試験(官能評価)

ブランチング後冷凍保存したセリの食味試験の結果を図9に示した。春セリは「香り」、「咀嚼時の香り」、「甘味」が冬セリより有意に高い評価となり、「総合評価」も高かった。一方、「鮮やかな緑色」が冬セリより劣り、解凍後に茎葉の一部がやや褐変し、茶色いドリップが出た。Brixは、春セリが5.5%、冬セリが3.2%となり、春セリで高い傾向がみられた。

## 4 結言

セリの一次加工において、冷凍前に100℃の熱湯で10秒～1分、または水蒸気100℃で1分ブランチングを行い、氷水で冷却後真空包して-20℃で冷凍することで、冷凍前と同様の緑色が保持されることが明らかとなった。一方、セリ特有の食感、ボリューム感はなくなり、茹でたセリの状態となった。

冬セリと春セリでは、香気成分の構成はほぼ同様であるが、ピーク強度は春セリで大きく、セリ特有の香りが強いことが明らかとなった。また、解凍後の食味試験では、春セリは「香り」、「咀嚼時の香り」、「甘味」が冬セリより有意に高い評価となり、特に甘みが強く、味と香りの違いが認められた。このため、味と香りの面では春セリが加工に適する可能性が示唆された。

今後、本研究で得られた結果が、セリの加工品開発に向けた取組の一助となることを期待したい。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり、セリを提供していただいた生産者の皆様、セリ産地のいしのまき農業協同組合河北営農センター様に多大なるご支援をいただきました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献、引用URL

- 1) 農水省. 地域特産野菜生産状況調査.  
[https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tokusan\\_yasai/index.html](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tokusan_yasai/index.html), (農水省, 「令和2年産地域特産野菜生産状況調査」)
- 2) 阿部一博, 嘉悦佳子, 阿知波信夫. 数種野菜のクロロフィルとアスコルビン酸含量に及ぼす異なるブランチングと処理前における切断の有無の影響. 日本食品保蔵化学会誌. 2013, Vol.39, No.4, p.

207-212.

- 3) 香西みどり. 野菜の加熱による軟化速度と硬化現象. 日本調理科学会誌. 1997, 30巻1号, p. 62-70.
- 4) 高山詩織, 小山誠司, 畑中咲子, 今野政憲. 宮城県産セリの特性評価. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2022, No20, p. 99-103.
- 5) Won Ho Seo and Hyung Hee Baek. Identification of characteristic aroma-active compounds from water dropwort (*Oenanthe jaavanica* DC.). J. Agric. Food Chem. 2005, 53, p. 6766-6770.



---

宮城県産業技術総合センター研究報告

ISSN 2759-0038

令和5年度 No.21

2024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/>

---