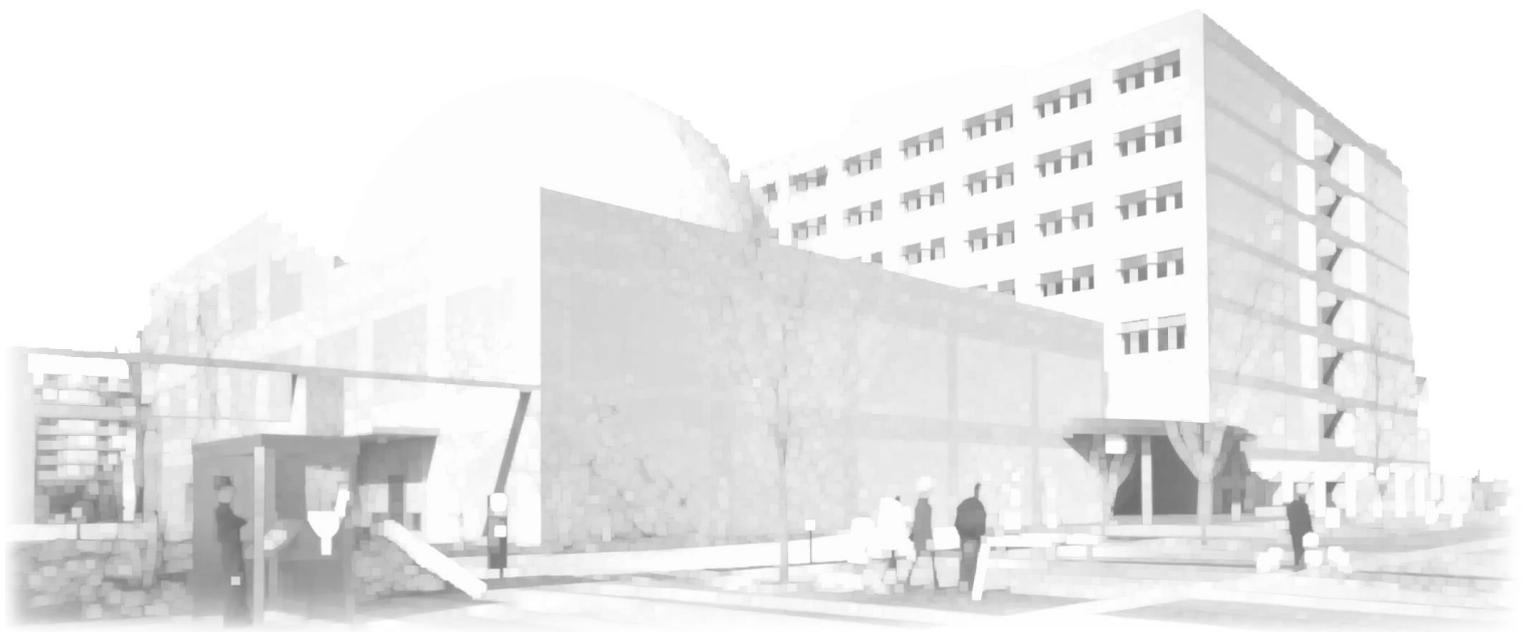


令和6年度  
埼玉県産業技術総合センター

# 研究報告

第23巻

REPORTS  
OF  
SAITAMA  
INDUSTRIAL  
TECHNOLOGY  
CENTER  
Vol. 23



令和8年(2026年)3月発行

# 令和6年度埼玉県産業技術総合センター研究報告

## 第23巻

### 目 次 CONTENTS

ページ

#### ○産業支援研究

・セルロース担持メラミンセパレータの開発	1
・人工膝関節置換術支援システムの開発(第2報)	4
・IoTデバイス電源とした太陽電池の発電量予測モデルの開発(2)	8
・酒造原料米の消化性Brixの機械学習による予測に関する研究	12
・そば末粉が有する機能性成分の有効利用に関する研究(第2報)	17
・高灰分ストリーム粉の応用による麺製品の高付加価値化の 検討(第2報)	22
・フレーム構造の最適設計に関する研究(第1報)	27
・少数色覚者のための色覚補正ツールの開発と検証 — 個々人の錐体分光感度分布の推定と推定誤差の評価 —	30
・埼玉県乳酸菌ライブラリーの構築	36

#### ○サーキュラーエコノミー推進事業

・バイオプラスチック実用化研究(第1報)	39
----------------------	----

#### ○新技術創出調査

##### 1. 独創的技術形成研究

・競技用車椅子へのマルチボディダイナミクス解析の適用に関する 基礎的検討	43
・ビール醸造に適した酵母の探索	46
・酸味に特徴のある新規埼玉酵母による清酒製造試験	50

## 2. 技術支援高度化研究

- ・金属3Dプリンタを用いたSUS630(17-4PHステンレス鋼)の力学的特性評価 ..... 55

## ○外部資金導入研究

- ・100 °Cを超える高温下での水蒸気透過度測定 ..... 59  
 <国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)>
- ・米麴を使用したグルテンフリー米粉パンの製パン機構の解明 ..... 64  
 <公益財団法人エリザベス・アーノルド富士財団>

## セルロース担持メラミンセパレータの開発

栗原英紀\* 秋 芳博\*\*

### Development of Melamine Separator with Cellulose

KURIHARA Hideki\*, AKI Yoshihiro\*\*

#### 抄録

電動車両の課題の1つに大電流での急速な充放電への対応がある。セルロース担持発泡メラミン樹脂からなるセパレータによりこの対応を図った。このセパレータはセルロースがメラミン繊維間を平面上に覆うように形成され、高い電解液保持性能を有することが推測された。このセパレータを用いたリチウムイオン電池の10C充放電における容量維持率は82%/200サイクルであった。このことから、セルロース担持発泡メラミンセパレータにより大電流での急速な充放電が可能となることが明らかとなった。

キーワード：発泡メラミン樹脂，セルロース，セパレータ，リチウムイオン電池

#### 1 はじめに

近年、カーボンニュートラル進展の観点から車両の電動化が求められている。電動車両の課題の1つに大電流での急速な充放電（ハイレート）への対応がある。ドローンの上昇時や自動車のブレーキエネルギーの回収では10Cでの充放電動作が求められている。10Cとは1/10時間で満充電・満放電することを意味している。令和4年度の産業支援研究において、リチウムイオン電池（LiB）のハイレート化のため、マグネシウム塩添加電解液と発泡メラミン樹脂（MLM）セパレータの開発を行った。これにより10C充放電で0.5C充放電の容量80%で、容量維持率90%/50サイクルを達成した。しかしながら、MLMをセパレータに用いた製品は存在しないため、技術移転に際し、その信頼性が得られなかった。MLMセパレータは3次元網目構造中に物理的に電解液を保持するのみであるので、長期充放電サイクル中に電解液が消失

して電池が突然停止することが懸念された。

そこで、本研究は、MLMにセルロース（Cel）を担持することにより、電解液の保持性能を向上し、長期安定性の担保を図った。安定動作の指標として、1C充放電で容量維持率80%/200サイクル（計400時間）、ハイレート安定動作の指標として、10C充放電で容量維持率80%/200サイクル（計40時間）を目標とした。なお、Celは環境負荷が低く、低コストで、耐熱性が高いことから実用性が高い<sup>1)</sup>。しかしながら、絶縁性に課題があるため、そのままでは短絡してセパレータとして用いることができなかった。この短絡を抑制するため、各種材料と複合化することが検討されている<sup>2)-4)</sup>。ただし、複合化によりイオン透過率が低下し、レート特性が低下する場合もあった。

#### 2 実験方法

##### 2.1 Cel担持MLMセパレータの作製

Cel原料には環境負荷低減の観点から古紙を用いた。Celは、古紙を亜臨界状態として抽出し、酸アルカリ処理で精製した。さらに、過酸化水素を

\* 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

\*\* 有限会社三和テック

添加して酸化を進行させた<sup>5)</sup>。Cel 担持 MLM はこの Cel の水分散液に MLM を浸漬して、乾燥して作製した。

## 2.2 LiB の性能評価

LiB は、グラファイト電極 (パイオトレック)、コバルト酸リチウム電極 (パイオトレック)、及び、作製したセパレータをコインセル用治具 (2 cm<sup>2</sup>, SB2A, EC フロンティア) に配置して作製した。1C 充放電試験は、カットオフ電圧 3.0 V - 4.2 V、電極容量 3.0 mAhcm<sup>-2</sup> で、電解液に 1M LiPF<sub>6</sub>/EC : EMC (1 : 1) (キシダ化学) を用い、25 °C で行った。10C 充放電試験は、カットオフ電圧 2.7 V - 4.3 V、電極容量 1.5 mAhcm<sup>-2</sup> で、電解液にはマグネシウム塩としてフッ化マグネシウム (MgF<sub>2</sub>) を添加した低粘度溶液 (0.5 wt% MgF<sub>2</sub> + 1M LiPF<sub>6</sub>/EC : DMC (1 : 5)) を用い、25 °C で行った。

## 3 実験結果及び考察

### 3.1 Cel 担持 MLM セパレータの構造

抽出した Cel の IR スペクトルを図 1 に示す。C=O に起因するピークが検出された。これは抽出した Cel が一般の Cel では有しないカルボキシ基を有することを示唆している。次に、抽出した Cel の XRD パターンを図 2 に示す。結晶化度は 66% であった。この値はコピー用紙等の値と同等であり、同程度の結晶性を有することが示唆された。作製した Cel 担持 MLM の SEM 像を図 3 に示す。Cel は MLM 繊維間に紙が貼られるように平面状に形成された。この構造は高い電解液保持性を有することが推測される。また、この構造は抽出した Cel のカルボキシ基による水への高い分散性と紙同等の結晶性、すなわち水素結合による配向性により形成されたと推察される。

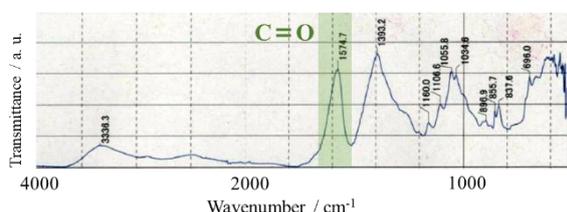


図 1 抽出した Cel の IR スペクトル

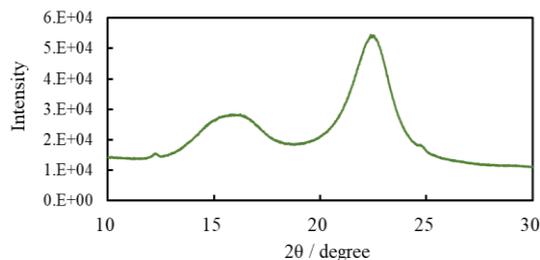


図 2 抽出した Cel の XRD パターン

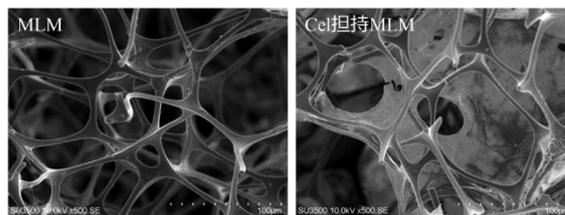


図 3 MLM 及び Cel 担持 MLM の SEM 像

### 3.2 LiB の性能

Cel 担持 MLM を用いた LiB の 1C 充放電における容量維持率を図 4 に示す。200 サイクルの容量維持率は 89% であり、目標値が達成された。500 サイクルでも LiB が突然停止することはなかった。この結果から MLM セパレータで懸念された電解液の消失が Cel を担持することにより抑制されることが明らかとなった。

次に、Cel 担持 MLM を用いた LiB の 10C 充放電における容量維持率を図 5 に示す。200 サイクルの容量維持率は 82% であり、目標値が達成された。この結果から Cel 担持 MLM セパレータ及び MgF<sub>2</sub> 添加低粘度溶液を用いることによりハイレートで安定した充放電が可能となることが明らかとなった。

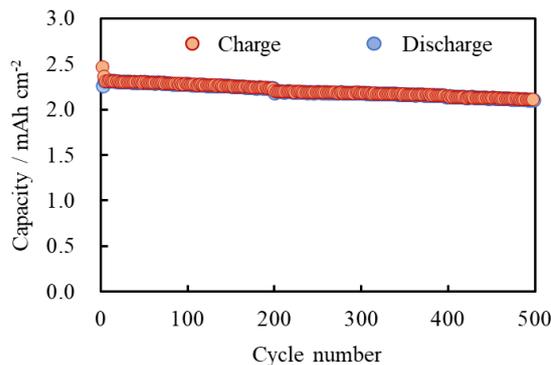


図 4 Cel 担持 MLM セパレータを用いた LiB の 1C 充放電における容量維持率

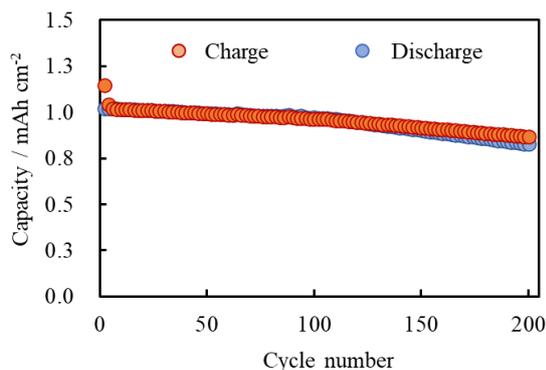


図5 Cel担持MLMセパレータを用いたLiBの10C充放電における容量維持率

- 4) C. Yang, Q. Wu, W. Xie, etc, “Copper-coordinated cellulose ion conductors for solid-state batteries”, *Nature*, **598**, 590–596 (2021).
- 5) 日本製紙, 特開 2023-62024.

#### 4 まとめ

- (1) Cel 担持 MLM セパレータは MLM 繊維間を平面状に覆う構造を有し、この構造が電解液保持性能を向上すると推察された。
- (2) Cel 担持 MLM セパレータを用いた LiB の 1C 充放電における容量維持率は 89%/200 サイクルであり、MLM セパレータの突然停止する懸念が払拭された。
- (3) Cel 担持 MLM セパレータを用いた LiB の 10C 充放電における容量維持率は 82%/200 サイクルであり、このセパレータによりハイレートで安定した充放電が可能となることが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) J. Sheng, S. Tong, Z. He and R. Yang, “Recent developments of cellulose materials for lithium-ion battery separators”, *Cellulose*, **24**, 4103-4122 (2017).
- 2) Y. Zhu, K. Cao, W. Cheng, S. Zeng, S. Dou, W. Chen, D. Zhao, and H. Yu, “A non-Newtonian fluidic cellulose-modified glass microfiber separator for flexible lithium-ion batteries”, *Eco. Mat.* **3**, e12126 (2021).
- 3) J. Deng, D. Cao, X. Yang, and G. Zhang, “Cross-linked cellulose/carboxylated polyimide nanofiber separator for lithium-ion battery application”, *Chem. Eng. J.* **433**, 133934 (2022).

## 人工膝関節置換術支援システムの開発 (第二報)

半田隆志\*

### Development of Navigation System for Total Knee Arthroplasty -Part 2

HANDA Takashi\*

#### 抄録

本研究では、「理想的な角度」で人工膝関節を埋入することを可能にする、「安価・簡便な人工膝関節置換術支援システム」の開発を目的とした。このうち、昨年度は、「大腿骨側骨切り支援システム」を開発したが、本研究では、術中に動的に靭帯に張力を加えられるバランスーと、3軸慣性センサーをアセンブリすることで、患者の靭帯の左右張力差も考慮して適切に脛骨側を骨切りできる「脛骨側骨切り支援システム」を開発した。このシステムの精度評価を実施したところ、誤差は概ね1度以下であり、十分な精度を有していることが分かった。

キーワード：人工膝関節全置換術，ナビゲーション，慣性センサー，バランスー

#### 1 はじめに

日本は、現在、世界一の高齢社会（高齢化率が世界一）であるが、これに伴い、変形性膝関節症の患者数と、これを改善するための人工膝関節置換術の手術件数も非常に多い。この手術件数は、年間8万件を超えている<sup>1)</sup>が、今後もさらに増加することが予想されている。

この人工膝関節置換術においては、人工の膝関節を理想的な角度（例えば、大腿骨頭中心と膝関節中心を結んだ「機能軸」に直角）で埋入する必要があるが、現状では、多くの手術において、医師が「経験と勘」で埋入しているため、「理想的な角度」から大きくズレてしまうことがある。このズレは、術後の人工膝関節の早期摩耗をもたらし、再手術が必要となる可能性を高めてしまっている。

上記の「ズレ」を低減するため、「ナビゲーションシステム」と呼ばれる手術支援システムが実

用化されている。しかし、いわゆる「光学式（光学式モーションキャプチャと同様の方式）」は、高価であること、追加の切開が必要であること、手術時間が延長すること等の問題があることから、広く普及していない<sup>2),3)</sup>。近年は、光学式の欠点のいくつかを解決した「ポータブルタイプ」が普及してきているが、従来手術方法と比較して手術成績が有意に改善しなかったという報告<sup>4)</sup>や、手術時間が有意に増加してしまった<sup>5),6)</sup>という報告もあり、改善の余地があると考えられた。そこで、本研究では、安価かつ手術時間短縮に寄与する簡便な人工膝関節置換術支援システムを開発することを目的とした。昨年度は、大腿骨側に着目し、「大腿骨側骨切り支援システム」を開発したが、今年度は脛骨側に着目して、「脛骨側骨切り支援システム」を開発することとした。

#### 2 実験方法

##### 2.1 概要

人工膝関節置換術において、脛骨側の骨切りは、

\* 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

大腿骨側の切断面に応じて実施する場合がある（例えば、大腿骨側の切断面に平行に、脛骨側の骨を切る（図 1））。しかし、患者ごとに個別最適化された手術を実現するためには、例えば、「患者ごとに異なる靭帯の左右張力差」も考慮して、脛骨側の骨を切り、人工関節を設置すべきであるとする意見もある。なぜならば、手術中は一般的に靭帯に張力は加わっていないが、術後は立ち上がった際等に張力が加わってくるため、それにより術後に人工関節間にズレ（図 2）が生じる可能性があるからである。そこで、空気圧により手術中に動的に、靭帯に張力を加えることができるバランス（アルスロデザイン株式会社製。図 3。以下「動的バランス」とする。）に、3 軸慣性センサー（多摩川精機株式会社製「TAG250」。図 4。以下「IMU」とする。）をアセンブリすることで、「靭帯の左右張力差を考慮できる脛骨側骨切り支援システム」を開発することとした<sup>7)</sup>。

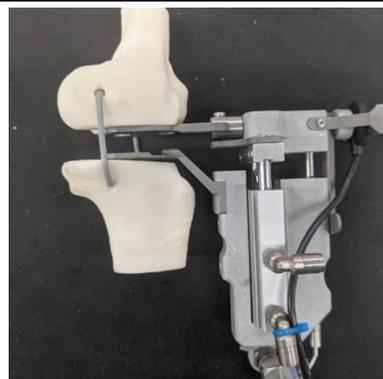


図 3 動的に靭帯に張力を加えられるバランス



図 4 使用した 3 軸慣性センサー

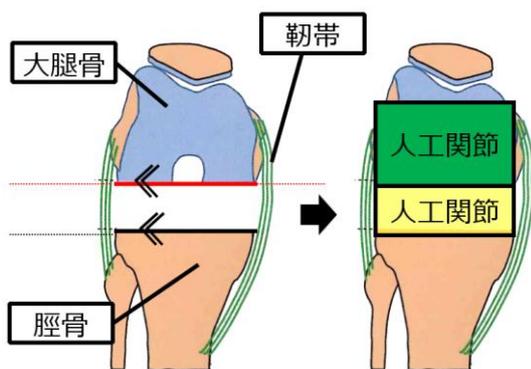


図 1 骨切り面のイメージ（張力無し）

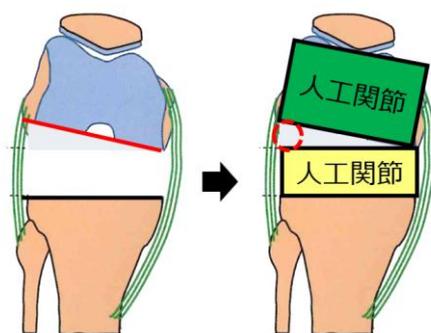


図 2 骨切り面のイメージ（張力有り）

## 2.2 システム構成

本システムの開発にあたり、まず動的バランスと IMU をアセンブリさせた「IMU 付き動的バランス」を開発することとした。そして、もう 1 つ IMU を用意し、これを大腿骨にも設置することとした。これにより、大腿骨に沿った座標系（大腿骨座標系）を基準としたときの、「動的バランス」により靭帯に張力を加えた際の角度（図 1 及び図 2 における脛骨側人工関節（黄色）の傾斜角度）をリアルタイムに計測できるようにした。この角度を計測・演算するプログラムの開発に当たっては、まず膝関節をモデル化し、次に、プログラム作成ソフトウェア LabVIEW（ナショナルインスツルメンツ社製）を使用した。

以上で開発したシステムを用いた脛骨側骨切りの手順は次のとおりである。

- ① 大腿骨に IMU を設置する  
（大腿骨側骨切り支援システムと共用）
- ② バランスで靭帯に負荷をかけながら、大腿骨側の IMU と、IMU 付き動的バランスの角度差を計測する。また、膝関節を屈曲・伸展させて角度を変えながら、同様の計測を実施

する

- ③ 計測した角度差を参考に、脛骨側の骨切りを実施する

開発したシステムの精度は、国立障害者リハビリテーションセンター研究所の協力のもと、接触式3次元計測機 (FARO.co.ltd 製) を使用して評価した。

### 3 結果及び考察

開発した「IMU 付き動的バランサー」を図 5 に示す。また、モデル化した膝関節を図 6 に、開発したプログラムのブロック図を図 7 に、このプログラムのインターフェイス画面を図 8 に示す。以上で完成した骨側骨切り支援システム (IMU 付き動的バランサー+プログラム) の使用イメージを図 9 に示す。

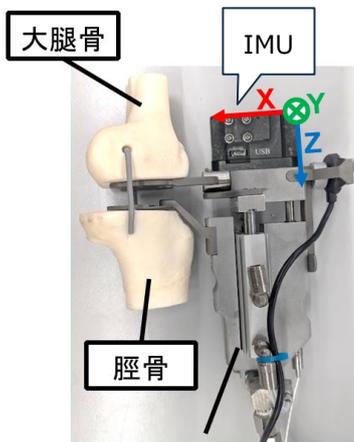


図 5 開発した IMU 付き動的バランサー

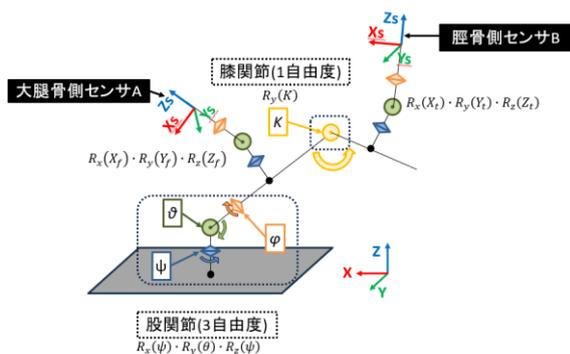


図 6 モデル化した膝関節

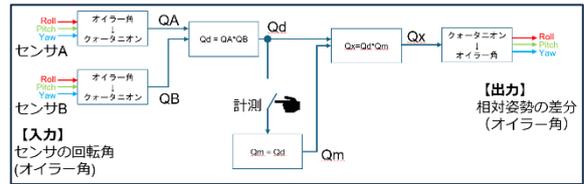


図 7 開発したプログラムのブロック図



図 8 インターフェイス画面

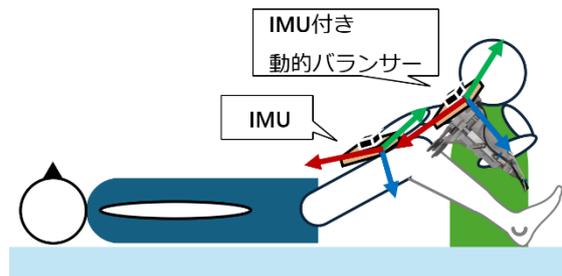


図 9 本システムの使用イメージ

接触式3次元計測機と比較した評価の様子を図 10 に、結果を図 11 に示す。これは、大腿骨に設置したとみなした IMU (図 10 中の A) を任意の角度に変化させ、その角度と IMU 付き動的バランサーとみなした IMU (図 10 中の B) の相対角度 (Roll、Pitch、Yaw) を「計測すべき角度」とし、この角度を、接触式3次元計測機で計測したものと (ゴールドスタンダードとした) と、本システムで計測したもので比較した (N=10)。その結果、接触式3次元計測機と本システムで測定した平均角度の差は、概ね 1度以下であった。

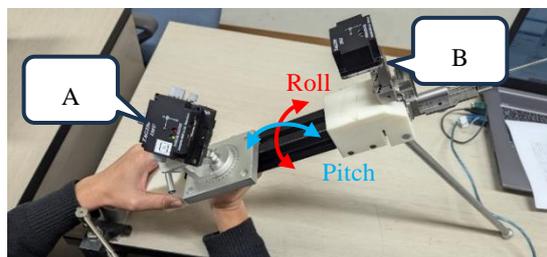


図 10 精度評価の様子

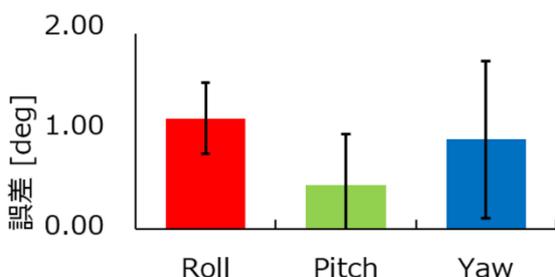


図11 接触式3次元計測機と本システムで測定した平均角度の差

以上より、開発した脛骨側骨切り支援システムは、目的どおりに動作し、かつ十分な精度（一般的に、誤差が1度以下であれば優秀）を有していることが分かった。今後は、昨年度に開発した「大腿骨側骨切り支援システム」と統合した人工膝関節置換術支援システムの完成を目指す。その上で、健常者を対象とした精度評価の実施も検討したいと考えている。

#### 4 まとめ

本研究では、術中に動的に靭帯に張力を加えられるバランスと、3軸慣性センサーをアセンブリすることで、患者の靭帯の左右張力差も考慮して適切に脛骨側を骨切りできる「脛骨側骨切り支援システム」を開発した。このシステムの精度評価を実施したところ、誤差は概ね1度以下であり、十分な精度を有していることが分かった。これにより、「安価・簡便な人工膝関節置換術支援システムを開発する」という最終的な目標の達成も可能であろうことが分かった。今後は、昨年度に開発した「大腿骨側骨切り支援システム」と統合させた「人工膝関節置換術支援システム」の完成を目指すとともに、企業への技術移転を目指す。

#### 謝辞

本研究は、連携大学院協定等に基づき、芝浦工業大学の浅利健太様、高木基樹准教授、花房昭彦名誉教授と連携して実施しました。ここに感謝の意を表します。また、本研究に御協力いただきま

したアルスロデザイン株式会社の鬼頭縁社長に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本人工関節学会日本人工関節登録制度事務局, “TKA レジストリー2022 年度症例統計”, 人工関節登録調査集計 2022 年度報告書, (2023).
- 2) E. P. Su, “Handheld navigation in total knee arthroplasty”, *Seminars in Arthroplasty*, vol. 26, no. 2, pp. 47–50 (2015).
- 3) F. Figueroa, D. Parker, B. Fritsch, S. Oussedik, “New and evolving technologies for knee arthroplasty -computer navigation and robotics: state of the art”, *Journal of ISAKOS*, vol. 3, no. 1, pp. 46–54 (2018).
- 4) I. H. Moo, J. Y. Q. Chen, D. H. H. Chau, S. W. Tan, A. C. K. Lau, Y. S. Teo, “Similar radiological results with accelerometer-based navigation versus conventional technique in total knee arthroplasty”, *Journal of Orthopaedic Surgery*, vol. 26, no. 2, (2018).
- 5) J. Li, X. Gao, X. Li, “Comparison of iASSIST navigation system with conventional techniques in Total Knee Arthroplasty: A systematic review and meta-analysis of radiographic and clinical outcomes”, *Orthopaedic Surgery*, vol. 11, no. 6, pp. 985-993 (2019).
- 6) S. Ehrendorfer, U. Erdmenger, L. M. Bocanegra, M. Boyd, J. Canal, J. Canal, A. Hoch, R. Windhager, R. Niehaus, “Comparing 28 consecutive iAssist and 28 conventional TKAs: A prospective study”, *The knee*, vol. 27, no. 6, pp. 1881-1888 (2020).
- 7) 浅利健太, 半田隆志, 鬼頭縁, 花房昭彦, 高木基樹, “簡易型 TKA 支援システムの IMU を使用した回旋方向の計測手法の検討”, 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2024 抄録集, 電子版のためページ無し (2024).

## IoTデバイス電源とした太陽電池の発電量予測モデルの開発 (2)

森田寛之\* 白石知久\*\*\*

### Development of a Model for Predicting the Amount of Electricity Generated by Solar Cells Using IoT Devices as Power Sources

MORITA Hiroyuki\*, SHIRAISHI Tomohisa\*\*\*

#### 抄録

太陽電池及びバッテリーを搭載した屋外用IoTデバイスにおいて、バッテリー容量を抑えながらも、電源喪失を起こすことなく運用が可能な、AIを用いた太陽電池の発電量予測モデルの開発を令和5年度に引き続き試みた。学習データは、前日の天気予報、5分間隔で測定・保存した日時、太陽電池（南向き、仰角30度）の発電電力、日射量とした。太陽電池の1日の発電量の平均実測値と予測値の差は、「晴れ」が-7%、「晴れのち曇り/曇りのち晴れ」が-4%、「曇り」が-9%、「雨」が+4%であった。さらに太陽電池の設置方向を南西向きに変更した場合における発電量の補正を試みた。

キーワード：太陽電池、発電量予測、AI、IoTデバイス

## 1 はじめに

通信技術の発達や業務効率化の必要性などから、自動化・遠隔制御用IoTデバイスの普及が進んでいる<sup>1,2)</sup>。屋外でIoTデバイスを使用する場合、太陽電池とバッテリーを組み合わせた電源が主流であり、太陽電池で発電した電力をバッテリーに蓄え、電子機器に供給する。しかし、電源喪失を防ぐため、過大な容量のバッテリーが必要となるケースが多く、コストや設置スペースの確保に課題が生じている。さらに、太陽光発電には、(1)天候変化により太陽電池の発電量が安定しない、(2)夜間での太陽電池による発電量がない、などの問題があり運用上の対策が必要となる。

そこで、この研究では、バッテリー容量を抑えながらも、電源喪失を起こすことなく運用が可能な、AIを用いた太陽電池の発電量予測モデルの開

発を試みた。

## 2 実験方法

### 2.1 太陽電池の最大電力の測定方法検討

太陽電池の最大電力を得るためには、ある時刻における太陽電池の発電電力（電流×電圧）を求める必要がある。太陽電池の電流と電圧関係（I-V特性）は図1の青線となり、太陽電池に接続する負荷（抵抗）の値を変化させて図1の赤線のように最大電力[W]（以下、「発電電力」とする）を求める必要がある。そのため、太陽電池に接続したトランジスタのベースに0.4~1Vの電圧を印加し、トランジスタの抵抗値を変化させI-V特性を求めることを試みた。

太陽電池の発電電力は時刻や天候により刻々と変化するため、電流・電圧値を自動取得するプログラムを作成し、これを「2.2 測定データ自動取得プログラムの開発」に用いた。

\* 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

\*\*\* 現 計量検定所

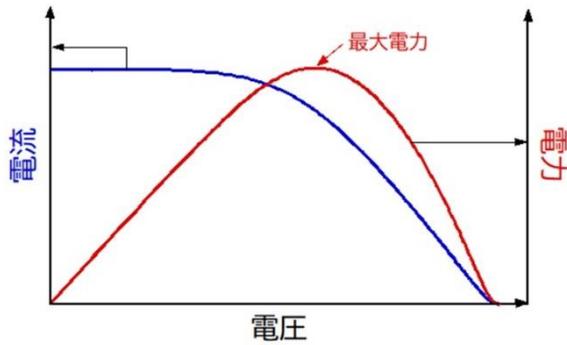


図1 太陽電池の I-V 特性

## 2.2 測定データ自動取得プログラムの開発及び発電量予測モデルの開発

当センター建屋 (SKIP シティ) 屋上にて、東京で一般的に最適と言われる<sup>3)</sup>南向き・仰角 30 度 に設定した太陽電池及び、日射量計、気圧センサを設置した。図 2 に示すフローチャートのロジックを実装する測定データ自動取得プログラムを用いて、5 分ごとの太陽電池の発電電力、周辺の日射量・気圧を取得した。同時に空模様を確認できるように USB カメラにて空画像を撮影・保存した。

これらの自動取得したデータを用いて、発電量予測モデルを開発することとした (図 3)。なお本報告では、発電量 [Wh] は太陽電池の発電電力の時間積算値と定義する。

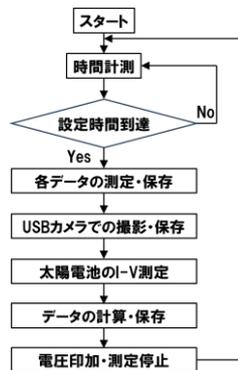


図2 測定データ自動取得プログラム  
フローチャート

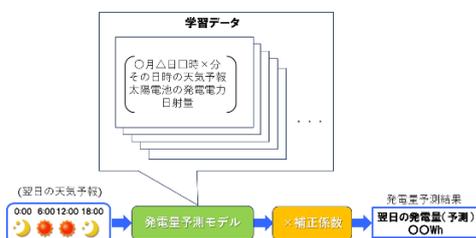


図3 太陽電池発電量予測モデル概要

## 2.3 発電量予測モデルの補正係数算出

実際に IoT デバイスを設置する際には、建物や地形などにより太陽電池の設置場所が制限されることが予想される。そのため、太陽電池が南向きに設置できないことを想定し、南西向きに設置した場合の予測モデルを補正する係数を求めた。

## 2.4 ボードコンピュータでの稼働試験

IoT デバイスとして、現在では小型 PC、スマートフォン、Arduino、Raspberry Pi 等様々な機器が利用されている。本研究では、低消費電力かつ開発言語を搭載可能な Linux の稼働する汎用性の高い Raspberry Pi 5 を用いた。開発した予測モデルを IoT デバイス (Raspberry Pi 5) で稼働可能か確認を行った。

## 3 結果及び考察

### 3.1 太陽電池の発電量予測モデルの開発

令和 5 年度の冬の空画像<sup>4)</sup>と令和 6 年度の春・夏・秋の空画像及び測定した日射量により、以下のことが分かった。

(1)実際に天気が晴れであっても一時的に太陽が雲に隠れることがあった。(2)実際に曇りであっても一時的に雲の隙間からの強い日射量を測定することがあった。

太陽の日差しと太陽電池の発電電力には強い相関関係があるため、空画像がなくても発電電力のデータを用いることで、(1)~(2)を考慮できると推定される。さらに天候による気圧の変化が約 980hPa~1013hPa と変化量が約 2%と小さく、予測への影響が小さいと想定された。そのため、今年度では空画像の天候判定結果及び気圧を学習データとして使用せず、天気予報、発電量、日射量を学習データとして、太陽電池の発電量予測モデルとした。

開発した太陽光発電の予測モデルを用いて、前日の天気予報から計算した 1 日の発電量の予測値と実測値との比較を図 4 に示す。

晴れの日々の発電量の実測値平均を基準(100%)とし、この基準に対して各天候の発電量の実測値

の平均値と予測値の差がどのくらいの割合かを示す。最大発電量積算値の実測値との差の割合  $\gamma$  は式(1)となる。

$$\gamma = \frac{Wh_{Wea,Pred} - Wh_{Sun,Ave}}{Wh_{Sun,Ave}} \quad (1)$$

$Wh_{Sun,Ave}$  は晴れの日の1日の発電量の実測値の平均、 $Wh_{Wea,Ave}$  はある天候時の1日の発電量の平均値、 $Wh_{Wea,Pred}$  はある天候時の1日の発電量の予測値を示す。

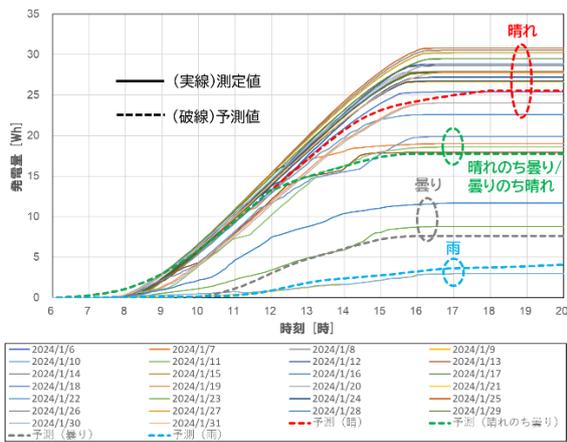


図4 予測モデルによる発電量の予測値と実測値との比較

式(1)を用いて、1日の発電量の実測値との差の割合は、「晴れ」が-7%、「晴れのち曇り/曇りのち晴れ」が-4%、「曇り」が-9%、「雨」が+4%であった。

1日の発電量の実測値と予測値との差は10%以下と良好であったが、全体的に予測値は実測値に比べて低い傾向となった。

天気予報が「晴れ」や「晴れのち曇り/曇りのち晴れ」で晴れの予報の時間帯において、移動する雲が一時的に太陽光を遮り発電量が減少したとしても、そのデータは晴れの学習データとして扱った。また、天気予報が「曇り」で実際の天気も曇りの場合、実際の曇りの雲の厚みが様々に発電量に影響したとしても、天気予報の「曇り」では雲の厚みを考慮できないため、学習データにバラつきが生じた。その結果、予測値は低い傾向をとったものと考えられる。

また一般的に、AIモデルは学習データに数値

のばらつきがあると、予測値を低めに出す傾向があることも、影響している可能性がある。

### 3.2 予測モデルにおける補正係数の算出

屋外に太陽電池を設置するには、周辺環境により取り付け場所が制限されることが想定される。太陽電池の設置向きを変更したときに発電量がどのように変化するか、補正係数の算出を検討した。

太陽電池を南向きから南西向きに変更した場合の発電電力を図5、発電量を図6に示す。

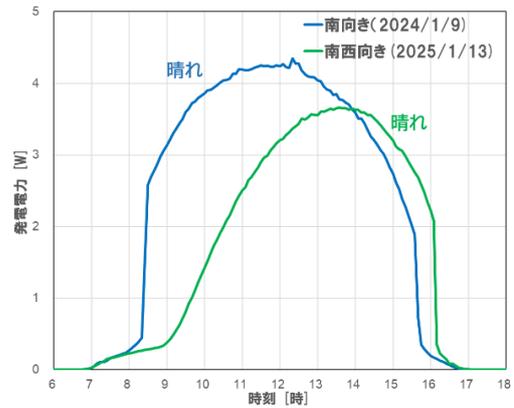


図5 南向きから南西向きに変化させたときの太陽電池の発電電力

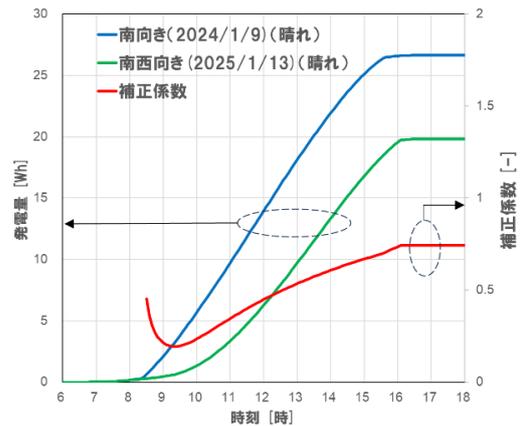


図6 南向きから南西向きに変化させたときの太陽電池の発電量及び補正係数

図5に示すとおり、太陽電池の発電電力のピークは12時から14時に移動した。また、図6に示すとおり1日の発電量も26.6Whから19.8Whと大きく低下し、設置向きにより1日の発電量が大きく変わることを確認した。この晴れの日の南向き及び南西向きの5分毎の発電量をもとに、太陽電池の南西向きの発電量の5分毎の補正係数を求めた。

太陽電池の発電量は、日射量だけでなく太陽電池に差し込む太陽光の向きが大きなパラメータとなる。このことから、実際に設置した太陽電池の発電量は、南向きに設置したときの発電量との比がその設置向きの補正係数と考えられる。南向きのときの晴天時の発電量実測値を  $Wh_{South}$ 、設置した向きでの晴天時の発電量実測値を  $Wh_{Site}$  として補正係数  $\alpha$  を式(2)と定義する。この計算式(2)を用いて、時刻毎の補正係数を算出し図 6 に示した。

$$\alpha = \frac{Wh_{Site}}{Wh_{South}} \quad (2)$$

予測モデルによる南向きの発電量を  $Wh_{Pred, South}$  とすると、南西向きのある時刻までの発電量の予測値  $Wh_{Pred, Site}$  は(3)となる。式(3)を用いると、南西向きでの晴れ及び曇りの実測値、予測値は図 7 となる。

$$Wh_{Pred, Site} = \alpha \times Wh_{Pred, South} \quad (3)$$

図 7 によると、太陽電池を南向きに設置したときの晴れの日の 1 日の発電量の平均実測値を 100%とした場合、式(1)より南西向きに設置したときの 1 日の発電量の予測値と実測値の差は、晴れでは-3%、曇りでは-6%であった。

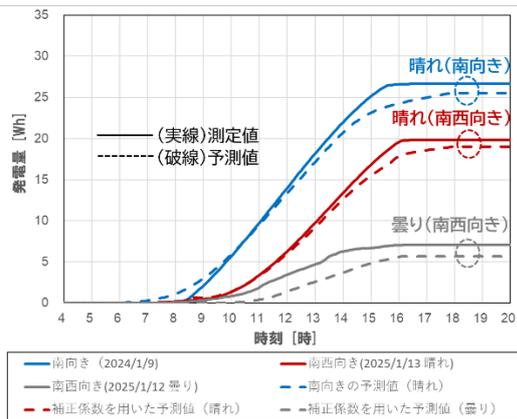


図 7 設置向きを変化させたときの 1 日の発電量の実際値と予測値

### 3.3 ボードコンピュータでの稼働試験

開発言語に Python を用いて、開発した予測モデルを稼働させた。その結果、30 秒以内に予測値を算出することを確認した。昨年度の空画像を用いた予測モデルの場合は、学習データ容量が大きく、取得した空画像を AI により天候判定するには非

常に時間がかかった。そのため、空画像を用いた予測行程を省略し、IoT デバイスの負荷を大幅に低減した。

## 4 まとめ

以上の結果をまとめると、次のとおりとなる。

- (1) 空画像の天候判定結果及び気圧データを除いた学習データを用いて太陽電池の発電量予測モデルを開発した。1 日の発電量の実測値の平均値と予測値の差の割合は、「晴れ」が-7%、「晴れのち曇り/曇りのち晴れ」が-4%、「曇り」が-9%、「雨」が+4%であった。
- (2) 太陽電池の設置向きを考慮した補正係数を求めて適用することにより、南西向きに設置した太陽電池の 1 日の発電量の実際値と予測値の差の割合は晴れでは-3%、曇りでは-6%であった。
- (3) Raspberry Pi 5 を用いて予測モデルを稼働させ、30 秒以内で予測値を算出できた。

今回の結果を用いることにより、電源喪失が発生しない IoT デバイスの適切な運用に寄与することができる。これにより、容量を抑えたバッテリーの使用が可能となり、小型化とコスト削減が実現できるため、これまで設置が難しかった場所でも IoT デバイスの屋外設置の普及が期待できる。

### 参考文献

- 1) 境野 哲, 「IoT への期待と課題～IoT システム開発者・利用者の心得～」, 情報の科学と技術 67 巻 11 号(2017)
- 2) 矢野 祐二, 岩本 久, 「IoT ハードウェアの変遷・歴史と IoT システムが有する課題」, システム/制御/情報, 67 巻 7 号 p. 257-262 (2023)
- 3) 太陽光発電協会, よくあるご質問, <https://www.jpea.gr.jp/faq/590/>
- 4) 森田寛之, 白石知久, 「IoT デバイス電源とした太陽電池の発電量予測モデルの開発 (1)」, 埼玉県産業技術総合センター研究報告 第 22 巻(2024)

## 酒造原料米の消化性Brixの機械学習による予測に関する研究

齋藤健太\* 樋口誠一\* 和田健太郎\* 横堀正敏\*

### Study on Machine Learning Prediction of Enzyme Digestibility of Rice for Sake Making

SAITO Kenta\*, HIGUCHI Seiichi\*, WADA Kentaro\*, YOKOBORI Masatoshi\*

#### 抄録

酒造原料米の溶解性は日本酒の品質に影響を及ぼす。その指標となる消化性Brixを迅速に予測するモデルの構築を目指した。精米歩合35~80%かつ水分7.2~14.2%と対象範囲を拡大し、説明変数として吸水率及びメッシュ農業気象データを用いた機械学習による回帰分析を行い、最適な解析手法を検討した。さらに予測精度の高い解析手法における説明変数の重要度を明らかにした。本法を活用することで、仕込みに使用する酒造原料米の溶解性が迅速に把握でき、最適な原料処理が可能となると期待される。

キーワード：米，日本酒，溶解性，消化性，機械学習

#### 1 はじめに

酒造原料米（以下、原料米という）の溶解性は、生育時の気象条件<sup>1)</sup>、品種、精米歩合<sup>2)</sup>及び水分<sup>2)</sup>によって変化し、日本酒の醸造工程や品質に影響を及ぼす。この溶解性の指標は酒造用原料米全国統一分析法<sup>2)</sup>による消化性 Brix で表される。

白米の浸漬あるいは蒸米の晒しなどの原料処理の調整により、原料米の溶解性を制御できる<sup>3)</sup>が、その条件を決めるには仕込み前に溶解性を把握する必要がある。しかし、原料米の溶解性分析には時間と手間がかかる<sup>4)</sup>ため、多くの酒造現場では行われていない。

酒米研究会では、全国の原料米を調査している。品種特性と年毎の傾向を把握するため、精米歩合70%かつ水分13.5%と限定された条件の原料米の消化性Brixの分析結果を酒造期後に提供している。仕込みに使用する原料米がそれ以外の精米歩合や水分である場合は直接評価できないため、溶解性は把握されないまま仕込まれ、造り手の経験則で

管理されており、十分な対応ができていない。

既報<sup>3)</sup>では部分的最小二乗（以下、PLSという）回帰分析による消化性Brixの予測を行い、迅速に把握できるようになったが、精米歩合70%かつ水分13.5%と限定された条件であった。そこで本研究では、精米歩合と水分の対象範囲を拡大した消化性Brix予測モデルの構築を目的とした。説明変数は迅速分析が可能な白米水分、10分吸水率、20分吸水率、近赤外分析（以下、NIRという）及びメッシュ農業気象データ<sup>4)</sup>とした。PLS、L1正則化線形（以下、LASSOという）、線形サポートベクターマシン（以下、SVMという）、人工ニューラルネットワーク（以下、ANNという）、ランダムフォレスト（以下、RFという）及び勾配ブースティング（以下、GBという）といった機械学習による予測モデルを構築し、予測精度を比較し、最適な解析手法を明らかにする。さらに、最も予測精度の高かった解析手法における説明変数の重要度を明らかにする。

\* 食品・バイオ技術担当

表1 試料の品種		表2 試料の精米歩合		表3 試料の白米水分	
品種	調査点数	精米歩合	調査点数	白米水分	調査点数
さけ武蔵	104	30-39%	8	7.0-9.9%	29
山田錦	42	40-49%	11	10.0-11.9%	32
五百万石	12	50-59%	61	12.0-12.9%	102
その他の酒米	53	60-69%	14	13.0%以上	62
一般米	14	70-79%	128	全合計	225
全合計	225	80%	3		
		全合計	225		

## 2 実験方法

### 2.1 試料

品種、生産地、生産年、精米歩合、白米水分の異なる原料米 225 点を用いた（表 1～表 3 参照）。生産年は 2017～2023 年であった。

### 2.2 原料米分析

20 分吸水率及び消化性 Brix の測定は酒造用原料米全国統一分析法<sup>2)</sup>に準じた。10 分吸水率は、20 分吸水率と同様の方法で、時間を 10 分間とした。白米水分は酒米・麴水分計（ライスタ f7、ケツト科学研究所）の酒米精米モードで測定した。

### 2.3 NIR

近赤外スペクトルの測定には、フーリエ変換赤外分光分析装置（Frontier MIR/NIR plus NIRA、PerkinElmer Japan）を用いた。近赤外反射アクセサリ（NIRA）の窓板を白米（米粒のまま）で覆い、セラミックディスクをリファレンスとして反射モードで測定した。637～2700 nm の範囲を 0.3～0.4 nm 間隔で、積算回数は 32 回とした。3 回繰り返し測定し、反射率の平均値を求めた。

データ処理は、最小二乗法に基づいた平滑化と数値微分を行い、915, 1200, 1355, 1460, 1580, 1708, 1776, 1825, 1936, 2058, 2106, 2174, 2282, 2320, 2430 nm の各波長スペクトルにおける 2 次微分ピーク面積値を求めた。

### 2.4 メッシュ農業気象データ

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構のメッシュ農業気象データシステム<sup>5)</sup>の日最高気温、日平均気温、日最低気温、日積算降水量、日照時間、全天日射量より、出穂後 10 日間ごとに 40 日間までの平均値を求めた。また平均気温は出穂後 20、30、40 日間の平均気温を求めた。圃場位置が特定できない米については、県単位のデータとした。

### 2.5 回帰分析

消化性 Brix への単回帰分析での相関係数及び決定係数（以下、 $R^2$ という）を比較した。

機械学習では R (version 4.3.1)<sup>6)</sup>のパッケージ tidymodels<sup>7)</sup>を用いた。説明変数には白米水分、10 分吸水率、20 分吸水率、気象データ（27 変数）、NIR データ（95 変数）の全 125 変数を用いた。変数増減法により絞り込み、LASSO、SVM、ANN、RF、GB による回帰分析を行った。動作エンジンには、LASSO で glmnet パッケージ、SVM で kernlab パッケージ、ANN で nnet パッケージ、RF で ranger パッケージ、GB で XGboost を指定した。PLS 回帰分析では、pls パッケージを用い、潜在変数は 3 とした。試料はランダムに区分し、全体の 80% に当たる 179 点を学習データ、残りの 20% に当たる 46 点を検証データとした。10 分割交差検証法を用いた。目的変数となる消化性 Brix には対数変換を行い、全ての変数を平均 0、分散 1 となるように標準化した。最適なハイパーパラメータの選択

には、二乗平均平方根誤差（以下、RMSE という）を指標とした。ハイパーパラメータには、LASSO では penalty 及び mixture を、SVM では cost 及び margin を、ANN では hidden\_units、penalty 及び epochs を、RF 及び GB では mtry 及び trees を用いた。

## 2.6 回帰分析の予測精度

予測精度は、許容誤差 0.5 以内に含まれる試料の割合（以下、正解率という）、平均絶対誤差（以下、MAE という）、RMSE、 $R^2$  で評価した。酒造用原料米全国統一分析法に定められるばらつき許容範囲は 5% であることから、許容誤差を 0.5 とした。

## 2.7 各説明変数の重要度

各説明変数の重要度は、相関係数及び 2 乗した Shapley 値<sup>8)</sup>により評価した。2 乗した Shapley 値には、Variance Shapley（以下、VS という）、Baseline Shapley（以下、BS という）、All Baseline Shapley（以下、ABS という）、Cohort Shapley（以下、CS という）を用いた。CS の算出の際に各説明変数を 10 区分に分類した。

## 3 結果及び考察

### 3.1 回帰分析の予測精度

各種分析値の平均値、最大値、最小値の一部を表 4 に示す。説明変数は変数増減法により 125 変数のうち 17 変数に絞り込んだ。回帰分析に用いた 17 変数は、20 分吸水率、1~10 日平均気温、11~20 日平均気温、21~30 日平均気温、31~40 日

平均気温、1~10 日最低気温、11~20 日最低気温、21~30 日最低気温、31~40 日最低気温、1~10 日日照時間、11~20 日日照時間、21~30 日日照時間、31~40 日日照時間、1~10 日全天日射量、11~20 日全天日射量、21~30 日全天日射量、31~40 日全天日射量であった。タンパク質に影響を及ぼす気温及び日射量を説明変数に加えることで、既報<sup>3)</sup>の PLS 回帰分析の説明変数に用いていた NIR が不要となったと考えられる。

6 つの機械学習による回帰分析の予測精度を表 5 に示す。正解率は GB で最も高く、MAE 及び RMSE は GB で最も低く、 $R^2$  は GB で最も高かった。GB による消化性 Brix 予測値及び実測値を図 1 に示す。GB による予測値は 8.4~11.6 と幅広く分布していた。他の機械学習モデルによる予測範囲は狭く誤差も大きかったため、広範囲の予測が可能で正解率が高かった GB による予測が適していると考えられる。また PLS の  $R^2$  が既報<sup>3)</sup>より低下したことは、精米歩合及び白米水分の対象範囲を拡大したためと考えられる。

表 4 各種分析値の平均値、最大値、最小値

変数	平均値±SD	最大値	最小値
消化性Brix (%)	10.2±0.9	12.1	7.7
精米歩合 (%)	62.1±10.8	80.0	35.0
白米水分 (%)	12.0±1.5	14.2	7.2
10分吸水率 (%)	21.7±4.5	34.2	12.1
20分吸水率 (%)	31.2±4.3	49.8	20.6

n=225

表5 機械学習による回帰分析の予測精度

回帰分析	PLS	LASSO	SVM	ANN	RF	GB
正解率	54.3	54.3	58.7	67.4	69.6	78.3
MAE	0.53	0.50	0.52	0.48	0.38	0.35
RMSE	0.64	0.62	0.65	0.80	0.46	0.43
$R^2$	0.53	0.57	0.51	0.48	0.76	0.80

n=46

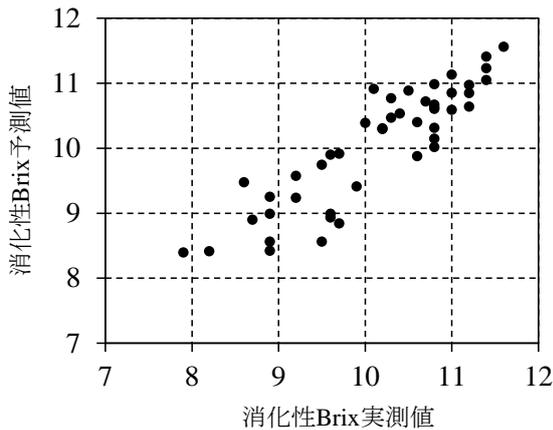


図1 GBによる消化性 Brix 予測値及び実測値

### 3.2 消化性 Brix へ影響を与える要因

消化性 Brix に対する各説明変数の単回帰分析による相関係数及び  $R^2$  の一部を表6に示す。タンパク質由来と考えられる NIR の 2174nm の 2次微分ピーク面積値が正の相関を示したことは、既報<sup>9)</sup>と一致した。また日射量はタンパク質組成に影響を及ぼすことが報告され<sup>10)</sup>、出穂後 11~20 日日照時間及び全天日射量の  $R^2$  が高かったことから、消化性 Brix へタンパク質が影響を及ぼしていると考えられる。

最も予測精度の高かった GB における各説明変数の重要度を表す Shapley 値を図2に示す。基準と比較した重要度を表す BS 及び ABS では、出穂後 11~20 日平均気温の重要度が高く、これは先行研究<sup>11)</sup>と一致した。区分別の影響の強さを表す CS では 17 変数すべてが関わっており、特に出穂後 11~20 日日照時間及び全天日射量の重要度が

高かった。重要度の差の原因を表す VS では出穂後 31~40 日の平均気温及び最低気温の重要度が高かった。合成データを生成しない CS を用いることで、平均気温だけでなく、日照時間、日射量及び吸水率が消化性 Brix へ与える影響が明らかになった。

表6 各説明変数の相関係数及び  $R^2$

変数	相関係数	$R^2$
白米水分 (%)	-0.488	0.238
10分吸水率 (%)	0.133	0.018
20分吸水率 (%)	0.332	0.110
1~10日平均気温 (°C)	-0.354	0.125
11~20日平均気温 (°C)	-0.434	0.188
21~30日平均気温 (°C)	-0.455	0.207
31~40日平均気温 (°C)	-0.486	0.236
1~10日最低気温 (°C)	-0.324	0.105
11~20日最低気温 (°C)	-0.375	0.140
21~30日最低気温 (°C)	-0.429	0.184
31~40日最低気温 (°C)	-0.477	0.228
1~10日日照時間 (h/day)	-0.456	0.208
11~20日日照時間 (h/day)	-0.529	0.280
21~30日日照時間 (h/day)	-0.377	0.142
31~40日日照時間 (h/day)	-0.348	0.121
1~10日全天日射量 (MJ/m <sup>2</sup> /day)	-0.471	0.222
11~20日全天日射量 (MJ/m <sup>2</sup> /day)	-0.539	0.290
21~30日全天日射量 (MJ/m <sup>2</sup> /day)	-0.434	0.188
31~40日全天日射量 (MJ/m <sup>2</sup> /day)	-0.425	0.181
2174nmの2次微分ピーク面積	0.529	0.280

n=225

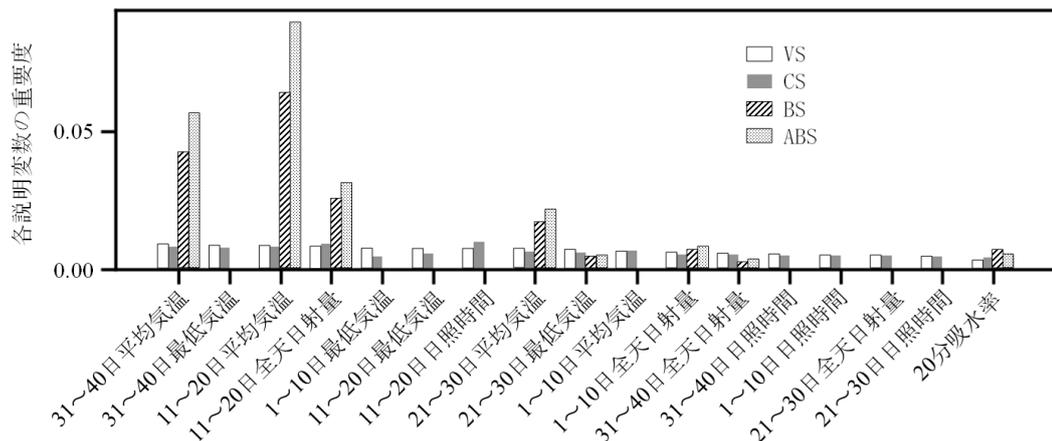


図2 GBにおける各説明変数の重要度を表す Shapley 値

#### 4 まとめ

迅速に得ることができる 20 分吸水率及びメッシュ農業気象データを説明変数として、原料米の対象範囲を精米歩合 35~80%かつ水分 7.2~14.2%と拡大した機械学習による消化性 Brix 予測モデルを構築した。PLS、LASSO、SVM、ANN、RF 及び GB により消化性 Brix を予測したところ、GB の正解率 78.3%と最も高かった。

さらに、Shapley 値を用いて GB における各説明変数の重要度が明らかになった。

今後は、実際に現場で使用される原料米の消化性 Brix 予測値を情報提供し、求められる予測精度の確認を行いたい。実際に現場で使用される白米水分 7~12%の試料のデータを蓄積することで、予測精度の向上が期待される。

#### 謝 辞

メッシュ農業気象データシステムを御提供いただきました国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、原料米を御提供いただきました酒造会社及び農家の皆様に感謝します。

#### 参考文献

- 1) 奥田将生, “米デンプン構造と醸造特性・気象条件との関係”, 生物工学会誌, vol. 90, no. 5, pp. 227-230 (2012).
- 2) 酒米研究会編, “酒造用原料米全国統一分析法”, 酒米研究会, (2023).
- 3) 齋藤健太, 樋口誠一, 和田健太郎, 横堀正敏, “酒造原料米の溶解性予測システムの確立に関する研究—酒造原料米の消化性 Brix 予測値の活用—”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 18, pp. 35-39 (2020).
- 4) 菅原雅通, 鍋倉義仁, 金桶光起, “米溶解性簡易推定法の比較”, 日本醸造協会誌, vol. 118, no. 7, pp. 529-534 (2023).
- 5) 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構, “メッシュ農業気象データシステム”, [https://amu.rd.naro.go.jp/wiki\\_open/doku.php?id=s tart](https://amu.rd.naro.go.jp/wiki_open/doku.php?id=s tart), 2025.10.20

- 6) “The R Project for Statistical Computing”, <https://www.r-project.org>, 2025.1.22
- 7) “tidymodels”, <https://www.tidymodels.org/>, 2025.11.8
- 8) Masayoshi Mase, Art B.Owen, Benjamin Seiler, “Explaining black box decisions by Shapley cohort refinement”, arXiv:1911.00467, vol. 2, pp. 1-26 (2020).
- 9) 齋藤健太, 横堀正敏, 樋口誠一, 和田健太郎, “酒造原料米の溶解性予測システムの確立に関する研究—酒造原料米の吸水性及び消化性の重回帰分析による予測—”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 17, pp. 30-34 (2019).
- 10) 大平陽一, “水稻種子貯蔵タンパク質の組成、含有率に及ぼす栽培・環境条件の影響ならびに米粒内分布特性に関する研究”, 近畿中国四国農業研究センター研究報告, vol. 14, pp. 1-49 (2015).
- 11) 池上勝, 磯野幸治, 藤本啓之, 加藤雅宣, 杉本琢真, 高橋圭, 奥田将生, “兵庫県における酒米品種の消化性と登熟期間の気温との関係”, 日本作物学会紀事”, vol. 90, no. 4, pp. 451-456 (2021).

## そば末粉が有する機能性成分の有効利用に関する研究 (第2報)

仲島日出男\*<sup>1</sup> 松本美樹\*<sup>2</sup> 成澤朋之\*<sup>1</sup>

### Research on the Effective Use of Functional Ingredients of the Buckwheat Milling Residual (Part2)

NAKAJIMA Hideo\*<sup>1</sup>, MATSUMOTO Miki\*<sup>2</sup>, NARISAWA Tomoyuki\*<sup>1</sup>

#### 抄録

そばの製粉時に生成する末粉の有効活用のため、そばの持つ機能性成分の一つであるレジスタントプロテインに注目し、その胆汁酸吸着能を評価した。3種類の胆汁酸に対する吸着能を確認したところ、ケノデオキシコール酸及びデオキシコール酸への高い吸着能が認められた。そば末粉はこれまでに同様の手法で測定された食品素材と比較して高い吸着能を示しており、体内コレステロール低減を目的とした機能性素材としても有効であると考えられた。

キーワード：そば末粉，レジスタントプロテイン，コレステロール，機能性食品

#### 1 はじめに

そばにはポリフェノールの一種であるルチンや各種のアミノ酸などの可溶性成分や、食物繊維などの不溶性成分が豊富に含まれており、これらの機能性成分に関する報告は多い。特に、可溶性成分の一つであるルチンは抗酸化作用などの様々な機能性を有することが知られている。そばの製粉を行う際、そばの実の中心部に近い部分から順に一番粉から三番粉までがそばの麺として使用されているが、外側の表皮に近い部分からなる末粉は、これらの機能性成分を多く含んでいるにもかかわらず、匂いやえぐみが強いことなどや繊維質のボソボソとした食感が忌避されるため、その多くが廃棄されている。

これまでにそば末粉の食材としての有効利用に関する報告<sup>1),2)</sup>はあるが、機能性素材としての検討例は少ない。そば末粉は食物繊維の含有量が多く、

ヒトの腸管内での機能性が期待される。

近年、食物繊維と同じくヒトの腸内での消化を受けにくいタンパク質である難消化性タンパク質に、血中コレステロール低下作用<sup>3)</sup>や大腸機能の向上作用<sup>4)</sup>などがあることが明らかとなってきた。この難消化性タンパク質がレジスタントプロテインと呼ばれており、その機能性が注目されている。また、そばタンパク質にはこのレジスタントプロテインとしての作用があることも明らかとなっている<sup>5),6)</sup>。

これまでの我々の研究で、そば末粉は通常そばの麺に使用されるそば粉を上回るレジスタントプロテインを含むことが確認された<sup>7)</sup>。本研究では、レジスタントプロテインの持つコレステロール低下作用に関連した胆汁酸吸着能に注目した。

脂質の消化に重要な役割をもつ胆汁酸は、肝臓においてコレステロールから生合成され、十二指腸において消化管に分泌される。人が摂取した食品中のコレステロールなどの脂質は、この胆汁酸による乳化作用を受けて腸管内に存在する。その

\*<sup>1</sup> 食品プロジェクト担当

\*<sup>2</sup> 食品・バイオ技術担当

多くは、小腸末端部の回腸において再吸収されて肝臓に戻る、いわゆる腸肝循環を繰り返している<sup>8)</sup>。ヒトが体内のコレステロール量を低下させるためには、肝臓に戻る胆汁酸と結合したコレステロールを食品成分等に吸着し、大腸に排出する必要がある。そのため、食品成分の胆汁酸吸着能は、腸管でのコレステロール排出により体内のコレステロールを低減させるために重要となる<sup>9)</sup>。

本研究では、そば末粉中のレジスタントプロテインが有するコレステロール低下作用を確認するため、胆汁酸吸着能の評価を実施した。

## 2 実験方法

### 2.1 そば末粉試料

県内製粉工場でロール挽き製粉により製造されたそば粉と、それらの製造時に生成する末粉について、500 μm 間隙のふるいを通じた試料を試験に供した。

### 2.2 胆汁酸吸着能測定

松本らの方法<sup>9)</sup>により、コール酸、ケノデオキシコール酸、デオキシコール酸 (図 1) の 3 種類の胆汁酸に対する吸着能の評価を行った。それぞれの胆汁酸を 200mM になるようジメチルスルホキシドに溶解後、リン酸緩衝生理食塩水 (PBS) により 4mM となるように希釈し、胆汁酸基準溶液を調製した。そば粉及びそば末粉試料 10mg に対して、4mM 胆汁酸基準溶液 990μL (1% w/w) を加えて 10 分間激しく攪拌後、14000×g で 20 分間遠心処理した。遠心上清と胆汁酸基準溶液中の胆汁酸の差を測定試料により吸着された胆汁酸吸着量として、その基準溶液中の胆汁酸量に対する割合を胆汁酸吸着能として算出した。

そば末粉と合わせて、ルチンなどの可溶性の機能性成分を抽出した後に残る不溶性残渣についても、同様に胆汁酸吸着能の評価を実施した。

そば末粉 10mg に対して 80%エタノール 500μL を加え、室温で 2 時間激しく攪拌後、14000×g で 20 分間遠心処理を行った残渣について同様に胆汁酸吸着能の評価を行った。

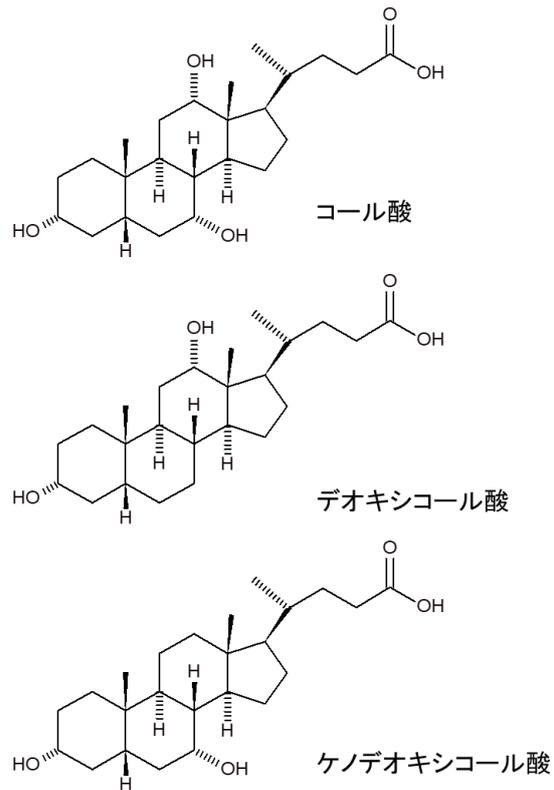


図1 評価を実施した胆汁酸

### 2.3 胆汁酸濃度の確認

試験溶液の胆汁酸濃度を高速液体クロマトグラフ (HPLC) により測定した。胆汁酸は蒸発光散乱検出器 (ELSD) により検出した。測定条件を表 1 に示す。HPLC の分析開始時の溶媒組成を考慮して、試料溶液をメタノールで 2 倍希釈して注入した。

## 3 結果及び考察

### 3.1 そば末粉の胆汁酸吸着能

ヒトの腸管内には多くに胆汁酸分子種が存在するが、特にコール酸、ケノデオキシコール酸、デオキシコール酸及びリトコール酸の濃度が高いことが報告されている<sup>8), 10)</sup>。本研究において、これら 4 種の胆汁酸について吸着能の評価を試みたが、リトコール酸は基準溶液調製時に PBS で希釈する際に沈殿を生じたため、本研究の評価系による吸着能の評価を行うことができなかった。そのため、図 1 に示した 3 種の胆汁酸についての評価を実施した。

図 2 に、そば粉及びそば末粉の 3 種類の胆汁酸

への吸着能を示す。そば粉及びそば末粉は3種類の胆汁酸に対して吸着作用を示した。特に、ケノデオキシコール酸及びデオキシコール酸に対して

高い吸着能を示した。コール酸に対しては、それ以外の胆汁酸と比較するとやや吸着能は低いものの、そば末粉はそば粉よりも高い吸着能を示した。

そば末粉には、レジスタントプロテインなどの不溶性成分と合わせて、ルチンなどのそばポリフェノールを中心とした可溶性の機能性成分が豊富に含まれており、これらを抽出したエキスは機能性素材としての利用が期待される。本研究では、80%エタノールを使用した可溶性エキスの抽出後に残る不溶性成分の有効利用のため、同様に胆汁酸吸着能の評価を行った。その結果、エキス抽出後の残渣についても、そば末粉と同程度の胆汁酸吸着能を有し、エキス抽出による胆汁酸吸着能の損失が少ないことが確認された(図2)。これまでに利用されてきたそばポリフェノールなどの可溶性成分と合わせて、エキス抽出後の残渣についても機能性素材としての利用が期待でき、そば末粉の機能性成分の総合的な活用に向けての有効性が期待される。

表1 HPLC 条件

カラム	Agilent Technology Poroshell 120 EC-C18 3.0×150mm, 2.7μm	
カラム温度	60℃	
移動相	A	20mM 酢酸アンモニウム水溶液
	B	アセトニトリル:メタノール = 60:40
グラジエント	Time(min)	B (%)
	0	40
	3	40
	12	60
	15	100
	23	100
	23.01	40
	35	40
流速	0.7mL/min	
注入量	5μL	
検出器	蒸発光散乱検出器(ELSD)	
	エバポレーター温度: 80℃	
	ネブライザ温度: 30℃	
	ガス流量: 1.6SLM	

### 3.2 他の食品素材との比較

表2に本研究と同様の手法により評価された食品素材の胆汁酸吸着能との比較を示す。そば末粉は、ケノデオキシコール酸及びデオキシコール酸に対してこれらの食品素材よりも高い吸着能を示

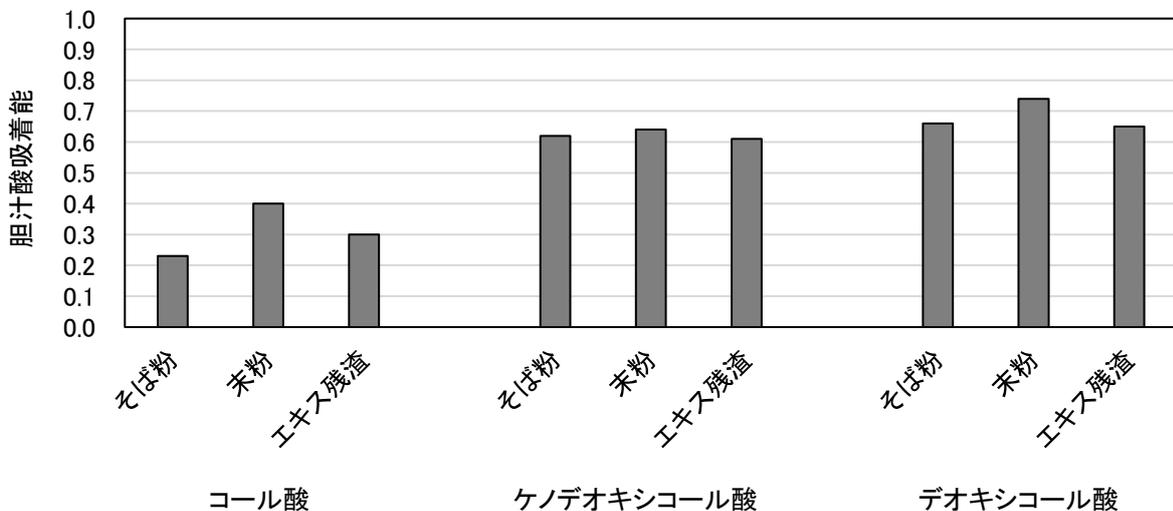


図2 胆汁酸吸着能

表2 胆汁酸吸着能の比較

	コール酸	ケノデオキシコール酸	デオキシコール酸
そば粉	0.23	0.62	0.66
そば末粉	0.40	0.64	0.74
柿未熟果抽出繊維 <sup>10)</sup>	0.50	0.59	-
エゴマ葉パウダー <sup>11)</sup>	0.11	-	0.47

した。そば末粉は、柿未熟果抽出パウダーやエゴマ葉パウダーのような原料素材の抽出や乾燥処理が不要であり、製粉工場で発生したそのままの状態でも食品素材として使用できる。そのため、これらの食品素材と比較して製造コストなどの点で有利であると考えられる。

#### 4 まとめ

そばの製粉時に生成する末粉の有効活用のため、そばの持つ機能性成分の一つであるレジスタントプロテインに注目し、その胆汁酸吸着能を評価した。3種類の胆汁酸に対する吸着能を確認したところ、ケノデオキシコール酸及びデオキシコール酸への高い吸着能が確認された。また、そばポリフェノールなどの可溶性成分の抽出後に残る不溶性素材についても同様に高い胆汁酸吸着能を示しており、そば末粉の可溶性成分と不溶性成分の総合的な有効利用が可能であることが明らかとなった。

#### 謝辞

本研究を進めるに当たり、客員研究員として御指導いただきました近畿大学の白木琢磨准教授及び高崎健康福祉大学の辻聡講師に感謝の意を表します。

#### 参考文献

1) 館和彦, 山川敬江, “そば末粉の成分特性と成果製品への利用”, 岐阜女子大学紀要, vol. 42, pp. 87-92 (2011).

- 2) 矢内和博, “そばの製粉残渣の有効活用法の開発”, 地域総合研究, vol. 16, pp. 143-150 (2015).
- 3) 加藤範久, “消化管で作用する疾病予防成分に関する栄養学的研究”, 日本栄養・食糧学会誌, vol. 65, pp. 258-260 (2012).
- 4) T. Morita, S. Kasaoka, A. Oh-hashii, M. Ikai, Y. Numasaki and S. Kiriayama, “Resistant Proteins Alter Cecal Short-Chain Fatty Acid Profiles in Rats Fed High Amyrose CornStarch”, J. Nutr., vol. 128, pp. 1156-1164 (1998).
- 5) J. Kayashita, I. Shimaoka, M. Nakajoh, M. Yamazaki and N. Kato, “Consumption of Buckwheat Protein Lowers Plasma Cholesterol and Raises Fecal Neutral Sterols in Cholesterol-Fed Rats Because of Its Low Digestibility”, J. Nutr., vol. 127, pp. 1395-1400 (1997).
- 6) 加藤範久, 栢下淳, 佐々木真宏, “レジスタントプロテイン”としてのそばたんぱく質とセリシンの生体調節機能”, 日本栄養・食糧学会誌, vol. 53, pp. 71-75 (2000).
- 7) 仲島日出男, 松本美樹, 成澤朋之, 原田雅典, “そば末粉が有する機能性成分の有効利用に関する研究”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 22, pp.29-32 (2024).
- 8) 石塚敏, “胆汁酸分子種の多様性 —構造・代謝と生理作用”, 化学と生物, vol. 52, pp 301-306 (2014).
- 9) 松本健司, 増田かおる, 武川加奈子, 小柳喬, “柿未成熟果実由来食物繊維の胆汁酸吸着能に対する加熱の影響とパン素材への応用”, 日本食品科学工学会誌, vol. 61, pp. 543-547 (2014).

- 10) 岩渕仁寿, “各種消化器疾患における胆嚢胆汁の胆汁酸の組成”, 日本消化器病学会雑誌, vol. 75, pp. 869-881 (1978).
- 11) 藤田恭輔, “エゴマ葉の胆汁酸吸着能の検証”, 富山短期大学紀要, vol. 56, pp. 119-122 (2020).

## 高灰分ストリーム粉の応用による麺製品の高付加価値化の検討 (第2報)

成澤朋之<sup>\*1</sup> 松本美樹<sup>\*2</sup> 焼田裕之<sup>\*\*\*</sup> 仲島日出男<sup>\*1</sup>

## Study on Enhancing the Value of Noodle Products through the Application of High-Ash Stream Flour (Part 2)

NARISAWA Tomoyuki<sup>\*1</sup>, MATSUMOTO Miki<sup>\*2</sup>, YAKITA Hiroyuki<sup>\*\*\*</sup>, NAKAJIMA Hideo<sup>\*1</sup>

抄録

麺製品の風味向上を目的とした高灰分ストリーム粉(高灰分粉)の利用技術確立のため、高灰分粉及び全粒粉置換によるゆで麺の官能特性の比較を官能評価により行い、さらに揮発性成分生成への効果をガスクロマトグラフ質量分析装置により確認した。官能評価において、高灰分粉と全粒粉では異なる官能評価特性を示し、高灰分粉では「くすみ」「ざらつき」「ふすま臭」を抑えて風味強化が可能であることが示された。揮発性成分特性でも高灰分粉と全粒粉は異なる特性を示した。このことから、高灰分粉及び全粒粉を使い分けることで地粉風味を増強した様々な麺製品へのニーズに対応が可能となることが示唆された。

キーワード：国内産小麦，麺，官能評価，香り成分，高灰分ストリーム粉

## 1 はじめに

近年、小麦粉加工品においては風味や食感などを向上させた付加価値の高い製品開発が課題となっている。このような課題を受け、これまでに高灰分ストリーム粉(高灰分粉)をパンへ応用することにより風味を向上する研究を行ってきた<sup>1,2)</sup>。

小麦の製粉工場において、その製粉工程の各段階で数多くのストリーム粉が生成し、そのストリーム粉の配合により各種の小麦粉が製造されている。小麦粒の皮部近傍部位を多く含む高灰分ストリーム粉(高灰分粉)は、風味の向上につながる不飽和脂肪酸やアミノ酸などを豊富に含む反面、その生菌数や色調などから、食品への利用は限定的である。一方、小麦粉加工品であるパンや麺の風味の強化や栄養価の向上などを目的として、原料

小麦粉に全粒粉や微粉碎した小麦種皮(ふすま)が添加されることがある。ただし、これらの使用は専用の製造工程が必要となるため、原料のコストアップにつながる。製粉工場で日常的に得られる高灰分粉を活用することで、低コストでの風味強化を図ることが可能になると考えられる。また、通常の製粉工程では篩をかけることにより小麦ふすまが取り除かれているため、全粒粉のように小麦ふすまによるざらつきなどの食感への悪影響も少ないと推測された。

麺類についても風味向上技術についての需要は高く、パンにおいて添加効果が確認された高灰分粉の利用が期待される。しかしながら、添加した際の影響は明らかになっていない。小麦粉加工品の中でも麺類は、加工工程が簡便であり、基本的には原材料が小麦粉と食塩水のみであるという特徴から、小麦粉の品質が最終製品へ大きく影響することが知られている<sup>3)</sup>。

\*1 食品プロジェクト担当

\*2 食品・バイオ技術担当

\*\*\* 現 環境部大気環境課

昨年度の研究報告にて、麵用粉と高灰分粉では、粒度分布全体に大きな差は認められなかったものの、高灰分粉の方が粒度の大きい粒子がやや多いこと、また、揮発性成分生成の影響として国産小麦を使用した麵の独特な風味の形成要因であると言われている不飽和アルデヒド類の(*E,E*)-2,4-デカジエンールなどの増加効果が大きいことを報告した<sup>4)</sup>。

そこで本研究では、麵用小麦粉へ高灰分粉及び全粒粉を添加したゆで麵を喫食した際に感じられる差異を解明することを目的とした。具体的には、ゆで麵を試食した際の高灰分粉及び全粒粉の官能特性の違いについて官能評価を行い、揮発性成分生成の違いについてガスクロマトグラフ質量分析装置(GC-MS)による分析を行った。

## 2 実験方法

### 2.1 小麦粉試料

使用した国産小麦麵用粉(中力粉)及び高灰分粉は星野物産(株)より入手した。国産小麦全粒粉は前田食品(株)より入手した。

### 2.2 官能評価

官能評価用ゆで麵は、官能評価直前に製麵した。麵用粉、麵用粉に高灰分粉を10%、20%、30%、40%、50%添加したブレンド粉、麵用粉に全粒粉を10%、20%、30%添加したブレンド粉500gに対して、4%食塩水を180mL加え、縦型ミキサー(愛工舎製作所製KENMIX major)を用いて合計3分間混捏した。麵生地をロール幅2.4mmで粗延べ後、同じロール幅で1回複合し、30分熟成させ、再度同じロール幅で1回複合した。その後、2.2mm、1.9mm、1.75mmと段階的に圧延し、10番の角切刃を使用して生麵を切り出した。麵の長さは25cmとした。この生麵を12分30秒間ゆでることで、ゆで麵試料を得た。

各種ゆで麵試料の官能価は、埼玉県産業技術総合センター北部研究所の職員2名と星野物産(株)の職員4名の合計6名を評価パネルとして行った。なお、評価パネルには実験に先立ち、予め本実験の趣旨を十分に説明して、実験協力者として同意

を得た。

国産麵用小麦粉及びその50%を高灰分粉で置換した小麦粉から作製したゆで麵試料(それぞれC1、C2とした)を試食し、それぞれの味や香りの特徴を表す単語を出し合った。その中でパネル間での合意が取れた単語を官能評価用語として採用した。C1のゆで麵の特徴を表す用語の評点は、C1で10点、C2で1点とした。一方、C2のゆで麵の特徴を表す用語の評点は、C1で1点、C2で10点とした。ふすま臭は全粒粉置換試料の評価を開始した際に追加要望が出た官能評価用語であったため、全粒粉置換割合30%をC2の代わりに高評点試料とし、C1を0、全粒粉置換割合30%を3とした4段階の簡易評価を行った。採用した官能評価用語を用い、パネルのトレーニングを十分行った後に、各種ゆで麵試料の官能評価を行った。得られた各評点を因子分析(最尤法・プロマックス回転)に供した。

### 2.3 揮発性成分測定

これまでの研究から<sup>3)</sup>、麵製品の揮発性成分は小麦生地の段階で生成されていることが分かっており、試料調製が容易である点から、生地の揮発性成分の測定を行った。麵用粉、麵用粉に高灰分粉を10%、20%、30%、40%、50%添加したブレンド粉、麵用粉に全粒粉を10%、20%、30%添加したブレンド粉に対して、4%食塩水を対粉比で50%加えて混練することにより生地を調製した。この生地について、既報<sup>1,2)</sup>の方法によりGC-MSを使用して揮発性成分分析を実施した。ゲステル製MPS robotic pro オートサンプラー、加熱脱着装置(TDU)及びクールドインジェクションシステム(CIS)を装備したアジレント・テクノロジー製8890ガスクロマトグラフをホスト側GCとして使用した、5977B シングル四重極質量分析装置(アジレント・テクノロジー製)を分析に使用した。3.0gの生地試料を20mLスクリュウキャップ付きバイアルに秤量し、30℃のインキュベータ内で2時間熟成を行った後に、揮発性成分分析に供した。

得られたクロマトグラムについて、MassHunter Quantitative Analysis ソフトウェアパッケージ(アジ

レント・テクノロジー製)中の Unknowns Analysis ツールを用いてデコンボリューション処理を行った。アルカン標準溶液(C<sub>8</sub>~C<sub>20</sub>)を用いてリテンションインデックス(RI)の算出を行った。その後、NIST17 ライブラリと照合、及び Aroma Office (ゲステル製)にて RI を照合して化合物の推定を行った。また、生成したイオンの中でその化合物に特徴的なイオンをターゲットイオン(TI)として、その面積値(n = 3)を算出した。

## 2.4 統計解析

各種統計解析はR version 4.4.1 (R Core Team, Austria)を用いて計算した。

## 3 結果及び考察

### 3.1 官能評価

6名の評価パネルでゆで麺試料(C1、C2)を試食し、それぞれの外見や食感、味、香りの特徴を表

す単語を出し合った結果、合意が取れた表1に示す17の単語を官能評価用語として採用した。

これらの官能評価用語を用い、各種ゆで麺試料の官能評価を行った結果を表2に示す。

表1 使用した官能評価用語とその定義

色	
くすみ	麺表面のくすみ
物性	
表面のざらつき	咀嚼前に舌で感じる麺表面のざらつき感(つぶ感込み)
表面のなめらかさ	咀嚼前に舌で感じる麺表面のなめらかさ・ぬめり感
全体の柔軟性	咀嚼初期に感じる麺全体の柔軟性
全体のかたさ	咀嚼初期に感じる麺全体のかたさ
味	
甘さ	咀嚼時に感じる甘さ
塩味	咀嚼時に感じる塩味
雑味	咀嚼時に感じる雑味
全体の強さ	咀嚼時に感じる味全体の強さ
香り	
草の香り	咀嚼時に感じるフレッシュグリーン様の香り
ふすま臭	咀嚼時に感じる枯草様の香り
全体の強さ	咀嚼時に感じる香り全体の強さ(草・ふすまを含む)
【咀嚼時】	20回以上咀嚼した時

表2 各種ゆで麺試料の官能評価結果

	麺用粉	高灰分粉					全粒粉			
		10%	20%	30%	40%	50%	10%	20%	30%	
色	くすみ	1.0 ± 0.0	2.8 ± 0.4	5.0 ± 0.6	7.0 ± 0.6	8.5 ± 0.5	10.0 ± 0.0	7.3 ± 1.2	11.2 ± 1.6	14.7 ± 0.0
物性	表面のざらつき	1.0 ± 0.0	2.7 ± 0.5	4.3 ± 0.7	6.5 ± 0.5	8.0 ± 0.6	10.0 ± 0.0	9.2 ± 2.3	14.3 ± 1.4	19.3 ± 0.0
	表面のなめらかさ	10.0 ± 0.0	8.5 ± 0.5	6.2 ± 0.7	4.5 ± 0.5	3.2 ± 0.4	1.0 ± 0.0	4.8 ± 1.9	2.8 ± 1.5	1.8 ± 1.0
	全体の柔軟性	10.0 ± 0.0	8.2 ± 0.7	6.3 ± 0.5	4.3 ± 0.7	2.8 ± 0.4	1.0 ± 0.0	5.5 ± 1.1	5.0 ± 1.2	3.8 ± 0.7
	全体のかたさ	1.0 ± 0.0	2.8 ± 0.4	4.3 ± 0.5	6.5 ± 0.5	8.2 ± 0.4	10.0 ± 0.0	4.8 ± 1.1	6.0 ± 1.0	7.7 ± 0.5
味	甘さ	10.0 ± 0.0	8.3 ± 0.5	6.5 ± 0.5	4.2 ± 0.9	2.7 ± 0.5	1.0 ± 0.0	7.2 ± 0.7	5.7 ± 0.5	4.3 ± 0.7
	塩味	10.0 ± 0.0	8.2 ± 0.4	6.8 ± 0.4	4.3 ± 0.7	2.5 ± 0.5	1.0 ± 0.0	6.8 ± 1.3	5.5 ± 0.8	4.2 ± 1.1
	雑味	1.0 ± 0.0	2.7 ± 0.5	4.3 ± 0.7	6.3 ± 0.5	8.2 ± 0.4	10.0 ± 0.0	4.7 ± 1.2	6.2 ± 0.7	7.7 ± 0.4
	全体の強さ	1.0 ± 0.0	2.7 ± 0.5	4.3 ± 0.7	6.7 ± 0.5	8.0 ± 0.0	10.0 ± 0.0	4.3 ± 1.1	5.5 ± 0.5	7.3 ± 0.5
香り	草の香り	1.0 ± 0.0	2.5 ± 0.5	4.8 ± 0.7	6.8 ± 0.7	8.2 ± 0.7	10.0 ± 0.0	3.5 ± 0.8	4.8 ± 0.7	6.2 ± 0.7
	全体の強さ	1.0 ± 0.0	2.5 ± 0.5	4.8 ± 0.7	6.8 ± 0.7	8.2 ± 0.4	10.0 ± 0.0	3.8 ± 0.7	5.3 ± 0.5	6.7 ± 0.4
	ふすま臭	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.8 ± 0.4	1.0 ± 0.0	1.2 ± 0.4	1.2 ± 0.4	2.0 ± 0.0	2.8 ± 0.0

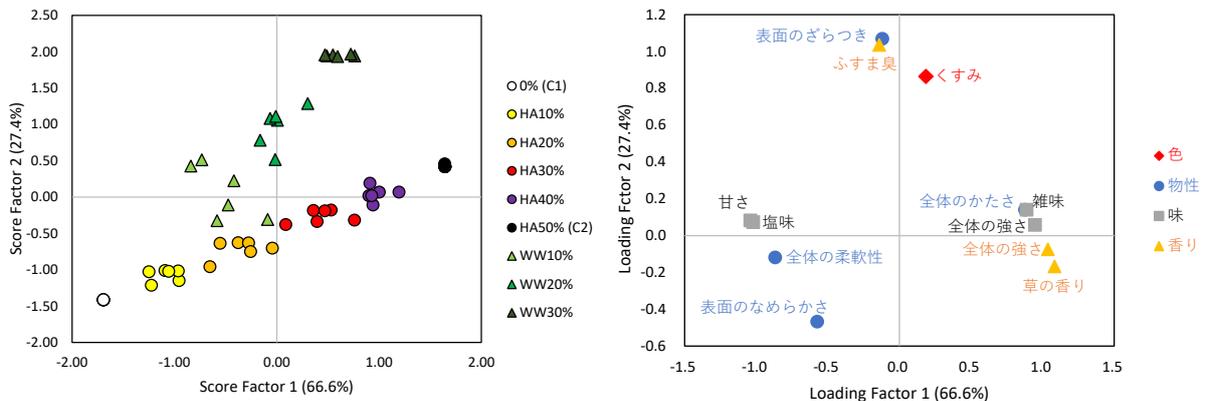


図1 官能評価結果の因子分析

n = 6。各因子の寄与率は、それぞれの軸のカッコ内に示す。

C1、C2は基準試料。HA：高灰分粉、WW：全粒粉。

これらの結果を因子分析(最尤法・プロマックス回転)に供した結果を図1に示す。第1因子及び第2因子でそれぞれ66.6%、27.4%の寄与率を示し、第2因子までの積算寄与率は94.0%となった。

高灰分粉置換サンプルでは、置換割合が増加するにつれてC1からC2にプロット位置が直線的に近づいた。一方、全粒粉置換サンプルでは、置換割合の増加と共に第2因子が大きい方向へプロットされており、高灰分粉置換サンプルとは分離した。ローディングプロットにより各サンプルに寄与した因子を確認すると、C1側に物性の「なめらかさ」「柔軟性」、味の「甘さ」「塩味」がプロットされており、C2側に物性の「かたさ」、味の「雑味」「全体の強さ」、香りの「草の香り」「全体の強さ」がプロットされた。これらC2側にプロットされた因子は、高灰分粉を置換することにより増強される風味であることが示唆された。また、第2因子として値が大きかったのは、色の「くすみ」、物性の「ざらつき」、香りの「ふすま臭」であった。これら第2因子が大きい側にプロットされた因子は、全粒粉を置換することにより増強される風味であることが示唆された。これらの結果から、高灰分粉添加では「くすみ」「ざらつき」「ふすま臭」を抑えて風味を強くすることが可能であると考えられた。

### 3.2 揮発性成分測定

小麦粉及び高灰分粉より調製した生地 GC-MS 測定の結果、合計 104 化合物検出し、その内訳は、有機酸類 6 種類、アルコール類 21 種類、アルデヒド類 27 種類、フラン類 5 種類、炭化水素類 21 種類、ケトン類 13 種類、ラクトン類 5 種類、その他 6 種類であった。高灰分粉置換ではアルデヒド類やフラン類、ケトン類の増加が確認された。一方、全粒粉置換では、上記の化合物の他、アルコール類の増加もあわせて確認された。

これらの化合物の中で、昨年度の報告にて高灰分粉置換することにより増加すると報告したヘキサナールと(E,E)-2,4-デカジエナール、及びアルコール類として2-ブタノール、3-メチル-1-ブタノール

の TI 面積値を図2に示す。

これらのアルデヒド類はこれまでの研究から、リポキシゲナーゼ(LOX)という不飽和脂肪酸酸化酵素により、小麦粉に含まれる不飽和脂肪酸が

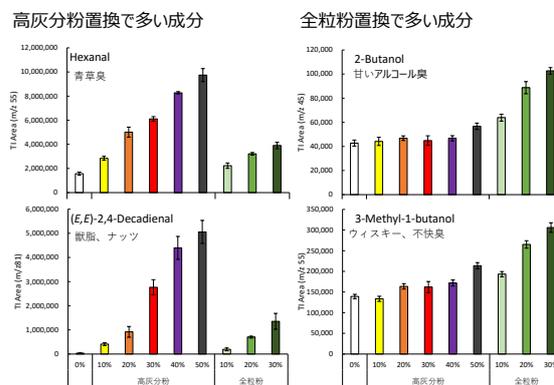


図2 高灰分粉置換及び全粒粉置換において特徴的であった化合物のTI面積値  
エラーバーは標準偏差を示す(n=3)

酸化されることにより生成されると示唆されている<sup>5)</sup>。また、灰分の高い小麦粉では LOX 活性が高く、脂質及び不飽和脂肪酸の含有量が多いことも報告されている<sup>5)</sup>。このことから、高灰分粉を添加することにより、LOX 及びその基質となる不飽和脂肪酸が添加されることにより揮発性成分が多く生成されたものと推測された。一方、3-メチル-1-ブタノールのようなアルコール類は、外皮由来の微生物中のエムデン・マイヤーホフ・パルナス経路による炭水化物代謝物やエールリッヒ経路によるアミノ酸代謝物だと推測された<sup>6-8)</sup>。これらの結果から、官能評価の結果における「草の香り」などはアルデヒド類が、「ふすま臭」はアルコール類が強く影響しているものと考えられた。

## 4 まとめ

麺製品の風味向上を目的とした高灰分ストリーム粉(高灰分粉)の利用技術確立のため、高灰分粉及び全粒粉置換によるゆで麺の特性を官能評価により比較した。また、揮発性成分生成への効果を GC-MS により確認した。

官能評価において、国産麺用小麦を使用したゆ

で麺の特徴を表す単語として、物性の「なめらかさ」「柔軟性」、味の「甘さ」「塩味」が、高灰分粉 50%置換のゆで麺の特徴を表す単語として、物性の「かたさ」、味の「雑味」「全体の強さ」、香りの「草の香り」「全体の強さ」が選定された。また、全粒粉 30%置換のゆで麺の特徴を表す単語として、色の「くすみ」、物性の「ざらつき」、香りの「ふすま臭」が選定された。これらの結果から、高灰分粉添加では「くすみ」「ざらつき」「ふすま臭」を抑えて風味を強化できることが示唆された。

また、揮発性成分生成の影響としては、高灰分粉置換ではアルデヒド類などが増加するのに対し、全粒粉置換ではアルコール類が増加した。これらの化合物が官能評価特性の差に関与しており、風味に対する高灰分粉と全粒粉の添加効果の違いを生み出しているものと推測された。

以上のことから、高灰分粉と全粒粉で添加した際の効果は異なるため、最終製品の設計に応じて使い分けることで地粉風味を増強した麺製品へのニーズに対応が可能となると考えられる。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、原料の国産小麦粉麺用粉及び高灰分粉を提供いただいた星野物産株式会社に感謝いたします。また、客員研究員として御指導いただきました帝京平成大学健康メディカル学部の前田竜郎教授、及び東京電機大学理工学部の椎葉究特定教授に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 成澤朋之, 江原雅人, 原田雅典, 海野まりえ, 金子雅明, 仲島日出男, “高灰分ストリーム粉の添加による国産小麦を原料としたパンの風味変化”, 日本食品科学工学会誌, 70 (7), 279–291 (2023).
- 2) 成澤朋之, 江原雅人, 原田雅典, 海野まりえ, 金子雅明, 仲島日出男, “高灰分ストリーム粉を継代に使用した醗酵種がパンの風味に与える影響”, 日本食品科学工学会誌,

- 71 (7), 231–249 (2024).
- 3) Narisawa T., Nakajima H., Umino M., Kojima T., Asakura T., Yamada M., “Volatile compounds from Japanese noodles, “udon,” and their formation during noodle-making”, *J. Food Process. Technol.* 8 (11), (2017).
- 4) 成澤朋之, 松本美樹, 原田雅典, 海野まりえ, 仲島日出男, “高灰分ストリーム粉の応用による麺製品の高付加価値化の検討” 埼玉県産業技術総合センター研究報告, 22, 37–40 (2024).
- 5) Narisawa T., Nakajima H., Umino M., Kojima T., Yamashita H., Kiribuchi-Otobe C., Yamada M., Asakura T. “Cultivar differences in lipoxygenase activity affect volatile compound formation in dough from wheat mill stream flour”, *J. Cereal Sci.*, 87, 231–238 (2019).
- 6) Giri, A., Osako, K., Ohshima, T., Identification and characterization of headspace volatiles of fish miso, a Japanese fish meat based fermented paste, with special emphasis on effect of fish species and meat washing. *Food Chem.* 120, 621–631 (2010).
- 7) Corrêa Lelles Nogueira, M., Lubachevsky, G., Rankin, S.A., A study of the volatile composition of Minas cheese. *LWT - Food Sci. Technol. (Lebensmittel-Wissenschaft-Technol.)* 38, 555 - 563 (2005).
- 8) Morales, P., Feliu, I., Fernández-García, E., Nuñez, M., Volatile compounds produced in cheese by Enterobacteriaceae strains of dairy origin. *J. Food Prot.* 67, 567–573 (2004).

## フレーム構造の最適設計に関する研究 (第1報)

都知木邦裕\*<sup>1</sup> 南部洋平\*<sup>1</sup> 半田隆志\*<sup>2</sup> 香西良彦\*<sup>2</sup>

### Study on the Optimal Design of Frame Structures

TOCHIKI Kunihiko\*<sup>1</sup>, NAMBU Yohei\*<sup>1</sup>, HANDA Takashi\*<sup>2</sup>, KOZAI Yoshihiko\*<sup>2</sup>

#### 抄録

本研究では、実製品への適用を見据えた最適設計手法を構築するために、手動車椅子のフレーム構造を対象に断面寸法の最適化を行った。3Dスキャナにより実機の形状を計測し、1次元ビーム要素を用いた有限要素解析モデルを構築した。JIS T 9201:2016 (手動車椅子)を参考にした解析条件のもと、OptiStructを用いて質量最小化を目的とした寸法最適化を実施した。さらに、生産性への配慮として、接合位置を考慮した現実的なフレーム構造の最適設計の適用手順を体系化した。

キーワード：フレーム構造，寸法最適化，有限要素法

## 1 はじめに

近年、輸送機器や建築構造など多様な分野において、軽量化や高剛性化を効率的に実現する手段として、構造解析と最適化アルゴリズムを組み合わせた最適設計手法が、製品開発に取り入れられつつあり、特にトポロジー最適化は、構造の形状や材料を自動的に導出できる手段として注目を集めている。しかしながら、トポロジー最適化の計算結果は自由形状を伴うことが多く、量産品へ適用することが困難な場合が多い。実際の製品設計では生産性や加工性も考慮した現実的な最適化が重要である。

本研究では、手動車椅子のフレーム構造を対象に、断面寸法を設計変数とした寸法最適化を行い、生産性も考慮した最適設計の適用方法を明らかにすることを目的とする。得られた知見を一般的なフレーム構造の設計に展開可能な設計手順として整理する。

## 2 解析方法

### 2.1 最適設計の方針

本研究では実際の製品設計への展開を見据え、トポロジー最適化ではなく、断面形状の寸法最適化を採用した。この手法は既存の形状を大きく変更することなく、標準的な断面形状の中で性能向上を図るアプローチである。

なお、本研究の最適化計算には、Altair Engineering社のOptiStruct (Ver.2023)を使用した。本ソフトウェアは、断面寸法を設計変数とする寸法最適化の計算を行うことが可能である。

### 2.2 解析モデルの作成

対象としたのは、一般的な手動車椅子の側面のフレーム構造である。フレームの形状は3Dスキャナ (Steinbichler社製COMET5-11M)を用いて計測した。

解析モデルには1次元のビーム要素を使用した。部材の中心軸上にビーム要素を配置し、各要素には、断面形状を定義する寸法をパラメータと

\*<sup>1</sup> 機械技術担当

\*<sup>2</sup> 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

して設定している。ビーム要素を用いることで、計算負荷を大幅に低減できる上、寸法を設計変数として直接扱うことができるため、寸法最適化との親和性が高い。作成した解析モデルを図1に示す。

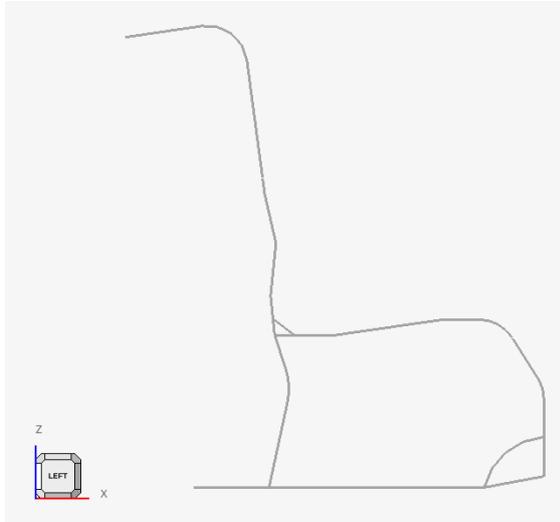


図1 解析モデル

### 2.3 解析条件の設定

材料特性はアルミ合金（A6061 相当）を想定した材料パラメータ（縦弾性係数 69,040MPa、ポアソン比 0.33、密度 2.7g/cm<sup>3</sup>）を使用した。荷重条件、境界条件は JIS T9201：手動車椅子の、手押しハンドル上方耐荷重試験とキャストアップ繰り返し試験に相当する条件を設定した。

### 2.4 最適化計算条件の設定

設計変数として各部材のパイプの外半径と内半径を設定した。外半径は既存製品の寸法を上限とする制約条件を設けた。また、肉厚を外半径と内半径の差から算出するパラメータとして定義し、1mm を下限とする制約条件を設けた。制約条件として耐荷重試験に対しては、応力が材料の引張強さを超えないこと、繰り返し試験に対しては、疲労曲線から算出される許容応力を下回ることとした。目的関数にはフレーム全体の質量最小化を設定し、必要な強度を保ちつつ、軽量化を図った。

### 2.5 生産性に関する配慮

本研究における構造最適化では、フレーム部材

に1次元のビーム要素を用いており、それぞれの要素に対して断面寸法や材料特性などの属性情報（プロパティ）を割り当てている。プロパティの分割位置で、断面寸法を変化させることができる。

最適化計算では、任意の位置でビーム要素に異なるプロパティを設定することが可能である。しかし、プロパティの分割位置が多くなると、最適化の計算結果として、寸法の異なる部材が多数生成されることになる。実製品ではこれらを接合して組み立てる必要が生じ、生産コストの増加につながる。

そこで、本研究ではプロパティの分割位置を既存製品の接合位置と一致させるように設定した。これにより、最適化後の設計でも新たな接合箇所を追加することのない構造を提案することができる。最適化の計算に使用したプロパティの分割図を図2に示す。図中の番号はプロパティ単位で付した部材番号を表す。

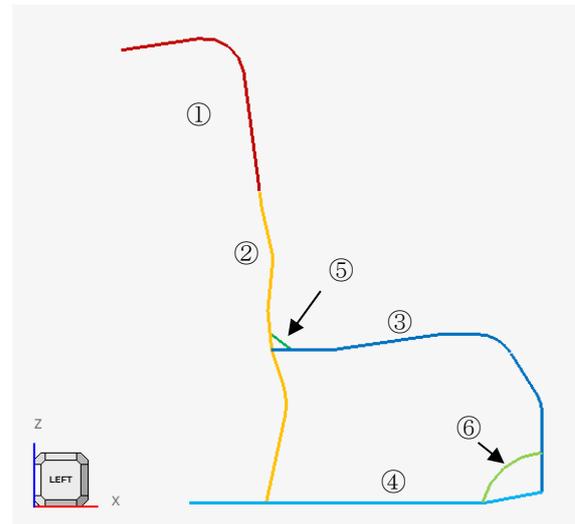


図2 プロパティ（断面寸法属性）の分割図と部材番号

## 3 結果及び考察

### 3.1 最適化計算結果

寸法最適化の計算で得られた最適化後の断面寸法の結果を表1に、質量及び最大応力の結果を表2に示す。この結果から、フレーム全体の質量は約30%の軽量化が可能であることが確認された。また、最大応力についても約18%の低減がみら

れ、最適設計の有効性を確認した。

表1 最適化計算結果：断面寸法  
(既存製品の数値を1として正規化)

評価項目	部材 番号 (図2)	計算結果	
		外半径	肉厚
断面寸法	①	1.00	1.17
	②	1.00	1.33
	③	1.00	0.64
	④	0.10	0.56
	⑤	0.52	0.61
	⑥	0.20	0.56

表2 最適化計算結果：質量と最大応力  
(既存製品の数値を1として正規化)

評価項目	計算結果
質量	0.70
最大応力	0.82

### 3.2 断面寸法最適設計の適用手順

以上の検討により断面寸法最適化を行う手順を以下にまとめた。解析ソフトは当センターが所有するソフトウェア「OptiStruct」を使用することを前提とした。

#### (1) 3D形状データの作成

1次元ビーム要素でモデル化を前提とした形状データを作成する。既存製品を対象とする場合には、3Dスキャナ等を用いた実測を行い、ビームの軸心や図心のデータを作成する。

#### (2) 解析モデルの作成

形状データをもとに1次元ビーム要素で有限要素法の解析モデルを作成する。計算コストを抑えつつ、断面寸法最適化に必要な情報を有するモデルとする。

#### (3) 接合位置を考慮した部材分割に関する設定

既存製品の接合部に合わせて、プロパティ（断面寸法属性）を分割する。効果として、接合箇所の増加を抑えつつ最適化が可能となる。

#### (4) 最適化寸法の設定

最適化対象の部材について断面形状の基本寸法（外径や内径など）を設計変数として設定する。

#### (5) 解析条件の設定

強度試験等で求められる性能を考慮し、試験条件を参考に、荷重条件及び境界条件を設定する。

#### (6) 制約条件の設定

応力や変形量など必要な性能指標を制約条件として設定する。

#### (7) 目的関数の設定

軽量化を目的とする場合には質量最小化を、剛性向上を目的とする場合は、コンプライアンス最小化を設定する。

#### (8) 寸法最適化の計算

OptiStructを用いて寸法最適化計算を行い、計算が正常終了すれば最適化結果が得られる。

## 4 まとめ

本研究では、フレーム構造に対する最適設計の適用手法を確立することを目的として、手動車椅子のフレームを対象に、断面寸法の最適化を実施した。3Dスキャナを用いて製品形状を計測し、それに基づいてビーム要素による計算効率の高い有限要素解析モデルを構築した。また、JIS T 9201:2016（手動車椅子）を参考とした解析条件を設定し、OptiStructを用いて寸法最適化を行った。

最適化に際しては、生産性への配慮として、既存製品の接合位置に基づくプロパティの分割を行うなど、実製品への適用を見据えた工夫を加えた。これらの手順を通じて、断面寸法最適化の実施手順を体系的に整理することができた。

今後はフレームのレイアウトに着目した最適化へと展開し、より自由度の高いフレーム設計の実現を目指していく予定である。

#### 参考文献

- 株式会社 日経BP,  
“新型「エルフ」にJFEのトポロジー最適化技術、軽量化と室内空間拡大を両立”,  
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/18/15785/>  
(accessed 2024.3.21).
- 山川宏, “最適設計ハンドブック；基礎・戦略・応用”, 朝倉書店, (2003).

## 少数色覚者のための色覚補正ツールの開発と検証

— 個々人の錐体分光感度分布の推定と推定誤差の評価 —

岡崎祥吾\* 青木誠\*\* 山口英将\*\* 鈴木浩之\* 小谷佳宏\*\* 川副裕之\*\* 半田隆志\*

### Development and Validation of a Color Vision Compensation Tool for Color Vision Deficiency

— Cone Sensitivity Estimation and Error Evaluation —

OKAZAKI Shogo\*, AOKI Makoto\*\*, YAMAGUCHI Hidemasa\*\*, SUZUKI Hiroyuki\*,  
KOTANI Yoshihiro\*\*, KAWAZOE Hiroyuki\*\*, HANDA Takashi\*

抄録

芸術作品では色の知覚が作品の印象に大きく影響するため、少数色覚者の作品が標準色覚者に十分に意図どおり伝わらない可能性がある。また、その逆の状況も生じ得る。本研究では、任意の2者間で錐体刺激値を一致させる画像変換手法に必要となる、個人ごとの錐体分光感度パラメータを高精度に推定する測定法を検討した。数値シミュレーションの結果、提案手法は従来手法と比較して測定精度が向上することを確認した。

キーワード：色覚多様性，少数色覚，画像変換，配色，高色域ディスプレイ

## 1 はじめに

少数色覚者（かつての色弱・色盲）の色覚補助の方法として一般的なものにColor Universal Design (CUD) が提唱されている。この方法は、少数色覚者が色を識別しやすいように標準色覚者が識別できる配色の一部を制限するものである。ほかの先行研究では、色の識別に焦点を当て、分かりづらい色の情報を明るさの情報に変換するもの、認識しやすい色のグラデーションに色相を回転するものなどが提案されてきた<sup>1,2)</sup>。これらの方法は高強度の色覚異常においても色の識別を与えるということには成功してきたが、配色の持つ効果（反対色等、脳内での色空間の構造の一致）までは伝えられなかった。この理由は、これまでの

色覚補助の目的が、意味の取り違えや事故の防止ができることであったためと思われる。

近年では暮らしのデジタル化も進み、娯楽としてのデジタルコンテンツも増えている。また、液晶ディスプレイの出荷時校正の正確性も増しており、標準色覚者にとっては制作者の意図どおりの配色で鑑賞しやすくなっている。しかし、一部の少数色覚者にとっては制作者の意図しない配色で鑑賞するという状況が生じており、これまで少数色覚の補助においてフォーカスされてきた情報の識別性のみならず、芸術的な意味での配色効果を伝達する方法の開発が必要である。

## 2 基礎となる考え方

### 2.1 開発する配色伝達方法について

#### 2.1.1 本研究が目指すこと

最終目的は、異なる色覚を持つ者同士であっても同じように芸術作品を楽しめる、あるいは、異

\* 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

\*\* (株) ワコム

なる色覚の者に対しても自身の意図した芸術的効果を損なわずに作品を発表できるようになることである。これを目標として言い換えれば、多様な色覚を持つ者たちの間で、芸術的なテクニックが引き起こす神経の反応が一致することを保証する仕組みを作ることと考えている。

本研究において、美術作品の感動の根源は、本能的な刺激への反応、その相性や個人の経験や体験の想起、概念の理解度、そのニュアンスの記憶などに由来していると考えられる。ただし、本研究にて一致を目指す「神経の反応」とは、個人に依存する主観的な反応ではなく、同じ視覚機能を持つ者であれば概ね共通して生じると考えられる、視覚の初期段階 (V4 野まで) の処理を指すものとする。なぜならば、少数色覚者が色覚の補助に期待するであろうことは、もし同じ個性であった場合に同じ色覚であれば得られたはずの感動であり、各人の経験や信念に基づいた、その作品との相性、つまり、脳の高次機能への介入ではないと思われるからである。

### 2.1.2 前年度取り組みと問題点

前年度の取り組みから、本研究でカバーする少数色覚としては D 型 3 色覚、P 型 3 色覚とした。この 2 つは少数色覚の中でも割合が多い色覚であり、パラメトリックに色覚モデルを作成できると考えたからである。そうであればパラメータと色覚特性を紐づけられ、研究上の取り扱いがよい。

図 1 は、P 型 3 色覚において、標準 C 型色覚での L 錐体分光感度ピーク (赤実線) がシフトパラメータ  $P$  により M 錐体分光感度ピーク (緑実線) へシフトする様子 (赤破線) を表現したものである。なお、D 型 3 色覚では M 錐体分光感度ピーク (緑実線) がシフトパラメータ  $D$  により L 錐体分光感度ピーク (赤実線) へシフトする。このようなシフトは遺伝的な要因によりほとんど連続的に起こることが知られている<sup>4)</sup>。理想的な P 型 3 色覚においては、M 錐体と S 錐体の錐体分光感度分布は標準色覚の場合と同じであり L 錐体のみシフトが起こるとされる。このため、図 1 においては、

赤の破線で示される L 錐体分光感度分布のみが、赤実線の標準色覚の分布からシフトしている。D 型 3 色覚でも同様にグラフを描けるが省略する。このように錐体分光感度が人によって異なることで、同じ光を見ても一般には 2 人の間で錐体刺激である LMS 刺激値は一致せず多様な色覚 (少数色覚と標準色覚を連続的に包括する色覚) が生じる。

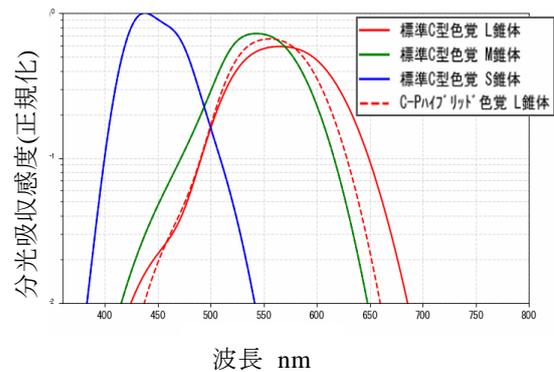


図 1 開発した色覚モデルによる P 型 3 色覚の錐体分光感度

前年度、我々は LMS 刺激値を一致させることを指針とした色調整装置を試作し、当事者 1 名に対しその効果検証・改良した<sup>5)</sup>。ここで課題となったのは多様な色覚者の個別の錐体分光感度の精度の高い推定である。我々が開発した色覚調整アプリケーションは使用者の錐体分光感度  $l(\lambda)$ ,  $m(\lambda)$ ,  $s(\lambda)$  が既知であることが必要である。既存の色覚特性診断装置であるアノマロスコープ検査では、本研究におけるシフトパラメータ  $D, P$  に相当する色覚特性の強度が高くなるほど、その強度に紐づく測定値 (等色ノブ値) の範囲が広くなってしまい、色覚調整アプリケーションの設定値を求めるといった目的に対し精度が不十分である。そこで我々はアノマロスコープ検査をヒントに、より精度高く色覚特性を選択的に判定する方法を検討した。

## 2.2 誤差の起源の分析と精度向上の指針

アノマロスコープは3つの光源を用い、色覚を判定する医療上の色覚検査装置である。黄色の単色スペクトル光源と、赤、緑の単色スペクトル光源の混色を等色するよう操作することで色覚特性を判定する。

アノマロスコープでは、図2に示すように  $x$ - $y$  色度図上  $y = 1 - x$  線分上の赤と緑の混色で、同線分上の黄色を作る。被検者の感度ピークのシフトが大きくなるにつれ認識できる色空間が縮退していくため、色空間上の混色範囲であるこの線分も短くなる。これが測定の誤差拡大の原因と考えられる。そこで、我々はアノマロスコープ検査で採用される色よりも、色空間上の距離が遠い色の組み合わせを使用するために“青と黄の混色”と“緑と赤の混色”を等色する仕組みを採用した。図3はこのアイデアの模式図であり、図4はこのアイデアを搭載した試作機である。

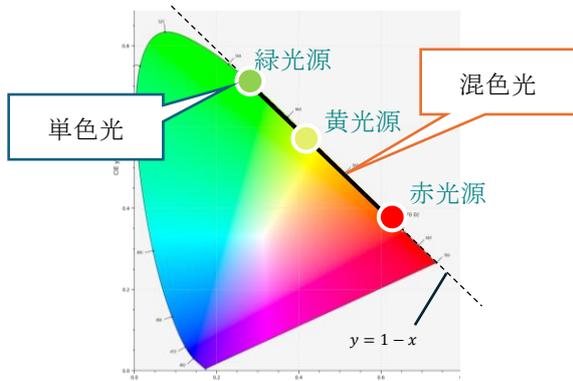


図2 3光源を用いる比較手法での等色の概念図

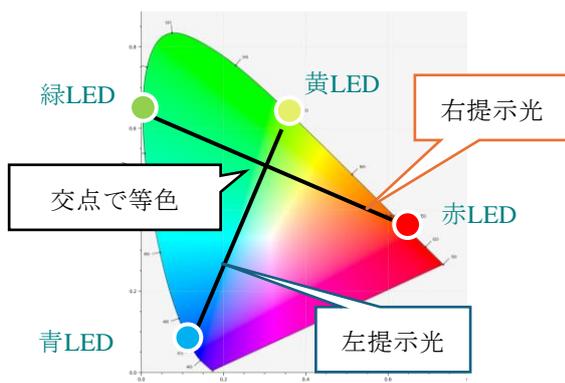


図3 4光源を用いる提案手法での等色の概念図

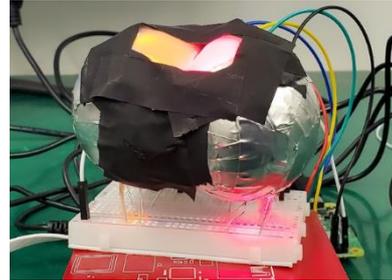
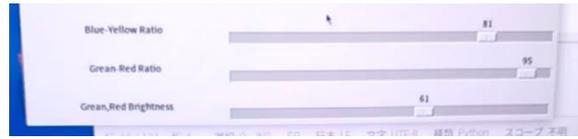


図4 左右それぞれ2光源の等色である試作機

注) 混色はアプリのスライダーから行う。

$x$ - $y$  色度図上、色のついている領域の外縁である曲線は単色スペクトル光の波長を掃引した際に認識される色に相当する。今回の光源はほとんど単色スペクトル光であるLEDを採用したため、模式的に4光源はこの曲線上に配置される。光源2つの混合調整によって作り出せる色は光の線形な性質により辺を成し、図4装置の左右の提示光が等色したとき、ユーザーに認識される色は図3上の交点に相当する。

## 3 実験方法

### 3.1 数値計算による誤差評価の方法

アノマロスコープは医療現場にて色覚の確定診断を目的とし使用される装置である。本報告では、アノマロスコープと比較して試作機の計測精度がどの程度向上するのかシミュレーションにより検証した。その方法としては、仮想的に条件をそろえた場合の誤差比較とし、規格上で定義されるような確定的な色の見分け誤差（色弁別）に基づいて計算を行った。前提条件は以下のとおりである。

シミュレーションの前提条件：

- 1) 色空間上の色弁別範囲は多様色覚者間で共通であり、色覚特性の強度によって認識可能な色空間上の領域が変形・縮小するものとする。これは、色弁別の限界が、LMS 錐体によ

る光の符号化の後段の処理により決まると仮定することに相当する。また、簡易のため人の色の見分けのつかない色空間の距離（色弁別範囲）を  $L^*a^*b^*$  色空間における半径 1 の真球とみなすこととする。

- 2) 装置に用いる 4 つの光源スペクトルは既知とする。また、色覚モデルに  $L$ 、 $M$  錐体それぞれのシフトパラメータ  $D, P$  を与えた場合の仮の錐体分光感度分布は計算できるとする（ただし、本装置ユーザーの真の錐体分光感度分布は未知とする）。このとき、図 4 装置の左右提示光が等色する、青-黄色スライダー割合  $S_{by}(D, P)$ 、緑-赤色スライダー割合  $S_{gr}(D, P)$  をベクトル空間上の問題として解ける。また、 $S_{by}(D, P)$ 、 $S_{gr}(D, P)$  から等色時にユーザーの認識する色も得られ、 $L^*a^*b^*$  色空間での表示では  $Lab(S_{by}, S_{gr})$  となる。ただし、本解析では、簡易のためシフトパラメータやスライダー割合を片方のみに限定する。例えば  $D$  について解析する際は  $P = 0$  とすることで、等色するスライダー割合は  $S_{by}(D)$ 、 $S_{gr}(D)$  となる。また、等色するスライダー割合 ( $S_{by}, S_{gr}$ ) から変化させるスライダー割合も  $S_{by}, S_{gr}$  のいずれかとし  $S$  と表現すれば、シフトパラメータが  $D$  であるユーザーの認識する色は  $Lab^D(S)$  である。
- 3) 本数値計算で求める誤差とは、「色覚測定装置の等色スライダー値  $S_{by}, S_{gr}$  よりシフトパラメータ  $D'$  が測定（逆算）されたとき、真のシフトパラメータ  $D$  がどの程度  $D'$  の周辺範囲  $\Delta D$  に含まれているか」を示すものとする。したがって誤差は、 $D'$  の関数  $\Delta D(D')$  となる。なお  $D'$  は  $[0, 1]$  に正規化されている。

これらの前提の下解析を行ったところ、以下誤差に関する式が得られた。 $\Delta P(P')$  についても  $\Delta D(D')$  と同様の議論が成り立つため、同時に掲載する。

$$\Delta D(D') \Big|_S < \frac{1}{\frac{\partial S(D')}{\partial D} \left| \frac{\partial Lab^{D'}(S)}{\partial S} \right|} \quad (1)$$

$$\Delta P(P') \Big|_S < \frac{1}{\frac{\partial S(P')}{\partial P} \left| \frac{\partial Lab^{P'}(S)}{\partial S} \right|} \quad (2)$$

ここで、 $\partial Lab^{D'}(S)/\partial S$  は、真のシフトパラメータ  $D \approx D'$  である任意のユーザーが等色をしている  $L^*a^*b^*$  色空間局所において、スライダー操作によって図 4 装置の左右それぞれの提示色がどの程度変化するかを示す。 $\partial Lab^{P'}(S)/\partial S$  も同様である。なお、前述の 3.1.2) に記載のとおり、右辺中の偏微分は数値的に計算できるため、左辺をシミュレーション可能である。

右辺は、前提とした色弁別から想定される最大測定誤差範囲を示している。数式 (1) の右辺分母を両辺にかけると、シフトパラメータ  $D$ -スライダー割合  $S$ -色空間  $Lab$  を局所接続する式に相当していることが分かる。この局所接続の式の右辺は 1 となるが、前述の 3.1.1) にて色弁別範囲を  $\Delta Lab = 1$  としたことに由来している。

ただし、数式 (1), (2) は簡易的なものであり、 $L^*a^*b^*$  色空間の弁別球に相当するスライダー割合の 2 次元空間 ( $S_{by}, S_{gr}$ ) 上の楕円が斜め (非直交) 方向に伸長するときには精度が悪化する。

数式 (1), (2) は、図 4 の装置のユーザーが等色するスライダー  $S$  を選んだとき、これに相当する図 3 の色度図上の交点を与える錐体分光感度シフトパラメータ  $D'$  を計算（逆算）によって得たとして、ユーザーの真の錐体分光感度分布のシフトパラメータ  $D$  が  $D'$  のどの程度の周囲  $\Delta D$  内 ( $D' \pm \Delta D$ ) にあるかを与えている。

## 4 結果及び考察

### 4.1 数値計算結果について

4 光源としていくつかのパターンを試したうち、比較手法のアノマロスコープよりも精度が明らかに向上した組み合わせについて、数値計算結果を図 5 に示す。

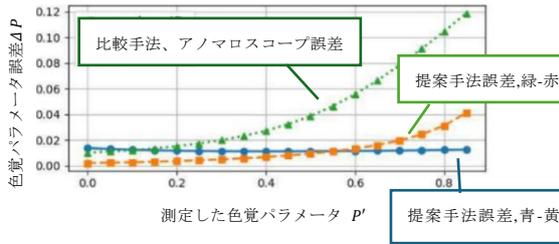


図5 色覚パラメータに対する測定誤差

注) 測定 $P'$ に対し、その周囲に真の $P$ があるとする場合の誤差

図5はP型色覚の錐体分光感度シフトパラメータの推定誤差について、アノマロスコープ検査と提案手法を比較したものである。前項にて説明したとおり、ここでの誤差の由来は、色弁別（人の色の見分けのつかない色空間の距離）のみに基づいており、信頼区間など統計的要素のない確定的なものである。ただし、この色弁別は均等色空間である $L^*a^*b^*$ 色空間において半径1の球と単純化した仮定に基づく。

グラフの横軸は、錐体分光感度分布（図1）における、標準色覚から少数色覚への正規化済みシフトパラメータであり、0にてシフトなし、1にて完全シフトに対応する。したがって、P型色覚の場合には、 $P' = 0$ で標準色覚（C型色覚）に一致し、 $0 < P' < 1$ ではP型3色覚、 $P' = 1$ ではP形2色覚に対応する。また、縦軸は横軸である錐体分光感度分布のシフトパラメータの測定値に対し、真の錐体分光感度分布のシフトパラメータが存在する誤差範囲を示すものである。

ユーザーがスライダー値 $S_{by}, S_{gr}$ にて等色した際に、この値を算出する錐体分光感度分布のシフトパラメータ計測値 $P'$ は理論から一意に得られる。しかし実際には、色弁別に由来して設定したスライダー値 $S_{by}, S_{gr}$ 付近においても等色してしまう。そのため、真の錐体分光感度分布のシフトパラメータ $P$ は計測値 $P'$ から区別する必要がある。

個人の色覚特性及び色弁別範囲と使用光源に由来する $\Delta P$ は、シフトパラメータ $P'$ の色の見分けのつかない範囲であるため、真の $P$ が存在する可能性のある範囲は測定値 $P'$ の周辺( $P' \pm \Delta P$ )と表

せる。したがって $\Delta P$ が小さい方が、錐体シフトパラメータ計測装置の性能が高いため、図5において、横軸のどの $P'$ においても、縦軸の $\Delta P$ が小さい提案手法は高精度な計測手法と言える。

図5では、個人の色覚特性を表す錐体シフトパラメータ $P \approx P'$ が大きくなるにつれ、比較手法も提案手法も誤差が拡大するが、提案手法の方が誤差の拡大を抑えられている。両者とも誤差が拡大する理由は、錐体分光感度分布のシフトパラメータが大きくなるにつれ、知覚できる色空間上の全体の領域が狭まる一方、区別のつかない局所的な色空間上の領域（色弁別）は一定となると仮定したことによると考えられる。3.1 1)で述べたように、色覚特性の強度によって認識可能な色空間上の領域が変形・縮小するため、シフトパラメータが大きい際には、いずれの手法でもスライダーによって表現できる色空間上の線分が、色弁別（XYZ色空間にて楕円体）に対し相対的に小さくなる。極限的には、この線分が色弁別に収まる時、スライダーを変化させても色の変化は感じられなくなる。このときには真のシフトパラメータを含むどのパラメータでも等色してしまうようになるため誤差は極めて大きくなる。数式(2)においては、 $\partial Lab^P(S)/\partial S$ 減に相当する。この傾向は色空間の縮退方向である緑-赤方向に対し強いため、完全に混同線上にあるアノマロスコープや、提案手法においても、緑-赤混色線分で顕著となる。

提案手法の緑-赤スライダーによる錐体分光感度分布のシフトパラメータ推定誤差 $\Delta P(P')$ が比較手法より小さくなる理由については、比較手法での制約である色度図上の $x + y = 1$ 以外の範囲の光源を使うことで、シフトパラメータ $P'$ に対しより大きく $S_{gr}$ や $L^*a^*b^*$ 色空間上の等色点ベクトルが変化する光源を選んでいたからと思われる。なぜ、より大きな変化がもたらされたかという $x + y = 1$ 制約がなくなることで、錐体分光感度分布中、シフトパラメータの変化に対し、急峻に分光感度の変化を検知できる波長付近に光源スペクトルをおけたからと考えている。これは、

錐体分光感度分布の裾における非線形さと光源が LED であることによるスペクトルの鋭さに由来していると考えられる。数式(2)においては、 $\partial S(P')/\partial P$  増に対応する。

なお、 $P = 0.1$ 未満において、青黄比率スライダー  $S_{by}$  を用いる際の提案手法の誤差が、比較手法より大きくなっているが、測定ではスライダーは誤差  $\Delta P$  が小さい方 (今回の場合  $S_{gr}$ ) のみを使えば基本的には十分である。

また、図を掲載していないが、 $\Delta D(D')$  の数値計算も行った。この結果においては  $D > 0.6$  にて、スライダー比率がマイナス (線分外) となり測定不能となってしまったが、 $D < 0.6$  にて  $\Delta P(P')$  同様に精度の改善が認められた。測定不能領域については光源の取り方などで改善できる可能性がある。

## 5 まとめ

### 5.1 今年度進捗

本研究では、芸術作品における色彩構造の知覚を多様な色覚の間で共有するため、個人ごとの錐体分光感度パラメータを高精度に推定する測定手法の検討を行った。今年度は、アノマロスコープと比較した数値シミュレーションにより、提案した4光源等色方式が比較手法よりも誤差を低減できることを確認した。

これにより、今後の実機評価及び色覚調整アプリケーションへの適用に向けた有効性を示すことができた。

### 5.2 今後の課題

本手法はシミュレーション上で比較手法に対し精度向上が見られたため、少数色覚当事者を対象とした実機による性能検証を進める必要がある。

また、本報告では色弁別として  $L^*a^*b^*$  空間上の球近似を用いた 1次元解析を行ったが、今後は DE2000 などの色差式を用いた楕円体色弁別の採用や 3次元での解析に拡張し、より実際の知覚に即したシミュレーションを行う必要がある。

さらに、色覚調整アプリケーションについては、当事者を対象とした美術的・実用的観点での介入効果の検証を行い、調整アルゴリズムの改善につなげていく予定である。

### 参考文献

- 1) 山下雅彦, 横田一正, 株式会社両備システムソリューションズ “色覚異常の人々を補助するソフトウェアの開発”, 26th Fuzzy System Symposium Hiroshima, September 13-15, (2010)
- 2) 大塚作一, 比良祥子 “色相ブレンド法を用いた携帯型2色覚補助ツール” 電子情報通信学会大会講演論文集 (Sep.03,2013)
- 3) 内川恵二, 篠森敬三 “視覚 I 視覚系の構造と初期機能”, 朝倉書店
- 4) 江島義道, “三色過程から反対色過程への変換機序”, 心理学評論, vol.28. no. 1, 87-110 (1985)
- 5) 岡崎祥吾, 鈴木浩之, 半田隆志, “多様な色覚者同士が美術的意図を損なわずに配色を伝達する手法”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 22, pp. 46-50 (2024).

## 埼玉県乳酸菌ライブラリーの構築

松本美樹\* 和田健太朗\*

### Establishment of the Saitama Prefecture Lactic Acid Bacteria Library

MATSUMOTO Miki\*, WADA Kentaro\*

#### 抄録

北部研究所では過去に乳酸菌に関する研究が多数実施され、様々な食品・環境から分離された約200株の乳酸菌が保存されている。本研究では埼玉県乳酸菌ライブラリー構築を目的として、基盤情報となる乳酸菌の特徴や食品への適性を調査した。未同定菌株の同定試験及び食品への適性試験を実施した結果、120株の菌種同定に成功し、77株の優良乳酸菌株候補を選抜した。食品適性試験として実施した項目は牛乳凝固性、豆乳凝固性、耐塩性であり、各特徴を有する菌株はそれぞれヨーグルトやチーズ等の乳製品や、プラントベース発酵食品、醤油・味噌・漬物等の発酵食品への利用が期待される。

キーワード：乳酸菌，牛乳凝固，豆乳凝固，耐塩性

## 1 はじめに

乳酸菌はヨーグルトやチーズ等の乳製品製造に主として使用されるほか、清酒・味噌・醤油・漬物など多様な食品の製造に利用されている。近年では乳酸菌の腸内環境改善効果やストレス緩和作用の機能性が注目され、乳酸菌入りの菓子類や乳酸菌を高濃度含む乳酸菌飲料等も人気が高まっている。埼玉県産業技術総合センター北部研究所でも過去に乳酸菌に関する研究<sup>1)~5)</sup>が実施され、様々な食品や環境から分離された約200株の乳酸菌が保存されている。優良な株は県内企業に有償で頒布しているが数はまだ少なく、県内企業がニーズに合った乳酸菌を選択する際に利用できる乳酸菌ライブラリーの構築が急務である。そこで本研究では、現在北部研究所で保有している乳酸菌の特徴を調査し、乳酸菌ライブラリーの基盤情報蓄積を試みた。

## 2 実験方法

### 2.1 菌種同定試験

北部研究所で保有している乳酸菌のうち、菌種が未同定であった菌株 43 株の推定試験・同定試験を実施した。推定試験は乳酸菌同定キット(ビオメリュー・ジャパン(株)製 API50CHL)を使用した。培養後、プレート上の 49 種類の炭素源の資化性パターンから菌種を推定した。また、同定試験は、細菌の種の同定に用いられる 16S rRNA の塩基配列を解析することにより行った。塩基配列の解析は(株)マクロジェン・ジャパンへ委託した。

### 2.2 牛乳凝固試験

1 mL の MRS 培地(BD 社製)で、乳酸菌を 30℃ で 48 時間培養した。市販牛乳に、培養液を 10% 添加し、30℃及び 40℃で 24 時間発酵させた。発酵後、目視観察と pH 測定により牛乳凝固性を評価した。

\* 食品・バイオ技術担当

### 2.3 豆乳凝固試験

1 mL の MRS 培地で、乳酸菌を 30°C で 48 時間培養した。市販豆乳に、培養液を 10% 添加し、30°C で 30 時間発酵させた。発酵後、目視観察と pH 測定により豆乳凝固性を評価した。

### 2.4 耐塩性試験

1 mL の MRS 培地で、乳酸菌を 30°C で 48 時間培養した。10%食塩添加 MRS 培地に培養液を 10% 添加し、30°C で 48 時間培養を行った。培養後、目視観察により生育を確認し、耐塩性を評価した。

## 3 結果及び考察

### 3.1 菌種同定試験

北部研究所で保有しており、分離源の判明している乳酸菌 207 株のうち、菌種が未同定であった菌株 43 株の同定試験を新たに実施し、合計で 120 株の菌種同定が完了した。菌種の内訳は表 1 のとおりである。なお、菌種同定が完了した菌株のうち、*Enterococcus* 属 8 株及び *Weisella* 属 6 株は食品製造には適していない可能性があるため、以降の実験では使用を中止した。

### 3.2 牛乳凝固試験

牛乳凝固試験を実施した 102 株中 39 株で牛乳凝固がみられた。凝固程度の差と菌種は表 2 のとおりである。凝固程度が優、あるいは良の 26 株はいずれも凝固後の香りはヨーグルト様の良好な香りであった。

### 3.3 豆乳凝固試験

豆乳凝固試験を実施した 84 株中 72 株で豆乳凝固がみられた。凝固程度の差と菌種は表 3 のとおりである。凝固程度が優の 16 株はカッテージチーズ様のタンパク質凝固がみられ、凝固程度が良の 52 株はヨーグルト様になめらかな凝固がみられた。凝固後の香りはヨーグルト様のものや豆乳らしい豆感のある香り等多様性があり、良好な香りのものが多かった。

表1 菌種内訳

菌種	株数	分離源
<i>Lactococcus lactis ssp lactis</i>	22 株	自然環境、パン種、漬物
<i>Lactiplantibacillus plantarum</i>	7 株	自然環境、漬物
<i>Pediococcus pentosaceus</i>	14 株	米粉パン種、米粉、米麴
<i>Leuconostoc citreum</i>	4 株	米粉パン種、米粉
<i>Tetragenococcus halophilus</i>	49 株	醤油もろみ、醤油
<i>Lactiplantibacillus pentosus</i>	3 株	漬物
<i>Levilactobacillus brevis</i>	1 株	漬物
<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	1 株	漬物
<i>Fructilactobacillus sanfranciscensis</i>	2 株	パン種
<i>Lacticaseibacillus paracasei</i>	1 株	α 化米米粉パン種
<i>Companilactobacillus kimchii</i>	1 株	漬物
<i>Latilactobacillus curvatus</i>	1 株	みかん酒

表2 牛乳凝固菌種

凝固程度	株数	菌種
優 (+++)	2 株	<i>L. plantarum</i>
良 (++)	24 株	<i>L. lactis</i> <i>L. plantarum</i> <i>P. pentosaceus</i> <i>L. pentosus</i> <i>L. curvatus</i>
可 (+)	13 株	<i>L. lactis</i> <i>P. pentosaceus</i> <i>T. halophilus</i>

表3 豆乳凝固菌種

凝固程度	株数	菌種
優 (+++)	16 株	<i>P. pentosaceus</i> <i>L. citreum</i> <i>L. paracasei</i> <i>C. kimchii</i> <i>L. curvatus</i>
良 (++)	52 株	<i>P. pentosaceus</i> <i>L. pentosus</i> <i>L. plantarum</i> <i>T. halophilus</i> <i>L. lactis</i> <i>L. brevis</i> <i>L. mesenteroides</i> <i>F. sanfranciscensis</i> <i>L. curvatus</i>
可 (+)	4 株	<i>T. halophilus</i> <i>L. lactis</i>

### 3.4 耐塩性試験

耐塩性試験を実施した 50 株中 50 株で 10%耐塩性が確認された。菌種は表 4 のとおりであり、漬物や醤油もろみ、醤油など塩分を多く含む環境から分離された菌株であった。

表4 耐塩性菌種

塩分濃度	株数	菌種
10%	50 株	<i>L. plantarum</i> <i>T. halophilus</i>

## 4 まとめ

本研究にて菌種同定された菌株は一部の *Enterococcus* 属及び *Weissella* 属を除き、全て食品からの分離報告例や食品への利用例のある菌種であったため、食品製造に適した菌株であると考えられる。また、特性評価を実施した菌株のうち、凝乳性のある菌株はヨーグルトやチーズ等の乳製品、豆乳を滑らかに凝固させる菌株は豆乳ヨーグルト、豆乳をしっかりと凝固させる菌株はプラントベース食品（チーズ様食品や大豆ミートなど）への利用が期待される。また、耐塩性のある菌株

は、醤油、味噌、漬物、チーズなど食塩を多く含む食品への利用が期待できる。今後さらに、実際の食品製造に類似した条件での特性試験や試作試験を実施することで、さらに各食品への適性を明らかにすることができると考えられる。これらの基盤情報をまとめてライブラリー化することで、乳酸菌頒布事業がより利用しやすくなることが期待される。また埼玉県内で分離された優良な乳酸菌を用いた新製品や、県内企業同士のコラボレーション製品等の開発に積極的に利用されることを期待する。

### 謝辞

本研究を進めるに当たり、客員研究員として御指導いただきました高崎健康福祉大学の辻聡講師に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 井上和春, 大澤千恵子, 高橋広子, 石川準一, 吉岡久雄, 又重英一, “乳酸菌・酵母を利用した新規穀類加工食品の開発 (第 2 報)”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 3, pp. 66-68 (2005).
- 渡辺泰成, 横堀正敏, 増田こずえ, 奥沢洋平, 館博, “微生物利用による生体機能調節物質の生産に関する研究”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 3, pp. 61-65 (2005).
- 細井永次, “新規の  $\gamma$ -アミノ酪酸高生産菌の検索及び食品加工残渣への応用”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 6, pp. 88-92 (2008).
- 鶴菌 大, 細井永次, 富永達矢, 常見崇史, “新規減塩漬物の製造技術の開発”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 11, pp. 13-16 (2013).
- 原田雅典, 和田健太郎, 松本美樹, 秋山稔, 山川翔平, “森林資源を活用した新たな食品開発—植物由来乳酸菌の探索と食品への利用検討—”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 22, pp. 33-36 (2024).

## バイオプラスチック実用化研究（第一報）

小宮直己\*<sup>1</sup> 川翔真\*<sup>1</sup> 山田岳大\*<sup>1</sup> 坂本大輔\*<sup>2</sup>

### Research for the Practical Application of Bioplastics

KOMIYA Naoki\*<sup>1</sup>, KAWA Shoma\*<sup>1</sup>, YAMADA Takehiro\*<sup>1</sup>, SAKAMOTO Daisuke\*<sup>2</sup>

#### 抄録

日本の農業では人手不足解消に向けた作業効率向上と、ごみ排出抑制や脱炭素など環境負荷低減が求められており、生分解性資材の需要が増加している。土壌や海洋中で水と二酸化炭素に分解されるプラスチック（PHA：P3HB-co-3HHx）を農業資材に活用することができれば、使用後に土壌へ還元され、その廃棄処分費用や作業負荷も低減させることができるため、サーキュラーエコノミーへとつながる製品となる。本研究では農業資材として必要なPHAの耐久性と分解性を調査した結果、夏季の農地で2ヵ月まで形状を維持する耐久性を有し、その後崩壊することが分かった。

キーワード：PHA，分解・耐久性，農業資材，フィールドテスト，サーキュラーエコノミー

#### 1 はじめに

プラスチックは安価で成形加工性が良く、量産性が高いことから、家電や自動車等の様々な用途の製品に適用され、市場を拡大させて社会を豊かにしてきた。プラスチック産業は大量生産・大量消費・大量廃棄による線形経済を主体としている。そのため、産業が発展し市場規模が拡大すると、プラスチックの原材料となる資源の確保の問題、及びプラスチック廃棄処理の際に生じる温室効果ガスの発生や環境中へのごみの流出といった環境問題が顕在化している。

これらの環境問題を解決する方法として、脱炭素やリデュース・リユース・リサイクルの3Rが推進されてきた。近年では、経済発展を伴いながら資源を効率的・循環的に利用する循環経済「サーキュラーエコノミー」が推進されている<sup>1)</sup>。さらなる環境負荷低減や経済発展には、サーキュラーエ

コノミーへの転換に加え、2019年5月31日に策定された「プラスチック資源循環戦略」にもある<sup>2)</sup>バイオプラスチックの利用促進が重要である。

環境配慮の観点から、バイオプラスチックの中でも、非化石燃料由来であり、環境中で生分解するプラスチックに着目した。当センターでは、特に微生物により産生され、土壌や海洋等の環境中の微生物の働きで水と二酸化炭素に分解されるポリヒドロキシアルカン酸からなるプラスチックのうち、3-ヒドロキシブチレート（3HB）と3-ヒドロキシヘキサネート（3HHx）の共重合体であるP3HB-co-3HHxに着目し研究開発に取り組んできた<sup>3,4)</sup>。

今後は、市場開拓を見据えた適用先の検討が必要である。P3HB-co-3HHxは生体親和性が高いことから医療分野においても利用が進んでいる。また、カトラリーや食品関連への適用、課題を抱える農業資材への適用が期待されている<sup>5)</sup>。

近年、日本の農業は高齢化や担い手不足等の問題を抱えており、作業効率の向上が求められている。また、ゴミや温室効果ガス等の環境負荷の低

\*<sup>1</sup> 機械技術担当

\*<sup>2</sup> 化学技術担当

減も重要な課題である。従来から広く使用されるプラスチック製の農業資材は、廃棄処理に伴う温室効果ガスの発生、意図しない使用中の製品一部の環境流出等により環境負荷の一因となっている。これらの環境課題を踏まえ、農業資材にP3HB-co-3HHxを活用することにより、使用後は土壌に埋め込んでも分解されるため、廃棄物の回収や処理に伴う費用や作業負荷も削減でき、持続可能な経済発展を目指すサーキュラーエコノミーの実現に寄与する製品となりうる。そこで、令和6年度から資源循環型農業資材の開発に向けた研究を実施した。

農業資材への適用に向けては、まずP3HB-co-3HHxの分解性や耐久性の把握、農作物への影響、分解における環境影響の調査が重要である。P3HB-co-3HHxについては、試験土壌や海漂林といった実際の環境、または分解酵素を用いた分解性や耐久性の調査が行われている<sup>6,7,8,9)</sup>。農地は作物の生産性向上のために改良されており<sup>10)</sup>、P3HB-co-3HHxの耐久性は試験土壌や自然環境と異なることが予想される。しかしながら、農地でのP3HB-co-3HHxの特性は十分に評価されていない。

そこで、埼玉県の3つの研究機関が連携し、P3HB-co-3HHxの農業資材への適用について検討した。研究体制を図1に示す。製品化に係る開発研究を担う産業技術総合センターを中心に、環境評価は環境科学国際センター、農業に関する助言・評価は農業技術研究センターが担い、それぞれ検討した。

当センターでは、農地におけるP3HB-co-3HHxの耐久性・分解性の影響を評価し、その一部を学会で報告した<sup>11)</sup>。本報告では、その内容に詳細な結果を加えるとともに、農作物の生育や安全性への影響を検討した結果について述べる。

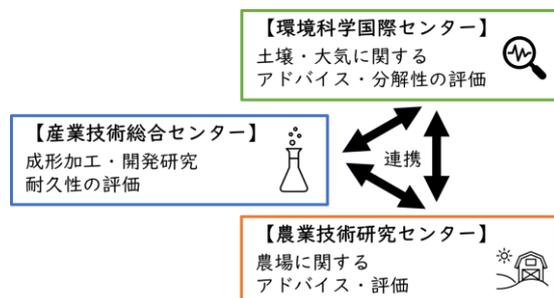


図1 研究体制

## 2 実験方法

### 2.1 試験片作製

試験片の材料には、3HHxの共重合割合が25mol%であるP3HB-co-3HHxを用いた。射出成形機（Rambaldi社、Babyplast6/12P）にて厚さ2mm、40mm角板に成形した。その後、熱プレス機（㈱アズワン、AH-2001）で厚さ $0.5 \pm 0.1$ mmのシートに成形した。その後、試験片打ち抜き刃（高分子計器㈱）によりJIS K 6251引張 8号形に調製した。

### 2.2 農地耐久性試験

評価期間は夏季の4ヵ月間とした。評価場所として、資源循環型社会の構築を目指す環境整備センター（埼玉県大里郡寄居町大字三ヶ山）に整備されたパイロットファーム（図2）を選定した。評価スキームを図3に示す。パイロットファームの土壌を投入したプランター（長さ:503mm、幅:670mm、高さ:473mm）に、試験片（n=3）とその土壌を入れた不織布製の袋を複数個入れた後、覆土した。使用した土壌は、牛糞堆肥を約1.6vol%施肥された赤土である。

農作物への影響を評価するため、覆土1ヵ月後に試験片近傍でジャガイモの植え付けを実施した。作物育成状況を見ながら、食品残渣からなるリサイクル堆肥（㈱アイル・クリーンテック、めばえ）を追肥した。

試験片は1ヵ月ごとに取り出し、デジタルマイクロスコープ（ライカマイクロシステムズ、DVM6）による表面観察と、赤外分光光度計（サーモフィッシャーサイエンティフィック、Nicolet iN10MX+Nicolet iZ10）による分析を行った。そして、覆土4ヵ月後に、ジャガイモを収穫し、外観評価による生育状態も確認した。その他、収穫したジャガイモは、作物の安全性について、P3HB-co-3HHx成形品製造時に現状唯一混入が懸念される重金属類のうち、農林水産省が公表している有害化学物質（カドミウム、ヒ素、鉛及び総水銀）の影響を評価した。



図2 パイロットファームの外観

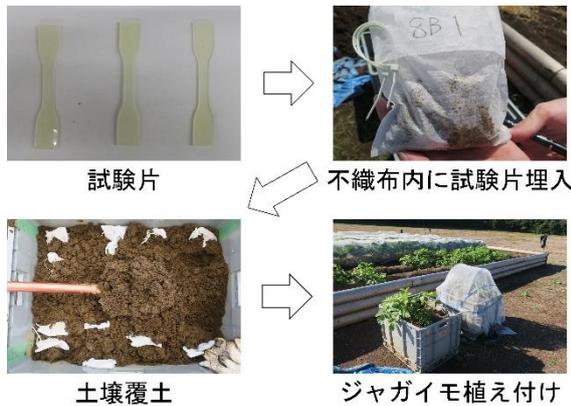


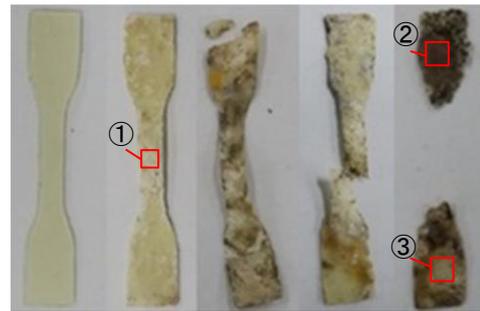
図3 農地における耐久性評価のスキーム<sup>1)</sup>

### 3 結果及び考察

覆土前の試験片と覆土1ヵ月後から4ヵ月後の試験片の外観写真を図4に示す。覆土1ヵ月後では表面状態に変化が見られるが、元の形状を維持している。しかし、2ヵ月以降では、試験片が分断し、試験片の崩壊が始まったことが確認できる。覆土4ヵ月後の試験片では、サンプルの大半が崩壊した。図5に覆土1ヵ月後の試験片(図4①の領域)と、図6に4ヵ月後の試験片(図4②の領域)の表面拡大写真を示す。覆土1ヵ月後では、覆土前には平滑であった表面が凹凸状に変化した。覆土4ヵ月後では、表面に、赤茶色の繊維状の物質がフィルム状に形成していることを確認した。

赤茶色の繊維状の物質が緻密に集合している箇所(図4 ②)と試験片の表面が露出した箇所(図4 ③)の赤外吸収スペクトルを図7に示す。③はブランクのスペクトルとほぼ同様であった。一方、②のスペクトルは、 $1500\sim 1700\text{cm}^{-1}$ のアミド結合に由来するピークや、 $3400\text{cm}^{-1}$ 付近や $1100\text{cm}^{-1}$ 付近の多糖類に由来するピークが見られ、カビのスペ

クトル<sup>12)</sup>と類似していた。これら表面観察及び赤外分光光度計のスペクトルから、赤茶色の繊維状の物質はカビであると推察した。時間の経過に伴い、試験片表面付近でカビ等の微生物が繁殖したことにより、試験片の崩壊が進んだと考察した。図8に試験片近傍で成長したジャガイモの外観を示す。通常の農作物と比較して遜色なく生育し、収穫物も外観で異常は確認されなかった。収穫物に対し、有害化学物質(カドミウム、ヒ素、鉛及び総水銀)含有調査を実施し、 $0.01\text{ppm}$ (総水銀のみ $0.001\text{ppm}$ )を超えて検出される物質はなかった。



0ヵ月 1ヵ月 2ヵ月 3ヵ月 4ヵ月

図4 覆土後の試験片外観経時変化



図5 覆土1ヵ月後の試験片表面拡大写真



図6 覆土4ヵ月後の試験片表面拡大写真

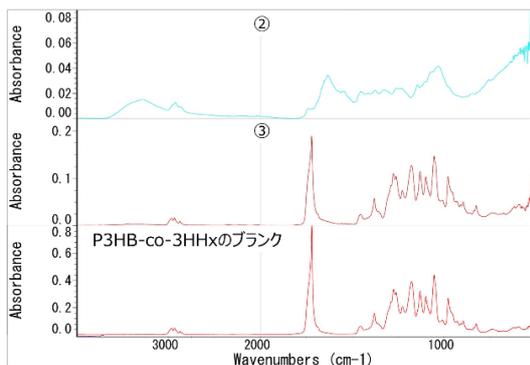


図7 試験片の赤外吸収スペクトル<sup>11)</sup>



図8 試験片近辺の収穫物（ジャガイモ）の外観

#### 4 まとめ

本研究では、農業資材への活用に向けて、農地における非化石燃料由来の生分解性プラスチック（P3HB-co-3HHx）の耐久性、分解性、並びに農作物の生育や安全性への影響を検討した。

夏季の農地で覆土されたP3HB-co-3HHxは2ヵ月まで形状を維持する耐久性を有し、その後崩壊することが分かった。分解が進行した試験片では表面にカビと考えられる繊維状の物質がフィルム状に形成された。試験片近傍の農作物は通常の作物と同等に生育し、重金属において収穫物から指標を超えるものはなかった。

夏季の農地において、2ヵ月程度まで形状を保ち、その後分解が求められる育苗ポットのような農業資材への適用が有効であると推察された。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省 産業技術環境局，“資源循環経済対策の現状と課題について”，(2023).
- 2) 環境省，“プラスチック資源循環戦略につい

て”，<https://plastic-circulation.env.go.jp/about/senryaku> (accessed 2025.09.26).

- 3) 山田岳大, 井上浩三, クマール ケー スデッシュ, “樹脂組成物、その成形品、並びにエラストマー組成物及びその成形品の物性を変化させる方法”, 特開 2023-093388.
- 4) 山田ほか, “生分解性バイオプラスチックの耐久性に関する研究”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 22, no. 2, pp. 6-10 (2024).
- 5) 加部泰三, 岩田忠久, “自然環境中で分解する繊維～微生物産生ポリエステル繊維の作製と酵素分解性～”, 繊維学会誌, vol. 75, no. 3, pp. 162-168 (2019).
- 6) 小池ほか, “赤外分光イメージングによるポリヒドロキシアルカン酸 (PHA) バンド球晶の結晶配向と分解速度の関係性評価”, プラスチック成形加工学会第 36 回年次大会, H-105 (2025).
- 7) 小野ほか, “CNF 補強による生分解性プラスチックの土壌試験における分解性”, プラスチック成形加工学会第 31 回秋季大会, A-202 (2023).
- 8) Post, Wouter et al, “Effect of mineral fillers on the mechanical properties of commercially available biodegradable polymers”, *Polymers*, vol. 13, no. 3, 394 (2021).
- 9) Sridewi, Nanthini et al, “Degradation of commercially important polyhydroxyalkanoates in tropical mangrove ecosystem”, *Polymer degradation and stability*, vol. 91, no. 12, pp. 2931-2940 (2006).
- 10) 農林水産省 農産局農業環境対策課, “農地土壌をめぐる事情”, (2025).
- 11) 小宮直己, 川翔真, 坂本大輔, 山田岳大, “実農地における P3HB-co-3HHx の耐久性評価”, 成形加工学会第 33 回秋季大会, P-25 (2025).
- 12) 三嶋洋介, “工業製品における付着混入異物の分析法と事例”, 大阪府立産業総合研究所報告, vol. 14, no. 10, pp. 56-60 (2000).

## 競技用車椅子へのマルチボディダイナミクス解析の適用に関する基礎的検討

都知木邦裕\*<sup>1</sup> 南部洋平\*<sup>1</sup> 半田隆志\*<sup>2</sup> 香西良彦\*<sup>2</sup>

## Fundamental Study on Multibody Dynamics Analysis for Sports Wheelchairs

TOCHIKI Kunihiko\*<sup>1</sup>, NAMBU Yohei\*<sup>1</sup>, HANDA Takashi\*<sup>2</sup>, KOZAI Yoshihiko\*<sup>2</sup>

## 抄録

競技用車椅子は、選手のパフォーマンスを向上させるため高い運動性能が求められる。車椅子バスケットボールでは、旋回動作の機動性が競技パフォーマンスに直結し、フレーム剛性等の構造特性がその性能に影響を与える。本研究では、マルチボディダイナミクス (MBD) 解析を用いて、旋回中のフレームひずみを算出し、実験結果と比較することで解析手法の妥当性を検討した。結果として、解析により得られたひずみ値は実験値よりも小さく、解析の精度に課題があることが分かった。

キーワード：マルチボディダイナミクス解析，競技用車椅子，旋回性能

## 1 はじめに

車椅子バスケットボールは、高い機動性と俊敏な旋回動作が求められる競技であり、競技用車椅子の設計は選手のパフォーマンスに大きな影響を与える<sup>1)2)</sup>。特に、旋回性能は試合中の素早い方向転換やポジショニングに直結し、車椅子のフレーム構造や剛性がその特性を左右する重要な要素となる。

これまで競技用車椅子の設計検討は、選手の使用感や開発者の経験に基づく試作・実験を中心に進められてきており、旋回動作のような動的挙動とフレーム構造との関係を力学的に検討する手法は十分に確立されていない。

近年、マルチボディダイナミクス (MBD: Multibody Dynamics) 解析は、車両やロボットの運動性能の評価に広く用いられており、剛体運動と関節の力学的作用を精密に解析できる手法として発展している。しかし、車椅子の設計にMBD解析を適用した例は少ない。

\*<sup>1</sup> 機械技術担当\*<sup>2</sup> 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

本研究では、バスケットボール用車椅子の旋回動作におけるフレームひずみをMBD解析と実験によって比較評価し、MBD解析の適用における技術課題を明らかにすることを目的とする。

## 2 実験及び解析方法

## 2.1 実験方法

バスケットボール用車椅子の旋回動作中のフレームのひずみを評価するため、実際の競技用車椅子を用いた計測実験を実施した。競技用車椅子には松永製作所製のセミリジッド型バスケットボール用車椅子を用いた。旋回動作によるフレームの動的な変形を把握するため、フレームの主要部位にひずみゲージを取り付け、ひずみの変化を測定した。実験に用いた車椅子を図1に示す。計測には共和電業製ひずみゲージ (KFGS-2-120-C1-23) を使用し、データ収集にはキーエンス製データロガー (NR-500)、ひずみ計測ユニット (NR-ST04) を用いた。

また、選手の運動を記録するためにモーションキャプチャシステムの NORAXON 製ウルティウムモーションを用いた。

実験は体育館のコートで実施し、20m 直進後に 90 度の急旋回を行う条件で行った。被験者は健常者の競技経験者 1 名（身長 175cm、体重 80kg）とした。実験状況を図 2 に示す。

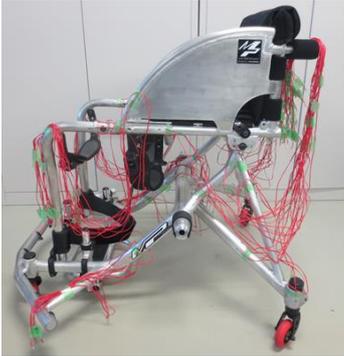


図 1 実験用車椅子



図 2 実験状況

## 2.2 解析方法

本研究では Altair Engineering 社の Motion View 及び Motion Solve を使用して MBD 解析を行った。車椅子のモデルは、フレームのひずみを評価するため、フレームを弾性体、車輪を剛体とするモデルを作成した。フレームのうち、ひずみの評価対象とした曲げ管部分表面のひずみを直接評価可能なシェル要素でモデル化し、その他のフレーム部材はビーム要素でモデル化した。タイヤと床の摩擦係数は静摩擦係数を 0.65、動摩擦係数を 0.45 とした。人体モデルは Motion View の人体モデルを使用した。解析モデルを図 3 に示す。

解析条件として、実験で計測した車椅子の旋回直前の速度を与えて直進走行させ、実際の選手の旋回時の車椅子操作に合わせ、片側の車輪を急停止させて旋回を模擬した。

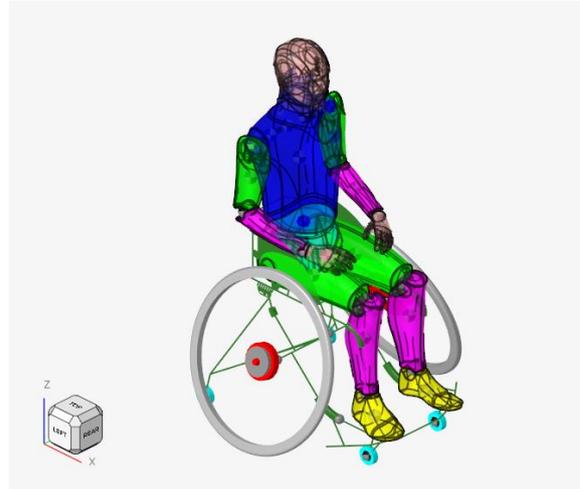


図 3 解析モデル

## 3 結果及び考察

バスケットボール用車椅子の旋回動作中のフレームひずみを測定し、主要部位における最大ひずみ値を求めた。ひずみは静止時のひずみをゼロとして計測した。測定位置は座面下の主フレームの側面とし、その位置を図 4 に示す。また、旋回中のひずみの時刻歴を図 5 に示す。

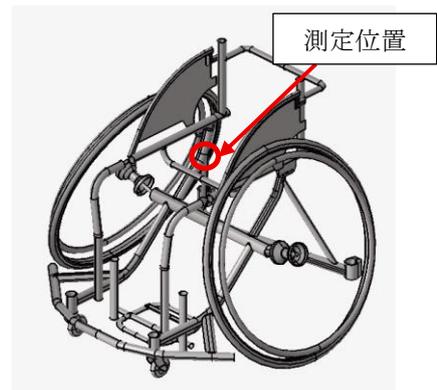


図 4 ひずみ計測位置

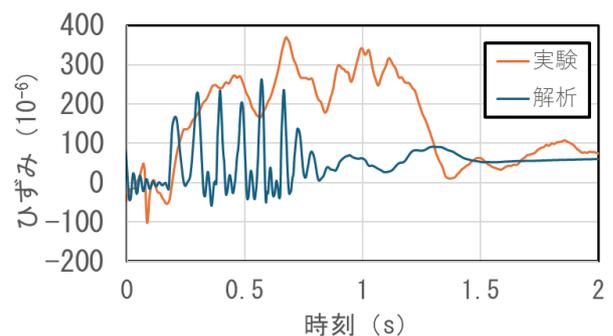


図 5 旋回時のひずみ時刻歴（旋回中）

座面下のフレームの最大ひずみは実験では  $370 \times 10^{-6}$ 、解析では  $263 \times 10^{-6}$  となり、実験結果は解析結果を大きく上回った。

解析に比べて実験のひずみが大幅に大きい点については、タイヤが遠心力により旋回外側に断続的に滑る (stick-slip) 現象が発生しており、解析ではその現象を十分に再現できていないことが要因と考えられる。

#### 4 まとめ

本研究では、車椅子の設計に MBD 解析を適用する際の技術課題を明らかにすることを目的に、バスケットボール用車椅子を対象として、旋回動作中のフレームに生じるひずみを実験と解析で比較した。

実験結果は解析結果を大きく上回ることが確認された。誤差が大きい要因としては、実験で発生したタイヤの断続的な滑り現象を解析では再現できていないためと考えられる。このことから、誤差低減のための手段として、タイヤや床との接触条件のモデル化精度を向上させる必要があると考える。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重な助言をいただきました東京都立大学 信太奈美准教授に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 半田隆志, 香西良彦, 都知木邦裕, “車椅子バスケットボール用車椅子の最適化と設計指針開発 (第1報)”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 20, no. 5, pp.36-40(2022).
- 2) 半田隆志, 香西良彦, 都知木邦裕, “車椅子バスケットボール用車椅子の最適化と設計指針開発 (第2報)”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 21, no. 5, pp.17-21(2023).

## ビール醸造に適した酵母の探索

和田健太郎\*<sup>1</sup> 原田雅典\*<sup>2</sup>

## Isolation of Yeast Strain Suitable for Beer Brewing from Plants in the Chichibu Region

WADA Kentaro\*<sup>1</sup>, HARADA Masanori\*<sup>2</sup>

抄録

秩父地域からマルトース発酵性のある酵母の分離を試み、得られた酵母のビール醸造適性を評価した。その結果、リンドウとミズキの二つの花から酵母を分離することができた。これらの酵母は26S rRNA 遺伝子のD1/D2領域の塩基配列解析から、*Lachancea thermotolerans* と *Lachancea meyersii* と同定された。麦汁発酵試験を行ったところ、いずれの酵母も市販ビール酵母と比較して、炭酸ガスの減少は緩やかに推移したものの最終アルコール濃度は同程度となった。また、製成酒の糖や有機酸の組成は市販ビールのものと異なっていた。今後、これらの酵母の特性を活かした新規ビール開発が期待される。

キーワード：酵母，花，ビール，有機酸，地域資源

## 1 はじめに

近年、全国的にクラフトビールがブームになっており、県内においても新規の醸造所は増加傾向にある。各社様々な果物や素材を副原料として使った個性的なビール造りに取り組んでいる<sup>1)</sup>。しかし、多くのビール醸造では市販の酵母を使用しているのが現状である。一方、日本酒業界では、地域ごとに自然界から酵母を分離し、その土地ならではの個性的な日本酒を生み出している。これらの地域固有の酵母は、ビール造りにも新たな可能性を秘めている。自然界から分離した酵母を使ったビールは、地域の特徴を表現し、ストーリー性のある商品として消費者の関心をひきつけることが期待される。

そこで本研究では、県オリジナルのビール開発を目的とし、秩父地域の花を中心とした森林資源から麦汁の主要糖であるマルトースを発酵できる酵母を分離し、ビール醸造適性の評価を行った。

\*<sup>1</sup> 食品・バイオ技術担当\*<sup>2</sup> 現 材料技術担当

## 2 実験方法

## 2.1 酵母の分離

試料は、秩父地域の森林を主な採取場所として、花や実を採取した。採取した試料は、YPM6 培地(酵母エキス 1%、ペプトン 2%、マルトース 6%)<sup>3)</sup> をオートクレーブ後、クロラムフェニコールを 100mg/L (エタノールに 0.1g/mL 溶解して添加)、プロピオン酸ナトリウムを 2g/L となるよう調製した液体培地に加え、28°C で約 7 日間集積培養した。濁りが認められた培養液の一部をガストラップチップの入った YPM6 液体培地で培養しガス生産性を確認した。YPM6 培地に寒天を 2% となるように加えて調製した平板寒天培地にガス生産が確認できた培養液を画線塗抹し、28°C で 24 時間培養した。生育したコロニーを釣菌し、別の YPM6 平板寒天培地で継代して純化した。

形態観察は、走査型電子顕微鏡(日本電子(株)製 JSM-IT300LA)により行った。走査型電子顕微鏡用の試料作製は、2% グルタルアルデヒド溶液で固定し、50~100% エタノール溶液で順次脱水後、t-ブ

チルアルコール凍結乾燥を行った。

## 2.2 酵母の同定

分離した酵母を同定するため、26S rRNA 遺伝子の D1/D2 領域の塩基配列を解析した。遺伝子解析は、(株)マクロジェン・ジャパンへの委託試験により行った。

## 2.3 キラー性試験

他の酵母の発酵を妨げるキラー性を確認するため、分離した酵母を YPD 平板寒天培地 (BD 社製) 上で市販のビール酵母 Safale S-04、S-33 (FERMENTIS 社製) と交差するように画線塗布し、28℃で24時間培養した。交差部位に、酵母の生育が抑制されて生じる透明なハローの有無を確認した。

## 2.4 麦汁発酵試験

麦汁にはモルトエクストラクト (Muntons 社製) を使用した。Brix13 になるように調整した麦汁 50 mL に酵母密度が  $1.0 \times 10^7$  cells/mL となるように接種し、20℃で10日間の発酵試験を行った。対照としてビール酵母 Safale S-33 (Fermentis 社製) を用いた。発酵経過は、炭酸ガス減量で評価した。発酵終了後にアルコール濃度の測定と糖、有機酸の分析を行った。

## 2.5 小規模試験製造

麦汁にはモルトエクストラクト (Muntons 社製) にホップペレットを添加したものを使用した。Brix13 になるように調整した麦汁 3.5L に酵母密度が  $1.0 \times 10^7$  cells/mL となるように接種し、20℃で発酵試験を行った。炭酸ガスの発生が収まるまで試験を続けた。対照としてビール酵母 Safale S-04 (Fermentis 社製) を用いた。発酵終了後にアルコール濃度の測定と糖、有機酸の分析を行った。

## 2.6 成分分析

Brix の測定は糖度計 (PAL-1、(株)アタゴ)、アルコール分はビールアナライザー (DSA-48、Anton

paar 社) により測定した。糖と有機酸の分析は高速液体クロマトグラフ (1260 Infinity II、アジレント・テクノロジー(株)) で行った。糖の分析は蒸発光散乱検出法 (ELSD) で行い、カラムは Shodex HILICpak VG-50 4E (4.6 mm×250 mm、粒径 5 μm)、溶離液には水とアセトニトリルを用いた。有機酸の分析はポストカラム法 (UV-Vis 検出器, 430nm) で行い、カラムは Agilent Hi-Plex H (7.7 mm×300 mm、粒径 8 μm) 2本、溶離液は 3mM 過塩素酸を用いた。

## 3 結果及び考察

### 3.1 酵母の分離・キラー性

本研究では、秩父地域の 28 種類の花や実からサンプリングを行い、マルトースを資化し発酵性のある酵母の分離を試みた。その結果、リンドウとミズキの花 (図 1) から 2 株を分離することができた。以下、リンドウから分離した酵母をリンドウ酵母、ミズキから分離した酵母をミズキ酵母とする。

リンドウ酵母及びミズキ酵母は、26S rRNA 遺伝子の D1/D2 領域の塩基配列解析の結果、それぞれ *Lachancea thermotolerans* 及び *Lachancea meyersii* と同定された。また、走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用して、分離した酵母の形態を確認した (図 2)。



図 1 左：リンドウの花、右：ミズキの花

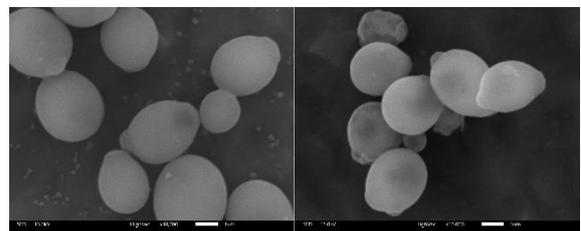


図 2 分離した酵母の SEM 画像  
(左：リンドウ酵母、右：ミズキ酵母)

*Lachancea thermotolerans* はワインやサワーエールの醸造に使用される報告<sup>4)</sup>が、*Lachancea meyersii* はブラジルのケフィアから分離された報告<sup>5)</sup>があり、どちらも食経験がある酵母であることから食品への応用が期待される。

分離したリンドウ酵母、ミズキ酵母のどちらも市販のビール酵母との境界にハローが認められなかったことからキラ性を有さないことが確認された。

### 3.2 麦汁発酵試験

発酵経過を図3に示す。分離した酵母は対照に対して炭酸ガスの減少が鈍く、緩やかに減少した。最終的にはリンドウ酵母は対照と同程度まで減少したが、ミズキ酵母の減少量はやや低かった。アルコール濃度は、対照のビール酵母が4.5%であったのに対し、リンドウ酵母は5.1%、ミズキ酵母は4.1%であった。麦汁と発酵後の糖濃度を図4に示す。グルコース、フルクトース、スクロースはすべての酵母で消費されていた一方、マルトトリオースは消費されていなかった。マルトースはミズキ酵母では完全には消費されていなかったが、これはマルトースの資化性が弱いためではないかと推察される。これにより、ミズキ酵母のアルコール生成量が対照よりも低くなったと考えられる。有機酸の濃度を図5に示す。対照と比較してクエン酸は変わらず、リンドウ酵母では乳酸が、ミズキ酵母ではリンゴ酸、コハク酸、酢酸が高かった。

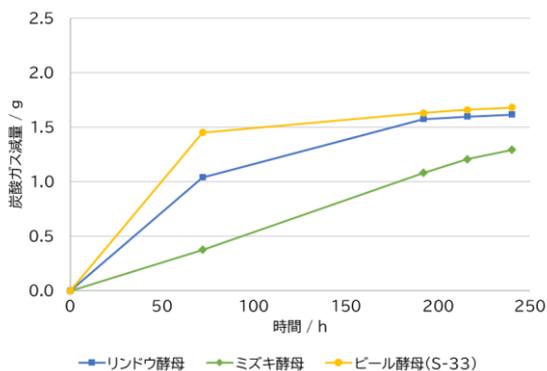


図3 発酵経過

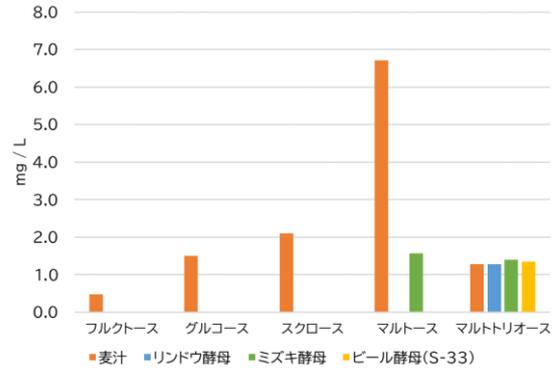


図4 麦汁発酵前後の糖濃度

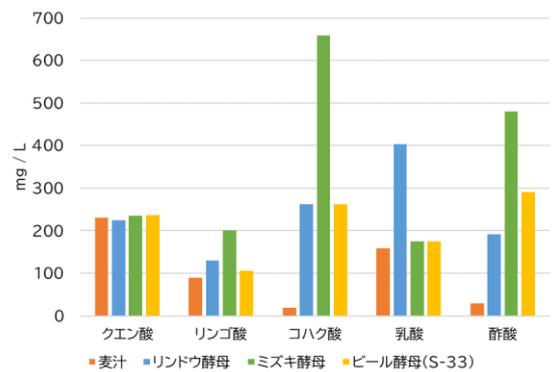


図5 麦汁発酵前後の有機酸濃度

### 3.3 小規模試験製造

発酵後の糖濃度を図6、有機酸濃度を図7に示す。麦汁発酵試験と同様に、ミズキ酵母ではマルトースが残っていた。有機酸組成も麦汁発酵試験と同様にリンドウ酵母は乳酸が多く、ミズキ酵母はコハク酸、リンゴ酸が多かったが酢酸はリンドウ酵母と同程度であった。製成酒はどちらも異味異臭はなく飲用上問題ないと評価できた。

リンドウ酵母はすっきりとした感じがあり、ミズキ酵母はややまろやかな印象であった。香りに関しては、いずれの酵母も特に顕著な特徴は認められなかったが、酵母由来の香気が穏やかであることから、ホップとの組み合わせによって多様な香味設計が可能であると考えられる。

これらの特徴は、市販ビールと比較して、味の面で差別化が可能であると考えられる。リンドウ酵母は乳酸、ミズキ酵母はコハク酸やリンゴ酸などを多く生成する特性を有しており、サワーエールのようなスタイルのビール製造に応用できる可能性がある。

本研究により、自然界から分離した酵母を用いて製造したビールが、独自の風味を有することが示された。今後は、酵母の糖質化性の改善や、ホップとの組み合わせによる味及び香りの特性解析を進めることで、新規ビールの開発につながる事が期待される。

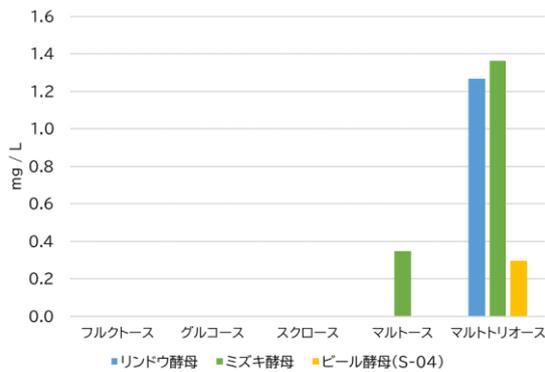


図6 麦汁発酵後の糖濃度

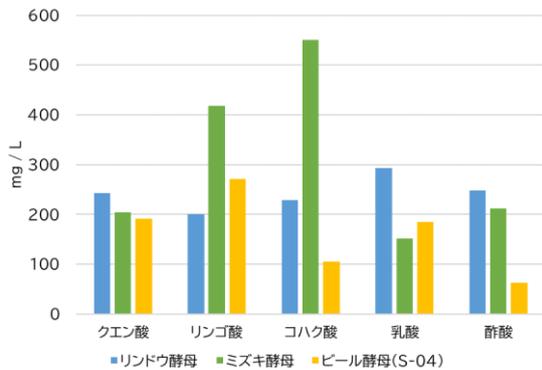


図7 麦汁発酵後の有機酸濃度

謝辞

本研究を進めるにあたり、森林資源からのサンプリングに御協力いただいた特定非営利活動法人秩父百年の森の坂本裕三様、島崎武重郎様、斎藤隆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 都築正男, 桑原智也, “法隆寺境内の植物からの酵母分離と清酒への応用”, 奈良県産業振興総合センター研究報告, vol. 49, pp. 28-33 (2023)
- 2) 井上智実, 松田章, “花から分離した酵母を用いたオリジナル清酒の開発”, 石川県工業試験場研究報告, vol. 67, pp. 27-32 (2018)

- 3) 松本健一, 福嶋瞬, 小坂忠之, 山下創, 横須賀貞夫, 菊地明, 齋藤高弘, “付加価値の高い県産ビールの開発”, 栃木県産業技術センター研究報告, vol. 12, pp. 15-18 (2015)
- 4) 武内純子, 阪内淳逸, 山崎雅夫, “自然界からの酵母分離および分離された *Lachancea thermotolerans* の酒類製造上の性質と活用”, 日本食品科学工学会誌, vol. 72 no. 1, pp. 1-10 (2003)
- 5) Karina Teixeira Magalhães, Gilberto Vinícius de Melo Pereira, Cássia Roberta Campos, Giuliano Dragone, Rosane Freitas Schwan, “Brazilian kefir: structure, microbial communities and chemical composition”, Brazilian Journal of Microbiology, vol. 42, pp. 693-702 (2011)

## 酸味に特徴のある新規埼玉酵母による清酒製造試験

樋口誠一\* 齋藤健太\* 和田健太郎\* 横堀正敏\*

### Sake Brewing Trial Using New Saitama Yeasts with Characteristic Sourness

HIGUCHI Seiichi\*, SAITO Kenta\*, WADA Kentaro\*, YOKOBORI Masatoshi\*

#### 抄録

清酒において多様化する消費者ニーズに対応するため、多様な県オリジナル清酒酵母を開発し、県内企業に提供することは重要な課題である。本研究では、酸味に特徴のあるリンゴ酸高生産性の酵母の開発を目指した。既存埼玉酵母からシクロヘキシミド耐性株を得て、リンゴ酸を親株の2倍程度生成する株を選抜し、これを用いた小仕込み試験を行った。その結果、爽やかな酸味を持つ製成酒が得られた。

キーワード：清酒，酵母，酸味，リンゴ酸

#### 1 はじめに

近年、清酒を取り巻く環境は大きく変化しており、多様化する消費者の嗜好や消費行動に対応する商品設計が重要となっている。清酒の特徴を決定する上で大きな役割を担っているのは清酒酵母である。当所においても、オリジナルの「埼玉酵母」を頒布しているが、上述の状況に対応していくにはさらなるラインアップが求められる。

本研究では、酸味に特徴のあるリンゴ酸高生産性の埼玉酵母の開発を目指した。これまでコハク酸ジメチル耐性株<sup>1)</sup>やシクロヘキシミド耐性株<sup>2)</sup>が育種され、リンゴ酸含量が多く、酸味に特徴のある清酒が造られている。通常の清酒に多いコハク酸や乳酸などに比べてリンゴ酸は酸味が強く、ワインのような爽やかな酸味を持たせることができ、冷酒や洋食などに合う清酒などの商品開発が期待される。これまで埼玉酵母にはその種の株がなかった。そこで既存埼玉酵母からシクロヘキシミド耐性株を得て、リンゴ酸高生産株を選抜し、

小仕込み試験を行ったので報告する。

#### 2 実験方法

##### 2.1 変異株の取得及びスクリーニング

埼玉酵母6株(A01、C、D01、E、F及びG)をYM培地(グルコース2%、ポリペプトン0.5%、イーストエキス0.3%、モルトエキス0.3%)にて培養後、吉田らの方法<sup>2)</sup>に従い、シクロヘキシミド1 µg/mL含有YM寒天培地に塗布し、28°C、1週間の培養にて生育してきた株を再び同寒天培地に塗布し、耐性株を得た。その後一次スクリーニングとして、YM10培地(上記YM培地のグルコース濃度を10%としたもの)にて20°C、7日間培養し、液体クロマトグラフによる有機酸分析<sup>3)</sup>を行った。さらに二次スクリーニングとして小仕込み試験(総米11 g~1 kg)を行った。また、選抜株を用いた同条件での小仕込み試験を繰り返し、安定性を確認した。 $\alpha$ 化米はAA-60、乾燥麹は1-60(ともに徳島製麹(株)製)を使用し、仕込み配合は既報<sup>4)</sup>に準じて行った。酵母は麹汁培地にて28°C、1日静置培養したものを用いた。炭酸ガス生成による醪の減少重量を測定することによって発酵経過を把握した。

\* 北部研究所 食品・バイオ技術担当

上槽は遠心分離 (3,000×g、10分) により行った。製成酒のアルコール分及び日本酒度は、それぞれアルコメイト (理研計器 (株) 製AL-2型) 及びそれと糖度計 ( (株) アタゴ製PR-101) で測定したBrix値から簡易的に算出したもの<sup>5)</sup>を用いるか、アルコライザーSAKE (アントンパール社製) により分析した。その他の一般成分や香气成分は国税庁所定分析法<sup>6)</sup>に準じて分析した。官能評価 (きき酒) は担当職員によって実施した。

## 2.2 清酒製造試験

表1に示した仕込み配合で総米 60 kg の清酒製造試験を行った。原料米は彩のさずな (令和 6年、埼玉県産、精米歩合 70%)、種麴は Roots 36 ( (株) 秋田今野商店製) を用いた。アンプル仕込み、醪の最高温度は 12~13°Cとし、発酵経過に応じて品温の調整を行った。醪の成分分析に関しては、ピルビン酸は 3-D-G 法<sup>7)</sup>、グルコースは国税庁所定分析法、その他は前項と同様に行った。

表1 仕込み配合

	酒母	初添	仲添	留添	合計
総米	1.5	9	18	31.5	60
掛米	—	7.5	14	25.5	47
麴米	1.5	1.5	4	6	13
汲水	6	11	18	46	81
乳酸	36	24	—	—	60

単位: kg (ただし汲水はL、乳酸はmL)

また、県内酒造会社においても総米 30 kg の試験製造が行われた。原料米はさけ武蔵 (令和 6年、埼玉県産、精米歩合 60%)、種麴はグルコ S ( (株) 秋田今野商店製)、酒母は中温速醸にて実施された (仕込み配合は省略)。

## 3 結果及び考察

### 3.1 変異株の取得及びスクリーニング

シクロヘキシミド 1 µg/mL 含有 YM 寒天培地に生育した大きめのコロニーを各親株につき 80 株程度釣菌した。その後、一次スクリーニングにより、親株に比べてリンゴ酸含量あるいはリンゴ酸/コハク酸比率が高いもの計 86 株を選択した。二次スクリーニングにより、発酵が良く、リンゴ酸含量あるいはリンゴ酸/コハク酸比率が高いもの計 25 株に絞り込んだ。さらにスケールアップし小仕込み試験 (総米 110 g) を行った。リンゴ酸含量は高いもので親株の 2 倍程度生成し、リンゴ酸/コハク酸比率は 3~5 倍程度となっていた (データは省略)。一方で発酵は全体的に親株より弱く、アミノ酸度もやや高い傾向が認められた。

これらのうち、発酵が良く、かつ酸度、リンゴ酸含量及びリンゴ酸/コハク酸比率がいずれも高いものを中心に 5 株を選抜し、さらにスケールアップして小仕込み試験 (総米 1 kg) を行った。

表2 小仕込み試験 (総米1 kg) の結果

株名	日数	Alc	Ns	TA	AA	香气成分		有機酸					計	M/S
						iAmAc	EtCap	クエン酸*	リンゴ酸	コハク酸	乳酸	酢酸		
C	23	18.1	10.0	1.7	1.6	2.6	3.9	20	86	215	326	21	669	0.40
F	27	18.1	8.5	2.1	1.7	2.3	8.6	12	173	229	330	11	755	0.76
G	30	17.3	-1.2	2.1	2.4	1.2	13.2	9	180	176	336	48	748	1.03
C7	23	18.0	7.6	2.2	1.6	3.7	2.1	31	159	188	359	0	737	0.84
F3	33	17.3	-1.6	2.5	2.1	2.1	6.1	16	319	139	315	31	820	2.29
F21	33	17.7	2.1	2.4	2.2	5.0	6.0	10	196	159	325	26	717	1.23
F63	27	17.0	0.5	2.9	2.0	1.9	6.4	24	331	187	332	25	899	1.77
G25	30	17.4	1.7	2.8	2.1	1.3	12.9	23	320	168	334	82	927	1.90

Alc: アルコール分 (%), Ns: 日本酒度, TA: 酸度, AA: アミノ酸度, iAmAc: 酢酸イソアミル (mg/L), EtCap: カプロン酸エチル (mg/L)、各種有機酸類 (mg/L)、M/S: リンゴ酸/コハク酸比

\*: 酒石酸も含む

表3 再取得株の小仕込み試験の結果

株名	日数	Alc	Ns	TA	AA	香氣成分		有機酸					計	M/S
						iAmAc	EtCap	クエン酸*	リンゴ酸	コハク酸	乳酸	酢酸		
F	14	16.5	-8	2.40	1.45	4.72	8.17	43	188	336	371	88	1025	0.56
F63a	14	14.9	-22	3.10	1.53	4.63	5.01	47	309	251	445	226	1278	1.23
F63b	14	14.7	-24	2.70	1.60	2.71	9.96	31	264	251	433	159	1138	1.05
F63c	14	15.4	-18	2.90	1.53	3.09	9.59	48	278	202	412	189	1129	1.37

Alc：アルコール分（%）、Ns：日本酒度、TA：酸度、AA：アミノ酸度、iAmAc：酢酸イソアミル（mg/L）、  
EtCap：カプロン酸エチル（mg/L）、各種有機酸類（mg/L）、M/S：リンゴ酸/コハク酸比  
\*：酒石酸も含む

結果は表2に示すとおり、F3、F63及びG25株はリンゴ酸を親株(アルファベットが親株に相当)の2倍近く生成し、リンゴ酸/コハク酸比率も親株の2倍前後となり、官能評価でリンゴ酸らしさも感じられた。特にF63株は酸度も高く、リンゴ酸らしさの評価が高かった。また、F、G株の系統は親株の性質を引き継いでカプロン酸エチルの含量が高かったが、G25株は、官能評価の結果、香りが高すぎ、味とのバランスがやや欠けるという評価となった。発酵が親株より劣る傾向はここで

もC株系統以外で見られた。以上より、F63株を選抜することとした。

さらに安定性確認のため繰り返した小仕込み試験の醪より、再取得した株 F63a（元株とほぼ同様）、F63b及びF63c（香りが高いもの、有機酸組成が少し異なるもの）を分離し（表3）、以降の試験に供した。

### 3.2 清酒製造試験

先に示した株を用いて総米 60 kg の試験製造を

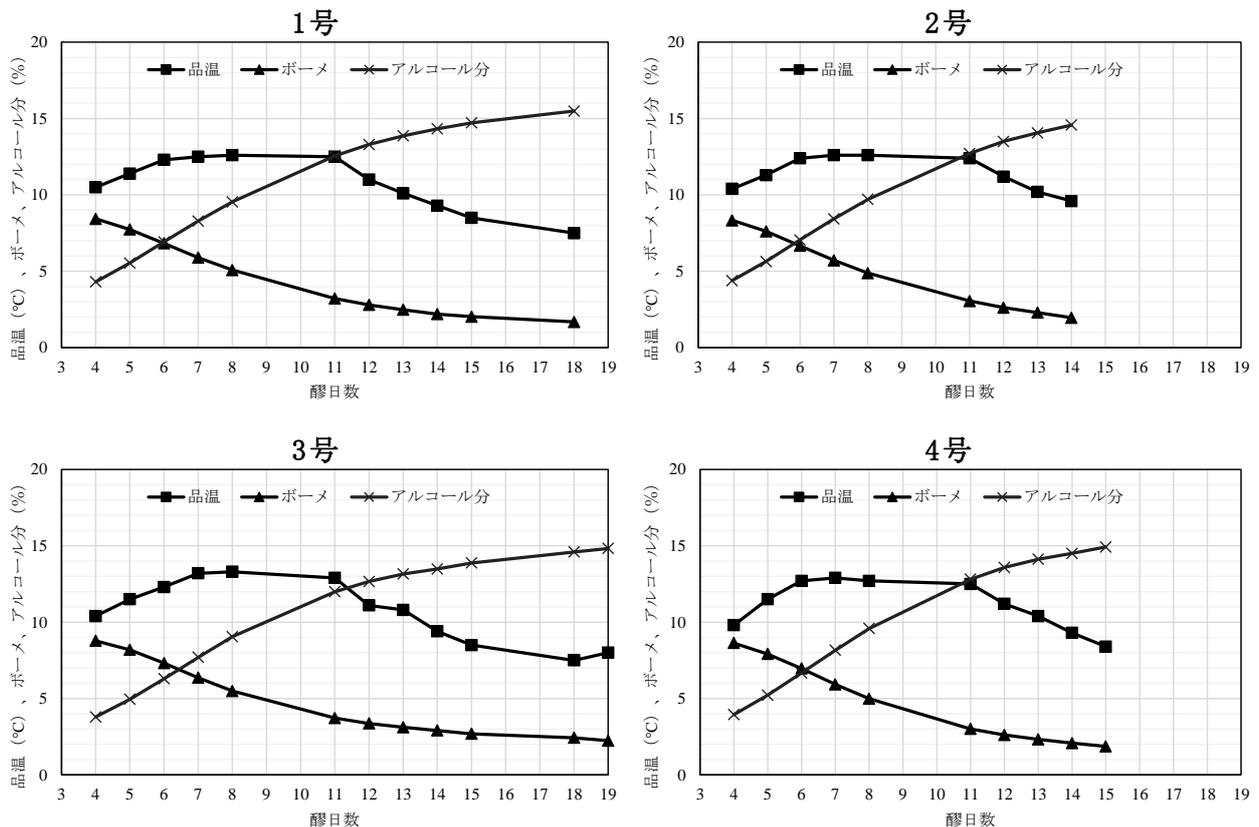


図1 清酒製造試験の醪経過

表4 清酒製造試験（総米60 kg）の結果

No.	株名	日数	Alc	Ns	TA	AA	Glc	香氣成分		有機酸					M/S	
								iAmAc	EtCap	クエン酸*	リンゴ酸	コハク酸	乳酸	酢酸		計
1	F	18	15.5	-16.6	2.2	1.5	3.9	1.5	3.6	145	286	465	17	145	913	0.51
2	F63a	14	14	-19.7	2.1	1.3	4.2	0.9	1.7	130	244	410	62	130	846	0.53
3	F63b	19	14.8	-22.9	2.2	1.5	4.8	0.8	5.4	122	267	450	79	122	918	0.46
4	F63c	15	14.9	-19.1	2.2	1.4	4.3	1.0	5.5	140	218	427	88	140	873	0.64

Alc：アルコール分（%）、Ns：日本酒度、TA：酸度、AA：アミノ酸度、Glc：グルコース（%）、iAmAc：酢酸イソアミル（mg/L）、EtCap：カプロン酸エチル（mg/L）、各種有機酸類（mg/L）、M/S：リンゴ酸/コハク酸比  
\*：酒石酸も含む

行った。その醗経過を図1、製成酒の成分等の結果を表4に示す。

酸味とのバランスをとるため、目標アルコール度数を14~15%、日本酒度を-20前後としたが、概ね目標どおりにコントロールすることができ、爽やかな酸味を有するソフトタイプの清酒となった。ピルビン酸濃度は上槽直前の13日目において、64~91 ppmといずれも高くはなく、上槽可能であった（データ省略）。これらの酵母により低アルコール清酒が製造しやすいという一面も示す結果となった。また、このときの酵母数は、いずれも約 $3 \times 10^8$ /mLであり、死滅率も2%程度で問題はなかった（データ省略）が、先のスクリーニングの項でアルコール生成が進むに従いアミノ酸度は高くなりやすかったため、アルコール分を高くしすぎない方が良いと思われる。

一方でリンゴ酸含量やリンゴ酸/コハク酸比率、酸度を比較すると、試験酒は親株を用いたコントロールとの差があまり見られず、スクリーニング時の結果と異なるものとなった。この原因は不明であるが、酵母の取り扱いの過程において、

何らかの変化が起こったためと考えられる。

### 3.3 酒造会社における試験製造結果

酒造会社にて実施したF63a株を用いた試験製造の醗経過を図2、製成酒の成分等の結果を表5に示す。その結果、リンゴ酸含量やリンゴ酸/コハク酸比率は、親株から作られた清酒と比べて高い数値となっていることが確認された。

## 4 まとめ

酸味に特徴のあるリンゴ酸高生産性の酵母の開

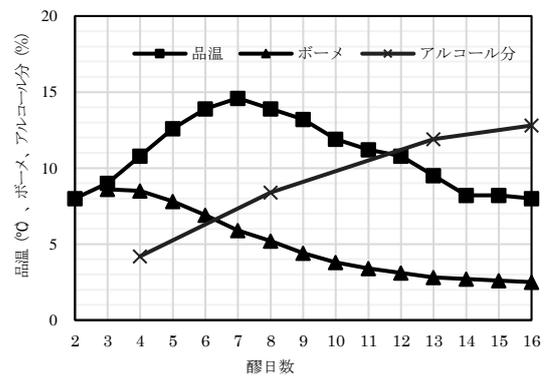


図2 酒造会社における試験製造の醗経過

表5 酒造会社における試験製造の結果

株名	日数	Alc	Ns	TA	AA	香氣成分		有機酸					M/S	
						iAmAc	EtCap	クエン酸*	リンゴ酸	コハク酸	乳酸	酢酸		計
F63a	16	12.8	-24	2.6	1.6	0.7	0.9	29	502	298	378	50	1257	1.68

Alc：アルコール分（%）、Ns：日本酒度、TA：酸度、AA：アミノ酸度、iAmAc：酢酸イソアミル（mg/L）、EtCap：カプロン酸エチル（mg/L）、各種有機酸類（mg/L）、M/S：リンゴ酸/コハク酸比

\*：酒石酸も含む

発を目指し、既存埼玉酵母からシクロヘキシミド耐性株を得て、リンゴ酸を親株の2倍程度生成する株を選抜した。これを用いた小仕込み試験の結果、爽やかな酸味を持つ製成酒が得られた。

酒造会社での実地製造を含め、様々な条件で製造された際にどのような酒質となるか不明な点もあるので、今後継続的にデータを得ていく予定である。

#### 謝 辞

本研究を進めるに当たり、御助言をいただき、試験製造にも御協力いただきました寒梅酒造(株)の鈴木隆広様に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 相川元庸, 水津哲義, 市川英治, 川戸章嗣, 安部康久, 今安聰, "りんご酸生成能の高い清酒酵母の育種", 醗酵工学会誌, 70, 4733, 477 (1992)
- 2) 吉田清, 稲橋正明, 中村欽一, 野白喜久雄, "Cycloheximide 耐性株から得られたリンゴ酸高生産性酵母", 日本醸造協会誌, 88, 645 (1993)
- 3) Shodex テクニカルレポート, <https://www.shodex.com/ja/dc/03/08/16.html>, 2025.10.15
- 4) 横堀正敏, 鶴菌大, 渡辺泰成, 増田こずえ, "微生物利用技術に関する研究—新規酵母の分離と食品への応用—", 埼玉県産業技術総合センター研究報告, 5, 107 (2007)
- 5) 横堀正敏, 南澤賢, 鈴木康修, 増田こずえ, "高温醪対応清酒酵母の開発", 埼玉県産業技術総合センター研究報告, 10, 44 (2012)
- 6) 国税庁所定分析法, 昭和 36 年国税庁訓令第 1 号, <https://www.nta.go.jp/law/tsutatsu/kobetsu/sonota/070622/01.htm>, 2025.10.15
- 7) 西田淑男, 久野敦史, 幅靖志, 深谷伊和男, "吟醸酒および吟醸酒醪中のピルビン酸濃度の簡易定量方法", 日本醸造協会誌 94 (5), 416 (1999)

# 金属3Dプリンタにより造形したSUS630 (17-4PHステンレス鋼) の力学的特性評価

小野裕也\*<sup>1</sup> 森本良一\*<sup>1</sup> 小熊広之\*<sup>1</sup> 都知木邦裕\*<sup>2</sup> 南部洋平\*<sup>2</sup>

## Mechanical Characterization of SUS 630(17-4PH Stainless Steel) Sintered Product Printed With a Metal 3D Printer

ONO Yuya\*<sup>1</sup>, MORIMOTO Ryouichi\*<sup>1</sup>, OGUMA Hiroyuki\*<sup>1</sup>,  
TOCHIKI Kunihiro\*<sup>2</sup>, NAMBU Yohei\*<sup>2</sup>

抄録

金属3DプリンタによるSUS 630造形部品の実用化支援のため、当センター所有の材料押出 (Material Extrusion: MEX) 方式の金属3Dプリンタで引張試験片を造形し、この方式による機械的強度に与える影響の検証を行った。さらに、粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion: PBF) 方式の3Dプリンタによる造形品及び圧延材との機械的強度の比較を行った。その結果、3Dプリンタによる造形品は、MEX方式ではPBF方式及び圧延材と比較して引張強さは同等の値を得られたが、気孔の影響により伸び・耐力は下回る結果となった。

キーワード：金属3Dプリンタ，SUS 630，造形方式，材料押出

### 1 はじめに

SUS 630は優れた耐食性を保ちながら強度を改善した磁性を持つステンレス鋼で、強度・耐食性が良好なため、航空機の燃焼系統に使われているほか、医療機器・建築資材などにも用いられている。しかし、SUS 630は切削加工性が悪く、目的形状を得るためには長時間の加工が必要となっている。

これらの問題解決のため、金属3Dプリンタによる造形が期待されている。金属3Dプリンタを用いることにより、切削では不可能な複雑形状の部品をニアネットシェイプで造形可能であり、除去加工の手間やコストを削減することができる。一方、金属3Dプリンタでの造形は、金属粉を溶融 (焼結) して成形するため、造形物内部に気孔が生じ強度

が低下する可能性がある。そこで本研究は、当センター所有の金属3Dプリンタによる SUS 630造形部品の実用化支援のため、以下について検証を行った。①相対密度、②気孔の発生状況、③気孔及びノズルの走査方向の違いが強度に与える影響、④寸法効果。さらに、粉末床溶融結合 (以下、PBF という) 方式の造形品及び圧延材との機械的強度の比較を行った。

### 2 実験方法

#### 2.1 試験片の造形

造形には、材料押出 (以下、MEX という) 方式である Markforged 社の Metal X を使用した。この装置は、金属粉末に油脂と熱可塑性樹脂 (以下、バインダーという) を混合したフィラメントを使用する造形装置であり<sup>2)</sup>、積層造形した造形物からバインダーの除去を行い、残った金属粉末を焼結することによって金属製品を造形することがで

\*1 材料技術担当

\*2 機械技術担当

きる<sup>3)</sup>。試験片形状は JIS Z2241:2022 に規定されている 14B 号試験片 (厚さ 3mm、平行部の幅 6mm) とした。造形条件を表 1 に示す。輪郭→45°、輪郭→135° を繰り返して造形した試験片を姿勢①、同様に輪郭→0°、輪郭→90° を繰り返して造形した試験片を姿勢②とした (図 1)。さらに、図 2 のとおり、Z 軸方向に輪郭→45°、輪郭→135° に造形した試験片を姿勢③、輪郭→0°、輪郭→90° に造形した試験片を姿勢④とした。

表 1 引張試験片の造形条件

	奇数層	偶数層
姿勢①③	輪郭 4 周後、平行部 に対して 45°	輪郭 4 周後、平行部 に対して 135°
姿勢②④	輪郭 4 周後、平行部 に対して 0°	輪郭 4 周後、平行部 に対して 90°
走査ピッチ : 0.25 mm、積層ピッチ 0.125 mm		
脱脂時間 : 12h、乾燥時間 : 4h、焼結時間 : 27h		

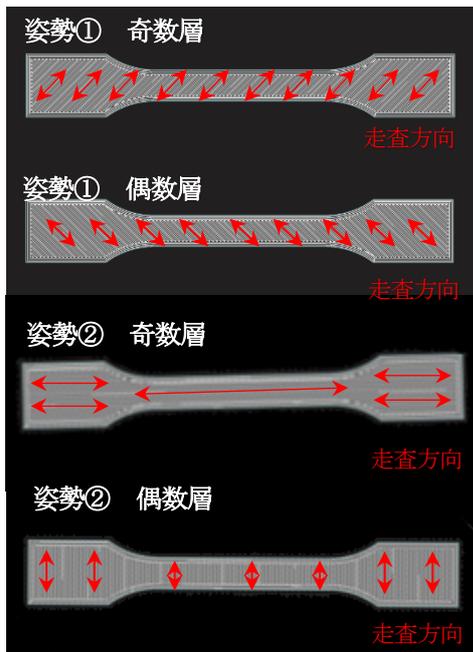


図 1 引張試験片の走査方向

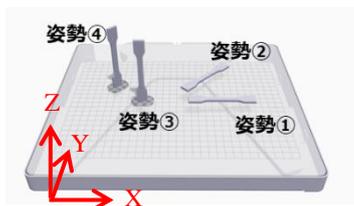


図 2 引張試験片の造形姿勢

## 2.2 相対密度の測定

JIS Z 8807:2012 に規定されている比重瓶法により焼結物の見掛け密度を測定し、JIS G 4304:2021 の SUS 630 の密度 (7.78g/cm<sup>3</sup>) を基に相対密度を算出した。

## 2.3 引張強度の試験

万能材料試験機 (AGX-300kN、(株)島津製作所) を用いて引張試験を行い、耐力、引張強さ、破断伸びを求めた。サンプル数は 3 本とした。

## 2.4 硬度の測定

φ20mm×10mm の円柱状の硬さ試験片 (姿勢①) を造形し、ブリネル硬さ (HBW 5/750) を測定した。

## 2.5 気孔・破面の観察

引張試験前の試験片 (平行部から切り出し、側面から中心部に向かって磨いた) と試験後の破面を、樹脂に埋め込んだ後に仕上げ研磨し、光学顕微鏡 (DMi8A、ライカマイクロシステムズ(株))、走査型電子顕微鏡 (SEM) (SU3500、(株)日立ハイテク) を用いて観察した。

## 2.6 寸法効果の検証

平行部の幅 (6mm、9mm、12mm) が異なる試験片 (姿勢①) に対して万能材料試験機 (AGX-300kN、(株)島津製作所) を用いて引張試験を行い、耐力、引張強さ、破断伸びを求めることで、寸法効果の検証を行った。サンプル数は 3 本とした。

## 3 結果及び考察

### 3.1 相対密度測定の結果

引張試験片平行部から 3mm×6mm×10mm の寸法に切り出して密度を測定したところ、MEX 方式 (姿勢①) が 7.60g/cm<sup>3</sup> (相対密度 97.7%)、PBF 方式が 7.68g/cm<sup>3</sup> (相対密度 98.8%) であった。

### 3.2 引張試験の結果

表 2 に姿勢①②③④及び PBF 方式と SUS630 圧延材の引張試験と硬さ試験結果を示す。姿勢①と

②では走査方向が異なるが、耐力、引張強さ、伸びのいずれの値も顕著な差は見られなかった。また、姿勢①と②は JIS G 4304:2021 に規定されている SUS630 H1150 の値と同等の値であることを確認した。

姿勢③と④では結果に顕著な差は見られず、走査方向の違いによる引張強度への影響(異方性)は確認されなかった。しかし、姿勢①②に対し、姿勢③④では耐力、引張強さ及び破断伸びが低下した。図3に姿勢①②と PBF 方式及び SUS630 圧延材の引張試験結果を示す。MEX 方式で造形された試験片は、PBF 方式及び SUS630 圧延材の試験片と比較して、伸びの値が小さくなった。引張強さについては、顕著な差はみられなかった。

表2 各種試験片の引張・硬さ試験結果 (n=3)

	耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	ブリネル 硬さ
MEX①	715	1125	8	306
MEX②	809	1092	6	
MEX③	611	717	4	
MEX④	657	687	2	
PBF	963	1089	20	341
圧延材	1084	1087	15	363
SUS 630 H1150	725以上	930以上	8以上	277以上

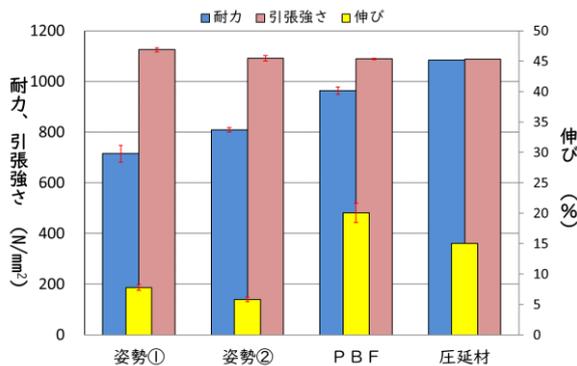


図3 引張試験結果

姿勢① n=3  
姿勢② n=3  
PBF n=5  
圧延材 n=1

### 3.3 硬さ試験の結果

測定値は 306 であった (n=3)。

### 3.4 気孔観察の結果

引張試験前の試験片について、図4に姿勢①の光学顕微鏡及び SEM による平行部の断面観察結果を示す。断面に直径 5~10μm 程度の多くの気孔が観察された。次に平行部の積層面を観察した(図5)。姿勢①と比較して姿勢③では、表面に凹凸が観察された。この凹凸間隔は積層ピッチと一致していることから造形する際に形成されたものと考えられる。また、姿勢③は姿勢①よりも大きな気孔が表層部に観察された。これは、輪郭走査時にノズル先端から材料が線状に押し出される際、隣り合う走査パターンとの境界面で材料が埋めきれない空間が生じているためと考えられる<sup>4)</sup>。

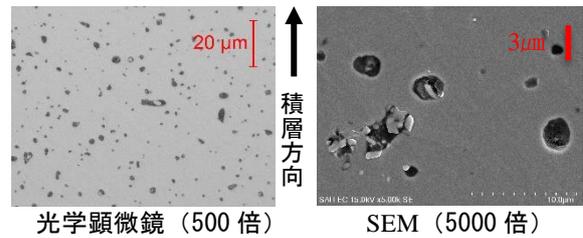


図4 姿勢①の断面観察結果

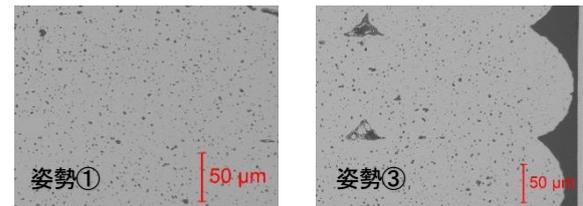


図5 平行部の積層面 (200倍)

### 3.5 引張試験後の観察結果

図6に姿勢③の破断面写真を示す。この写真から表面の凹凸部の凹部が破壊の起点となり、表層にある大きな気孔に伝播して破壊が進展した様子が観察された。3.2の項で述べたとおり、姿勢①②に対して姿勢③④の引張強度、破断伸びが低くなったのは、姿勢③④は表面の凹部が起点となり、表層の大きな気孔に亀裂が伝播したことが原因と考えられる。

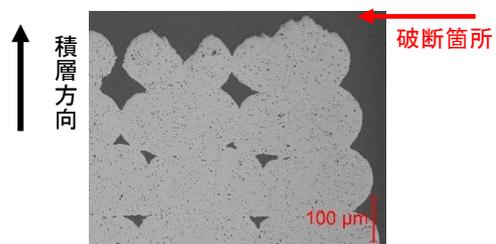


図6 姿勢③の平行部の破断面 (100倍)

### 3.6 寸法効果の検証

図7に引張試験結果を示す。平行部の幅(6mm、9mm、12mm)が異なる試験片(姿勢①)の耐力、引張強さ、伸びのいずれの値も顕著な差は見られず、寸法効果は確認されなかった。

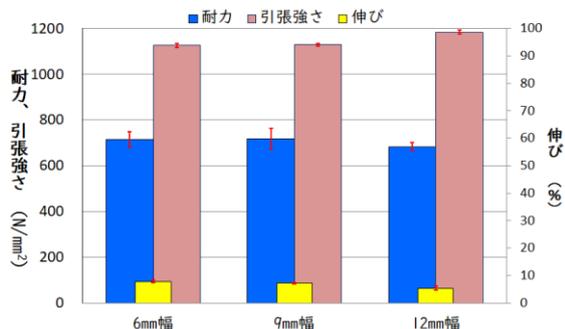


図7 引張試験結果(平行部幅別)

## 4 まとめ

金属3Dプリンタで造形したSUS630焼結物の力学的特性を評価したところ、以下のことが明らかとなった。

(1) 相対密度はMEX方式が97.7%、PBF方式が98.8%であった。

(2) 姿勢①と②では走査方向が異なるが、引張強度・破断伸びにおいて顕著な差はなく、異方性は確認されなかった。また、姿勢③と④についても同様であった。

(3) MEX方式とPBF方式の引張強度は同程度であったが、破断伸びはPBF方式の方が約3倍大きかった。

(4) 姿勢①②に比べて姿勢③④の引張強度・破断伸びは低かった。これは姿勢③④では造形時において表層部に大きな気孔が形成されやすく、表面の凹部が起点となり、気孔に亀裂が伝播したことが原因と考えられる。

(5) 造形した試験片のブリネル硬さ(HBW 5/750)はJIS G 4304:2021に規定されているSUS630 H1150の値と同程度であった。

(6) 平行部の幅(6mm、9mm、12mm)が異なる試験片の引張強度・破断伸びに顕著な差はなく、寸法効果は確認されなかった。

本研究を進めるに当たり、PBF造形物を提供していただきました地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター 千葉浩行主任研究員に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 中山 英樹, 京極 秀樹, 小松眞一郎, “MIMプロセスによるSUS630焼結体の組織と機械的性質に及ぼす熱処理条件の影響”, 粉体および粉末冶金 第45巻第9号 pp.882 (1998).
- 2) 富山 和也, 城之内 一茂, 花澤 明洋, 吉田 浩之, 中村 昌彦, 山本 貴之, “MIM応用型金属3Dプリンターの造形精度及び造形物機械的特性の調査(最終報)”, 千葉県産業支援技術研究所研究報告 No.20, pp. 18-22 (2022).
- 3) 多川 信也, 谷口 幸典, “FFF方式金属3Dプリントの脱脂・焼結プロセスにおける不良の改善”, 奈良県産業振興総合センター研究報告 No.49, pp.5 (2023).
- 4) 富山 和也, 城之内 一茂, 花澤 明洋, 吉田 浩之, 中村 昌彦, 山本 貴之, “MIM応用型金属3Dプリンターの造形精度及び造形物機械的特性の調査”, 千葉県産業支援技術研究所研究報告 No.20, pp. 11 (2020).

## 謝辞

## 100 °Cを超える高温下での水蒸気透過度測定

<NEDO 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業

／共通課題解決型基盤技術開発／固体高分子形燃料電池用接着シール技術の研究開発>

飯塚真也\*<sup>1</sup> 関口悠\*<sup>2</sup> 佐藤千明\*<sup>2</sup>

### Measurement of the Water Vapor Transmission Rate at Temperature above 100 °C

IIZUKA Shinya\*<sup>1</sup>, SEKIGUCHI Yu\*<sup>2</sup>, SATO Chiaki\*<sup>2</sup>,

抄録

カップ法による110～138 °Cでの水蒸気透過度測定を試みた。カップをHASTチャンパー内に入れて、カップに固定した試料フィルムへ水蒸気を透過させ、2秤量間のカップ質量増加から水蒸気透過度を求めた。測定中の試料損傷を避けるために調圧機構付きカップを用いた。吸湿剤は無水塩化カルシウムの代わりに担体入り十酸化四リンを用い、高温下での吸湿力を維持した。

キーワード：水蒸気透過度、透湿度、カップ法、燃料電池

#### 1 はじめに

車載半導体や太陽電池などの高信頼性化につながる電子部品の高気密耐水パッケージを実現するため、水蒸気バリアフィルムや水蒸気バリア性接着剤など、防湿材料や封止材料の開発が広く進められている。これらの材料は、高温環境での高い信頼性を確認するため水蒸気透過度測定による防湿性評価が行われる。水蒸気透過度測定方法はJIS Z 0208<sup>1)</sup> 及び JIS K 7129<sup>2)</sup> に規定されており、従来は食品包装フィルム等の利用環境を想定して40 °Cまでの低温条件で測定が行われていたが、近年の高温測定ニーズに対応するため、2016年に60 °C及び85 °Cの高温測定条件が新たに規定された<sup>2)</sup>。

現在、産業界の測定ニーズはさらなる高温を指向している。例えば、電子部品の耐湿性評価とし

てIEC 60068-2-66<sup>3)</sup>では110～130 °C、85% RHの環境で加速的な耐久性評価が行われており、加速環境下での材料の防湿性評価が求められる。また、車載用燃料電池では、性能向上の観点で作動温度の上昇が要望されており、電池スタック時に使用されるシール材料には100 °Cを超える高温下での防湿性評価が求められる<sup>4,5)</sup>。

しかし、現時点において、100 °Cを超える水蒸気透過度測定は実現されていない。これは、100 °Cを超えると水が沸騰するため、100 °C以上の高湿度環境を構築するためには1気圧以上の気体を保持する圧力容器を用いなければならない。従来の水蒸気透過度測定装置に圧力容器を組み込むことが困難なためである。現状では、100 °Cを超える水蒸気透過度の値は85 °C以下の測定値からアレニウスの法則の依存性を使用して外挿予測しなければならない。

ところで我々は、調圧機構付きカップを開発し、85 °Cにおけるカップ法を用いた水蒸気透過度測

\*<sup>1</sup> 北部研究所 食品プロジェクト担当

\*<sup>2</sup> 東京科学大学 総合研究院

定を実現した<sup>6)</sup>。この手法は、高温下のカップ法で問題となっていたカップ内圧上昇を調圧機構が緩和して、試料の損傷を回避した水蒸気透過度測定を可能にする。この手法を100℃以上の測定条件に適用できれば、従来のカップ法と同様の手順で100℃を超える高温下での水蒸気透過度測定が実施できるものと考えられる。本研究では調圧機構付きカップと電気・電子部品評価用のHASTチャンバー（Highly Accelerated Stress Test System, 100℃以上の温度及び相対湿度を一定に保つことができる圧力容器）を組み合わせ、110～138℃において汎用樹脂フィルム及び接着フィルムの水蒸気透過度測定を試み、測定結果の妥当性を評価した<sup>7)</sup>。

## 2 実験方法

### 2.1 材料

吸湿剤として、4.0gの担体入り十酸化四リンを用いた。担体入り十酸化四リンとは、3.0gの十酸化四リン粉末（関東化学）と1.0gのフェームドシリカ（QS-20L、トクヤマ）を混合して吸湿時の皮膜形成を抑制した吸湿剤である。樹脂フィルム試料として、ポリエチレンナフタレート（PEN、テオネックス Q51、東洋紡、厚み100μm）、ポリエチレンテレフタレート（PET、ルミラーT60、東レ、厚み100μm）、ポリカーボネート（PC、EC105、住友ベークライト、厚み500μm）、ポリイミド（PI、PIF100、MORTECH Corp.、厚み100μm）を用いた。接着剤試料として、ポリプロピレン系ホットメルト接着フィルム（Adhes.、META-SEAL 1、藤森工業、厚み100μm、融点140℃、軟化点120℃）を用いた。

### 2.2 実験方法

110～138℃の水蒸気透過度測定に用いる調圧機構付きカップは既報<sup>8-9)</sup>のものを用いた。カップの組立方法は既報<sup>8)</sup>のとおりとし、図1のとおり試料の下側に調圧機構を組み込んだ。高温下では密閉されたカップの内圧が上昇するが、調圧機構のアルミ箔ラミネート袋が膨張することで内圧上

昇を緩和し、試料の損傷が回避できる。吸湿剤はカップ内側を相対湿度0%にする役割を果たし、カップ外側を相対湿度85%とした場合に膜試料を隔てた相対湿度差をΔ85%で一定に保つ。相対湿度差は膜を透過する水蒸気の駆動力となる。透過した水蒸気は吸湿剤が吸湿して、カップ全体の質量が増加する。吸湿剤及び試料を組み付けたカップの質量を測定した後、HASTチャンバー（EHS-212、エスペック）内にカップを入れ、設定した温湿度条件で所定時間おいた後に取り出して再びカップ質量を測定し、2秤量間の質量増加から水蒸気透過度を算出した。水蒸気透過度の測定条件は温度110～138℃、相対湿度85%とした。測定は1試料につき3点測定し、平均値と標準偏差を求めた。

また、40～85℃の水蒸気透過度測定は既報<sup>8)</sup>のとおり行った。測定は1試料につき3点測定し、平均値と標準偏差を求めた。

水蒸気透過度 $J$  ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$ )及び水蒸気透過係数 $P$  ( $\text{mol m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ )は次式から算出した。

$$J = \Delta q / A \Delta t$$

$$P = J \cdot l / \Delta p$$

$\Delta q / \Delta t$ は時間あたりのカップの質量増加量 ( $\text{g}/24\text{h}$  or  $\text{mol s}^{-1}$ )、 $A$ は透過面積 ( $\text{m}^2$ )、 $l$ は試験片の厚み ( $\text{m}$ )、 $\Delta p$ は膜試料を隔てた水蒸気圧差 ( $\text{Pa}$ )である。水蒸気透過の活性化エネルギーはアレニウスの式から算出した。

$$P = P_0 \exp(-E_p / RT)$$

$$\ln P = -E_p / RT + \ln P_0$$

ここで、 $P_0$ は頻度因子、 $R$ は気体定数 ( $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )、 $E_p$ は水蒸気透過の活性化エネルギー ( $\text{J}$ )である。

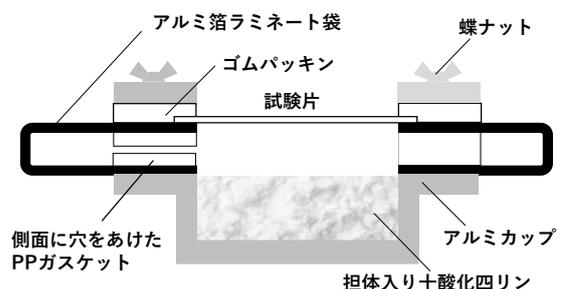


図1 調圧機構付きカップの模式図

### 3 結果及び考察

調圧機構付きカップ及び従来のねじ締め式カップに PEN を組み付けたカップを 130 °C、85% の HAST チャンバー内に入れ、24 時間後に取り出した際の PEN の外観写真を図 2 に示す。調圧機構付きカップに組み付けた PEN は水平に固定されており、110~138 °C においてたわみ及び破れは発生しなかった。一方、従来カップの PEN は 110~138 °C において大きくたわみ、130~138 °C では破れる場合もあった。PEN のたわみ及び破れは加熱によるカップ内圧上昇によって生じたと考えられる<sup>8)</sup>。したがって、加熱時のカップ内圧上昇を緩和できる調圧機構付きカップは、85 °C だけでなく 110~138 °C においても調圧機構が機能し、測定中の試料損傷を回避できることが確認された。また、130 °C で測定した PEN の水蒸気透過度は、調圧機構付きカップに組み付けた場合は  $156 \pm 0.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$  (mean $\pm$ SD, n=3)、従来カップでは  $711 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$  (n=1, その他の n=2 試料は破れにより測定不可)であり、試料のたわみが水蒸気透過度を大きく上昇させる誤差要因となった。このことから、100 °C を超える条件では調圧機構付きカップを用いて水蒸気透過度測定を行った。

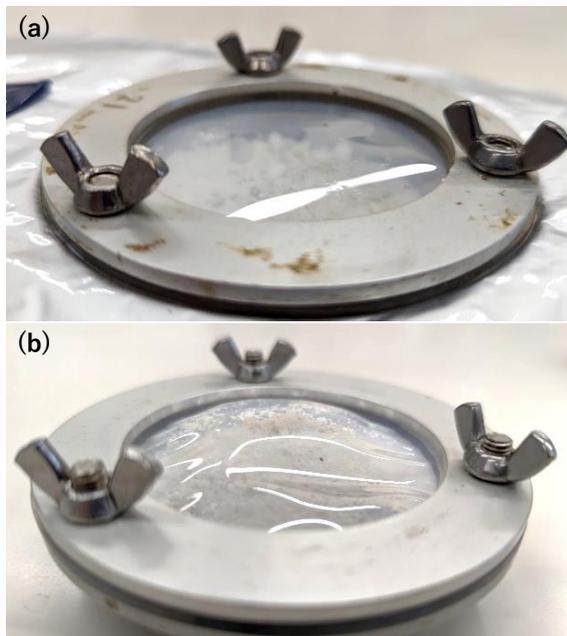


図 2 水蒸気透過度測定後の PEN (a) 調圧機構付きカップ、(b)従来のねじ締め式カップ

温度 120 °C、相対湿度 85% において秤量間隔を 3~86 時間と変えて測定した PEN の水蒸気透過度を図 3 に示す。秤量間隔が 7 時間 (水蒸気透過量 0.08 g) 以下では水蒸気透過度の標準偏差が大きかった。一方、秤量間隔が 16~86 時間 (水蒸気透過量 0.18~0.95 g) の場合は測定された水蒸気透過度が一定となり標準偏差が小さかった。これは、水蒸気透過量を大きくすることで秤量誤差の影響が小さくなったこと、及び秤量間隔を長くすることで秤量間隔前後の加熱及び冷却時間に生じる質量変動の誤差の影響が小さくなったことによつて、標準偏差が小さくなったと推察される。

また、秤量間隔を 1~93 時間と変えて測定した PI の水蒸気透過度を図 3 に示す。PEN と同様に秤量間隔が 3 時間 (水蒸気透過量 0.14 g) 以下では水蒸気透過度の標準偏差が大きくなり、秤量間隔が 7~30 時間 (水蒸気透過量 0.31~1.38 g) では水蒸気透過度が一定となり標準偏差が小さかった。また、PI の場合は秤量間隔を 38 時間 (水蒸気透過量 1.63 g) 以上とすると水蒸気透過度が低下した。これは、吸湿量が増えて吸湿剤の吸湿力が弱まったためと考えられる。

高温下水蒸気透過度測定において、吸湿剤の吸湿力を維持するために水蒸気透過量が 1.38 g 以下となる秤量間隔を選択することが望ましいと推察された。また、測定値の標準偏差を小さくするために水蒸気透過量が 0.18 g 以上となる秤量間隔を選択することが望ましいと示唆された。

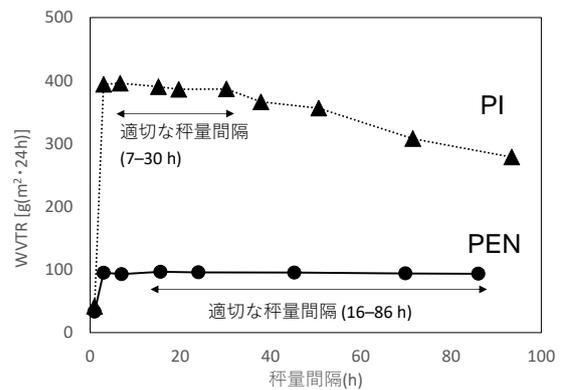


図 3 PEN 及び PI の水蒸気透過度測定結果

表 1 樹脂フィルム及び接着剤の水蒸気透過度及び活性化エネルギー (Ep)

試料	厚み ( $\mu\text{m}$ )	水蒸気透過度 ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$ , mean $\pm$ SD), 85% RH							Ep ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )
		40 °C	60 °C	85 °C	110 °C	120 °C	130 °C	138 °C	
PC	500	8.6 $\pm$ 0.2	21 $\pm$ 0.2	61 $\pm$ 0.4	163 $\pm$ 1.1	225 $\pm$ 1.4	305 $\pm$ 4.5	428 $\pm$ 6.4	0.6
PI	100	16 $\pm$ 0.5	41 $\pm$ 0.6	109 $\pm$ 2.0	288 $\pm$ 5.1	386 $\pm$ 1.2	522 $\pm$ 2.1	652 $\pm$ 8.6	-1.2
PET	100	5.8 $\pm$ 0.1	16 $\pm$ 0.1	57 $\pm$ 0.6	262 $\pm$ 3.8	439 $\pm$ 5.9	766 $\pm$ 7.7	1106 $\pm$ 9.0	2.3 (40~70 °C), 28 (85~138 °C)
PEN	100	1.4 $\pm$ 0.1	4.8 $\pm$ 0.1	19 $\pm$ 0.2	61 $\pm$ 0.6	95 $\pm$ 0.8	156 $\pm$ 0.3	235 $\pm$ 4.4	12 (40~120 °C)
Adhes.	100	4.0 $\pm$ 0.1	21 $\pm$ 0.3	117 $\pm$ 2.1	633 $\pm$ 6.2	1140 $\pm$ 21	-	-	30

各種樹脂フィルム及び接着剤の 40~138 °C, 85% RH における水蒸気透過度の一覧を表 1 に示す。水蒸気透過度が小さい場合や測定温度が低い場合は秤量間隔を長くし、水蒸気透過度が大きい場合や測定温度が高い場合は秤量間隔を短くして、2 秤量間の質量増加が 0.2~1.0 g の範囲内になるようにした。110 °C 以上において、いずれの試料も水蒸気透過度の標準偏差が小さかった。水蒸気透過度は温度の上昇と共に指数関数的に増大し、138 °C では 40 °C の 41~194 倍の水蒸気透過度となった。接着剤は軟化点 (120 °C) を超える条件において測定中の試料損傷を回避できず、測定ができなかった。

樹脂フィルムの水蒸気透過のアレニウスプロットを図 4 に示す。PC (ガラス転移温度  $T_g$  142 °C) 及び PI ( $T_g$  200 °C 以上) について、40~138 °C の範囲で測定値が近似直線上に分布した。また、PET ( $T_g$  70 °C) は  $T_g$  近傍で屈曲点が現れており、屈曲点の低温側 (40~70 °C) は近似直線上に分布し、屈曲点近傍 (70~85 °C) は緩やかに屈曲し、屈曲点の高温側 (110~138 °C) は低温側とは異なる近似直線上に分布した。PEN ( $T_g$  120 °C) においても  $T_g$  近傍に屈曲点が表れ、屈曲点前半 (40~120 °C) は近似直線上に分布した。一方、屈曲点近傍 (120~138 °C) も一見すると近似直線上に分布しているように見えるが、PET の透過特性を参照すれば、PEN の屈曲点近傍は緩やかに屈曲しているものと予想される。接着剤 ( $T_g$  40 °C 以下) の水蒸気透過のアレニウスプロットを図 4 に示す。40~120 °C の範囲で測定値が近似直線上に分布した。

アレニウスプロットの近似直線から求めた水蒸

気透過の活性化エネルギーを表 1 に示す。PET は  $T_g$  の前後で 2 種類の活性化エネルギーが決定され、高い温度では活性化エネルギーが低い温度の 12 倍に増加した。PEN の場合は  $T_g$  が測定の上限值 (138 °C) に近いため、 $T_g$  より高い温度での透過の活性化エネルギーが決定できなかった。

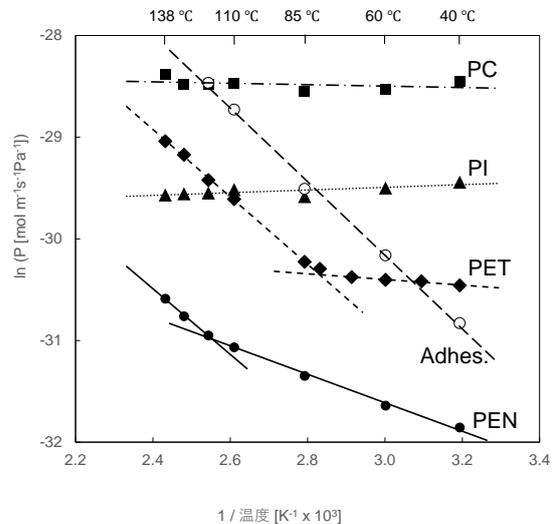


図 4 水蒸気透過のアレニウスプロット

#### 4 まとめ

調圧機構付きカップと HAST チャンバーを組み合わせることで、138 °C までの高温下水蒸気透過度測定が実現できた。PC 及び PI のアレニウスプロットが直線関係を示したことから、本手法が妥当な測定方法であることが示された。また、PET 及び PEN のアレニウスプロットにおいて  $T_g$  近傍での屈曲点を捉え、透過性の変化を捉える高精度な測定が実現された。さらに、接着剤の高温下水蒸気透過度が測定できたことから、HAST 試験や車載用燃料電池などの過酷環境で接着剤を適用する際に、その防湿性評価手法として本手法が適用

できると期待される。

における水蒸気透過度測定技術の開発(第2報)”,  
埼玉県産業技術総合センター研究報告第14巻  
(2016)

#### 謝 辞

本研究成果は、NEDO「固体高分子形燃料電池用接着シール技術の研究開発」プロジェクト(JPNP20003)の支援を受けて行われました。

#### 参考文献

- 1) JISZ0208:1976 防湿包装材料の透湿度試験方法(カップ法)
- 2) JIS K 7129:2008 フィルム及びシートー水蒸気透過度の求め方
- 3) IEC 60068-2-67 Environmental testing-Part 2 : Tests- Test Cy : Damp heat, steady state, accelerated test primarily intended for components
- 4) Urbani, F., Barbera, O., Giacoppo, G., Squadrito, G., & Passalacqua, E. Effect of operative conditions on a PEFC stack performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(12), 3137-3141 (2008). [10.1016/j.ijhydene.2007.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.11.014)
- 5) Bieringer, R., Adler, M., Geiss, S., & Viol, M. Gaskets: Important durability issues. *Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability*, 271-281(2009). [10.1007/978-0-387-85536-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-0-387-85536-3_13)
- 6) Iizuka, S., Murata, K., Sekine, M., & Sato, C. A novel cup with a pressure-adjusting mechanism for high-temperature water vapor transmission rate measurements. *Polymer Testing*, 50, 73-78(2016). [10.1016/j.polymertesting.2015.11.018](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.11.018)
- 7) Iizuka, S., Sekiguchi, Y., & Sato, C., Measurement of the water vapor transmission rate at temperatures above 100° C, *The Journal of Adhesion*, 101(5), 776-793(2024). [10.1080/00218464.2024.2394596](https://doi.org/10.1080/00218464.2024.2394596)
- 8) 飯塚真也、村田一英、関根正裕：高温環境下における水蒸気透過度測定技術の開発”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告第13巻 (2015)
- 9) 飯塚真也、村田一英、関根正裕：高温環境下における水蒸気透過度測定技術の開発(第2報)”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告第14巻 (2016)

# 米麴を使用したグルテンフリー米粉パンの製パン機構の解明

＜公益財団法人エリザベス・アーノルド富士財団令和5年度学術研究助成＞

仲島日出男\*<sup>1</sup> 松本美樹\*<sup>2</sup>

## Research for the Baking Mechanism of Gluten-Free Rice Flour Bread Using Rice Koji

NAKAJIMA Hideo\*<sup>1</sup>, MATSUMOTO Miki\*<sup>2</sup>

### 抄録

米麴を使用した米粉パンの生地形成プロセスを解明するため、米粉パン製造の最初の工程である米粉生地の米麴処理中の微生物解析を行うとともに、生地中の遊離アミノ酸含量、有機酸含量及び米タンパク分解物の解析を行った。米粉生地の分解処理中の乳酸菌の増加による生地pHの低下が、米粉パンの膨らみに必要となる粘性付与タンパク質の生成を促進していると考えられた。米麴及び米粉中に存在する乳酸菌がグルテンフリー米粉パンの形成に重要な役割を担っていることが強く示唆された。

キーワード：米粉パン，米麴，乳酸菌，米タンパク

### 1 はじめに

小麦アレルギー疾患患者数の増加や、世界的な小麦供給不安などの要因から、米粉パンへのニーズが高まっている。米粉はグルテンを含まないため、グルテンフリーのパンの製造において重要な役割を果たす<sup>1)</sup>。しかし、米粉だけでは小麦粉に比べて膨らみが悪く、パンの製造には生地の粘性を向上させ、ガスを保持するための工夫が必要となる<sup>2)</sup>。これまで、小麦粉を使用しない米粉パンの製造には、増粘多糖類などが多く使用されてきたが、消費者の食の安全志向に応えるためには、米由来の原料のみを使用することが望ましい。

こうした背景から、我々は米麴を用いて、米粉100%のパン生地に粘性を付与する方法を開発した<sup>3,4)</sup>。具体的には、米粉、米麴、水を混ぜた米粉生地をホイロで一晩発酵させる。この過程で、米麴に含まれるプロテアーゼが米粉中のタンパク質

を部分的に分解し、粘性を与えるタンパク分解物を生成する<sup>5)</sup>。さらに、発酵過程でパン酵母を加えることでガス保持力が向上し、膨らみのある米粉パンが完成する。

また、米粉生地の分解処理中には、生地のpHが低下する現象も観察されており<sup>4)</sup>、この過程で生成される粘性タンパク質に加え、酵母や乳酸菌などの微生物が複合的に作用して、最終的なパン生地の物性が向上している可能性が示唆された。本研究では、米麴を用いた米粉パンの生地形成過程における、微生物群の複合的な役割を解明することを目的とする。

### 2 実験方法

#### 2.1 米粉生地試験

みたけ食品工業（株）（埼玉県）から市販されている米粉パン用の米粉を使用して一連の試験を実施した。原料米粉に対して水を100wt%、家庭用ミキサーで粉碎した市販米麴の粉末を3wt%加えて混合して米粉生地を調製した。これをインキュ

\*<sup>1</sup> 食品プロジェクト担当

\*<sup>2</sup> 食品・バイオ技術担当

表1 モデル米粉生地試験条件

試験区	米粉	加水	マイクロ波加熱	米麴
①加熱米粉	10.3g	200g	500W 3分	—
②加熱米粉+麴	10.0g	200g	500W 3分	0.3g
③非加熱米粉	10.3g	200g	—	—
④非加熱米粉+麴	10.0g	200g	—	0.3g

表2 米タンパクのHPLC分析条件

カラム	GLサイエンス Inertsil WP300 Diol (4.6 × 250 mm, 5 μm) + Inertsil Diol (4.6 × 250 mm, 5 μm)
移動相:	0.2M NaClを含む0.1Mリン酸ナトリウムバッファー (pH 6.7)
流速:	0.3mL/min
カラム温度:	35°C
注入量:	25 μL
検出波長:	214nm

ベーター内で 24 時間分解処理を行った。分解処理 15、18、24 時間後の米粉生地について、一般生菌数、酵母数及び乳酸菌数を測定した。比較として、米麴を添加しない米粉生地についても生菌数を測定した。

さらに、乳酸菌の由来を確認するために、表 1 の配合により、通常の米粉生地の 20 倍量の加水によりモデル米粉生地を調製し、インキュベーターでの分解処理後の生地 pH の変化を確認した。一部の試験区では、米粉への加水後にマイクロ波による加熱処理を行い、その後に米麴粉末を添加して米粉生地を調製し、米粉の加熱処理及び米麴添加の有無による生地 pH 変化の差異を確認した。

## 2.2 米タンパク分解物組成

米タンパク分解物組成については高速液体クロマトグラフ (HPLC) を使用して分析を行った<sup>9)</sup>。6.0M 尿素及び 1% ジチオトレイトールを含む 2% ドデシル硫酸ナトリウム水溶液を抽出溶媒に使用して、上記のアミノ酸・有機酸分析と同様の抽出操作を行い、得られた遠心上清について、表 2 に

示す条件により抽出タンパク質の分子量分布を測定した。

## 3 結果及び考察

### 3.1 米粉生地試験

米麴による米粉生地分解処理中の一般生菌数、酵母数、乳酸菌数及び生地 pH の変化を図 1 に示す。分解処理の進行とともに一般生菌数が増加し、18 時間経過時においてそれらは  $10^9$  まで増加したが、その後の変化は小さかった。生地中の酵母数については、 $10^3 \sim 10^4$  程度で大きな変化はなかった。また、米麴を添加しない生地において、生菌数及び酵母数が米麴添加生地より少なかった。

生地 pH の低下に寄与する乳酸菌の由来をさらに確認するため、米粉の加熱処理を含めたモデル米粉生地の pH 変化を測定した (図 2)。生地に麴を添加した米粉生地②と④では、米粉の加熱処理の有無によらず分解処理 24 時間後の生地 pH が 3.8 まで低下した。これらは米麴中に存在している乳酸菌の増殖によるものと推定された。一方、麴を使用しない米粉のみの生地では、加熱処理を行った

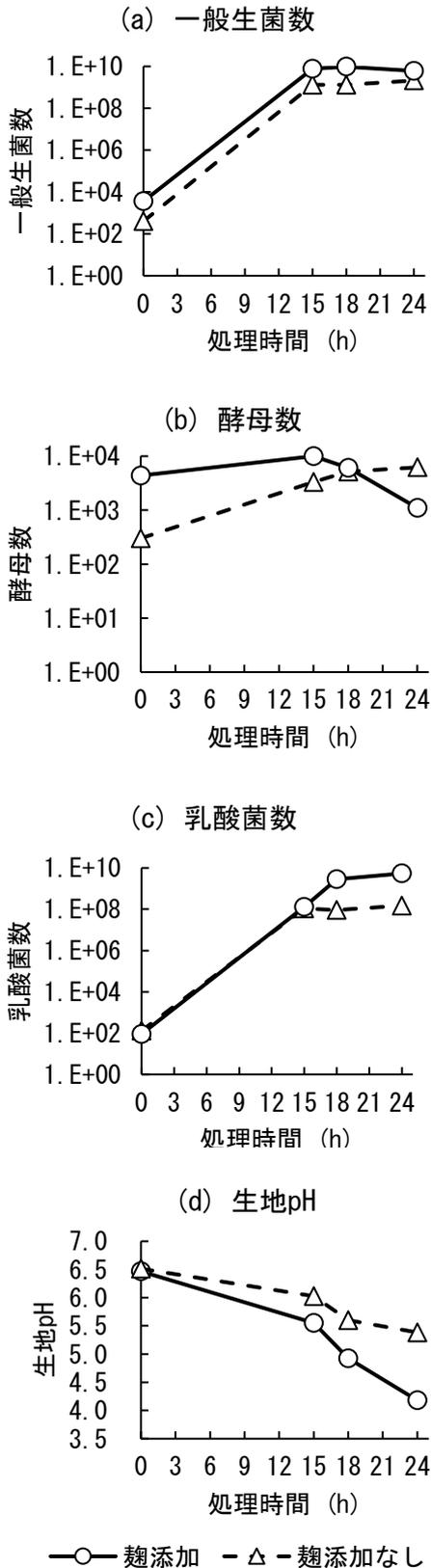


図1 米粉生地の菌数及びpH測定結果

①の生地における分解処理24時間後のpHは6.7であり、pH低下が抑制された。一方、加熱処理を行わない米粉生地③においては、米麩を添加しない

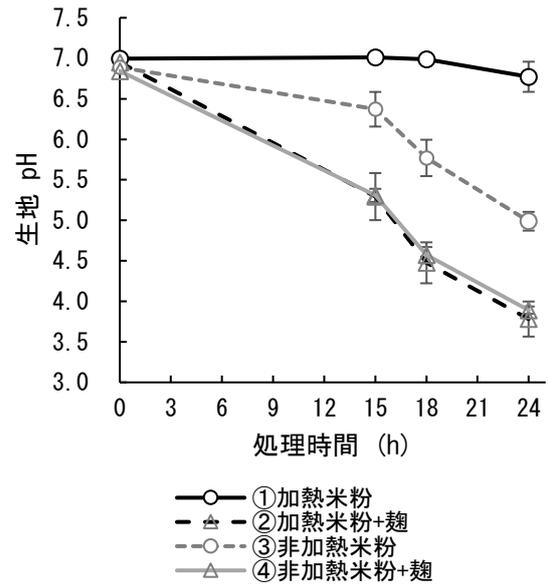


図2 モデル米粉生地のpH変化

条件においても24時間後にpHが5.0まで低下した。このように、米粉生地のpH低下は米麩だけでなく米粉由来の乳酸菌もその要因となっていると考えられた。

これらの結果から、米粉生地中においては、米粉由来及び米麩由来の乳酸菌の両者が共存しており、それらが分解処理中に増加し、生地pHを低下させていると考えられた。

### 3.2 米タンパク分解物組成

図3に、HPLCにより確認した米粉生地中の可溶性タンパク質の分子量分布に対応したクロマトグラムを示す。米粉生地の分解処理の進行とともに、保持時間が13分までの高分子量画分のピークが小さくなり、16分から20分までの比較的低分子量側のピークが大きくなった。分子量の大きいものからA~Dにクロマトグラムを分割し、それぞれのピーク面積を比較した(図4)。遊離アミノ酸と同様、分解処理18時間以降のピーク面積の増加が大きかった。特に分子量が10-20kDa付近に対応するCの画分のピーク面積の増加量が大きく、この分子量領域のタンパク質分解物が生地粘性に関与していると考えられた。

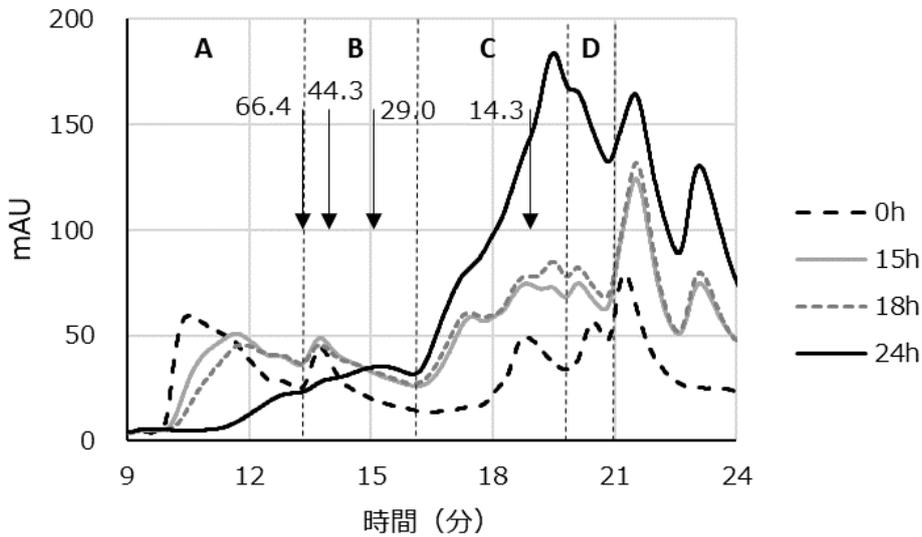


図3 米タンパク分解物のクロマトグラム

4種の分子量マーカーの溶出位置を矢印で示す（分子量単位:kDa）。  
 得られたクロマトグラムを以下の4領域に分割してピーク面積を算出した。  
 A: 9.0-13.2分、B: 13.2-16.5分、C: 16.5-19.8分、D: 19.8-20.8分

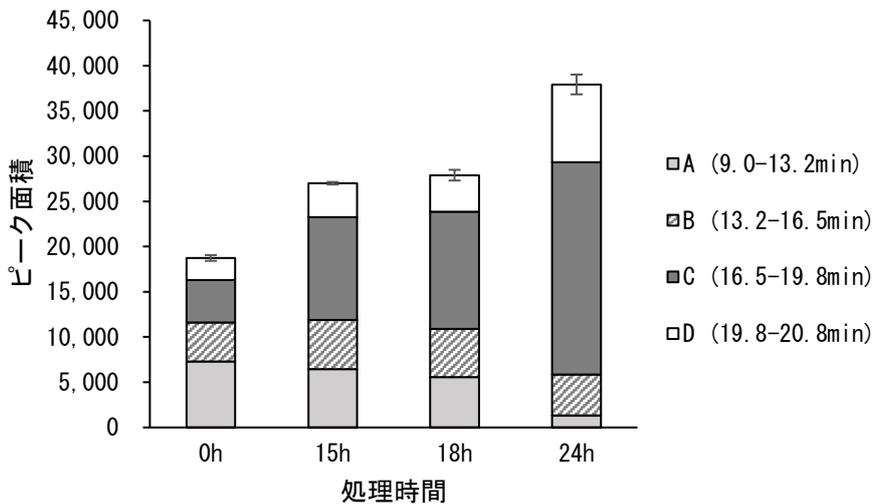


図4 米タンパク分解物のピーク面積の変化

遊離アミノ酸及び米タンパク分解物のいずれも分解処理 18 時間以降での増加量が大きかった。この要因はいずれも生地 pH の低下に伴う麴プロテアーゼの活性化であると考えられた。これらのことから、米粉パンの生地形成プロセスには、米粉生地の分解処理中の乳酸菌の増加とそれに伴う生地 pH の低下が大きな役割を果たしているといえる。生地の分解処理中に米粉及び米麴由来の乳酸菌が増殖し、これらによって生産される乳酸により生地 pH が低下する。その結果、

米麴プロテアーゼの活性化により粘性タンパク質の生成が促進され、米粉パン生地の粘性付与や発酵ガスの保持が実現される。米麴を使用したグルテンフリー米粉パンは、米麴由来の酵素だけでなく、これらの乳酸菌の働きにより製造が可能になっていることが、本研究の結果から強く示唆された。

#### 4 まとめ

米麴を使用した米粉パンの生地形成プロセスを

解明するため、米粉パン製造の最初の工程である米粉生地での米麴処理中の微生物解析を行うとともに、生地中の遊離アミノ酸含量、有機酸含量及び米タンパク分解物の解析を行った。米粉生地の分解処理中に増殖する乳酸菌により生産される乳酸量の増加及びこれに伴う生地 pH の低下が、米粉パン生地の発酵ガス保持を実現するために必要となる粘性付与タンパク質の生成を促進していると考えられた。現在販売されている米粉パンは、米麴由来のタンパク質分解酵素だけでなく、米粉及び米麴中に存在する乳酸菌の働きにより生産が可能になっていると考えられる。日本酒の生酏造りで見られるような米麴と乳酸菌の共生系の働きが、グルテンフリー米粉パンの製造に重要な役割を担っていることが強く示唆された。

#### 謝 辞

本研究を進めるに当たり、客員研究員として御指導いただきました石川県立大学の本多裕司教授に感謝の意を表します。

本研究は公益財団法人エリザベス・アーノルド富士財団令和5年度学術研究助成を受けて実施したものです。

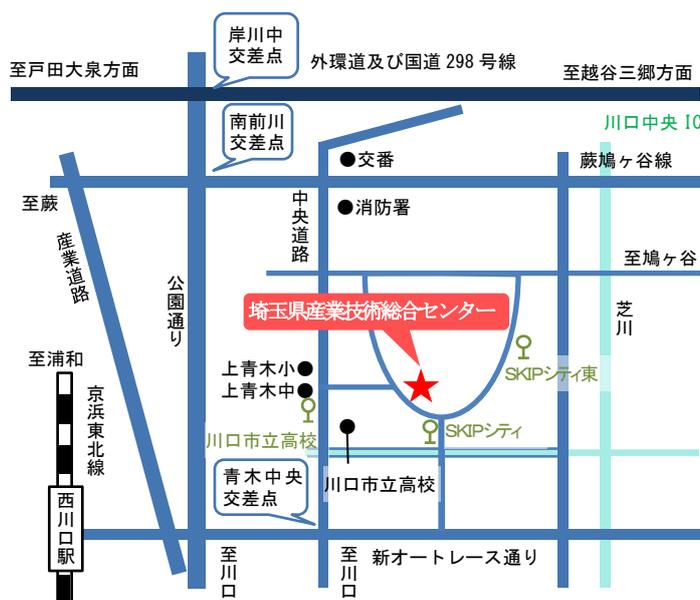
#### 参考文献

- 1) 大坪研一, “米の機能性食品化と新規利用技術・高度加工技術の開発”, テクノシステム, p303 (2022).
- 2) 奥西智哉, “米粉パン研究の現状とこれから”, 日本調理学会誌, vol. 48, no. 6, p385 (2015).
- 3) 仲島日出男, 海野まりえ, 原田雅典, 成澤朋之, 常見崇史, 荒木和樹, 奥西智哉, “グルテンフリー米粉パンの風味制御技術の確立”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, vol. 20, p24-28 (2022).
- 4) 仲島日出男, 海野まりえ, 原田雅典, 成澤朋之, 常見崇史, 荒木和樹, 奥西智哉, “グルテンフリー米粉パンの風味制御技術の確立 (第2報)”, 埼玉県産業技術総合センター研究報告,

vol. 21, p26-30 (2023).

- 5) Honda Y., Inoue N., Kurita M. and Okunishi T., “Alpha-Glutelin Degradation and Its Hydrolysate by Protease Enhance the Specific Volume of Gluten-Free Rice Starch Bread”, *J. Cereal Sci.*, Vol. 102, p2-7 (2021).
- 6) A. Van Der Borght, G. E. Vandeputte, V. Derycke, K. Brijs, G. Daenen and J. A. Delcour, “Extractability and Chromatographic Separation of Rice Endosperm Proteins”, *J. Cereal Sci.*, Vol. 44, p68-74 (2006).

## 【問い合わせ先】



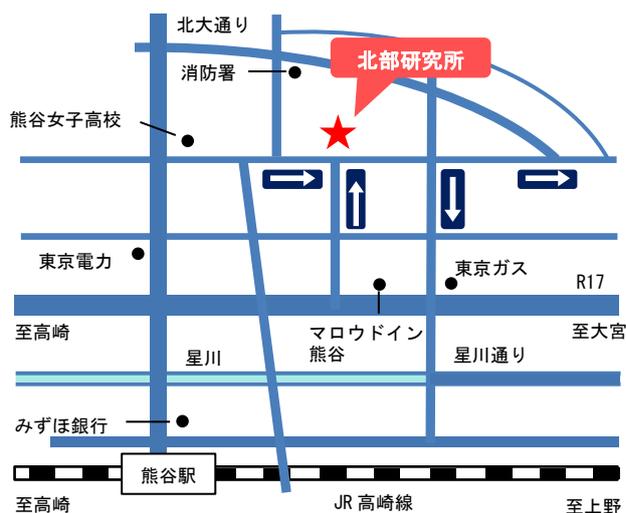
### 埼玉県産業技術総合センター

〒333-0844

埼玉県川口市上青木 3-12-18

TEL 048-265-1311

FAX 048-265-1334



### 埼玉県産業技術総合センター

#### 北部研究所

〒360-0031

埼玉県熊谷市末広 2-133

TEL 048-521-0614

FAX 048-525-6052

## 令和6年度 埼玉県産業技術総合センター研究報告 Vol. 23

令和8年3月発行

発行：埼玉県産業技術総合センター

〒333-0844 埼玉県川口市上青木 3-12-18

TEL 048-265-1368 (金・繰越 金) FAX 048-265-1334

URL <https://www.pref.saitama.lg.jp/saitec/>

無断複写・転載を禁じます