

研究報告

第27号 (2025.3)

Reports of Iwate Industrial Research Institute
No. 27



地方独立行政法人岩手県工業技術センター

地方独立行政法人岩手県工業技術センター研究報告

第 27 号

－ 目 次 －

◆ 電子情報システム部

- 1 クラスター分析による製品の良品自動判定と理美容はさみの隙間形状への適用
二瓶貴之 1

◆ 機能材料技術部

- 2 分子接合技術の三次元回路基板への応用
【投稿論文再掲】 MATERIAL STAGE, Vol.23, No.2(2023)
鈴木一孝 目黒和幸 黒須恵美 7

◆ 素形材プロセス技術部

- 3 シミュレーション技術を活用した穀物用コンバイン開発の効率化に関する研究
佐々木駿 大里達朗 桑嶋孝幸 佐々木龍徳 12
- 4 デジタルシボによる機能性シボを有する鋳鉄フライパンの作製
和合健 生内智 及川春樹 17
- 5 レーザ溶接した Ti 合金積層造形体の機械的特性改善のためのレーザ熱処理
園田哲也 黒須信吾 佐々木龍徳 23
- 6 ねずみ鋳鉄によるマルエージング鋼積層造形体の鑄ぐるみの接合性評価
高川貫仁 黒須信吾 園田哲也 岩清水康二 28

◆ 産業デザイン部

- 7 3D 治具を活用した木材 CNC 加工技術の開発 (第 1 報)
内藤廉二 長嶋宏之 永山雅大 34

◆ 醸造技術部

- 8 麦汁で発酵可能な清酒酵母の開発
玉川英幸 38
- 9 自然環境からの *Saccharomyces cerevisiae* の分離とビール醸造への利用
玉川英幸 笹渡繁巳 45

10 麹菌紅椿を用いた味噌の製造試験

畑山誠 53

◆ 食品技術部

11 燻製フレーバーホイールの作成とスモークチップの香り特性

伊藤菜々 及川和宏 56

12 IoT 機器を用いた麺の簡易乾燥(II) ～半生麺の乾燥制御～

武山進一 61

クラスター分析による製品の良品自動判定と 理美容はさみの隙間形状への適用*

二瓶 貴之**

本研究では、理美容はさみの品質検査をとりあげ、デジタルデータとその分析技術を活用した製品の良否判定システムを開発した。本システムでは、理美容はさみの荷重計測装置からはさみを閉じたときの荷重変化を計測し、クラスター分析の技術を適用することで良品と不良品を分けることができる。クラスター分析はアイソレーションフォレスト法と、t 分布型確率的近傍埋め込み法 (t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding : t-SNE) と混合ガウスモデル (Gaussian Mixture Model : GMM) を組み合わせた t-SNE+GMM 法の二つの手法を実施し、それぞれの手法の利点と欠点について検討した。アイソレーションフォレスト法では、製品の型番ごとにデータの異常検知が可能となった。t-SNE+GMM 法では、型番間で特徴を捉えたクラスター分析が可能となった。

キーワード：クラスター分析、アイソレーションフォレスト、t-SNE、理美容はさみ

Determination of Products by Cluster Analysis, and Application to the Goodness of the Shape of Hairdressing Scissors

NIHEI Takayuki

Key words: cluster analysis, isolation forest, t-SNE, hairdressing scissors

1 緒言

日本では少子高齢化が進行し労働力の減少は産業界全体、特に製造業に直接的な影響を及ぼしている。この問題に対し、IoT や DX を活用した新たな解決策が提示され始めた。しかしながら IoT/DX 技術を導入しているのは主に大企業であり、中小企業では人材の不足などの要因により、技術発展の恩恵を受けられない現状がある。

理美容はさみは、熟練の職人の手によって作製されており、切れ味には、刃そのものの鋭さだけではなく、刃同士のかみ合わせも重要になるため、最終出荷時に熟練の検査官が調整を行うことで品質を維持している。しかしながら、理美容はさみの品質は、現在、世界的に統一された評価方法は確立されておらず、検査官の技能に判断が委ねられている。そのため、数値化した客観的で統一された品質評価方法の確立が課題となっている。

理美容はさみの官能評価項目の一つに「調子」があり、これは、はさみのかみ合わせを反映した使用感の評価である。この評価は、検査官の評価方法の伝承や、模倣品対策など、品質を保つための重要項目である。井上、飯村らは、独自に開発したはさみの荷重計測器 (図 1) ではさみのかみ合わせのための検査方法の標準化、規格化を図ることを目指し、研究を進めてきた¹⁾²⁾。

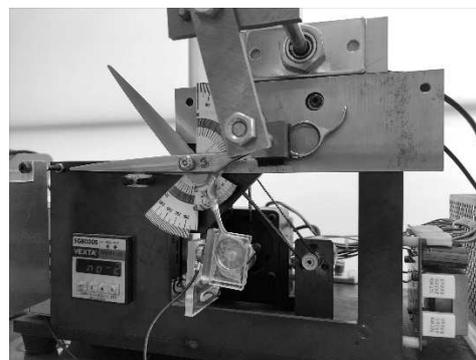


図 1 東光舎製荷重計測装置

開発したはさみの荷重計測器によって、はさみの切断現象について詳細な分析ができるようになった一方で、各々のはさみ製品の計測データを用いて、職人が実施している調子の良否の判断を行えるまでには至っていない。

そこで本研究では、県内企業で製造されている理美容はさみ製品で実際に行っている検査工程を例とし、デジタルデータとその分析技術を活用した良品自動判定システムの開発を検討した。本システムを適用することで、熟練者の技能が必要な検査工程を、誰でも実施できるよ

* 令和 5 年度ものづくり DX システム導入支援強化事業

** 電子情報システム部

うになることが期待される。

本システムでは、データサイエンスの分野で近年急速に発展している技術の一つである、クラスター分析を用いた。計測装置から取得される製品の状態を表すデータから、異常な計測データを自動で判定する方法を検討した。

2 実験方法

2-1 理美容はさみ用荷重計測装置による評価

図2は東光舎製のはさみ開閉荷重計測装置のモデル図である。当該装置ははさみを固定するクランプ機構、はさみを開閉させる駆動部からなる。駆動部はステッピングモータとモータに接続しはさみの持手部分と接触する回転アーム、アーム先端のはさみと接する部分に取り付けられた閉口時にかかる荷重を測定するロードセル、及びロータリーエンコーダで構成される。

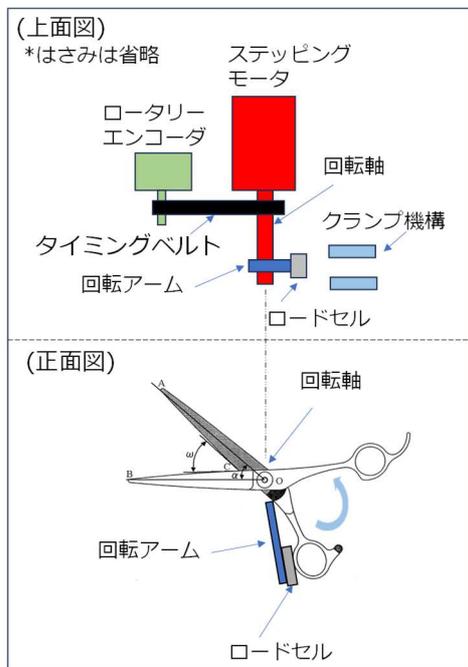


図2 はさみ開閉荷重計測装置モデル図

本装置では、はさみを開口状態からステッピングモータにて一定の角速度で閉口させ、その時にはさみの持ち手にかかる荷重の変化(波形と呼ぶ)を計測する。時間が経過するにつれて、はさみはアームの回転力によって徐々に閉じられていく。この時の荷重がロードセルによって計測され、データロガーに記録される。本装置では毛髪や試験用紙など被切断物の切断の際の荷重波形を計測することができるが、本実験においては、被切断物を用いず何も無い状態での荷重波形を計測する。これを空切り波形と呼ぶ。

図3に検査官により良品と判定された理美容はさみの空切り波形の例を示す。荷重が最大になる時が、交点が刃

先に到達した時である。閉口時の荷重波形において、開始後から荷重が最大になるまでの領域が、製品の「調子」を計測するための、かみ合わせを最も反映している箇所である。

本実験は、東光舎製品6種129丁の理美容はさみと、理美容はさみの品質規格の制定を目指す団体 Hairdressing Scissors Consortium (以下、HSC)の各社より理美容はさみを合わせて9丁入手し、合計138本の荷重計測データを収集して分析の母集団データとした。

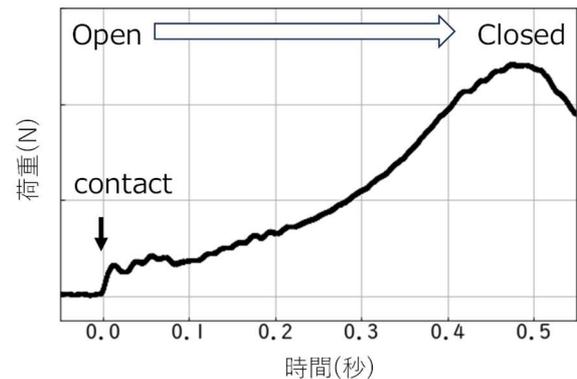


図3 はさみ(良品)の荷重計測例

2-2 クラスタ分析

クラスタ分析は、多数のデータについてそれぞれ特徴が異なるデータを集団(クラスタ)として分類するためのデータ分析手法であり、教師なし機械学習の一種である。すなわち、ヒトの手によって、「正常」「異常」といったラベルづけをすることなく、データを分類するために使われる手法である。

本研究で検討したアイソレーションフォレストは、クラスタ分析の一手法であり、階層構造で、多数データと小数データに区別する異常検知手法である³⁾。また、t分布型確率的近傍埋め込み(t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding、以下 t-SNE)と混合ガウスモデル(Gaussian Mixture Model、以下 GMM)を組み合わせたクラスタ分析も検討した。

一つ目のアイソレーションフォレスト法は、決定木を用いて異常検知を行うため、荷重計測データのような高次元のデータに対して効率的に検出できる特長がある。また、木構造における末端ノードまでのパス長の長さで異常度を計算するため、他の一般的な異常検知手法よりも負荷を少なくして計算できる。

二つ目の手法である t-SNE 分析は次元削減手法の一種であり⁴⁾、また、GMMはEMアルゴリズム⁵⁾を用いて最適化を行う非階層クラスタ分析の一種である。t-SNEとGMMを組み合わせて計測データに適用することで、はさみの型番ごとの波形の特徴を複数のクラスタとして認識することができるため、どの型番にも属さない計測

データを異常として検出できる。したがって、複数のはさみの型番を同時に取り扱うことができる。例えば、特定の型番で計測データが一つしかないような場合でも異常判定できるため、検討手法の一つとして採用した。

以上、二つのクラスター分析手法を、理美容はさみの良品/不良品を自動的に判定するためのツールとして検討した。

データ処理は Python を用いて行い、各分析は Python の機械学習ライブラリ `scikit-learn` で提供されている `sklearn.ensemble.IsolationForest`、`sklearn.manifold.TSNE` 及び `sklearn.mixture.GMM` クラスモジュールを用いて分析を実施した。可視化には同じく Python のグラフ描写ライブラリ `Matplotlib` を用いた。

3 結果及び考察

3-1 アイソレーションフォレスト法と分析結果

東光舎の理美容はさみ製品 6 種 129 丁について、型番ごとに閉口時の荷重計測を実施し、それぞれの結果に対してアイソレーションフォレスト法による分析を実施し

た。

例として、型番 A 及び B のアイソレーションフォレスト分析による良品自動判定の結果を図 4 及び図 5 に示す。各図の左側のグラフは個々の荷重計測の波形データであり、赤い波形が自動的に「異常」の予測ラベルが付されたデータである。

また、各図の右側のグラフは、各結果に対してアイソレーションフォレストによって評価された異常度 s (Degree of Anomaly) のスウォームプロットである。異常度 s は原論文³⁾によれば、以下の式で与えられる。

$$s = 2 \frac{E(h(x))}{c(n)}$$

ここで、 x は決定木上にある点、 $h(x)$ は点 x のパス長 (ルートから点 x までの長さもしくは深さ)、 $E(h(x))$ は全ての点 x で計算されるパス長の期待値 (平均値)、 $c(n)$ は二分木の構築に失敗したときのパス長である。上記異常度 s は 0 から 1 まで変動し、 s が 1 に近づくとき異常、 s が 0 に近い場合は正常となる。これらは相対的であり、すべての点で $s=0.5$ となる場合、分析したデータセットのすべての

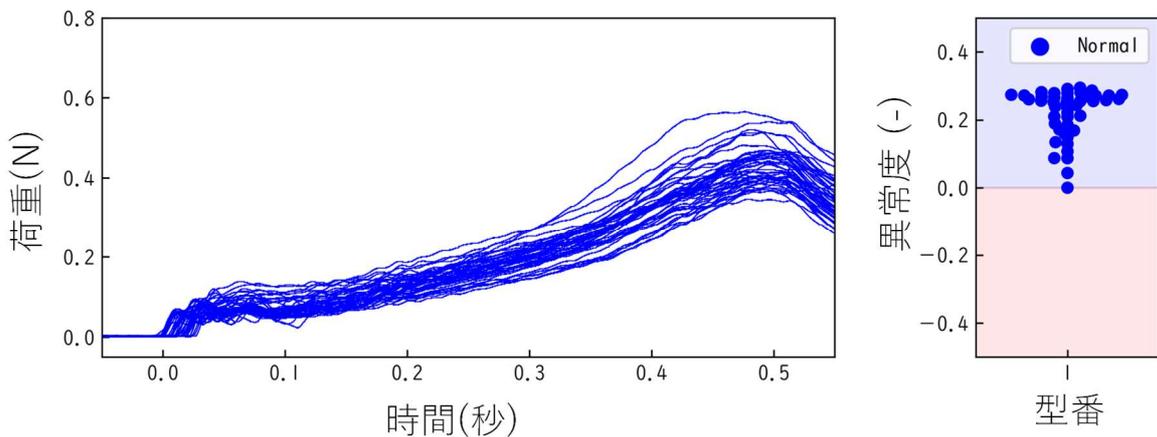


図4 型番 A のアイソレーションフォレスト分析による良品自動判定

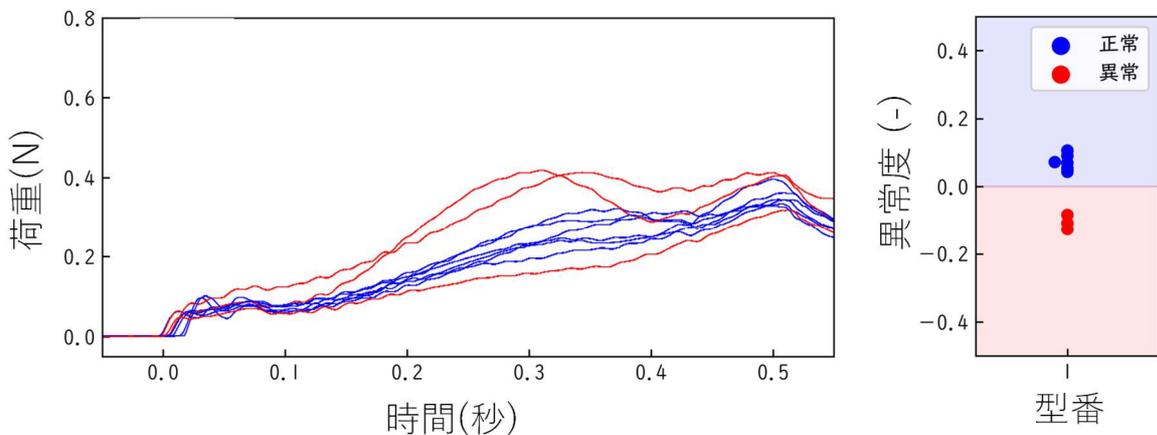


図5 型番 B のアイソレーションフォレスト分析による良品自動判定

データに明確な異常がみられないことを意味する。

Scikit-learn における sklearn.ensemble.Isolation-Forest では、-1 から 1 まで変動し、異常度 s が負の値になっているものが、「異常」と判定される。

なお、スウォームプロットとはデータ点の分布と値を同時に表現する可視化手法であり、データ点が重なる場合には横に広げて表示している。

理美容はさみ製品のそれぞれの型番について、荷重曲線とアイソレーションフォレストの予測、異常度の分布を比較しながら予測結果について考察した。出荷数量が多い型番 A では、全ての荷重計測波形が安定しておりバラツキが少ないことが分かった。このため、図 4 に示すように、型番 A の異常度のスウォームプロット（図の右側）では全てのデータが近くに密集しており、「異常」を示す赤い波形が無いことがわかった。これは、全てのデータに明確な異常がみられないことを意味する。

これに対して、図 5 に示す、出荷数が限定的な型番 B のスウォームプロットを見ると、異常データは正常データと比べて明確に異常度（赤い点）が分離されており、それらに対応した荷重計測波形（赤い波形）も各型番を代表するデータ（波形）と比べてその形状が異なっていることがわかる。

このように、アイソレーションフォレストは 10 丁程度の計測データでも、異常を的確に自動判定できることが分かった。

しかし、アイソレーションフォレストによる異常検出は高精度である一方で、同一の型番のはさみで複数の計測データが必要である。はさみの品質評価に適用する際に、依頼された特定の形状（型番）のはさみを一つだけ評価したい場合がある。そのような場合にはリファレンスとなるデータがなくアイソレーションフォレストによる異常検知は難しい。そのため、t-SNE と GMM による異常検知手法について検討した。

3-2 t-SNE と GMM による異常検知とクラスター分析結果

図 6 は、型番 A、型番 B、型番 C の荷重計測波形を同じグラフに図示したものであり、それぞれ型番ごとに異なる形状（刃の長さ、太さ等）に対応した波形である。これらを t-SNE によって次元削減し、1 軸目と 2 軸目の二次元散布図にプロットしたものが図 7 である。t-SNE 変換後においてもそれらの違いを反映した分布を持っていることがわかる。

t-SNE により変換された二次元座標は相対的であり、分析するデータの持つ特徴に依存し、物理的な意味を持たない。しかし、各データ点の相対位置の座標は、型番ごとに刃の長さや隙間形状が異なることによる荷重計測波形の平均的な傾きの違いや、はさみが閉じ切った際の最大荷重などの違いとして現れる。

図 6 における赤矢印で示した型番 B の明らかに異常な波形 2 データは、t-SNE 変換後の図 7 の散布図において赤矢印で示した 2 点としてプロットされ、他の波形計測データの t-SNE 座標から大きく外れており、明らかに異常値として判定できる。

さらに、これらを GMM でクラスター分析することで、その点がどのデータ群に属するかを判定し、その座標に点が生成される確率（もしくは尤度）を計算することができる。

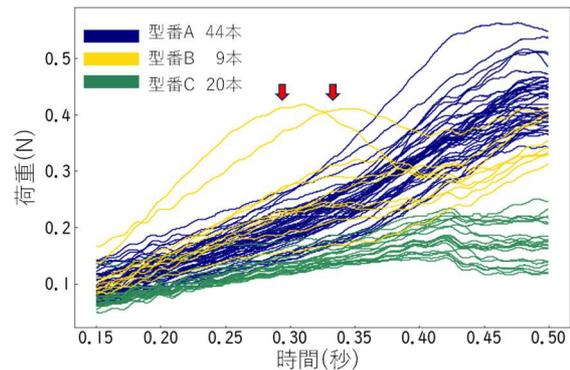


図6 型番 A, B, C の荷重計測例

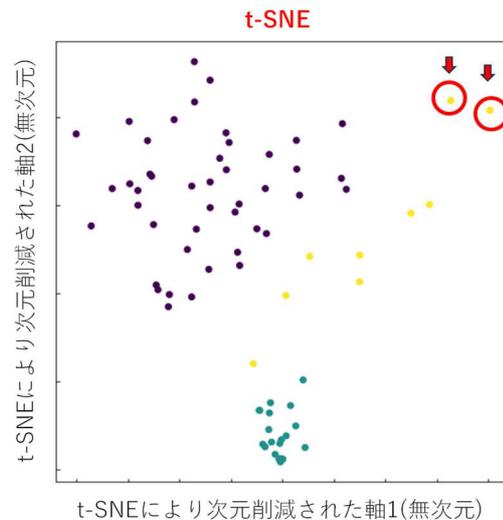


図7 型番 A, B, C の t-SNE による次元削減

図8はt-SNEの結果に対して、GMM クラスター分析を実施し、各クラスターから生成される確率に比例する尤度を等高線として表したグラフで、等高線の中央付近ほど生成確率が高く正常なデータであることを表している。点がある程度まとまった集合が正常なデータであり、そこから外れた点は異常データと判断することができる。図8から明らかなように、赤矢印で示した点は尤度が低く、したがって、異常なデータ点であると推定される。

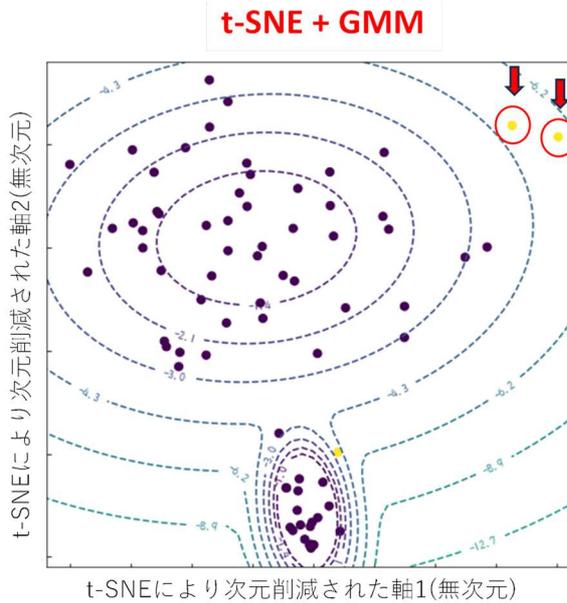


図8 t-SNE+GMM クラスター分析結果
等高線は確率に比例する負の対数尤度
(Negative log-Likelihood) を表す。

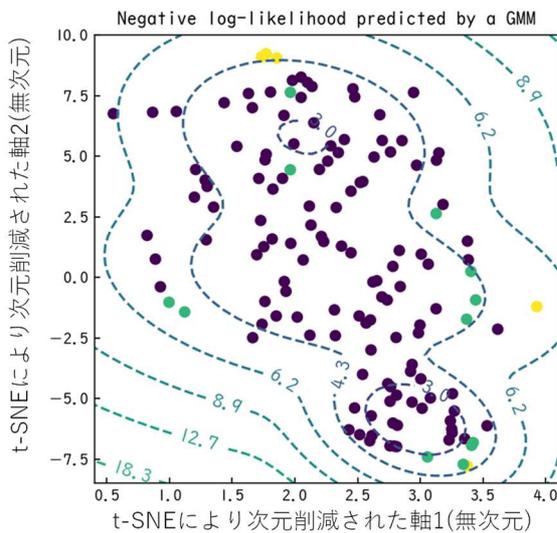


図9 前処理済みデータのt-SNE+GMM
クラスター分析結果
東光舎製6種129丁(青色,黄色)及び
HSC団体5社9種9丁(緑色)の理美容
はさみを示す。

また、図8からは、t-SNE変換が元のデータである荷重計測の波形の形状に大きく依存することが分かる。これが影響し、特定の型番で計測データが一つしかない場合について判断をしたいときに、他の形状の波形データを参考にして判断することができない。

そのためデータ前処理を実施し、他の型番でもt-SNE変換後に同じ分布を持つようにする必要がある。具体的には、計測データに微分と移動平均およびローパスフィルタを実施する。それによって、型番ごとの右肩上がりの傾きを平滑化する。この判定精度について検討した。

図9は前述のように前処理したデータについて、t-SNE分析およびGMMクラスター分析を実施した結果である。図中各点の色は、アイソレーションフォレストによってそれぞれ色分けしたもので、正常ラベルが付された荷重計測波形のデータ(青色)、異常ラベルが付された荷重計測波形のデータ(黄色)及び、HSC団体の型番が異なる9丁の荷重計測波形のデータ(緑色)である。

前処理後でも、異常ラベルが付されたデータは負の対数尤度が高く算出されているが、正常ラベルが付されたデータも同程度に負の対数尤度が高い値で算出されている点もある。

このことから、現在の前処理条件は、ある程度の正常/異常判定が行えるが、その判定の精度の向上が課題として明らかになった。判定精度の向上のためには、サンプル数や種類の増加、勾配量や移動平均など、前処理の条件について更なる検討が必要である。

4 結言

本研究では、データサイエンスによるDX化技術を地域企業に技術展開するために理美容はさみを取り上げ、アイソレーションフォレスト及びt-SNE+GMMによるクラスター分析を用いて、理美容はさみ製品の良品/不良品判定について検討した。

得られた結果は以下のとおりである。

- (1) アイソレーションフォレスト法では、型番ごとに波形の異常検出が可能となった。しかし、測定データが一つしかない型番に対しては、リファレンスとなるものがないため検出できなかった。
- (2) t-SNEでは、型番ごとの波形を二次元平面図にプロットすることで可視化でき、その結果をGMMクラスター分析することによって異常/正常の判定ができるようになった。しかしながら、型番ごとにデータが一つしかないときに判定したい場合にはデータの前処理が必要であり、適切な前処理の条件を得るための更なる検討が必要である。

謝辞

本研究は株式会社東光舎をはじめとするHSCの各社の御支援により、成果を上げることができました。特に、株

式会社東光舎の井上代表取締役社長には多大なる御協力をいただきました。心から感謝の意を申し上げます。

文 献

- 1) 井上研司：理美容はさみの切断特性と切れ味の定量評価に関する研究, 早稲田大学博士学位論文(2006)
- 2) 飯村崇：精密はさみの高付加価値化技術に関する研究, 岩手大学博士学位論文(2014)
- 3) Liu, F. T., Ting, K. M., Zhou, Z. H.: Isolation forest, Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM'08), Pisa, Italy, p.413-422(2008)
- 4) van der Maaten, L. J. P., Hinton, G. E.: Visualizing Data using t-SNE, Journal of Machine Learning Research, 9, p.2579-2605(2008)
- 5) Dempster, A. P., Laird, N. M., D. B. Rubin: Maximum-Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm, Journal of Royal Statistical Society, Series B, 39(1), p.1-38(1977)

～3次元実装や次世代半導体対応などを含めた～
 これからのプリント回路基板に関わる基板材料や、封止・絶縁・放熱などの周辺材料の開発の動き

分子接合技術の三次元回路基板への応用

～分子接合法 (i-SB 法) による三次元配線形成技術への応用開発～

鈴木 一孝 国立大学法人岩手大学 研究支援・産学連携センター 客員教授
 地方独立行政法人岩手県工業技術センター 連携推進室 主任技術専門員

目黒 和幸 地方独立行政法人岩手県工業技術センター 機能材料技術部 上席専門研究員

黒須 恵美 地方独立行政法人岩手県工業技術センター 機能材料技術部 研究技能員

1 はじめに

かつて岩手県岩手郡松尾村（現八幡平市）に東洋一の硫黄鉱山があった。この豊富な地域資源の有効利用として、岩手大学で開発されたのが、図1に示すトリアジンチオール化合物である。この含硫黄有機化合物は、金属捕集剤やゴムの補強架橋剤、ポリ塩化ビニルの耐熱架橋剤として新幹線の床材（耐シガレット材）への利用、さらにはホースの耐薬品性向上部材、医療用品の各種部品の接合にと多くの産業分野に応用されてきている。トリアジン環によって分子間が凝集しやすいこと、直鎖状分子に比べて官能基が多いことに起因した化学反応のしやすさから、様々な異種材料間の接合（共有結合による強固な接合）に有効な化合物である。この化合物は、「分子接合剤」として、これまでも広く紹介されている^{1,2)}。変革する社会ニーズに対応して、新規合成による材料開発とそのプロセス開発は継続され、最近はこの技術を分子接合法（以後 i-SB 法）として、その応用展開に努めている^{3,4)}。

さて、近年、スマートフォンに代表される移動体通信を始め、家電、自動車、医療機器など、様々なモノがインターネットに繋がり、我々の生活を便利にするなど、高速通信社会が高度化する流れは、今後もますます加速すると言われている^{5,6)}。加えて、自動車や情報通信端末等のエレクトロニクス実装部品数はさらに増加するといわれているが、その設置スペースは限られてい

る。この課題を解決する部品として、樹脂成形品へ導体配線を形成する三次元成形回路部品（3D-MID : Molded Interconnect Device の略）の需要が高まっている⁷⁾。

小型化、軽量化、複雑化に対応する回路基板に用いられる樹脂成形品表面への導体配線の密着性は、従来、アンカー効果に因ってなされている。高速通信における伝送信号の高周波化により、電流は導体の表面に集中して流れるという表皮効果の影響により、配線が粗いほどその導体損失を増加させる。従って、高周波化社会に用いられる配線回路の導体損失低減には、配線の平滑化技術が必要である。

そこで、我々は i-SB 法を用いて、次世代通信用エレクトロニクス実装部品への展開を目指し、樹脂成形品へ平滑な三次元配線形成するプロセス技術開発を進めることとした。本報では、その開発状況について以下に紹介する。

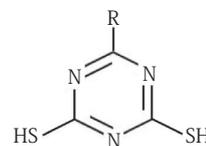


図1 トリアジンチオール化合物の化学構造

2 分子接合法 (i-SB 法) による配線プロセス

図2には、本技術 (i-SB 法) による平滑配線形成の原理を示す。1分子内に、光照射により反応性の化学種

を発生させ、樹脂材料の表面に結合する光反応性基と、めっきと結合する官能基とを有する光反応性分子接合剤を用いる。ナノオーダー膜厚の光反応性分子接合処理層が平滑な樹脂表面と導体（配線）材料とを接合する。これにより、樹脂表面に強固に接合した平滑配線を形成することができる。i-SB 法は光反応性分子接合処理層が配線材料と化学的に接合に関与している点が特長である。

図3には従来プロセスとi-SB法のめっき配線プロセスとの違いを示す。従来の工法として、レーザー照射で樹脂表面を粗面化して導体材料（めっき）を接合する方法を比較として示している。この方法では粗面化した樹脂材料に導体材料が入り込み機械的な接合強度を得ている。

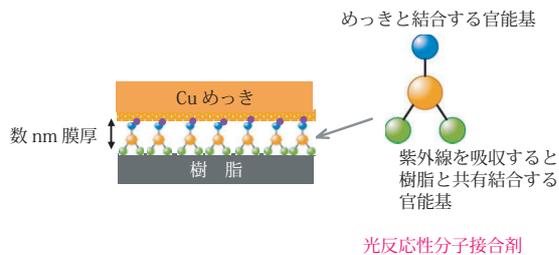


図2 i-SB法による異種材接合

i-SB法の具体的な処理プロセスは次のとおりである。樹脂表面に光反応性分子接合剤を均一塗布するために、予め樹脂表面の改質処理を行う。この改質処理が、光反応性基の反応を促進し、結果的に樹脂表面とめっきによる導電性物質との密着性をより一層向上させることができる。この樹脂表面の改質処理としては、紫外線（UV）照射処理、コロナ放電処理、プラズマ処理、エキシマ処理等が挙げられる。

光反応性分子接合剤は、溶媒に溶解した溶液として用い、その塗布方法は、例えば、浸漬、噴霧やロール塗布等が用いられる。その後の乾燥により、導入された光反応性分子接合剤は、光照射工程により基板表面と接合する。ここで用いる光照射の波長は、光反応性分子接合剤の樹脂表面への接合反応の活性化に有効である紫外線を用いている。光反応性分子接合剤が樹脂表面に、より強固に接合するため、さらに紫外線照射によって生じる樹脂表面の劣化も抑えるように、照射光の波長、ならびに積算光量を最適化が必要である。光反応性分子接合処理層が形成された樹脂表面には、金属イオンを還元するための触媒が担持されやすく、一般的な無電解めっき法で導体材料を形成することができる。

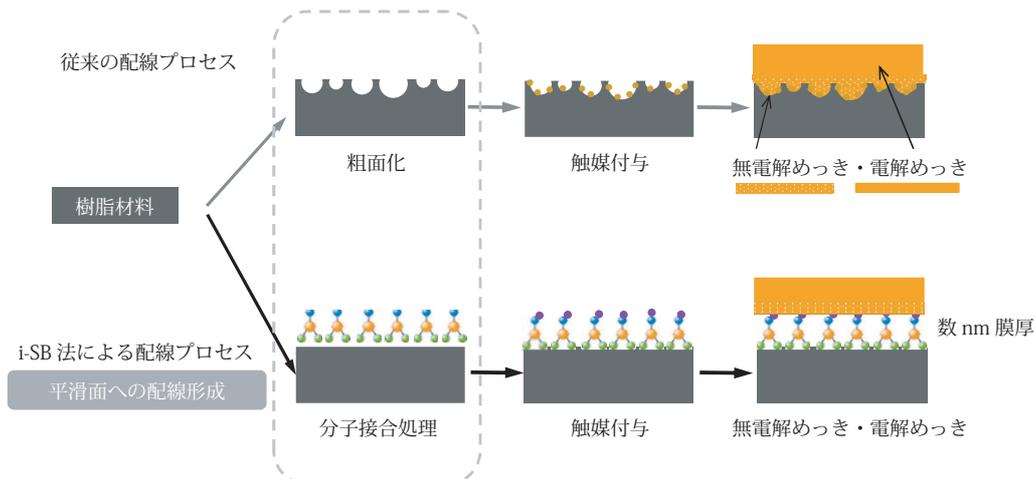


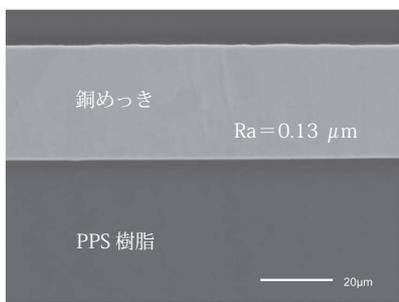
図3 従来法とi-SB法とのめっき配線プロセスの違い

～3次元実装や次世代半導体対応などを含めた～

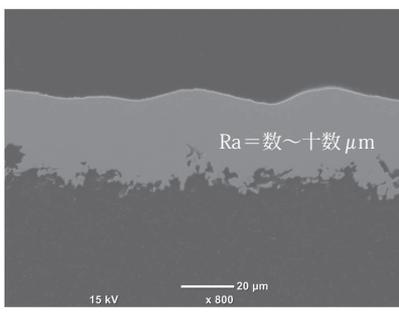
これからのプリント回路基板に関わる基板材料や、封止・絶縁・放熱などの周辺材料の開発の動き

3 分子接合法 (i-SB 法) による平滑配線の形成

写真1にポリフェニレンスルフィド (PPS) 樹脂に銅めっきした断面のSEM写真を示す。従来工法の一つであるレーザー照射による樹脂表面の算術平均表面粗さ (Ra) は数 μm から十数 μm であったが、i-SB法によるめっき前の Ra は 0.13 μm であった。この値は成形された樹脂表面の粗さと同等であり、平滑なめっきができていることを示している。



i-SB法でのめっき断面



従来工法のめっき断面

写真1 めっき断面のSEM写真

図4にはPPS樹脂へi-SB法で無電解めっきを行い、その後、さらに電解銅めっき (膜厚 20 μm) した試験片の剥離強度を測定した結果を示す。PPS樹脂にめっきした試験片をJIS K6854による90°剥離試験した結果、剥離強度は0.7kN/mであった。市場要求では0.5kN/m以上と言われていることから、十分実用的な強度であることがわかる。めっきし難いと言われるPPS樹脂に対して表面を粗さなくとも、i-SB法は実用的な剥離強度のめっき層の形成に寄与していることを示唆している。

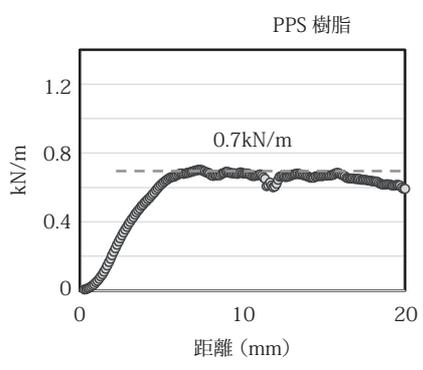


図4 PPS樹脂表面に形成しためっき膜の剥離強度試験結果

また、本i-SB法での微細配線の可能性を調査した結果を写真2に示す。樹脂表面全面に光反応性分子接合剤を塗布した後に、フォトマスクを用いて局所的に光照射して、無電解めっきでの配線形成の実験を行った結果である。線幅が30 μm のめっき配線が観察できる。30 μm の隙間のあるフォトマスクにより線幅が30 μm の光反応性分子接合処理層のパターンが得られ、その箇所に配線が形成されたと考えられる。

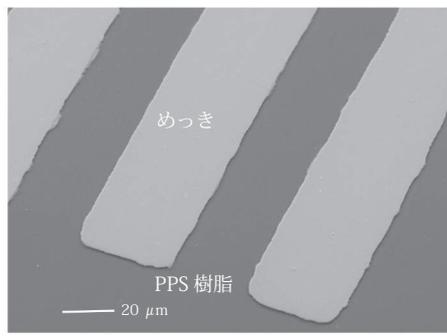


写真2 i-SB法による配線のSEM写真

4 3次元配線の形成

写真2では板状の樹脂表面への微細配線形成が可能であることを示したが、今後、実用化を考えると、樹脂成形品は複雑な形状であり、フォトマスクを密着させ、光の洩れがなく局所的に光照射制御することは困難である。そこで、我々は、光反応性分子接合剤を複雑な樹脂

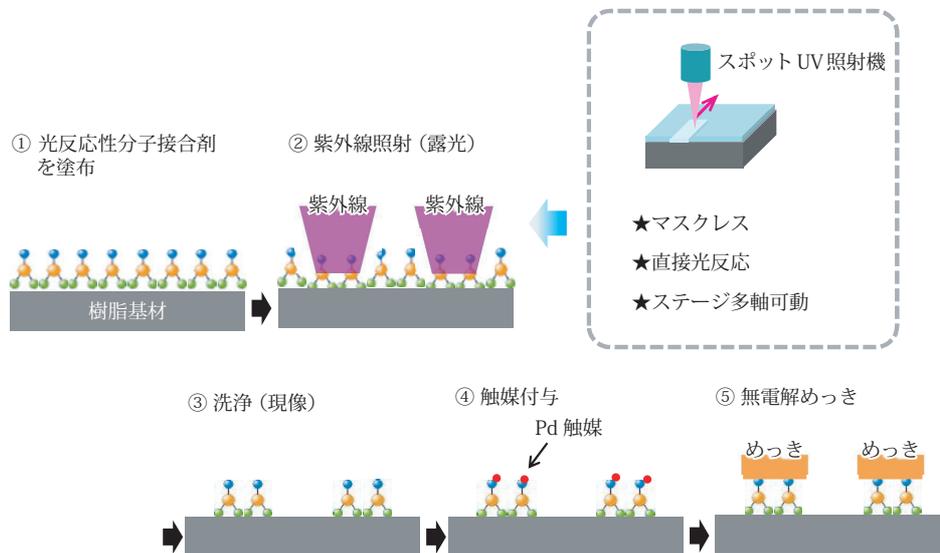


図5 i-SB法でのめっき配線プロセスのモデル

表面に導入し、その後、局所光を直接に樹脂表面に照射して光反応性分子接合処理層のパターンを形成する方法を検討することとした。そのプロセスを図5に示す。このプロセスでは、光反応性分子接合剤を全面に導入した成形品に、収束した紫外光 (UV) を照射する。この時、樹脂成形品を固定したステージを走査し樹脂表面に光反応性分子接合処理層のパターンを形成する。次工程の洗浄により、未照射部の光反応性分子接合剤を除去する。

以上の工程により、樹脂表面を粗らすことなく、三次元形状の樹脂成形品の表面に平滑な配線パターンを形成することができる。試作試験した結果を写真3に示す。用いた成形品は、底面との段差が1mm程度ある台形状の突出部がある。台形状の中央には十字につながった配線が形成され、さらに、その中心の配線の両側に段差部を中心に2本の配線が形成されていることがわかる。底辺から約45°で立ち上がり形状を有する成形体の形状の底辺から段差部、さらには台形状の突出部へ向けて、局所UV光を数本、樹脂表面に直接照射し、その後の洗浄により光反応性分子接合剤処理層のパターンが得られたと考えられる。そのパターン形状に対して無電解めっきの三次元配線が得られたものである。

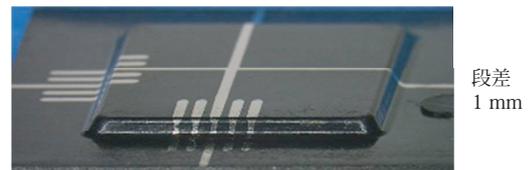


写真3 i-SB法による立体配線の試作

5 おわりに：まとめ

以上、高周波対応のために導体損失低減を目的として、平滑配線形成するための分子接合法 (i-SB法) について紹介した。

i-SB法により試験した樹脂材料へのめっき膜は、表面粗さはRaで0.2 μm以下と平滑であるものの、その剥離強度は高く、PPS樹脂では0.7kN/m以上であった。また、回路としてめっきでの微細配線形成が可能であることも確認した。

現在、フォトマスクが不要な直接描画による三次元配線形成の可能性を確認したところである。引き続き、生産性向上に関する技術課題の解決と高周波での電気特性

～3次元実装や次世代半導体対応などを含めた～
これからのプリント回路基板に関わる基板材料や、封止・絶縁・放熱などの周辺材料の開発の動き

の評価、あるいは品質の信頼性評価等により、実用化を目指す予定である。

ご興味を示す皆様からのご助言、ご協力を頂けると幸いです。

謝辞

本稿は、文部科学省令和元年度に採択された地域イノベーション・エコシステム形成プログラムの支援を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 森邦夫, エレクトロニクス実装学会誌, 19, No. 2, 91 (2016)
- 2) 森邦夫, 工業材料, Vol. 68, No. 1, 62, (2020)
- 3) 鈴木一孝, 目黒和幸, 黒須恵美, 石原綾子, プラスチックス, Vol. 72, No. 12, 36 (2021)
- 4) 鈴木一孝, 目黒和幸, 黒須恵美, 石原綾子, クリーンテクノロジー, Vol. 32, No. 12, 22 (2022)
- 5) 渡部慶二, 表面技術協会誌, Vol. 72, No. 6, 2 (2021)
- 6) 渡邊充広, 表面技術協会誌, Vol. 72, No. 7, 2 (2021)
- 7) 新野俊樹, 表面技術協会誌, Vol. 71, No. 4, 2 (2020)

シミュレーション技術を活用した 穀物用コンバイン開発の効率化に関する研究*

佐々木 駿**、大里 達朗***、桑嶋 孝幸****、佐々木 龍徳*****

穀物の収穫には作業効率の良さから一般的に収穫機械であるコンバインが利用される。コンバインは、機械前方にある刈取機によって穀物を刈り取り、刈り取られた穀物は機械内部の脱穀機で脱穀された風選別によって子実のみ収穫する機械である。しかし、雑穀は長稈であることから、子実と大きな葉や茎を選別する網に詰まり収穫作業が中断されてしまう。また、子実が小さく質量も小さいため風選別が難しく、収穫ロスが大きい。これらの課題を解決するため、本研究ではコンバイン内部の状況把握を目的とし、シミュレーションによるコンバイン内部の空気流れの調査と実験による内部の観察を実施した。シミュレーション結果からはコンバイン内部の空気流れの傾向を確認することができ、実験ではフレームレートの異なるカメラを使用して子実の飛散の様子や枝葉の堆積の様子を観察することができた。

キーワード：雑穀、コンバイン、シミュレーション、数値解析

Research on Improving Efficiency of Grain Combine Harvester Development Using Simulation Technology

SASAKI Shun, OSATO Tatsuro, KUWASHIMA Takayuki, SASAKI Tatsunori

Key words: grain, combine harvester, simulation, numerical analysis

1 はじめに

岩手県は雑穀の生産が日本一であり国産の9割を占めているが、雑穀は収穫作業の効率が悪く、かつ収穫ロスが大きいことから生産をやめる農家が多い。そこで、作業の負担軽減と生産性の向上の対策として、岩手県農業研究センター県北農業研究所では、雑穀に適した収穫機械（コンバイン）のセッティングを試行錯誤している。

穀物の収穫に使用されるコンバインは普通型と呼ばれ、刈取機で刈り取られた作物全体（子実、茎、葉）が機械内部へ搬入され、機械内部で脱穀と風力による選別（風選別）が行われている（図1）。雑穀は長稈であることから脱穀機のこぎ胴と呼ばれる回転部品と選別用の網（コンケープ）の間に絡まりやすい（図2）。完全に詰まってしまうとこぎ胴の回転が止まり、収穫作業が中断されてしまう。さらに、雑穀の子実が小さく軽いため風選別の調整が難しく、収穫率が小さいことも課題となっている。これらの課題を解決するには、様々な部品形状を検討する必要があるが、実験による試行錯誤では費用や時間がかかる。シミュレーションは一般的に試作・実験行程を削減できるため、開発期間を短縮し、開発コストを削減できる利点がある。



図1 雑穀の収穫に使われる普通型コンバイン

* 令和5年度技術シーズ創生・発展研究事業（発展研究）
** 素形材プロセス技術部
*** 岩手県農業研究センター 県北農業研究所
**** 素形材プロセス技術部（現：ものづくり技術統括部長）
***** 素形材プロセス技術部（現：DX推進特命部）



図2 コンバイン内部で雑穀が詰まっている様子

近年の研究では、コンバインの風選別に着目して籾や藁の物理特性や風選別の流れ特性の実験、籾や藁の飛行シミュレーションが行われている¹⁾。この研究では、籾や藁をモデル化することで風選別における空気流れをシミュレーションし、最適な選別風速を調査している。しかしながら、コンバイン内部に子実が堆積する現象や枝葉が詰まる現状のメカニズムについて調査されていない。

そこで、本研究では簡易的なシミュレーションによってコンバイン内部の空気流れと、実験によってコンバイン内部に枝葉が詰まる様子や子実が堆積の様子を調査し、雑穀用コンバインの部品形状等の最適化に反映させることで、効率的にコンバインを開発する手法の確立を目的として実施した。

2 調査方法

コンバイン内部の空気流れを把握するため、内部形状のモデルを作成し、流れ解析のシミュレーションを実施した。また、収穫作業中のコンバイン内部の様子を把握するため、観察窓を作製し、ビデオカメラなどで撮影と観察をした。具体的な内容について以下に述べる。

2-1 シミュレーション方法

シミュレーションに使用した流体解析ソフトは Ansys 2022 R1 の Fluent である。簡易モデルは、こぎ胴への入り口から雑穀の枝葉が排出される出口までをモデル化した (図3)。内部の寸法はメジャーにより測定し、こぎ胴のサイズはカタログ値を参照した。

解析条件に必要なとなるのは、こぎ胴の回転数とコンバイン内部への入口流速である。こぎ胴の回転数はカタログ値より 316rpm とし、入口流速はハンディ風速計 (CW-50, カスタム社) を用いて測定した。コンバイン内部へ空気が流入する入り口は、刈り取られた作物全体が搬入される入り口と風選別のためにファンから送られた風が入る入口の2カ所ある。作物全体が搬入される入口はこぎ胴 (回転部品) の奥に位置しているため、直接流速を測定することができない。そこで、出口流速と風選別のための入口流速を測定し、連続の式より、作物搬入のための入口流速を求めた。

○ 測定値

作物搬入のための入口面積	$A_1 = 0.1680 \text{ m}^2$
風選別のための入口面積	$A_2 = 0.0168 \text{ m}^2$
出口面積	$A_3 = 0.1288 \text{ m}^2$
風選別のための入口流速	$V_2 = 5.0 \text{ m/s}$
出口流速	$V_3 = 3.0 \text{ m/s}$

○ 作物搬入のための入口流速 V_1 の算出

$$V_2 \cdot A_2 = Q_2 \text{ より}$$

$$Q_2 = 0.084 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$\text{同様に } Q_3 = 0.3864 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$\text{連続の式 } Q_1 + Q_2 = Q_3 \text{ より}$$

$$Q_1 = Q_3 - Q_2 = 0.3024$$

$$Q_1 = V_1 \cdot A_1, \quad A_1 = 0.168 \text{ m}^2 \text{ より}$$

$$V_1 = Q_1 / A_1 = 1.8 \text{ m/sec}$$

内部を流れる気体は空気とし、流速が音速よりも明らかに小さいため非圧縮性流体として計算する。モデルのメッシュサイズは全体を 10 mm、細部を 5 mm とし、壁面近傍はインフレーションを成長率 1.2 の 5 層とした。

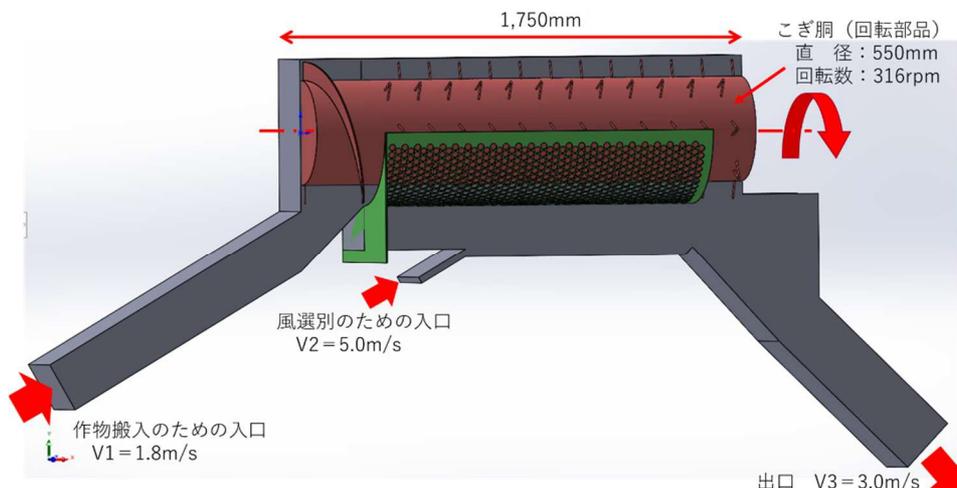


図3 コンバイン内部の3Dモデル

	アワ (10月)	キビ (11月)
ほ場		
穀物		

図4 ほ場の様子と収穫した雑穀

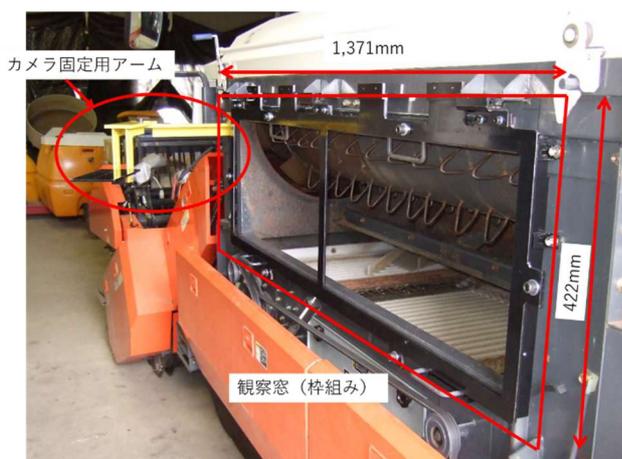


図5 観察窓とカメラ固定用アーム



図6 実験の様子

2-2 実験方法

実験で収穫した雑穀はアワとキビである(図4)。収穫時期が異なるため、実験は10月と11月の2回実施した。実験内容は、コンバイン内部状況の観察と子実の飛散速度測定である。コンバイン内部の撮影のため作製した観察窓はコンバインのカバーを外したところに取り付けている。観察窓からは、脱穀と風選の様子が見られる。また、撮影用カメラを固定するアームも作製した(図5)。撮影に使用したカメラは、高速度ビデオカメラ(Motion Pro HS-4、IDT社)、ホームビデオカメラ(HC-W580M、Panasonic)、iPhoneのカメラである。3種類のカメラによって撮影した主な理由は、フレームレートにある。フレームレートが大きいほどスローモーション撮影が可能と

なり、コンバイン内部の様子を観察し易くなる。しかし、フレームレートが大きく、鮮明な画像を撮影するには焦点距離が小さいレンズとなるため、画角も小さくなり、内部全体の撮影が難しくなる。フレームレートは、高速度ビデオカメラは3,000 fps、ホームビデオカメラは60 fps、iPhoneは120 fpsである。実験の様子を図6に示す。高速度ビデオカメラは、カメラ本体と別に電源と操作用PCを有線で接続する必要がある。そこで、電源はポータブルバッテリーをコンバインのキャビンに設置し、操作用PCは実験者が持ち、撮影中はコンバインと並走しながらPCの操作を行った。

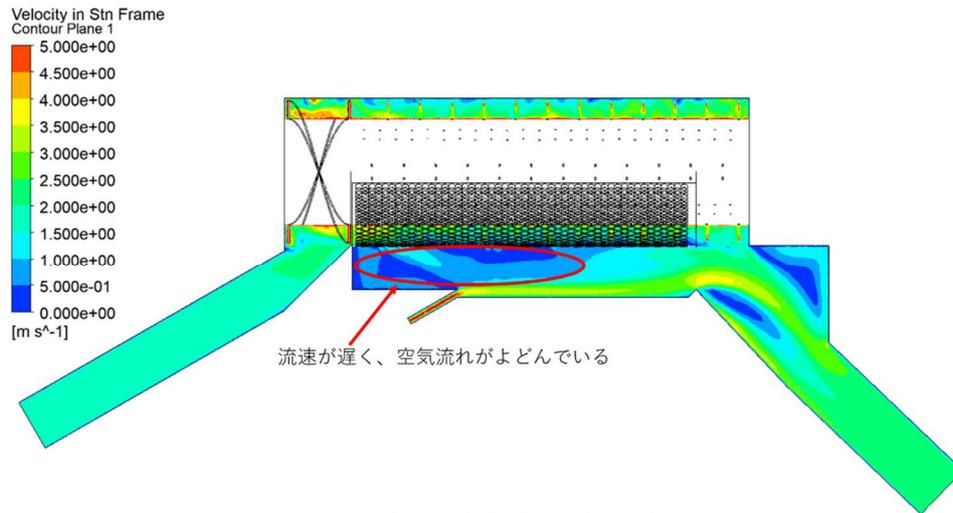


図7 コンバインの解析結果（速度分布）

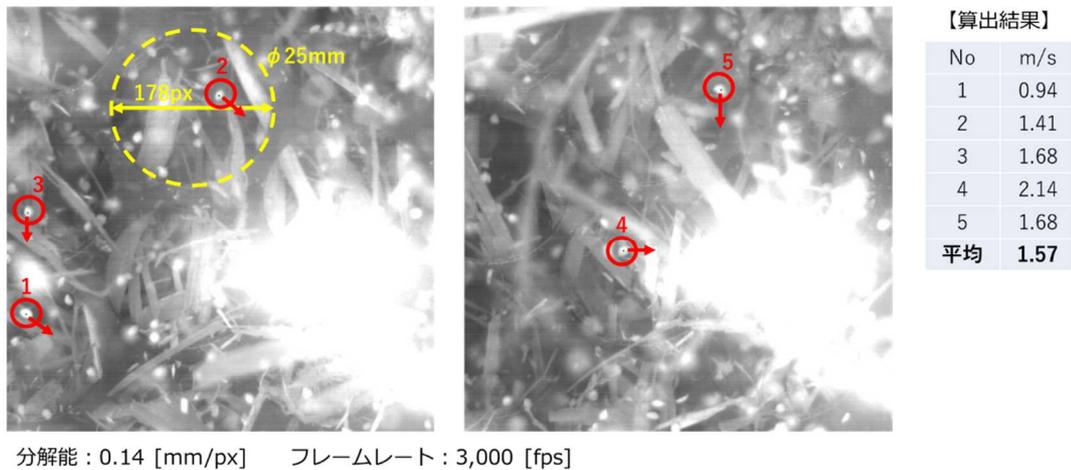


図8 高速ビデオカメラによる撮影画像と子実の飛散速度測定

3 結果及び考察

3-1 数値解析結果

解析結果を図7に示す。2か所の入口流量の和と出口流量を比較すると、その差は0.02%しか変わらず、出入口における質量保存が成立している。このことから、数値解析は問題無く計算が終了している。速度分布の結果から、こぎ胴下の特に上流側の流速が遅く、よどんでいることがわかる。実機においても枝葉の堆積が多く確認されていた場所であり、解析結果から流れの傾向は予測できると考えられる。

3-2 各カメラによる内部観察

はじめに、高速ビデオカメラによる撮影結果について述べる。こぎ胴付近を撮影し、選別の網目から飛散する子実の速度を測定した。撮影した画像の分解能は網目の穴寸法（Φ25 mm）が178 px前後であることから、0.14 mm/pxである。飛散速度は、2枚の撮影画像から子実が移動したピクセル数と、フレームレート数（3,000 fps）か

ら算出した時間（1/3,000 sec）で除して求めた。飛散速度は5個の測定結果を平均し、約1.57 m/sであった（図8）。求めた飛散速度は平面上の移動速度であるのに対し、実際の子実立体空間を移動するため正確な飛散速度ではないが、粒子挙動を含めたシミュレーションを実施した際に、検証用として参考にした。

次にホームビデオカメラによる撮影結果について述べる。このカメラでは、コンバイン内部全体を撮影した（図9）。カメラ固定アームにカメラを取り付けるとフレームレートが小さいためコンバインの振動の影響が大きく、内部を鮮明に撮影できない。そこで、コンバインに直接取り付けず、コンバインから離れた位置にカメラを支持して撮影した。また、撮影時は観察窓に当たる自然光が反射するため、観察窓を囲うように暗幕を設置することで対策した。撮影動画はフレームレートが小さいため、雑穀の飛散状況を細かく観察することはできないが、雑穀がどの位置から詰まり始めるのか、過程を観察することができた。

最後に iPhone のカメラによる撮影結果について述べ

る。このカメラでは、高速度ビデオカメラと同様にこぎ
 胴付近を撮影し、雑穀の飛散・落下状況を確認した(図
 10)。フレームレートと画角は、高速度ビデオカメラとホ
 ームビデオカメラの間の性能であり、内部の観察用であ
 れば最もバランスの取れた動画が撮影できた。また、カ
 メラレンズを観察窓に張り付けることで自然光の反射の
 影響も無く撮影することができた。

以上のことから、撮影はカメラによって撮影環境の影
 響が異なるため、カメラの固定方法や暗幕の設置などが
 必要となる。今後の実験・観察に当たっては、画角が大
 きい順(ホームビデオカメラ → iPhone のカメラ → 高
 速度ビデオカメラ)に、撮影対象を絞り込みながら撮影
 実験することが最適と考えられる(表1)。



図9 ホームビデオカメラによる撮影画像



図10 iPhoneカメラによる撮影画像

表1 各カメラの使い分け

カメラ	高速度 ビデオカメラ	iPhone スローモーション 撮影	ホームビデオ カメラ
画角	狭い 約72×72mm	中間 約300×200mm	広い 約600×400mm
フレームレート	3,000fps	120fps	60fps
使用目的	子実等の飛散速度 の測定	こぎ胴と風選別の 様子を同時に観察	コンバイン内部全 体において詰まる 様子を観察

4 まとめ

本研究では、雑穀用コンバイン部品形状等の最適化に
 向けて、収穫作業中のコンバイン内部の状況を観察し把
 握するため、シミュレーション技術を活用した流れ解析
 と高速度ビデオカメラ等による撮影を実施した。得られ
 た成果は以下である。

- (1) 初めて収穫作業中のコンバイン内部を高速度ビデオ
 カメラ等で撮影することに成功し、内部での雑穀の子
 実等の動きを確認できた。これによって、雑穀がどの
 位置から堆積し詰まり始めるのかなどを調査するこ
 とや、コンバインの設定において風選別の風速やこぎ
 胴の回転数などの調整が容易になった。
- (2) コンバイン内部の空気流れに関するシミュレーショ
 ンを行い、こぎ胴のような回転体を含む流れ解析の手
 法を確認できた。これによって、コンバイン内部の空
 気流れの傾向を確認することができるようになった。
- (3) シミュレーションを活用することで実機での実験よ
 りも容易に内部の空気流れを確認できるようになっ
 た。実機による実験は雑穀の収穫時期に限られ、さら
 にカメラの画角やフレームレートによって撮影する
 範囲も限られるため、より多くの条件で調査するこ
 とが困難である。それに対して、シミュレーションはい
 つでもコンバイン内部全体の空気流れを評価するこ
 とができ、雑穀用コンバインの開発に大いに貢献でき
 る。

今後は、実験結果からシミュレーション精度を高め、
 シミュレーションを中心とした雑穀の詰まる原因調査と
 コンバインの設定最適化を実施することで、実験回数を
 大幅に削減して開発コスト・期間の縮小に貢献してい
 きたい。

文 献

- 1) 井上英二, 森健, 岡安崇史: コンバイン脱穀内部の風
 選メカニズムの理論的解明と選別制御への応用, 科
 学研究費補助金研究成果報告書 (2009)

デジタルシボによる機能性シボを有する鋳鉄フライパンの作製*

和合 健**、生内 智**、及川 春樹***

表面に凹凸模様を与えるシボ加工は、意匠性を付与する手法として利用されてきた。デジタルシボ技術は定量的にシボビットの大きさが数値制御できることから、意匠に加え機能性を付与したシボの設計が可能であると考え、南部鉄器製のフライパンを対象に、実用的な調理で要求される離型性、軽量性、加熱性の3項目の機能性をデジタルシボで付与する方策に取り組んだ。評価項目を剥離性、味、油滞留性、意匠性、加熱性の5項目として、テストピースによる調理試験を実施し、官能評価で採点した結果、幾何学シボ半球凹が多くの食材に適することを見出した。

キーワード：デジタルシボ、機能性、南部鉄器、フライパン、官能試験

Production of Cast Iron Frying Pan to Equip Functional Surface Texture Made by Digit-Shibo

WAGO Takeshi, OBONAI Tomo, OIKAWA Haruki

Key words: digit-shibo, functionality, nanbu ironware, frying pan, sensory testing

1 はじめに

我々は岩手県特産の南部鉄器にデジタルシボを適用し、これまで独自の意匠による鉄瓶や急須の作製に取り組んできた¹⁾²⁾。次の取り組みとして、厨房品であるフライパンへのデジタルシボ適用について検討を行った。鋳造鉄器製フライパン（以下、鋳鉄フライパン）は量販店や百円ショップでも多く販売されている見慣れた製品ではあるが、主に大量生産方式で製造されているため、意匠性を考慮した製品は極めて少ない。この鋳鉄フライパンにデジタルシボを適用し、意匠性の他に、機能性も付与し高付加価値化に繋げることができれば、デジタルシボの新たな活用手法として期待ができる。

本研究では、デジタルシボを活用したフライパンの意匠性と機能性の向上を図ることを目的として、離型性、軽量性、加熱性の3点に注目したシボ模様を選定し、選定したシボ模様が発揮する機能性について官能試験を行った。

2 実験方法

2-1 機能性付与の方針

鋳鉄フライパンは、表面に黒色の焼き付け塗装が施されており、焼き面に食材の焦げ等が付着した際にスチールブラシ等を使用すると、塗装の剥離に繋がる。そのため、表面に焦げ付き防止効果のある表面処理を行うことが望ましい。板金製フライパンにおいては、フッ素コー

ティングが施されているが、鋳鉄フライパンに同様の処理をする場合、焼き面の温度域や粗い表面性状の影響から適応が難しい。鋳鉄フライパンに適した焦げ付き防止の方策を調べた結果、食用油を利用して焼き面と食材の間に緩衝膜を形成する方法が適することが分かった。そのためデジタルシボにより、フライパン表面に食用油が滞留するシボ模様を与えることで、離型性を付与する手法について検討した。具体的には、食用油が適度に滞留し、かつ焦げが付着し難いシボ模様の凹凸形状について検討した。

デジタルシボによる軽量化は、フライパンの剛性を保ちつつ、シボ模様により肉抜きを行い、厚さを薄くすることとした。

加熱性は、フライパンの厚さや縁の高さ及び傾きが関係すると考えられる。つまり、与えた熱がこもる方向で焼き面温度が上昇し、熱が逃げる方向で焼き面の温度が低下する。そのため加熱性はフライパンの厚さと全体形状に関係し、軽量化とも密接な関係にあると予想される。

シボ模様の設計ではこれら3項目の機能性を総合的に検討した。

2-2 テストピースの意匠設計

図1にデジタルシボを付加する前のテストピースの断面を示す。テストピースの寸法は、外径216mm、高さ13mm、縁幅10mm、肉厚3mmとした。機能性シボの設計

* 令和3年度、令和4年度ものづくりDXシステム導入支援強化事業

** 素形材プロセス技術部

*** 有限会社及春鋳造所

は図2のとおり3枚のテストピースを製作し、素の鑄肌地を muji、幾何学模様を kika、ランダム模様を yuzu とした。kika と yuzu は90度分割にして1枚のテストピースに4種類のシボを配置した。muji はテストピース全面を鑄肌地として表面粗さは鑄物砂の粒度に依存する。また異なる二つの市販品の鑄鉄フライパンを用意して shihan_A と shihan_B とし、参照比較することとした。この市販品の表面性状は muji と同様に物砂の粒度に依存する平坦な表面であった。以上から実験に用いたシボ模様の水準は計11水準となった。

デジタルシボによるシボ模様の作製方法は、ボクセルで3次元を表現するCADソフトウェア Geomagic Freeform Plus (3D Systems社) を使用し、グレースケール画像を用いてエンボス処理を行い作製した。具体的な手順は図3のとおりグレースケール画像を3Dモデルに投影し、画像の階調情報と指定した基準深さから凹凸を生成した。kika は図4に示す半球状模様を用い、yuzu は図5に示すゆず肌と呼ばれる模様を用いた。

テストピースの鑄造は、小型溶解炉(1.0トン/h)で1チャージとしてコークス、銑鉄、戻り、古銑、石灰石、シリコン (Fe-Si) の順番で装入し片状黒鉛鑄鉄 F150 溶湯を試作した鑄型に流し込み、テストピースを製作した。砂型の造型は試作用造型枠を使用し 300×300 mm の試作用枠(開閉式)を使用して作製し、使用した鑄物砂の粒度はシボ模様と比較して十分に小さい。

2-3 テストピースの表面性状

設計したシボ模様の詳細を示す。幾何学シボ kika 及びランダムシボ yuzu はそれぞれ4水準の表面性状を与えた。各シボ模様の深さは表1のとおりであり、シボ模様形状は kika1 及び kika2 は半球状凹凸、kika3 は半球状凸、kika4 は半球状凹とした。kika と yuzu を詳細に説明すると、kika1 と kika2 は同一の半球状凹凸で kika1 が高さ約 1000 μm と kika の中で最も大きく、kika2 が高さ約 600 μm であり kika1 の約半分。kika3 と kika4 は高さと同じで約 300 μm でありシボ模様形状は kika3 が半球状凸、kika4 が半球状凹と対比させた。一方、yuzu は同一のゆず肌画像からグレースケール画像のサイズと深さを変えた。yuzu1 を基準高さ 1 とすると他水準の高さの比率は yuzu2 で 1.4、yuzu2 で 1.1、yuzu4 で 0.6 とした。

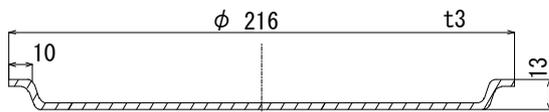


図1 テストピース断面 (mm)

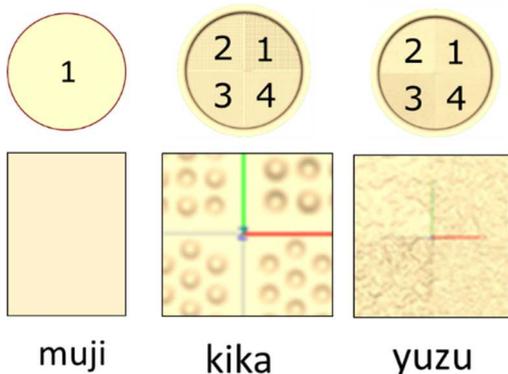


図2 シボの設計

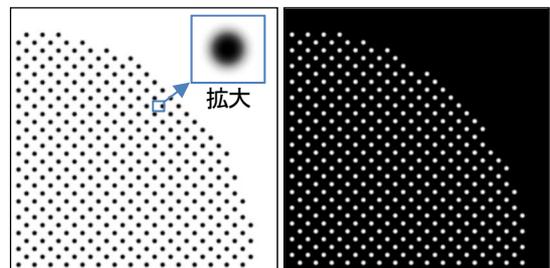


図4 kika1で使用したグレースケール画像 (左:半球凹、右:半球凸)

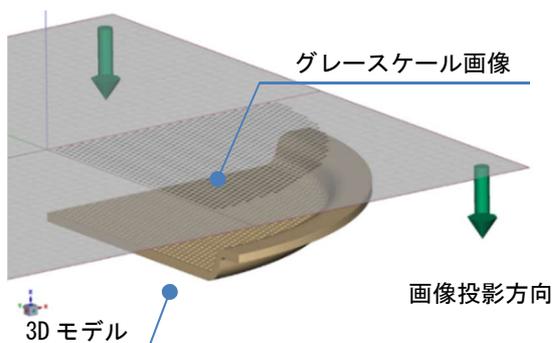


図3 エンボス処理

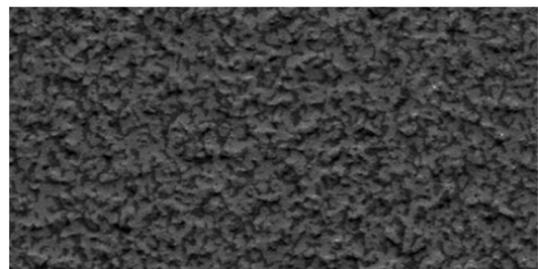


図5 ゆず肌グレースケール画像

図6、図7に鋳造したテストピースの表面外観写真を示す。撮影には顕微鏡（VHX-7000、(株)キーエンス）を使用し、観察倍率は20倍、照明はリング片射で行った。図8から図10にmuji、kika1、yuzu1の断面曲線を示す。断面曲線の測定は輪郭形状測定機（DSF600S、(株)小坂研究所）を使用し、スタイラスは超硬材、円錐形状、先端頂角16°、先端R25μmで触圧は10mNで行った。測定した断面曲線からZ方向の最大値と最小値の差を求め最大高さPzとした。表1、図11に各テストピースのPz測定結果を示す。テストピースの鋳造に使用した砂型の粒度の影響により、表1のmujiのb-aの数値に示すとおり鋳物表面に69μmの凹凸が転写されることを確認した。対して、sihan_A及びsihan_BのPzは、それぞれ110μm、129μmであり、今回テストピースの鋳造に使用した砂型よりも粗い粒度のものが使用されていたと予想される。

表1 断面曲線の最大高さPz

	Die: a	Casted work-piece: b	μm b-a
muji	5	74	69
kika1	977	1020	43
kika2	588	584	-4
kika3	205	279	74
kika4	219	264	45
yuzu1	115	129	14
yuzu2	125	179	54
yuzu3	156	148	-9
yuzu4	83	82	-1
sihan_A	5 [*]	115	110
sihan_B	5 [*]	134	129

^{*} mujiの数値を設定

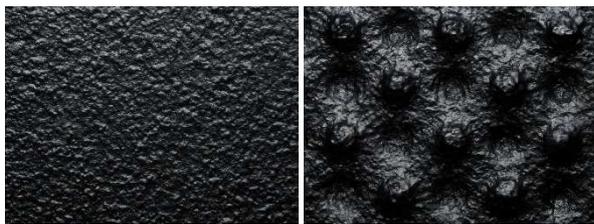


図6 muji (左) と kika1 (右) (鋳造品)



図7 yuzu1 (左) と sihan_A (右) (鋳造品)

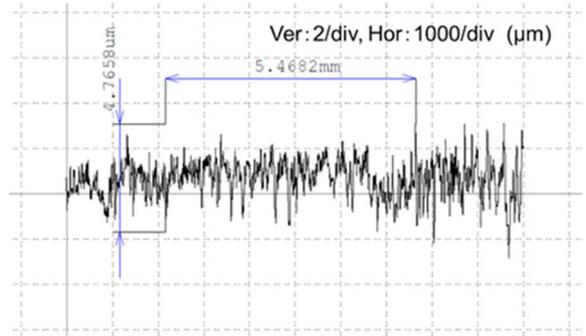


図8 mujiの断面曲線（鋳造品）

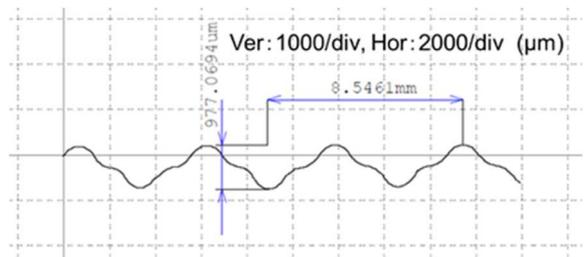


図9 kika1の断面曲線（鋳造品）

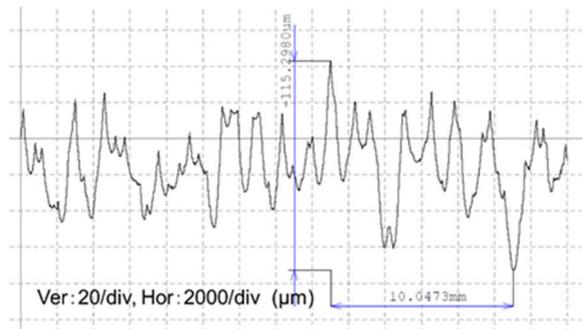


図10 yuzu1の断面曲線（鋳造品）

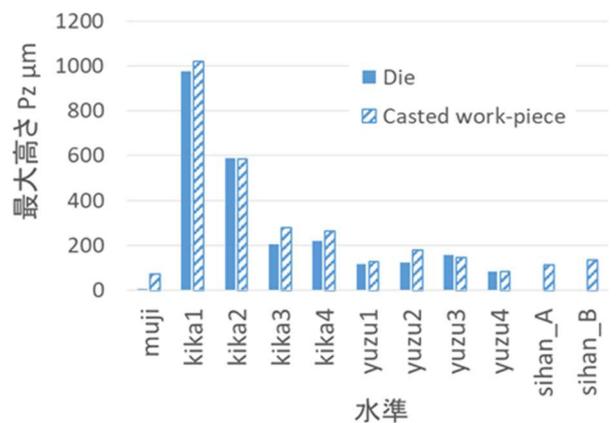


図11 断面曲線の最大高さPz

3 調理試験

3-1 試験方法

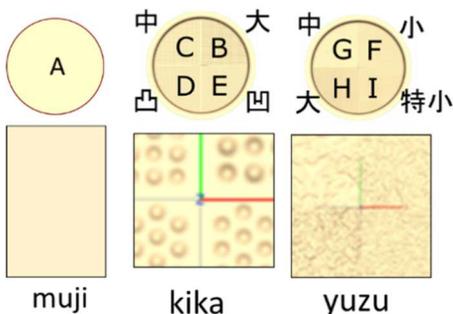
無作為に抽出した6名を試験者としてテストピースで調理試験を行い、官能評価を行った。試験者の性別は男性5名、女性1名、平均年齢は49才であった。官能試験は表2の配点表のとおり5段階評価とし、調理試験での食材は目玉焼きとステーキ、評価項目は剥離性、味、油滞留性、意匠性、加熱性の5項目とした。評価対象物は図12に示すテストピース3種類 muji、kika、yuzu として、muji で1カ所、kika で kika1~4 の4カ所、yuzu で yuzu1~4 の4カ所の計9カ所で調理を行い採点した。図13は図12の位置に配置したシボ模様の詳細を示したものである。調理方法はテストピース3種類で同一手順とし、使用する前に油ならしを行い、目玉焼き及びステーキどちらも経過時間毎に、フライパン表面温度を赤外線温度計で点測定した。

表2 官能試験の配点

項目	配点				
	非常に良い	良い	普通	悪い	非常に悪い
剥離性	5	4	3	2	1
味	5	4	3	2	1
油滞留性	5	4	3	2	1
意匠性	5	4	3	2	1
加熱性	5	4	3	2	1



図12 テストピースの評価位置



※1: mujiは鏡肌地
 ※2: 大~特小は凹凸の高さ

図13 評価位置のシボ模様

3-2 フライパンの表面温度

図14、15に各条件でのフライパン表面温度測定結果を示す。図14は空焚きした強火での1分30秒後の温度であり、sihan_Aとsihan_Bが250°Cを超え、他のテストピース3種類よりも高かった。その理由としてsihan_A、sihan_Bは肉厚が厚く縁高さが高いため、熱の排出が阻害され熱が留まる傾向が強かったためと推測した。一方、中火で1分30秒後の温度では、sihan_Aとテストピース3種類でフライパン表面温度は170°C程度であり大きな差は見られなかった。この理由としては、与える熱量が小さい場合、熱が留まるために必要となる追加エネルギーが十分に与えられず、フライパン肉厚と縁高さの影響が表れ難かったのではないかと考えられ、今後CAE解析など追加確認が必要である。図15のステーキの調理温度ではsihan_Aとmujiの方がkikaとyuzuよりもフライパン表面温度が高い。これは載せた肉の数が1対4個であり載せた食材に熱が奪われた。しかしkikaとyuzuは肉の数は同等であるが温度差が生じた。

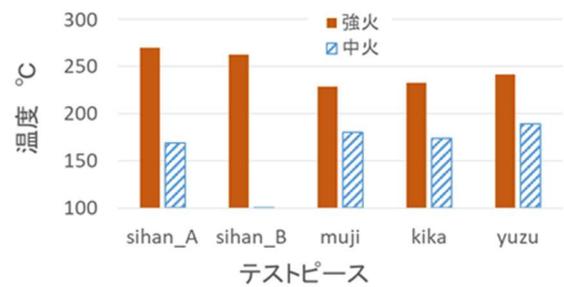


図14 温度 (1分30秒後)

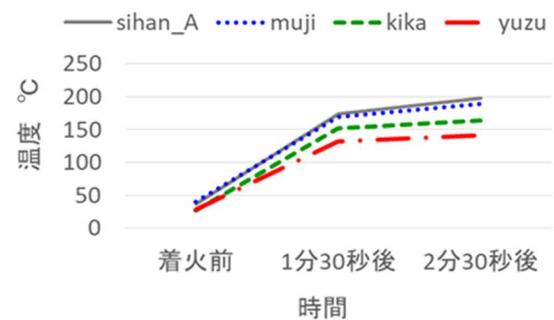


図15 ステーキの調理温度

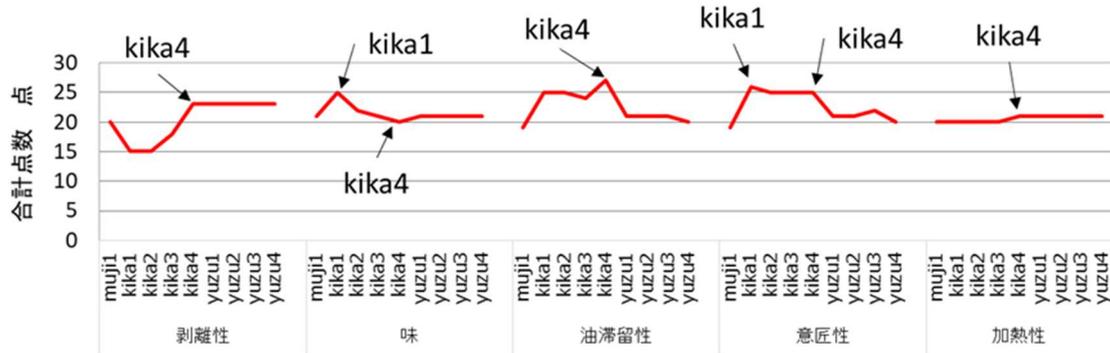


図 16 官能試験の結果

3-3 結果及びシボ模様の決定

図 16 に官能試験の結果を示す。横軸が評価項目で縦軸が 6 名の評価者の合計点数である。特徴値の番号を矢印で示した。項目毎に検証すると、剥離性では kika4 を含む yuzu で点数が高い。剥離性は焼いた後に箸で食材をフライパンから剥がす行為と調理後の水洗い作業の 2 行為で採点した。kika1~3 では半球凹凸の隙間に食材が入り込み剥がし難い結果となった。味は kika1 の点数が特出して高く、特にステーキでは肉の油が半球状の溝に落ちてステーキから油が抜けたために味が向上したと考えられる。油滞留性は kika で点数が高く、特に kika4 の半球凹に油が溜まる傾向が見られた。yuzu では油の流動性が高く、所定箇所に滞留する傾向は見られなかった。意匠性は kika が yuzu よりも見た目での斬新さがみられ、特に半球凹凸高さが大きい kika1 で優れていた。加熱性については、官能試験での差は殆どみられず同等の結果となった。

以上の結果から、ステーキのみを対象にした場合は kika1 が味の面で優れた結果であったが、鋳鉄フライパンは、通常の厨房調理で使用することを対象にしているため、あらゆる食材に適合した万能性が求められる。また、当初計画したシボ模様に付与する機能性は、離型性、軽量性、加熱性の 3 項目であり、各種検査や官能試験の結果から、総合的にこれらの機能性を満足するシボ模様として kika4 の半球凹を選定した。

3-4 有意差検定

官能試験での結果を統計により有意差検定³⁾をした。検定方法は kika1 と kika4 で平均の差の検定(対応のある場合)とし、以下の手順に従った。

(1) 仮説の設定

$H_0: \mu_d = 0$ (差が無い)、 μ_d : 平均の差

(2) 差 $d = x - y$ の平均値 d_{avg} と平均平方 V_d を求める。

(3) d の標準偏差 $(V_d/n)^{0.5}$ を求める。

(4) 次の式で t_0 を求める。

$$t_0 = d_{avg} / (V_d/n)^{0.5}$$

(5) 判定

$|t_0| > t(n-1, 0.05)$ ならば仮説 H_0 を棄却する (危険率 5%)

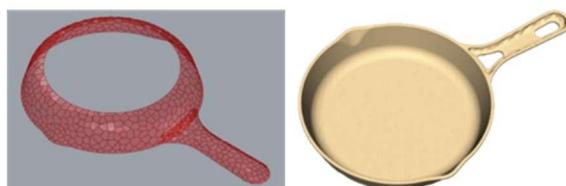
この手順に従って t_0 を求めた結果、 $t_0 = -0.8950$ となり $t(29, 0.05) = 2.045$ であるから $|t_0| < t(29, 0.05)$ となった。したがって仮説 H_0 が成立した (危険率 5%)。つまり双方の値にかたよりの無い。ゆえに有意差は無い。検定では両者に有意差は見られなかったが、鋳鉄フライパンの味及び調理等を含めた機能性評価では現在のところ官能試験のみが差別化できる手法であり、工学的な評価方法に課題が残った。

4 鋳鉄フライパンの製品試作

図 17 にボロノイ分割意匠とフライパン全景の CAD モデルを示す。フライパン意匠の 3D モデル作製は、基本設計と複雑なパラメトリックデザイン面の作製及びデジタルシボ付加の 3 工程に分かれており、それぞれのモデリングに適した 3 次元 CAD ソフトウェアを使用した。基本形状の設計・作製は、SOLIDWORKS (ダッソー・システムズ(株))、フライパン裏面、取手表面のボロノイ分割を応用したパラメトリックデザイン面の作製には Rhinoceros (Robert McNeel & Associates 社) を使用した。これらの 3D データを用いて、最終的な 3D モデリングを Geomagic Freeform Plus で行った。フライパン調理面のシボは、実験の結果より選定した半球状凹型の幾何学シボを付加した。この幾何学シボ付加箇所と裏底面を除いたフライパン表面全体にゆず肌、取手裏面に凸形状の鋳出し文字を付加した。

図 18 に金型を示す。金型加工では平たい薄肉厚状の金型ブロックの全域を加工する必要があり、それに対応する固定方法が要点となった。工作機械への固定方法は面板を介して金型ブロックの不用部を正確に計測し、面板固定用ねじ位置を決定した。図 19 に鋳造後の完成した鋳鉄フライパン、図 20 に完成後の半球状凹型シボを示す。半球状凹型シボの製作条件はテストピース製作時に確認済みであり、設計値どおり $\phi 2 \text{ mm}$ 程度に仕上げ

ることが出来た。また取手と裏面に与えたポロノイ分割意匠については、ポロノイ領域の辺長を10mm程度としたことで適度な広さになっており、当初の狙い通りの意匠に仕上がった。



(左：ポロノイ分割意匠、右：ポクセル形式)

図17 試作品のCADモデル



(左：上型金型、右：ポロノイ分割部)

図18 試作品の金型



(左：全景、右：ポロノイ分割部)

図19 完成した試作品



図20 焼き面に付与した幾何学シボ半球状凹型
(鋳造品)

5 結言

南部鉄器製のフライパンにデジタルシボを適用して、フライパンの機能として要求される離型性、軽量性、加熱性についての機能性向上を図った。そのシボ模様は、幾何学シボでは半球、ランダムシボではゆず肌、及び無地の計9種類として官能試験で優位性を判定した。

- (1) 評価項目を剥離性、味、油滞留性、意匠性、加熱性の5項目として、テストピースによる調理試験を官能試験により採点した結果、kika4の幾何学シボ半球状凹型で最高点数となった。
- (2) 調理実験結果を反映させた製品フライパンの最終意匠は、焼き面が幾何学シボ半球凹、裏面及び取手にはポロノイ分割を応用したパラメトリックデザインとした。

文 献

- 1) 和合健, 生内智, 及川春樹: デジタルシボ技術を活用した南部鉄器の作製, 岩手県工業技術センター研究報告, 23, p. 30-34 (2021)
- 2) 和合健, 生内智, 及川春樹: デジタルシボによる南部鉄器製急須の製造方法の提案, 2022年度精密工学会東北支部講演論文集 (2022)
- 3) 森口繁一: 新編統計的方法, 日本規格協会 (1992)

レーザ溶接した Ti 合金積層造形体の 機械的特性改善のためのレーザ熱処理*

園田 哲也**、黒須 信吾**、佐々木 龍徳***

金属積層造形により作製したチタン合金 (Ti-6Al-4V) のレーザ溶接と溶接部の延性改善を目的としたレーザ熱処理について検討を行った。レーザ溶接については、溶接条件の最適化により、母材強度以上の接合強度が得られた一方、曲げ試験においては溶接部の延性低下による破断を確認した。対策として溶接部に対し局所的なレーザ熱処理を行った結果、極めて短時間の熱処理で接合部の延性が改善することを明らかにした。

キーワード：レーザ溶接、レーザ熱処理、金属積層造形、チタン合金

Laser Heat Treatment to Improve Mechanical Properties of Laser Welded Titanium Alloy Produced by Additive Manufacturing

SONODA Tetsuya, KUROSU Shingo, SASAKI Tatsunori

Key words: laser welding, laser heat treatment, additive manufacturing, titanium alloy

1 緒言

Ti 合金は、高比強度、耐熱性、耐食性に優れ、航空機産業を始めとする高付加価値工業製品に多く使用されているが、原材料が高く難削材であることや、活性金属であり酸素との反応性が極めて高いというデメリットがある。一方で、これらのデメリットは金属積層造形 (以下、AM) のメリットである、ニアネットシェイプや造形時の雰囲気制御の容易さという点で相性がよく、この合金の AM に関する研究が盛んに行われている。AM の造形サイズは、造形方式により制限があり、例えば AM の代表的な造形方式のひとつであるパウダーベッド方式は、粉末を敷き詰めたテーブルの範囲内で造形を行うため、造形サイズに限界がある。このような中で大型部材への適応を考えた場合、AM 造形品の接合が必要である。このことにより AM 材同士以外にも、汎用部材との組み合わせや、マルチマテリアル化への対応等についての検討も重要な課題である。このような背景から本研究では金属積層造形により作製したチタン合金 (Ti-6Al-4V) のレーザ溶接について検討を行うと共に、溶接部の機械的特性の改善を目的としたレーザによる溶接後熱処理の検討を行った。

2 実験方法

2-1 レーザ溶接及びレーザ熱処理

供試材は、電子ビーム積層造形装置で作製した板厚 2 mm の Ti-6Al-4V を用い、開先面を研削加工し、突合せ溶接にて接合体を作製した。レーザ溶接は、最大出力 6 kW

の半導体レーザ (Laserline 社) 発信器を用い、出力 2.5 kW、溶接速度 2.0 m/min、溶接長約 90 mm で行った。一般にチタン材料は 400°C~500°C の比較的低温域でも容易に酸化し、機械的特性の低下に繋がるため、溶接中に大気から溶接部を完全にシールドすることが重要となる²⁾³⁾。本研究では、レーザ同軸方向からシールドガスを供給するための独自の円錐ノズルを作製し使用した。シールドガスは Ar を使用し、流量は同軸方向 30 L/min、アフターシールド 50 L/min、バックシールド 50 L/min とした。溶接の後、溶接部の機械的特性の改善を目的に、溶接後熱処理としてレーザ熱処理を行った。最大出力 3 kW の半導体レーザ (Laserline 社) 発信器を用い、ビームホモジナイザーにより 28 mm×7 mm の矩形均一強度ビームを作製し、Ar ガスシールド BOX 内に設置した試験材の溶接ビードに対しガラス越しに処理を行った。熱処理温度は、2 色式パイロメータによりレーザ同軸上の材料表面温度を測定すると同時に、所定の温度となるよう出力フィードバックを行った。レーザ熱処理の概略図を図 1 に示す。熱処理前後の接合部の評価は、組織観察、引張試験、曲げ試験、EBSD、マイクロビッカース硬さ測定により行った。

2-2 電気炉による熱処理

短時間の溶接後熱処理による金属組織及び硬さの変化を調べることを目的に、電気炉による熱処理を行った。熱処理用の試験材は、板厚 3 mm の Ti-6Al-4V 電子ビーム積層造形材にビードオン溶接を行い、図 2 に示すよう

* 令和 5 年度技術シーズ創生・発展研究事業 (発展研究)

** 素形材プロセス技術部

*** 素形材プロセス技術部 (現: DX 推進特命部)

に、溶接部を中心に 5 mm×18 mm のサイズに切り出し作製した。熱処理条件を表 1 に示す。昇温速度は 20°C/min とし、真空雰囲気下で所定の保持時間に到達後、炉冷し、組織観察、マイクロビッカース硬さ測定を行った。

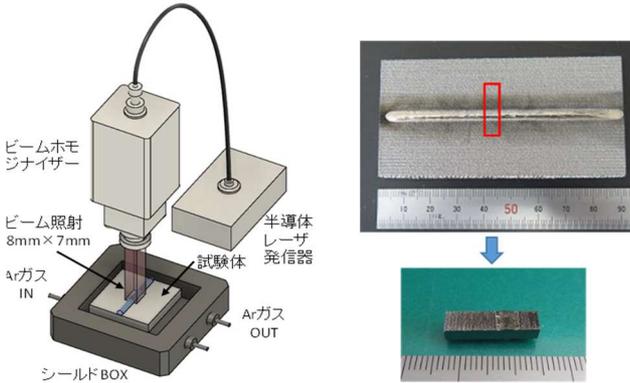


図1 レーザ熱処理概略図 図2 電気炉熱処理試験片

表1 電気炉熱処理条件

熱処理温度	保持時間(min)			
	1	5	10	30
600°C	1	5	10	30
700°C	1	5	10	30
800°C	1	5	10	30

3 結果及び考察

3-1 レーザ溶接接合部の組織と機械的特性

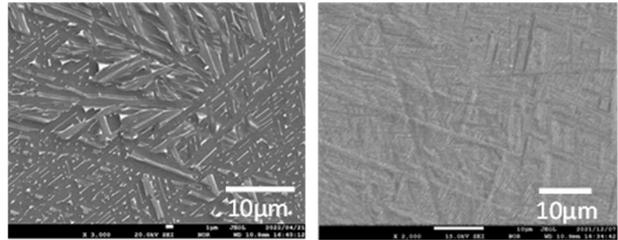
表 2 に、AM 母材及び、AM レーザ溶接材の引張試験及び曲げ試験結果を示す。JIS 規格値、引張強さ 895 MPa 以上、伸び 10% 以上に対し、AM 母材においては両規格値ともに満足し、曲げ試験も良好な結果であったのに対し、レーザ溶接材については、伸びが 4.5% と規格値を大きく下回り、曲げ試験では破断する結果となり、溶接部の著しい延性低下を確認した。

表2 引張試験及び曲げ試験結果

試験片	積層造形体(母材)	積層造形体レーザ溶接材
引張強度(MPa)	1071	1147(母材破断)
伸び(%)	13	4.5
曲げ試験結果		

図 3 に AM 母材及び、AM レーザ溶接部の断面組織観察結果を示す。母材の組織には、針状の α 相とその粒界に明コントラストの部位が点在していることがわかる。EPMA 分析の結果、この部位は β 安定化元素であるバナジウムの濃化部であることを確認したことから、 α 相と β

相が混在した組織となっている。一方で、溶接部の組織にはバナジウムの濃化部は確認できず、針状の α 相と微細な α' マルテンサイト相で形成された組織である。このことからレーザ溶接部の延性低下は、 β 相の消失と、 α' マルテンサイト相の形成が要因であることが示唆された。



(a) AM 母材 (b) AM レーザ溶接部

図3 AM 母材と AM レーザ溶接部の断面組織

3-2 電気炉での短時間溶接後熱処理による変化

熱処理した溶接金属断面の組織写真を図 4 に、マイクロビッカース硬さ測定結果を図 5 にそれぞれ示す。

Ti-6Al-4V の金属積層造形材の熱処理について、 β トランザス以下の温度での有効性が示されていることから⁴⁾、熱処理温度を 600°C、700°C、800°C とした。熱処理温度 600°C における、1 分、5 分、10 分の保持時間の違いによる目立った組織変化は認められず、熱処理前の組織とほぼ同様の組織であるが、保持時間 30 分の組織写真では、母材組織と同様のバナジウム濃化部が認められる。一方、熱処理温度 700°C、800°C の組織を見ると、1 分の処理時間でバナジウム濃化部位 (β 相) が生成されており、極めて短時間の熱処理で、母材と類似した組織に変化することが示された。

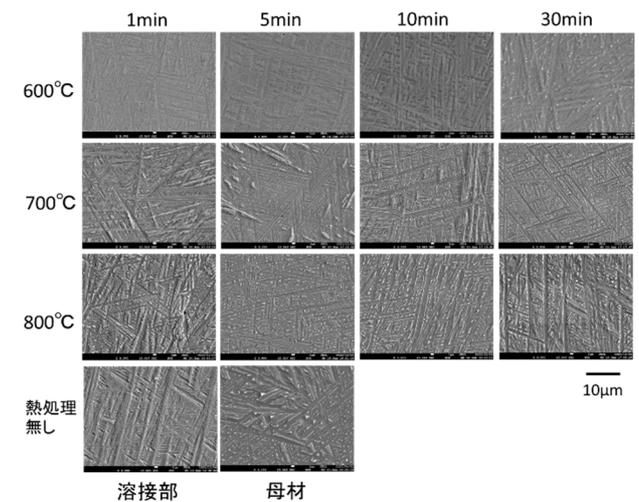


図4 各熱処理条件における溶接部断面組織

次に、熱処理による硬さの変化に着目すると、熱処理温度 600°C では、保持時間の増加に伴う硬さの変化はほとんど見られないが、700°C、800°C の処理温度では、1 分の保持時間で硬さが低下し、保持時間の増加に伴いそれぞれ硬さが低下する傾向が見られた。Ti-6Al-4V 材の短時間の時効処理において、比較的高温になると析出した針状・相の粗大化により、硬さが低下するという報告がある⁹⁾。本研究でも同様の理由により硬さが低下したものと考えられる。

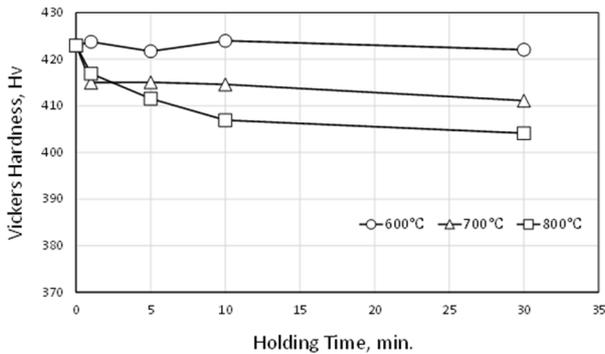


図5 各熱処理条件とマイクロビッカース硬さ

3-3 レーザ熱処理による機械的特性の改善

レーザ熱処理は、レーザ照射部だけに局所的な熱処理が可能であること、昇温・冷却速度が極めて速いことが大きな特徴である。図6に熱処理温度 800°C、照射時間 1 分の設定における、試験片表面温度測定データを示す。放射温度計による測定のため 550°C 以上の温度からの測定値となっているが、レーザ照射開始直後瞬時に所定の温度に到達していることがわかる。

AM 溶接材のレーザ照射時間に対する伸びと硬さの変化を図7に示す。伸びと硬さどちらの結果においても照射時間 1 分で値が大きく変化し、その後緩やかな変化に変わり、伸びは回復し、硬さは低下傾向を示している。伸びに着目すると、溶接したままの状態では、5% 台であった数値が、僅か 1 分間の熱処理で 10% を超える値にまで大幅に回復している。処理温度については、700°C に比べ 800°C の方が、伸び、硬さ共に変化量が大きく、後

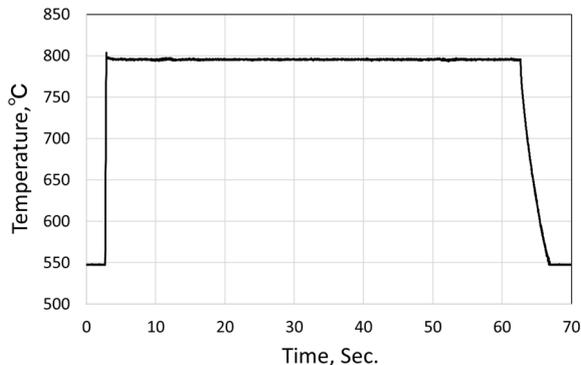


図6 レーザ熱処理による試験材表面温度測定

熱処理の効果が大きいことがわかった。これらの試験材に対し曲げ試験を実施した結果を図8に示す。レーザ熱処理を行った試験材は全て破断せず曲がり、溶接したままの試験材のみ破断する結果となった。これは熱処理による伸びの回復結果とよい一致を示しており、短時間のレーザ熱処理により、曲げ特性が改善されることを確認した。

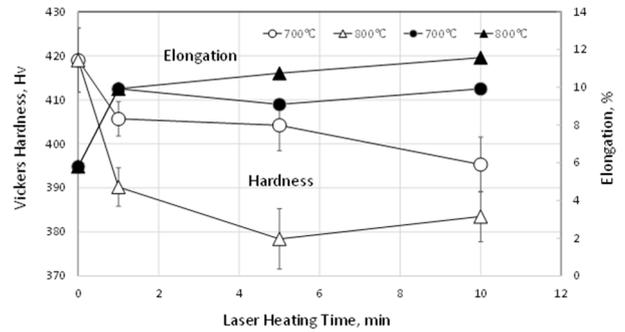


図7 レーザ熱処理品の伸び及び硬さ測定結果



700°C ①1分, ②5分, ③10分
800°C ④1分, ⑤5分, ⑥10分
熱処理無し⑦

図8 レーザ熱処理品の曲げ試験結果

3-4 レーザ熱処理による機械的特性の改善

図9に各試験材断面の反射電子線像と、バナジウムの特異 X 線像を示す。図4に示した通り電気炉での熱処理では、800°C 保持時間 1 分で、バナジウム濃化相の形成が確認されたが、レーザ熱処理の場合は、1 分の保持時間では、熱処理無しの組織とほとんど差異が見られず、保持時間 5 分で一部濃化相、10 分の保持時間で、組織全体に濃化相が形成されている。電気炉加熱は、レーザ加熱と比較すると昇温速度が非常に遅い。瞬間的に表面温度が 800°C に到達するレーザ加熱に比べ、今回は 20°C /min の昇温速度で加熱を行っているため、700°C から 800°C への昇温に 5 分程要し、その分多く入熱が材料に投入されるため、このような差異が生じたと考えられる。

一方で、曲げ試験においては保持時間 1 分の試験材も破断せず良好な曲げ特性が得られたことから、組織変化

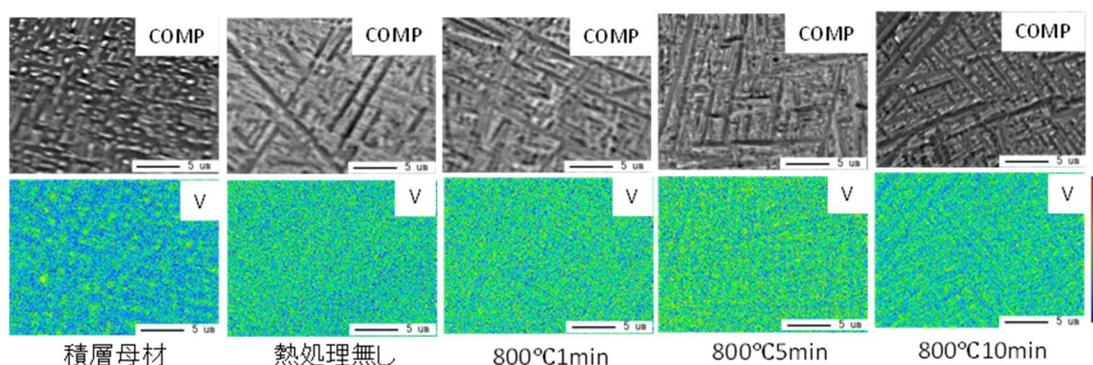


図9 レーザ熱処理品の反射電子線像及びバナジウム特性X線像

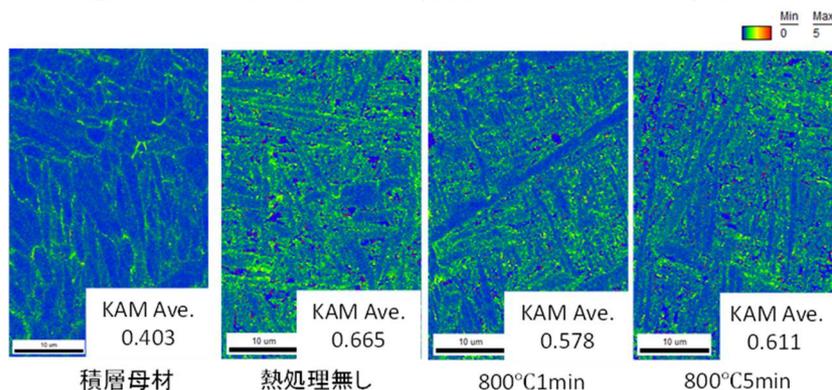


図10 レーザ熱処理品のEBSD測定によるKAMマップ

以外の要因により、曲げ特性が改善されたものと考えられる。この原因を明らかにするために、EBSDにより局部方位差（KAM: Kernel Average Misorientation）マップを測定した。各試験材のKAMマップと、KAM平均値を図10に示す。熱処理無しのKAMマップを積層母材のマップと比較すると、組織全体にひずみが分布し、特に結晶粒界付近にひずみが集中しているように見える。それに比べ保持時間1分及び5分のKAMマップは、全体的にひずみが緩和され、KAM平均値も減少傾向にあることがわかった。特に結晶粒内のひずみが除去されているように見える。この結果から、レーザ熱処理による曲げ特性の改善は、内部ひずみの除去に伴う延性の回復が要因と考えられる。

4 結言

金属積層造形装置で作製したチタン合金を使用し、突合せレーザ溶接及び、溶接部のレーザ熱処理を行い以下の結論を得た。

- (1) レーザ溶接継手の引張試験により、引張強度は積層材母材と同等以上であることがわかったが、曲げ試験では溶接部が破断した。この溶接部の延性低下は、レーザ溶接特有の急熱急冷プロセスにより、 α' マルテンサイト相が形成されたことが要因と考えられる。
- (2) 電気炉での熱処理試験により、700°C及び800°Cの熱処理温度において、保持時間1分から金属組織の変化と硬さの低下が確認され、適正な温度条件下であ

れば、短時間の熱処理で機械的特性に影響を与えることが示された。

- (3) 700°C及び800°Cの温度で、1分～10分の短時間レーザ熱処理を行ったサンプルは、全て良好な曲げ特性が得られ、レーザ熱処理により、昇温時間含め極めて短時間で溶接部の機械的特性を改善できることが確認された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、秋田県産業技術センターのレーザ加工装置を借用するとともに、同センターから貴重な御助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

文献

- 1) 中野貴由, 石本卓也: チタンならびにチタン合金の Additive Manufacturing プロセス, まてりあ, 58(4), p.181-187 (2019)
- 2) 社団法人日本チタン協会(編): チタンの加工技術, 日刊工業新聞社, (1992)
- 3) E.Akman, A.Demir, T.Cande and T.Sinmazcelik: Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys, Journal of Materials Processing Technology, 209(8), p.3705-3713 (2009)
- 4) B.Vrancken, L.Thijs, J.Kruth and J.V.Humbeeck: Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting, Microstructure and Mechanical properties, Journal of Alloy

and Compounds, 541, p.177-185 (2012)

- 5) 森田辰郎, 信田康介, 川崎一博, 三阪佳孝 : Ti-6Al-4V 合金の疲労強度に及ぼす短時間 2 段階熱処理の影響, 材料, 56(4), p.345-351 (2007)

ねずみ鋳鉄によるマルエージング鋼積層造形体の 鑄ぐるみの接合性評価*

高川 貫仁**、黒須 信吾**、園田 哲也**、岩清水 康二**

マルエージング鋼積層造形体とねずみ鋳鉄の鑄ぐるみ基礎技術の確立を目的に、接合性に及ぼす鋳鉄の注湯温度及び体積比、積層造形体形状の影響について調べた。その結果、凸型の場合、注湯温度 1350°C 及び 1400°C では空隙が生じたが、1500°C では良好な接合が得られた。ただし局所的な溶損も生じた。また空隙の発生箇所は、「上段上面の中央部分」及び「上段の揚がり側側面」に共通していた。形状をドーム型に変更した場合、1400°C による鑄ぐるみでは、ドーム型（頂点中央）及びドーム型（頂点揚がり側）において良好な接合が得られた。ドーム型（頂点湯口側）においては、揚がり側にのみ、積層造形由来の微細な凹凸に溶湯が入らず空隙が生じ、接合面の平滑化についても検討する必要があることがわかった。

キーワード：ねずみ鋳鉄、金属積層造形、鑄ぐるみ

Evaluation of Cast-in Bondability of Maraging Steel Additive-manufactured Object by Gray Cast Iron

TAKAGAWA Takahito, KUROSU Shingo, SONODA Testuya and IWASHIMIZU Koji

Key words: gray cast iron, additive-manufacturing, insert

1 緒言

近年、省資源・省エネルギーの観点から機械部品の軽量化や高機能化、多機能化が求められている。鋳鉄部品においても同様の要求が高まっており、大幅な特性向上には機能部品や異種材料との複合化が有効な手法となる。一方、形状の自由度により飛躍的な特性向上を見込める製造プロセス技術に金属積層造形技術がある。金属積層造形技術は、従来の加工法では不可能な三次元複雑形状の金属部品の造形が可能であり、航空宇宙部品をはじめ医療関連部品、各種金型など幅広い分野への応用が進められている。しかし、大型部品の製造においては、装置による造形サイズの制約や造形コストが高いなどの課題もある。そこで、鑄造の鑄ぐるみ技術を活用して金属積層造形体と鋳鉄を複合化できれば、鋳鉄材料の大幅な付加価値の向上に寄与できるとともに、金属積層造形体の大型化という課題を補うことができる。

鑄ぐるみとは、鑄型内に予め固体金属部材（心材）等を置き、そこに熔融金属を流して凝固させて両者を一体化させる接合方法である。鑄ぐるみによる接合機構には、①固体金属表面が熔融する接合、②固体金属表面は熔融しないが金属成分が拡散する接合、③固体金属表面は熔融せず接合面におけるアンカー効果による機械的な接合がある¹⁾。鑄ぐるみ接合は、同種材料や異種材料の接合

も可能であり、マルエージング鋼積層造形体のアルミニウム溶湯や球状黒鉛鋳鉄溶湯による鑄ぐるみ研究も行われている²⁾³⁾。

本研究では、鋳鉄溶湯には振動減衰能や熱伝導性、摺動性などが鋼より優れるねずみ鋳鉄、金属積層造形体には金属積層造形における汎用鋼材であるマルエージング鋼を用い、マルエージング鋼積層造形体とねずみ鋳鉄の鑄ぐるみ基礎技術の確立を目的に、接合性に及ぼす鋳鉄の注湯温度及び体積比、積層造形体形状の影響について調べた。

2 実験方法

2-1 積層造形体の形状及び造形条件

鑄ぐるまれる積層造形体の形状及び寸法を図1に示す。図1(a)は異なる径の円柱を2段重ねたものである（以下凸型と記す）。図1(c)は凸型の上段を半球状にしたものであり、この形状を基準に図1(b)及び(d)は頂点位置を左右に振った形状である。以下、図1(b)~(d)を順にドーム型（頂点湯口側）、ドーム型（頂点中央）、ドーム型（頂点揚がり側）と記す。金属粉末は粒度分布 20~45 μm、平均粒径(D50) 35 μm のマルエージング鋼粉末を使用し、粉体床型レーザ照射式の金属粉末積層造形装置 (TRAFAM/要素技術研究機) により造形した。レーザはイッテルビ

* 令和5年度技術シーズ創生・発展研究事業（発展研究）

** 素形材プロセス技術部

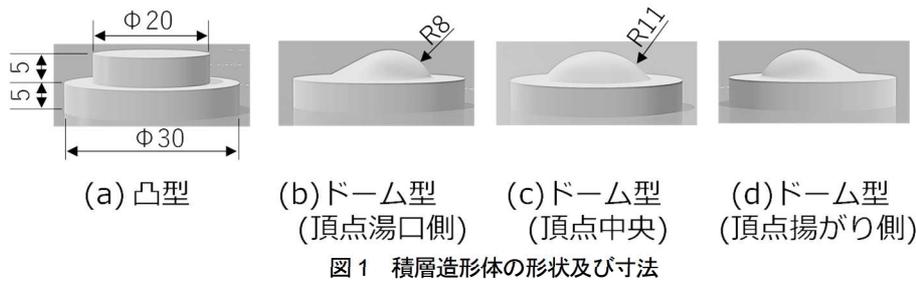


図1 積層造形体の形状及び寸法

表1 積層造形体(マルエージング鋼)の化学組成 (mass%)

C	Ni	Co	Mo	Ti	Cr	Al	Fe
0.01	17.6	9.0	4.9	0.80	0.15	0.15	残

ウム(Yb)ファイバーレーザであり、造形条件はレーザパワー350 W、走査速度 900 mm/秒、ピッチ 0.09 mm、スポット径 0.1 mm、積層厚さ 0.1 mm とした。造形の進行方向は、二次元スライスデータを幅 5 mm の帯状に分割し、レーザを短手方向に振りながら長手方向に造形した。また進行方向は 1 層ごとに 90°回転させた。積層造形体の固体発光分光分析結果を表 1 に示す。材質は 18%Ni マルエージング鋼であり、C は 0.01 mass%以下と低く、時効硬化元素として Mo、Ti 及び Al を含有している。18% Ni マルエージング鋼の融点は 1427~1454°C である⁴⁾。

2-2 铸ぐるみ実験方法

铸ぐるみ試料及び铸造方案の概略図を図 2 に示す。凸型及び各種ドーム型の積層造形体は、下段部分を砂型に埋めて設置し、砂型から突出する上段が铸铁溶湯に铸ぐるまれる。堰は板形状で長さ 15、幅 10、高さ 5 mm である。铸ぐるみ試料の铸铁部分の高さは、凸型の铸ぐるみ実験においては 10、20 及び 50 mm の 3 水準とした。この場合の铸铁と積層造形体の体積比は順に、1.1、2.5、6.6 である。各種ドーム型の铸ぐるみ実験においては铸铁部分の高さは 10 及び 20 mm とし、铸铁と積層造形体の体積比は、高さ 10 mm の場合は 1.5、20 mm の場合は約 3.1 である。铸造方案は、铸ぐるまれる材料と接触した冷えた溶湯を吐き出すとともに、接触時間を長くするため、湯口の反対側に湯口と同様のサイズの揚がりを設置した。

実験は、予め積層造形体を設置した CO₂ 铸型に、高周波溶解炉で溶解した FC250 相当のねずみ铸铁溶湯を 1350~1500°C で注湯し铸ぐるみを行った。铸铁溶湯には注湯直前に Ba 系接種剤を 0.3 mass%湯面添加した。铸铁の固体発光分光分析結果を表 2 に示す。炭素当量 CE_L⁵⁾は 3.7、初晶温度 T_L⁶⁾は計算上 1213°C である。

得られた铸ぐるみ試料について光学顕微鏡により断面観察を行い、凸型及びドーム型の上段の接合性を評価した。また接合界面近傍について SEM-EDS による元素分析を行い、マルエージング鋼の合金成分であるニッケルの铸铁側への拡散状態を調べた。

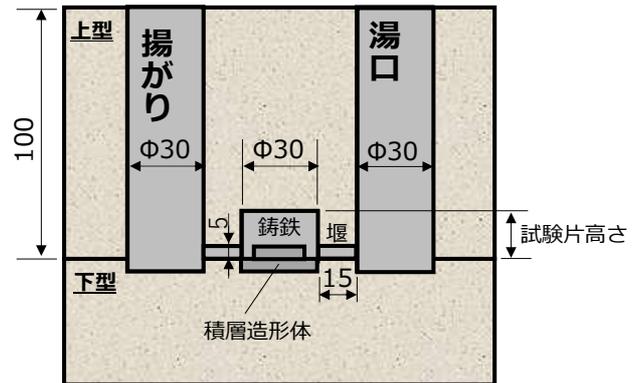


図2 铸ぐるみ試料及び铸造方案概略図

表2 ねずみ铸铁の化学組成(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
3.0	1.8	0.65	0.04	0.05	残

3 結果及び考察

3-1 接合性に及ぼす注湯温度及び体積比の影響

図 3 に凸型の積層造形体を注湯温度 1350°C、1420°C 及び 1500°C で铸ぐるみした試料の断面組織写真を示す。接合の良否については、界面に空隙がある場合は接合不良であり、空隙が無い場合でも積層造形体表面の溶融は出来るだけ少ない方が望ましい。図中、黄色で囲った部分は空隙が観察された箇所である。空隙は注湯温度の上昇及び体積比の増加に伴い減少した。これは注湯温度が高くなるに従い積層造形体の温度も上昇し、铸铁溶湯も凝固までの時間が長くなるためと考えられる。また体積比が増加した場合も、溶湯との接触時間が長くなることで積層造形体の温度は上昇し、铸铁溶湯も冷却速度が遅くなることで凝固までの時間が長くなるためと考えられる。

注湯温度 1500°C、体積比 2.5 及び 6.6 において空隙は観察されなかったが、湯口側において溶損が観察された。体積比 1.1 では空隙及び溶損の両方が観察された。空隙の発生については、注湯温度が高い場合でも一定時間以上の溶湯との接触時間が必要であることが推察された。

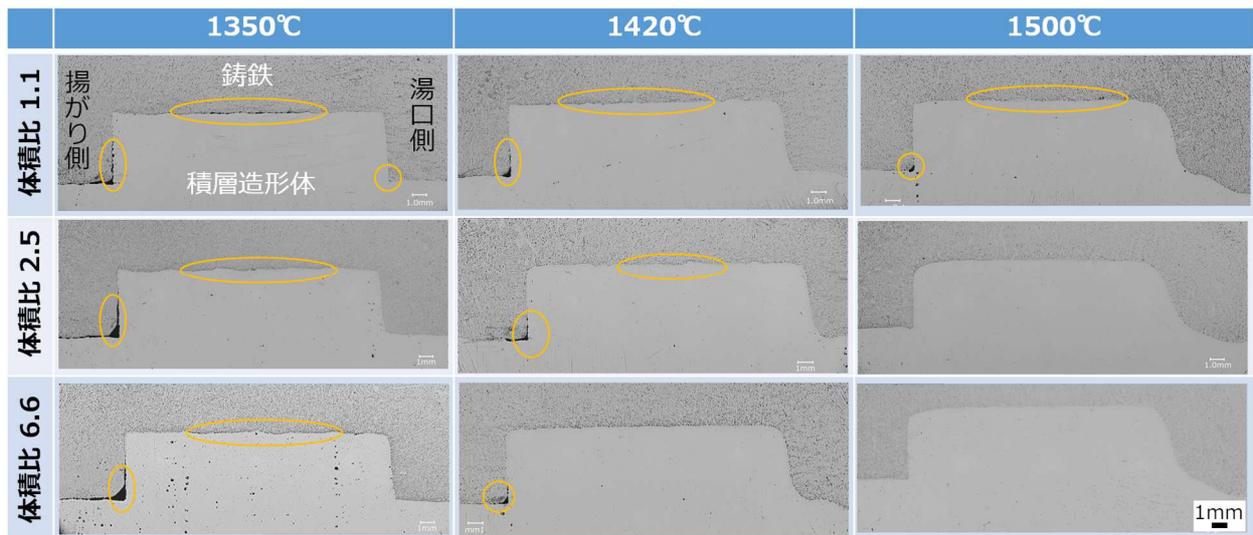


図3 凸型積層造形体を鑄ぐるみした試料の断面組織写真

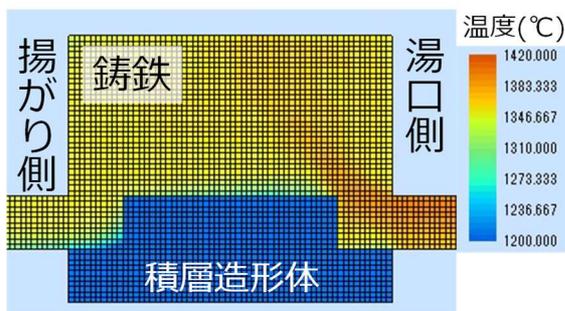


図4 湯流れシミュレーションによる凸型積層造形体鑄ぐるみ時の温度分布結果

また溶損については、1500°Cでは空隙が生じる短い時間でも溶損が生じることから注湯温度としては高いことが伺え、1420°Cで良好な接合が得られるのが望ましい。

空隙の発生箇所は、「上段上面の中央部分」及び「上段の揚がり側側面」に共通していた。そこで、湯流れシミュレーションにより注湯時の温度変化を評価した。図4に、鑄ぐるみ部が鑄鉄溶湯で満たされた直後の溶湯の温度分布を示す。積層造形体の右側の溶湯温度はオレンジ色で他よりも高く、そのオレンジ色の部分は積層造形体の湯口側の上段側面に沿って上方向に伸びている。積層造形体の上段上面近傍の溶湯温度は、湯口側から中央部にかけて水色であり温度が低くなっている。このことから、堰から供給される高温の溶湯はキャビティに入らずに積層造形体と衝突して跳ね上がり、積層造形体の上段上面には高温の溶湯が通過しないため「上段上面の中央部分」に空隙が発生しやすくなると推察される。また図より、揚がり側の積層造形体の上段側面は黄色であるが、下段との角部は濃い青色であり、溶湯温度が一番低い箇所となっている。ここは積層造形体の上段が湯の

流れの妨げになり溶湯の流速も遅く、冷めた溶湯が滞留するため空隙が発生しやすくなると推察される。特にこの角部は、注湯温度 1400°C において体積比を上げてても最後まで空隙が生じたことから、空隙が発生しやすき注意が必要な箇所である。

図5に注湯温度及び体積比を変化させた場合の鑄鉄側へのニッケルの拡散距離を示す。ニッケルの拡散は、空隙による接合の良否判定と同様に、ニッケルの拡散が全く無い場合は接合不良であるが、拡散している場合でも出来るだけ少ない方が望ましい。図はニッケル含有量が比較的大きく変化する点のみをプロットして、ニッケル含有量及び拡散距離を簡略化して示したものである。ニッケルの拡散距離は場所別では湯口側が一番長く拡散する傾向にあり、また湯口側におけるニッケルの拡散距離は、体積比が大きくなる程、注湯温度が高くなる程長くなった。一方で中央部及び揚がり側の拡散距離は、1500°Cにおいて中央部の拡散距離が長くはなったが、体積比と温度の影響は顕著には現れなかった。これらの結果から、接合性の向上のためには注湯温度の上昇や体積比の増加は有効であるが、ニッケルの拡散を抑えながら全体を接合するためには、溶湯が積層造形体の一ヵ所だけ集中的に当たる形状は避け、出来るだけ高温の溶湯が界面全面を通過するような形状づくりが重要である。

3-2 接合性に及ぼす積層造形体形状の影響

図3及び図5より凸型は積層造形体の「上段上面の中央部分」及び「上段の揚がり側側面」に空隙が生じやすき、またニッケルの拡散は主に湯口側において大きく生じることが分かった。そしてその原因は図4より堰から入った溶湯が積層造形体の上段側面と衝突し上に跳ね上がることと、揚がり側では積層造形体の凸部が溶湯の流れの妨げとなるためと推察された。そこで出来るだけ積

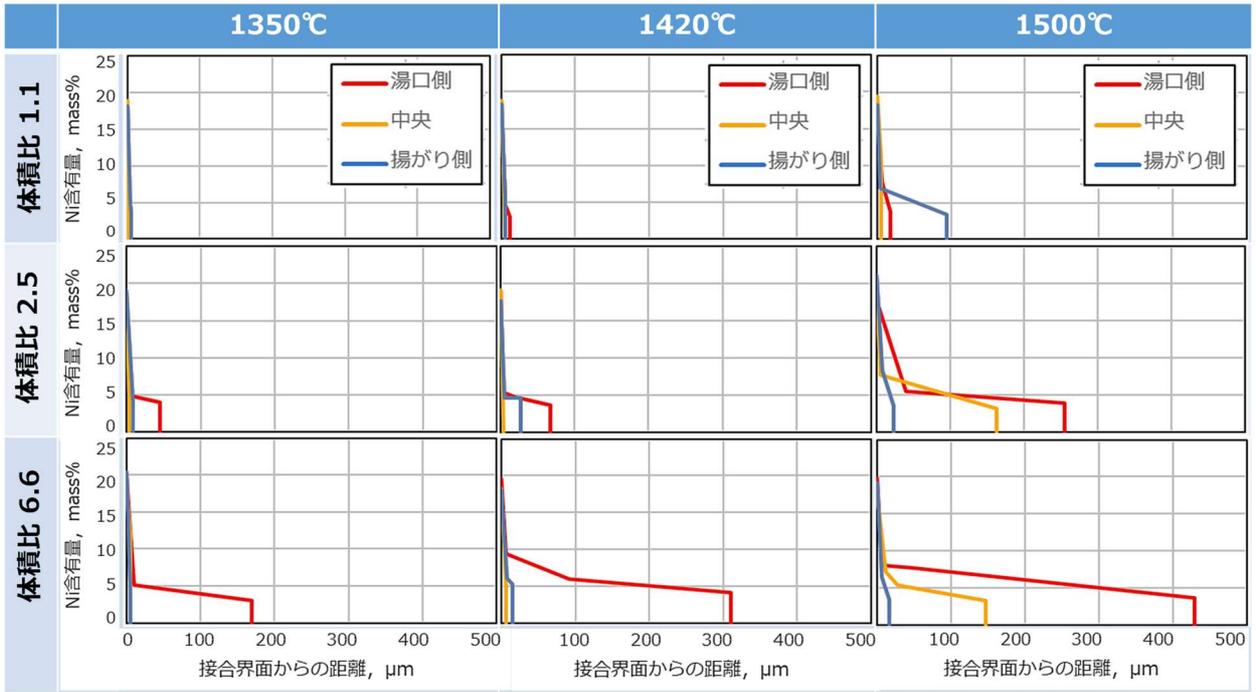


図5 凸型積層造形体を铸ぐるみした試料の铸鉄側へのニッケルの拡散距離

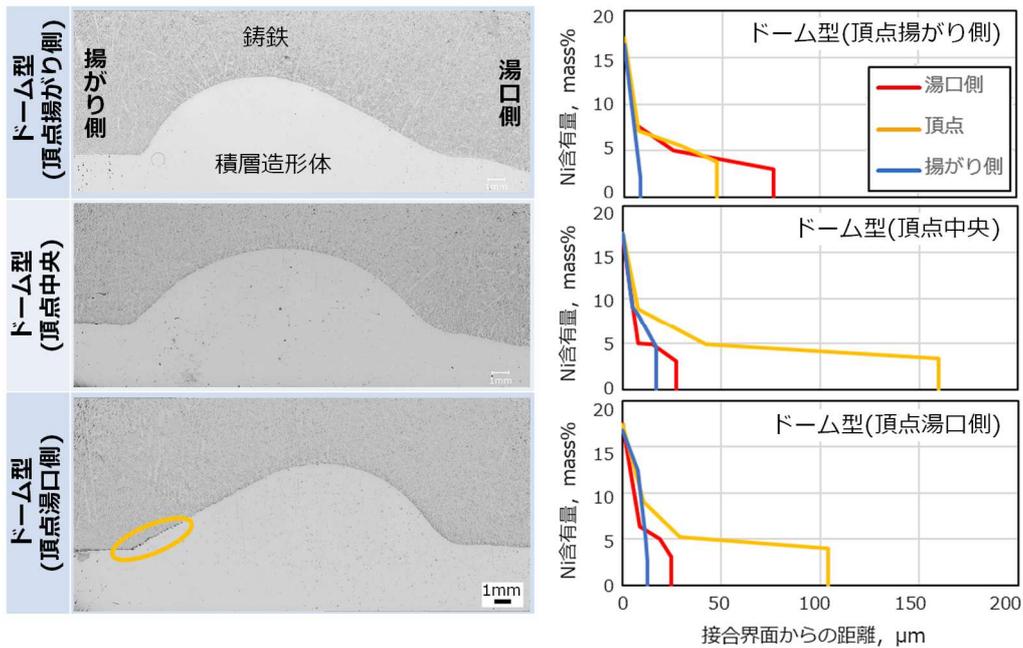


図6 ドーム型積層造形体を铸ぐるみした試料の断面組織写真及び铸鉄側へのニッケルの拡散距離

層造形体と溶湯との衝突を緩和させるために、積層造形体の上段に丸みを付けた3種類のドーム型について接合性を評価した。注湯温度は1420°Cとした。

図6に各種ドーム型の積層造形体を铸ぐるみした試料の断面組織写真及びニッケルの拡散距離を示す。ドーム型(頂点湯口側)において揚がり側に空隙が観察されたが、ドーム型(頂点中央)及びドーム型(頂点揚がり側)

ではドーム頂点付近及び揚がり側共に空隙は観察されず、良好な接合が得られた。これより注湯温度1420°Cにおいても接合性を向上させることができた。ニッケルの拡散については、高温の溶湯が衝突しかつ温められやすい頂点部分において拡散が大きくなる傾向にあった。

そこで湯流れシミュレーションにより各種ドーム型における注湯時の温度変化及び流速をシミュレーションし

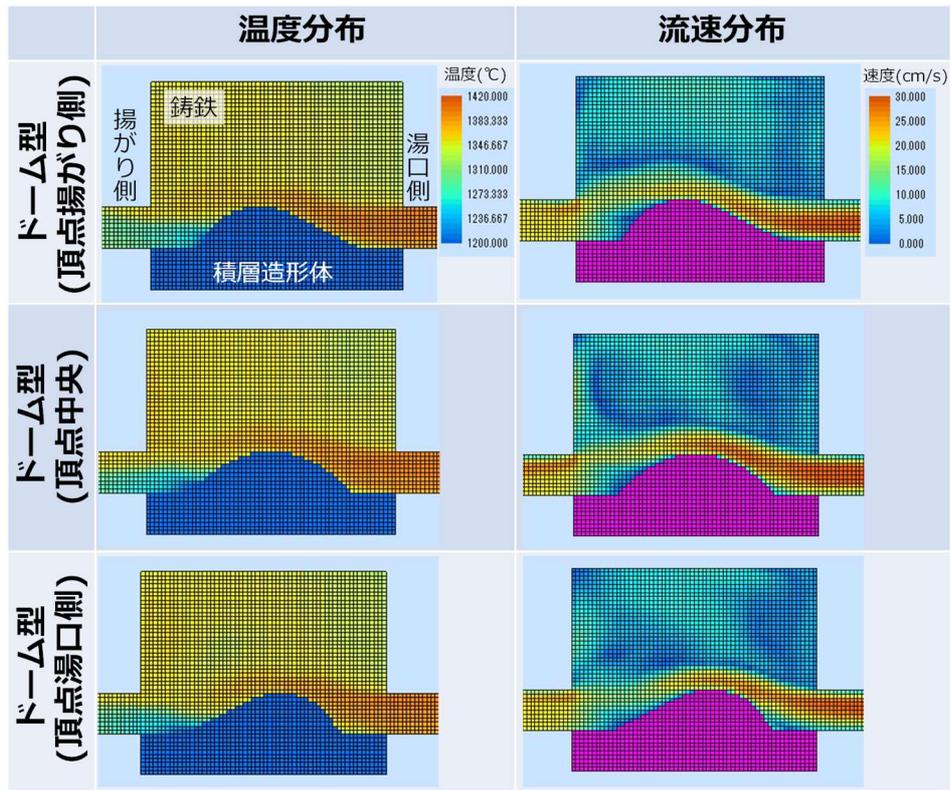


図7 湯流れシミュレーションによるドーム型積層造形体を鑄ぐるみ時の温度分布及び流速分布結果

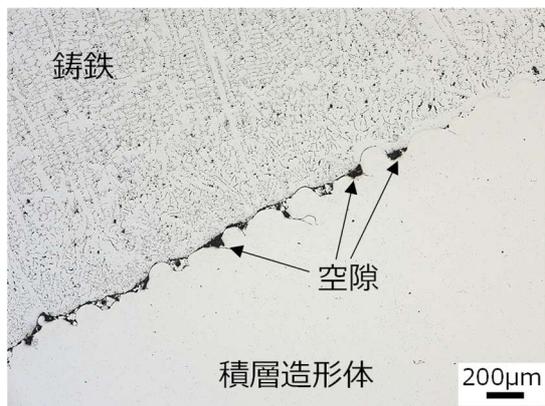


図8 ドーム型 (頂点湯口側) 未接合部の組織写真

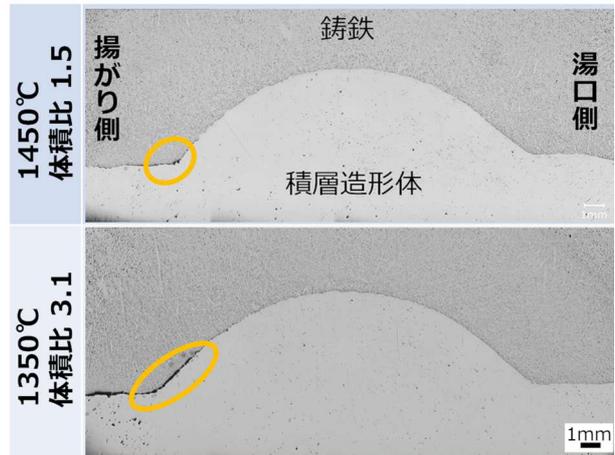


図9 ドーム型 (頂点中央) における鑄ぐるみ条件を変化させた試料の断面組織写真

た。図7に鑄ぐるみ部が鑄鉄溶湯で満たされた直後の溶湯の温度分布及び流速を示す。溶湯温度はいずれの形状においても同様の傾向を示し、湯口側では積層造形体の表面形状に沿って高く、溶湯は積層造形体との衝突により上方向に跳ね上がることなくドーム形状に沿って流れていることが伺える。ただし揚がり側の温度はいずれの形状においても低くなっている。流速もいずれの形状においても、湯口側ではドーム形状に沿って速いが揚がり側では減速している。これらの結果から、積層造形体の「上段上面の中央部分」の接合性を改善できた要因は、上段上面の中央部分に丸みをつけ、堰からの溶湯が何の

障壁も無く直接中央部分に当たるようになったためと推察される。揚がり側の接合性については、ドーム型 (頂点湯口側) のみ空隙が観察されたが、シミュレーション結果では各種形状において差はほとんどなく、温度や流速以外の要因も考えられた。そこでドーム型 (頂点湯口側) の未接合部について詳細に観察した。

図8にドーム型 (頂点湯口側) の未接合部の組織写真を示す。積層造形体表面に微細な凹凸が見られ、その凹部に溶湯が入り込めなく空隙となっていることが分かる。この凹凸は積層造形体を作製する際に層状に積層していくために生じる段差で、ドーム型のような傾斜がある積

層造形体では傾斜が緩やかになるほど積層の段差が水平方向に広がり粉末形状が目立ち微細な凹凸が顕著に現れる。そのため、ドーム型（頂点湯口側）においては緩やかな傾斜面には微細な凹凸があり、かつその緩やかな傾斜面が高温の溶湯が届かない揚がり側に位置しているというこの二つの作用により揚がり側に空隙が発生したと考えられる。

次にドーム型（頂点中央）において、良好な接合が得られたため、注湯温度及び体積比をそれぞれ片方だけ 1 水準下げ、注湯温度 1420°C のまま体積比を 1.5、体積比 3.1 のまま注湯温度 1350°C の条件で铸ぐるみ試験を行った。光学顕微鏡による断面組織写真を図 9 に示す。積層造形体のドーム頂点近傍はいずれの条件においても良好な接合が得られたが、図揚がり側では空隙が観察された。このことから、積層造形体の上段上面については、常に高温の溶湯が当たるような対策が接合性の向上に効果的である。揚がり側の接合については、この部分は湯の流れが遅く冷えた溶湯が停滞しやすい箇所になるため、いかに高温の溶湯をこの部分に届けるかが重要になる。

これらの結果から、積層造形体に対して铸ぐるみを行う場合は、以下の対策が有効である。①堰から入った溶湯の流速をあまり落とすことなく接合面全面に行きわたる铸造方案又は積層造形体形状とする。②積層造形体の造形において、接合面にする面、特に溶湯の流速が遅くなる箇所の面には出来るだけ凹凸が生じないように配置し造形する。場合によっては、積層造形体を造形後、積層造形体をベースプレートからワイヤー放電加工で切り離すが、その切断面は平滑であるため、その平滑面を接合面に利用する。

4 結言

(1) 凸型の铸ぐるみにおいて、注湯温度 1350°C 及び 1400°C ではいずれの体積比においても空隙が観察された。1500°C では体積比 2.5 及び 6.6 において良好な接合が得られたが、積層造形体は局部的に大きく溶損

した。

- (2) 凸型の空隙の発生箇所は、「上段上面の中央部分」及び「上段の揚がり側側面」に共通していた。
- (3) 湯流れシミュレーションの結果、凸型では堰から入った溶湯は積層造形体と衝突し上方に跳ね上がり、上段上面の溶湯温度が低下することを確認した。また揚がり側では積層造形体の上段が溶湯の流れの妨げとなり同様に温度が低下する傾向となった。
- (4) ドーム型の 1400°C による铸ぐるみでは、ドーム型（頂点中央）及びドーム型（頂点揚がり側）において良好な接合が得られた。ドーム型（頂点湯口側）においては、揚がり側にのみ、積層造形由来と考える微細な凹凸に溶湯が入らず空隙が生じ、造形体の形状によって、接合面の平滑化についても検討する必要があることを確認した。

謝辞

本研究は、岩手大学大学院総合科学研究科 金型・铸造プログラム特別研究(長期インターンシップ)の研究テーマとして小林拓夢氏に多大な協力を頂いた。心から感謝します。

文献

- 野口徹, 鴨田秀一: 铸ぐるみにおける接合要件と界面の制御, 铸造工学, 70, p.920-927 (1998)
- 谷内大世, 鷹合滋樹, 高野昌宏, 吉田勇太: 石川県工業試験場研究報告, 66, p.5-8 (2016)
- 鈴木逸人, 長船康裕: 接合部形状および材料を変化させた金属 AM 造形材の铸ぐるみにおける接合部の評価, 铸造工学, 95, p.646-652 (2023)
- 大和久重雄: マルエージング鋼, 日本金属学会会報, 3, p.719-728 (1964)
- 菅野利猛, 岩見祐貴, 姜一求: 亜共晶鉄の初晶晶出温度と炭素当量に及ぼす各種元素の影響, 铸造工学, 91, p.87-93 (2019)

3D 治具を活用した木材 CNC 加工技術の開発（第 1 報）*

内藤 廉二**、長嶋 宏之**、永山 雅大**

基準平面をもたない複雑な形状の CNC 加工を行うため、3D プリンターを活用した 3D 治具を作成した。3D 治具により複雑な曲面でも定盤への安定した固定を可能にし、正確な 3 次元 CNC 加工が可能になった。

キーワード：3 次元 CNC 加工、CNC 加工機、木材、3D プリンター、3D 治具

Development of CNC Processing Technology of Wood Using 3D Jigs (First Report)

NAITOU Yasuji, NAGASHIMA Hiroyuki, NAGAYAMA Motohiro

Key words: 3D automatic machining, CNC processing machine, wood, 3D Printer, 3D jig

1 はじめに

近年、工芸産業は生産額と従事者（後継者）が減少しており、産業の継続性の観点から生産性や利益率の向上が必要であると考えられる。岩手県工業技術センターでは先行研究として、漆工芸製品のスプーン（図 1）をターゲットに木材 CNC 加工の活用とその効率化を進めてきた。¹⁾²⁾

スプーンのような平面をもたない複雑な形状は、加工の過程で基準平面が無くなり加工機の定盤への固定が困難となる。先行研究では、定盤への固定部分とスプーンを支えるサポートを付与することにより、CNC による両面加工を達成した（図 2）。しかし、依然としてサポートを除去する手間や、材料の歩留まり悪化が課題となった。

本研究では、これまでの研究で明らかとなった木材 CNC 加工における課題解決のため、複雑形状の木製品に対して、熱溶解積層法 3D プリンター（以下、「3D プリンター」という）で固定治具を作成し、サポートを使わない CNC 加工を可能とすることを研究目標とした。



図 1 漆工芸品のスプーン



図 2 サポートを付与したスプーンのカNC加工

2 実験方法

2-1 3D 治具の定義

3D プリンターはコンピューターで設計した任意の形状を造形でき、複雑な形状も比較的容易に製作することができる。

本研究では、図 2 で示した固定部分及びサポートに代わる治具を 3D プリンターで製作する。これにより、複雑形状の被削材を固定できる可能性があり、次の効果が考えられる。

- ・加工工具と被削材固定具の接触リスクの低減
- ・手加工工数の削減による生産性の向上
- ・材料歩留まりの向上
- ・治具製造工程の短縮

治具の構成要素は、CNC 装置定盤へ取付ける合板部品、3D プリンターで造形した樹脂部品であり、これらを接合して 3D 治具（図 3）と呼称することとした。なお、3D 治具と材料の固定は真空吸着で行われる。真空吸着による固定は木工用の CNC 加工機で多く用いられ、真空ポンプによる負圧によって定盤に材料を吸い付ける固定方法である。よって 3D 治具には定盤に繋がる吸込口を設ける構造とした。

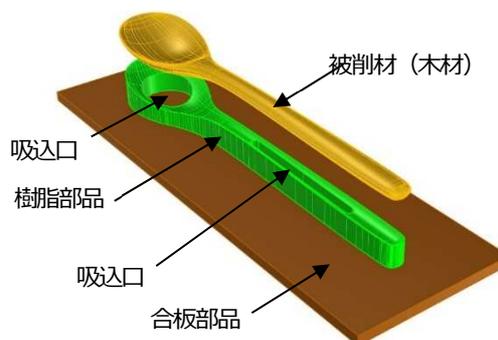


図 3 3D 治具

* 令和 5 年度技術シーズ創生・発展研究事業（発展研究）

** 産業デザイン部

2-2 加工形状と加工工程の設計

本実験の加工形状はスプーンの近似形状とし、かまぼこ型の曲面とスプーンの皿と柄を模した平面で構成される。設計寸法と加工後の寸法を比較することに重点をおいて設計した（図 4）。

スプーンは基準平面をもたない複雑な形状の為、CNC 加工機ではオモテ面、ウラ面の 2 方向からの加工が必要となる。そこで、実験においては曲面側の加工を第 1 加工、平面形状側の加工を第 2 加工とした（図 5）。3D 治具は第 2 加工で使用し、第 1 加工で加工した曲面側を支えながら真空吸着固定する仕様とした。

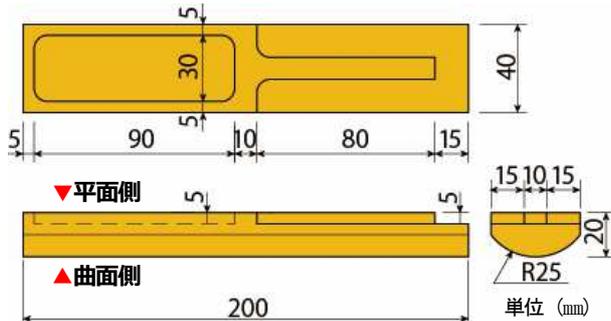


図 4 被削材加工形状図面

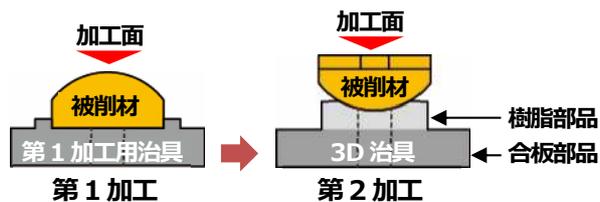


図 5 加工工程

2-3 3D 治具の設計と造形

3D 治具の樹脂部品を被削材の曲面形状にあわせて設計し（図 6）、3D プリンター（Fortus 450mc、Stratasys 社）で造形した（図 7）。本機では樹脂が隙間なく埋まっている solid の他に樹脂量の節約の為、3 種の充填パターンを選択できる（図 8）。そこで、各充填パターンで造形した治具での加工精度を確認した。造形条件は以下の通り。

- ・樹脂：ABS
- ・チップ：T16 (0.254 mm)
- ・充填パターン：
(Solid, Sparse, Sparse Double dense, Hexagram)

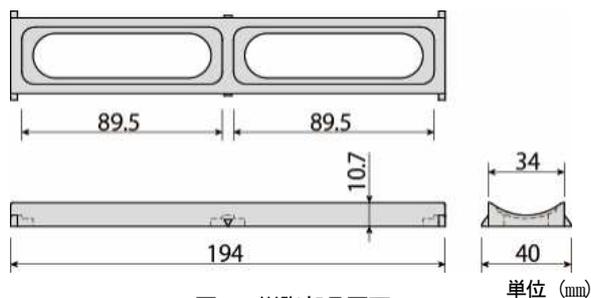


図 6 樹脂部品図面



図 7 造形した樹脂部品

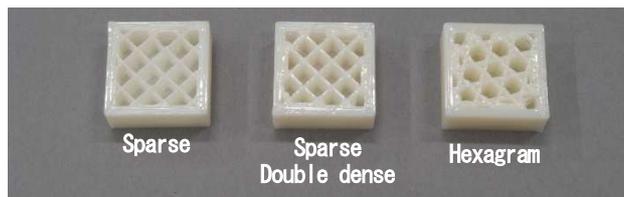


図 8 充填パターン

2-4 加工条件

加工には当センター保有の CNC 加工機（NC-151MC1508、(株)平安コーポレーション）、被削材はブナ材を用いた。使用する工具、加工条件（表 1）、及びツールパス（工具経路）（図 9）は製品のスプーン加工の中で特に切削量の多い荒加工での工具の動きを想定し設定した。ツールパスの作成にはアルファ CAM（ライコムシステムズ(株)）を用いた。

表 1 第 1 加工の切削条件

		第1加工	第2加工
使用工具	荒加工	ストレートビット (直径 12 mm)	ストレートビット (直径 12 mm)
	仕上加工	ボールエンドビット (直径 20 mm)	
回転数		18000 rpm	18000 rpm
送り速度		1000 mm/min	1000 mm/min
仕上加工のカスプハイト		0.01 mm	—
加工深さ		—	5 mm (2.5 mm × 2回)

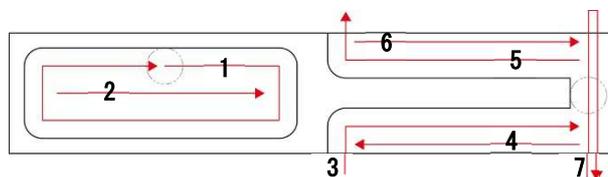


図 9 第 2 加工のツールパスと加工順

2-5 加工寸法測定と精度許容値の設定

樹脂の充填パターンが異なる 4 種の 3D 治具で CNC 加工した被削材の寸法を測定した。スプーンに求められる寸法誤差許容値は製造現場にヒアリングを行い（図 10）、図 4 の設計値に対する各寸法の許容値を定めた（図 11）。加工寸法は、被削材の測定箇所（図 12）に対してデジタルノギスを用いて測定し比較評価した。

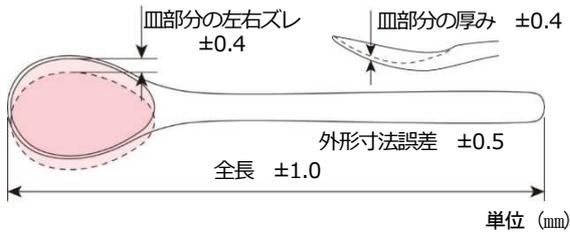


図10 製造現場で求められている寸法誤差許容値

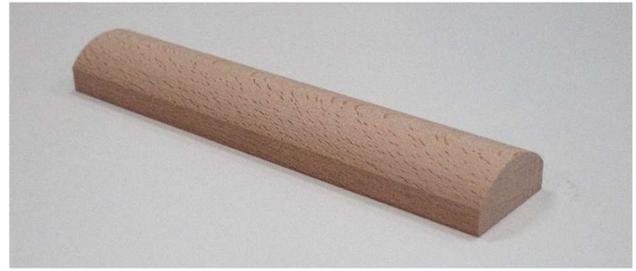


図14 第1加工結果

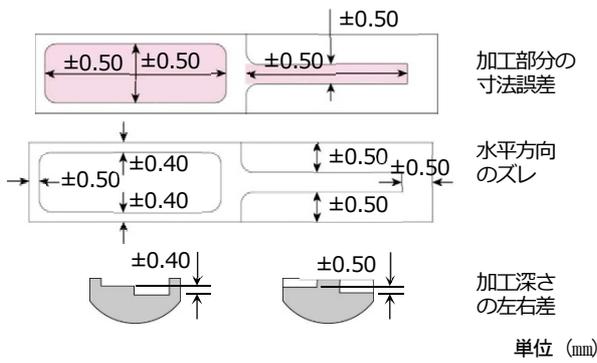


図11 被削材の寸法誤差許容値

3-2 第2加工

図7の樹脂部品を合板部品に接着固定し、第2加工用の3D治具を製作した(図15)。被削材の真空吸着を確実にするため、樹脂部分に厚さ2mmのスポンジゴムシートを紐状に切り出し、パッキンとして取り付けた。第1加工での切削曲面を3D治具で真空吸着固定し、加工座標に配置できるように合板部品にコマを取り付けて位置出しを行った(図16)。コマは真空吸着固定後に取り外し、加工を行った。加工時に被削材のズレや破損等の問題は発生しなかった。また、3D治具の破損や変形などの問題も発生しなかった。第2加工終了後の被削材を図17に示す。

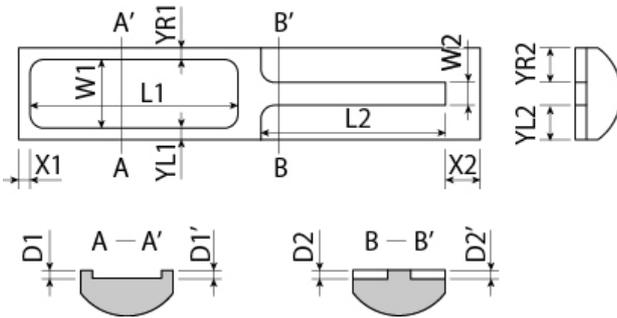


図12 被削材の寸法測定箇所

3 結果および考察

3-1 第1加工

第1加工用治具を製作し(図13)、被削材の加工を行った。加工結果を図14に示す。



図13 第1加工用治具

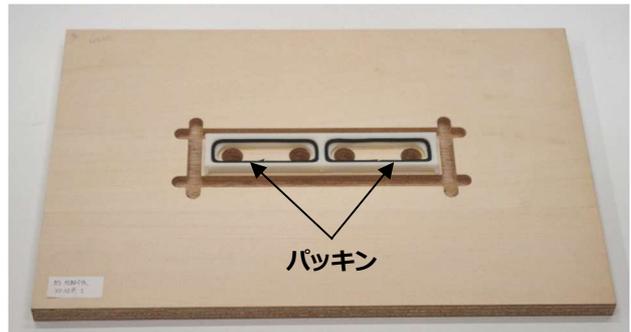


図15 第2加工用治具

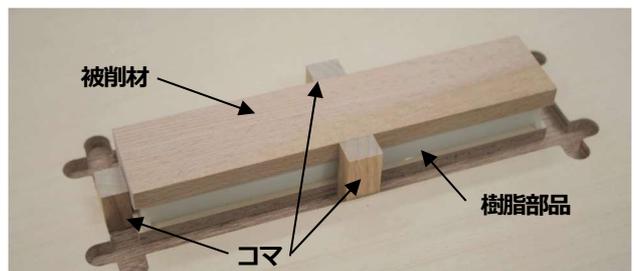


図16 被削材の位置出し

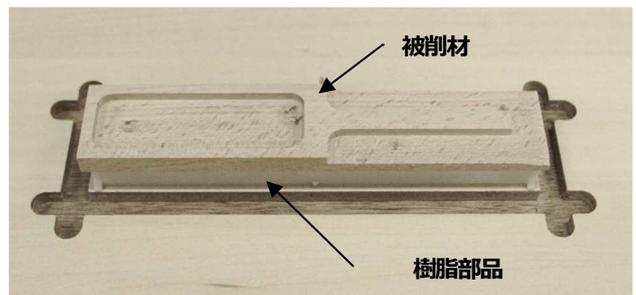


図17 第2加工後の被削材

3-3 加工精度の比較

加工精度の比較結果は、表 2、表 3、表 4 の通りとなった。各測定箇所の寸法精度は許容値内に収まっており、4 種の充填パターンによる寸法誤差に差は見られなかった。3D 治具を用いた吸着固定による CNC 加工が可能であること、3D 治具の機能は充填パターンに影響されず、3D 治具の製作コストが低い充填形状 (Sparse) でも問題なく加工できることが分かった。

表 2 第 2 加工面 (内側) の寸法誤差比較

単位 (mm)

測定箇所		L1	W1	L2	W2
許容値		±0.50	±0.50	±0.50	±0.50
パ 充 填 パ タ ー ン	Solid	0.03	0.09	-0.06	-0.08
	Sparse	0.05	0.01	-0.05	-0.08
	Double dense	-0.02	0.06	0.08	-0.05
	Hexagram	-0.05	0.09	0.06	-0.16

表 3 第 2 加工面 (外側) の寸法誤差比較

単位 (mm)

測定箇所		X1	X2	YL1	YR1	YL2	YR2
許容値		±0.50	±0.50	±0.40	±0.40	±0.50	±0.50
パ 充 填 パ タ ー ン	Solid	-0.03	0.29	-0.08	-0.01	-0.37	0.05
	Sparse	-0.01	0.01	-0.11	-0.03	-0.05	0.00
	Double dense	0.04	0.04	-0.12	-0.04	-0.27	0.06
	Hexagram	-0.10	0.15	-0.11	0.06	-0.23	0.12

表 4 第 2 加工面 (左右) の寸法誤差比較

単位 (mm)

測定箇所		D1-D1'	D2-D2'
許容値		±0.40	±0.40
パ 充 填 パ タ ー ン	Solid	0.11	-0.11
	Sparse	0.07	0.01
	Double dense	0.00	0.07
	Hexagram	-0.17	-0.07

4 まとめ

3D プリンターを活用した 3D 治具は、3 次元加工された木材を真空吸着固定し、CNC 加工を可能にすることが分かった。また、被削材の加工精度は樹脂部品の充填形状にも影響されないことが明らかとなった。これらから、3D 治具を活用することにより、複雑形状の木製品をサポートを使わずに CNC 加工できる可能性が示された。

今後は、最終到達目標である製品のスプーン木地の加工試験を行う。加工形状がより小さくなり、吸着面積が減少するため、3D 治具及び加工条件の精緻化と、生産性を考慮した仕上げ精度について検討していく予定である。

文 献

- 1) 内藤廉二, 有賀康弘 : Fusion360 を活用した木材 3 次元自動加工の検討, 岩手県工業技術センター研究報告, 24, p.31-37 (2022)
- 2) 内藤廉二, 有賀康弘, 茨島明 : 3 次元自動加工による木工製品製造の効率化, 岩手県工業技術センター研究報告, 22, p.43-47 (2020)

麦汁で発酵可能な清酒酵母の開発*

玉川 英幸**

吟醸香を多分に含むビールを製造するため、セルレニン耐性を有する岩手県の吟醸酵母「ジョバンニの調べ」F2株からマルトース資化性が向上し、麦汁を十分発酵可能となった変異株を分離することを試みた。定法にしたがい2-デオキシグルコース耐性となった変異株を分離し、その中から10%マルトースを含む合成培地で比較的发酵力の高い1株を選抜した。得られた変異株は親株と比較するとドライモルト培地での発酵力が大幅に改善しており、吟醸香の成分であるカプロン酸エチルを3.29 ppm、酢酸イソアミルを2.48 ppm生成した。発酵条件がエステル生成に与える影響を評価したところ、カプロン酸エチル生成は20°C前後で発酵を行ったときが最も高く、それより低く、あるいは高くなるにつれて大きく低下した。また、いずれの温度帯においても初期菌数が多くなるほどカプロン酸エチルの生成量は低下した。一方酢酸イソアミルは初期菌数が高いほど、発酵温度が低いほど生成量が増加する傾向が確認された。また、初期比重の高いドライモルト培地を使用すると酢酸イソアミルは生成量が増加する一方で、カプロン酸エチルでは変化がなかった。岩手県内の3つのブルワリーで合計7回の試験醸造を行ったところ、カプロン酸エチル(0.77-4.89 ppm)、酢酸イソアミル(2.24-5.42 ppm)を含むビールが製造された。

キーワード：酒イーストビール、吟醸香、カプロン酸エチル、酢酸イソアミル

Beer Brewed by Mutated-Sake Yeast Strains Enable Maltose Utilization

TAMAKAWA Hideyuki

Key words: sake yeast beer, ginjo-aroma, ethyl caproate, isoamyl acetate

1 緒言

ビアスタイルガイドライン 2204 (日本地ビール協会)によれば「酒イーストビール」は清酒酵母を用いて製造したすべてのビールが該当し、「清酒酵母がもたらす複雑なキャラクターが、ベースにしたビアスタイル固有のキャラクターと調和をとりながらローからミディアム・レベルで感じられるスタイル」と定義されている¹⁾。清酒は原料由来の香りに乏しいことから、使用される清酒酵母は香气成分生成能の高い株の開発が行われてきた経緯があり²⁾、他の醸造用酵母に比べるとエステル生成能が高いと言われている。したがって清酒酵母を用いることで吟醸香を中心としたエステル濃度の高いビールを製造できることが期待される。しかし、多くの清酒酵母は麦汁に含まれる主要な糖質であるマルトースの資化性に乏しく、単菌でビールを製造することが難しい³⁾⁴⁾。そこで多くの酒イーストビールの製造には、酵素処理することでグルコース比率の高い麦汁を用いる方法⁴⁾⁵⁾、麦汁に清酒酵母が利用可能な糖類を添加する方法⁶⁾、ビール酵母と併用する方法⁶⁾⁷⁾などが用いられている。しかし、麦汁の糖組成を加工する方法ではビールの残糖が大きく

変化し、ボディ感が極端に低い、あるいは高いビールになってしまう。また、ビール酵母との併用では期待していたほどのエステルが生成しないなどの欠点がある。そこで本研究では、清酒酵母由来の吟醸香を多分に含むビールを製造するために麦汁で発酵可能な清酒酵母を育種・開発することを目的とした。

Saccharomyces cerevisiae がマルトースを資化するためには、 α -グルコシダーゼ、マルトーストランスポーターおよびこれらを誘導する転写因子が機能している必要がある。マルトース資化性のない株の多くは、このうちマルトーストランスポーターが十分に機能していないと報告されている⁸⁾。マルトーストランスポーターの機能が強化された変異株を選抜する方法として、2-デオキシグルコース(2DG)耐性⁸⁾、アンチマイシン耐性⁹⁾およびマルトース培地での集積培養¹⁰⁾などの方法が報告されている。今回報告者はセルレニン耐性を有する吟醸用酵母「ジョバンニの調べ」F2株から0.2 g/L 2DGと20 g/L マルトースを含む最小培地で耐性変異株を選抜し、ラボスケールでの発酵条件の検討および20L~2kLスケールでの試験醸造を実施した。

* 令和5年度技術シーズ創生・発展研究事業(可能性調査研究)

** 醸造技術部

2 実験方法

2-1 菌株

育種の親株としてセルレニン耐性を有する岩手県の吟醸酵母「ジョバンニの調べ」F2株¹¹⁾を使用した。対照としてマルトトリオース資化性のないエール酵母 ALE514 (AB Mauri Food Inc, St. Louis, MO, USA) を用いた。

2-2 培地

酵母の培養には YPD2 培地 (10 g/L 酵母エキス、20 g/L ペプトン、20 g/L グルコース)、2DG-マルトース培地 (6.7 g/L Yeast Nitrogen base、20 g/L マルトース、0.2 g/L 2DG)、YPM10 培地 (10 g/L 酵母エキス、20 g/L ペプトン、100 g/L マルトース) を用いた。適宜 20 g/L の寒天を添加して使用した。

2-3 2DG 耐性株の選抜方法

酵母菌株は YPD2 培地に接種し、30°C、100 rpm で 24 時間、培養した。遠心分離で培養液から菌体を回収、滅菌水で 2 回洗浄した後、10⁷cells/plate もしくは 10⁸cells/plate で 2DG-マルトース培地各 8 枚に塗布した。30°C で 7 日間培養を行い、生育してきたコロニーを再度同じ培地上にストリークし、十分な培養が確認できたクローンを YPD2 培地にストリークし、マスタープレートとした。

2-4 マルトース資化性株の選抜

2DG 耐性株は YPD2 培地に接種し、30°C で 2 日間静置前培養した。30 ml YPM10 を分注した 50 ml 容コンカルチューブに前培養した培養液 0.3 ml 接種し、30°C で 2 日間静置培養し、遠心上清の各種成分分析を行い、マルトース資化性の高い株を選抜した。

2-5 発酵能力の確認および条件の検討

発酵条件の検討にはドライモルト エクストラライト (Muntons Plc, Stowmarket, England) を用いて調製したドライモルト培地を用いた。初期比重 1.05~1.07 (t/t) となるように蒸留水に溶解し、オートクレーブで 105°C、60 分間加熱処理した。加熱によって生成した凝集物を無菌的に遠心して除去し、発酵試験用の培地とした。発酵容器には 180 ml の培地を入れた 225 ml 容ビオラモビグコンカル (Asone, Osaka, Japan) を用いた。

酵母は 10 ml YPD2 に接種し、30°C で 2 日間静置した。前培養液は 1 L の YPD2 に植え継ぎ、30°C で 2 日間静置培養した。培養液から遠心で菌体を回収し、初期 OD₆₀₀ = 0.04-5.0 となるように培地に接種し、13-28°C の条件で静置培養を行った。経時的にサンプリングして遠心上清の比重を測定した。各サンプルは比重低下が停止して 24 時間経過してから 4°C に移し、7 日間静置した後、上清の香気成分を分析した。

2-6 分析方法

発酵液の Brix 測定はポケット糖度計 PAL-J (Atago, Tokyo, Japan) を用いた。アルコールの測定にはアルコメイト AL-3 (Riken Keiki, Tokyo, Japan) を用いた。グルコース、マルトース、エタノール分析は Shi らの高速液体クロマトグラフィーによる方法を一部改変して行った¹²⁾。60°C で保持した IC Sep-ION-300 カラム (Tokyo Chemical Industry, Tokyo, Japan) を用い、溶媒として 0.01 N 硫酸 (流速 0.4 mL/min) を使用した。検出には示差屈折率検出器を用いた。比重は密度比重計 DA-505 (Kyoto Electronics Manufacturing Co. Ltd., Kyoto, Japan) を用いて測定した。香気成分はエタノール 5% (v/v) を含む標準物質を用いて清酒用の国税庁所定分析法を用いて行った。

2-7 試験醸造

試験醸造用の酵母は YPD2 で培養を行った。培養菌体は滅菌水で 2 回遠心洗浄した後、滅菌水に懸濁して各メーカーに払い出した。必要に応じて麦汁を用いて各社で拡大培養を行い、20 L~2 kL スケールでビール醸造を行った。製造するビールのスタイルや仕込条件は各メーカーに一任した。

3 結果

3-1 2DG 耐性株およびマルトース資化性向上株の選抜

変異体選抜のために 2DG-マルトース培地に 10⁷ cells/plate で菌体を塗布した場合、全くコロニー形成が認められなかった。ジョバンニの調べ F2 株から自然変異株を選抜する場合、塗布菌体量を増やすと取得率が飛躍的に向上した経験があったことから¹¹⁾、塗布菌体量を 10⁸ cells/plate とした条件で選抜を行ったところ 8 枚のシャーレから複数個のコロニーを検出した。得られたコロニーを同じ培地に再度ストリークし、十分な増殖を確認した 8 個のコロニー (DG21-28) についてマルトース資化性の評価を行った。

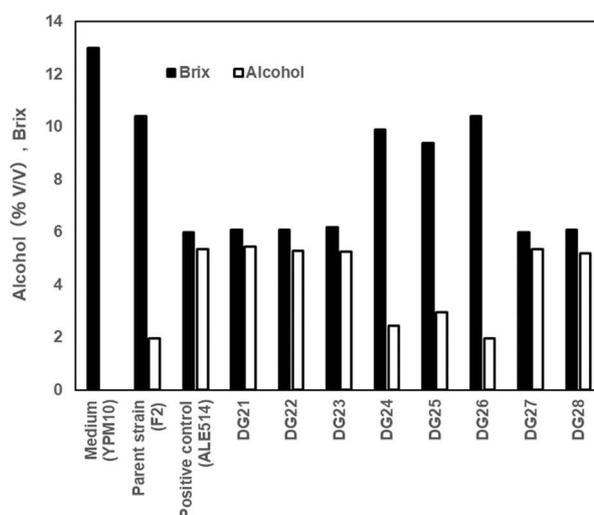


Figure 1 Production of alcohol by 2DG-resultant sake yeast strains in YPM10 medium.

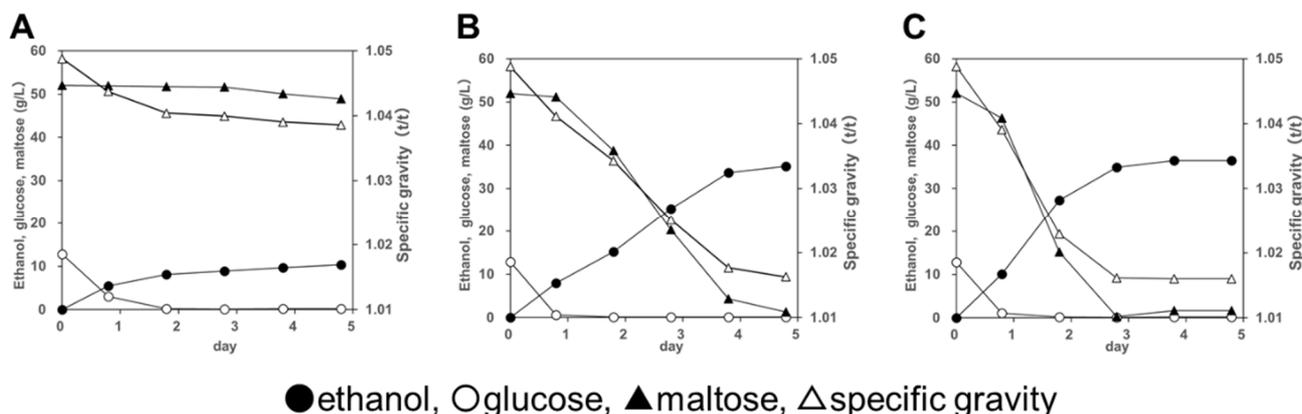


Figure 2 Time-dependent fermentation profiles of DG23 in dry malt medium adjusted to an initial specific gravity of 1.05. Panels A, B and C show the results for F2, DG23 and ALE514, respectively. Fermentation was carried out at 23°C. The initial cell density in the fermentation medium was adjusted to OD600 = 0.15.

コニカルチューブを用いて 10%マルトースを含む合成培地で発酵試験を行った結果を Figure 1 に示した。親株であるジョバンニの調べ F2 株は 1.95% (v/v) しかアルコールを生成せず、Brix も 10.4 までしか低下していなかったのに対して、2DG 耐性株は 8 株中 5 株がエール酵母である ALE514 と同等となる 5.20-5.45% (v/v) のアルコールを生成した。また、培地の Brix も 6.0-6.2 まで低下していた。これらの発酵試験を複数回実施し、マルトースを最も安定的に資化した株として DG23 株を選抜した。

Table 1 Concentration of ethyl caproate and isoamyl acetate in culture medium after a fermentation test.

Strain	Ethyl caproate (ppm)	Isoamyl acetate (ppm)
F2	0.40	0.50
DG23	3.29	2.48
ALE514	0.45	0.88

3-2 ドライモルト培地での発酵力の評価

DG23 株のマルトース資化性とエステル生成能を麦汁に近い条件で評価することを目的としてドライモルト培地での発酵試験を実施した (Figure 2, Table 1)。

ジョバンニの調べ F2 株は発酵開始からグルコースは速やかに消費されたもののマルトースの消費はほとんど行われず、それに伴って比重の低下も停止した。最終的に生成したエタノールは 10.5 g/L だった。一方、DG23 株ではグルコース消費後からマルトースの消費がはじまり、約 5 日間でマルトースを完全に消費した。生成したエタノールは 35.1 g/L だった。ALE514 ではマルトース消費が速く約 3 日間でマルトースを完全に消費し、36.1 g/L のエタノールを生成した。

培養液のエステルを分析したところ、マルトース資化性に乏しく早い段階で発酵が停止したジョバンニの調べ F2 株ではカプロン酸エチル 0.40 ppm、酢酸イソアミル 0.50 ppm しか生成しなかったのに対して、マルトースを完全消費した DG23 株ではそれぞれ 3.29 ppm、2.48 ppm の生成が認められた。一方、エール酵母である ALE514 はマルトースを完全消費したのにも関わらず各エステルの生成はそれぞれ 0.45 ppm、0.88 ppm だった。このようにマルトース資化性を獲得した清酒酵母変異株は麦汁を模した培地においても高い吟醸香生成能を示すことが確認された。

3-3 発酵条件が吟醸香生成に与える影響

初期菌数、発酵温度が酵母の発酵経過に与える影響を評価した。Figure 3 に示したように、初期菌数が多いほど、発酵温度が高いほどの比重の低下が速くなったことから、発酵速度が初期菌体数と温度に依存することが確認された。また、いずれの温度帯においても初期 OD600 が低いところから発酵を開始したサンプルほど最終 OD600 が低くなる傾向が認められ、OD600 = 0.04 とした場合の最終 OD600 が 7.7-9.3 だったのに対して、初期 OD600 = 5.0 とした場合では最終 OD600 は 13.4-17.9 で最大 2.32 倍の差があった。

各条件で生成した吟醸香を分析したところ、いずれの発酵温度帯においても初期菌体数が多いほどカプロン酸エチル生成量が低い傾向が認められた (Table 2)。特に 23°C で実施した場合は、初期 OD600 = 0.04 とした場合は 3.35 ppm のカプロン酸エチルが生成したのに対して、初期 OD600 = 5.0 では 1.04 ppm と 3 分の 1 以下の生成量に留まった。また、同じ初期菌数の場合は発酵温度が 18°C、23°C のときが高く、13°C、28°C では低い生成量であった。

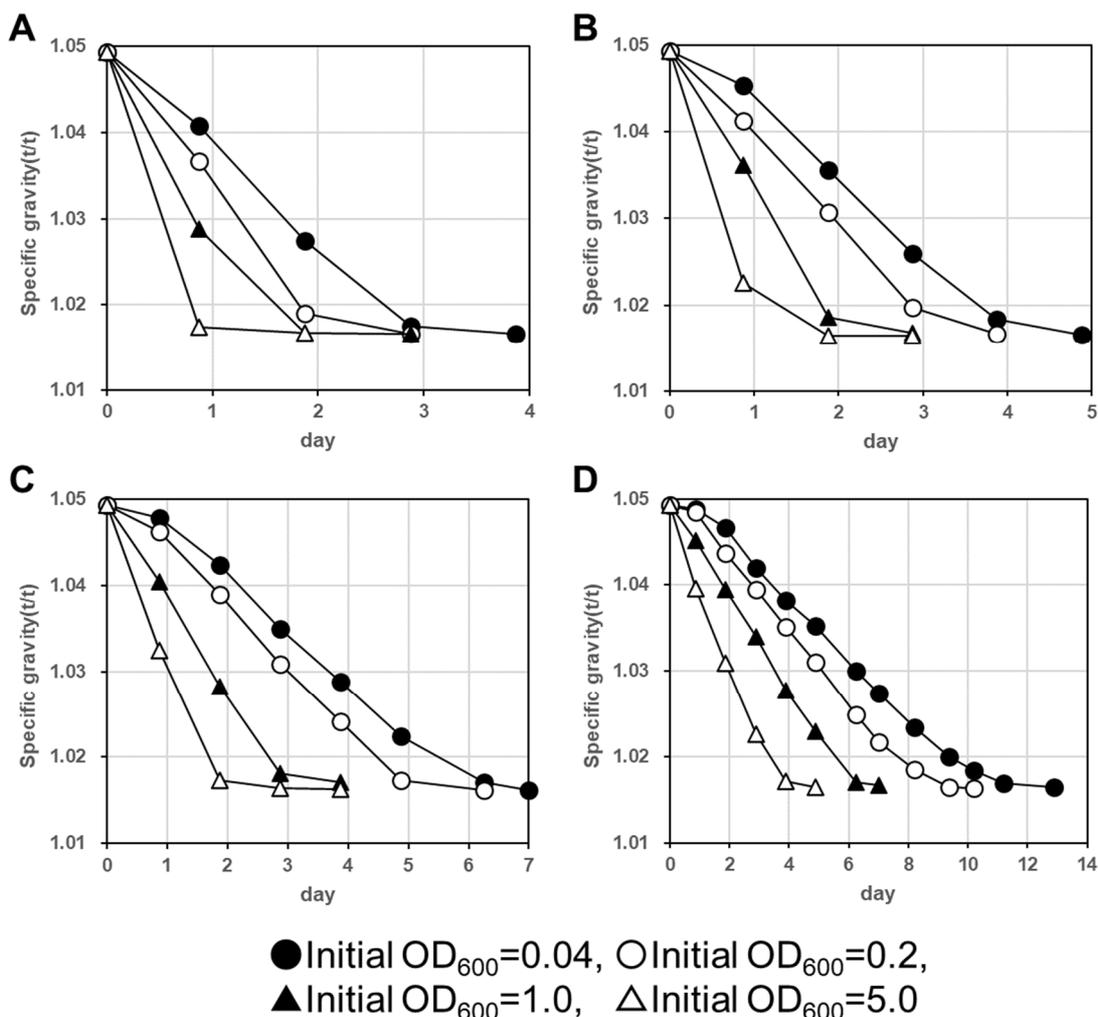


Figure 3 Time-dependent fermentation profiles of DG23 in dry malt medium adjusted to an initial specific gravity of 1.05. Panels A, B, C and D show the results for 28°C, 23°C, 18°C and 13°C, respectively.

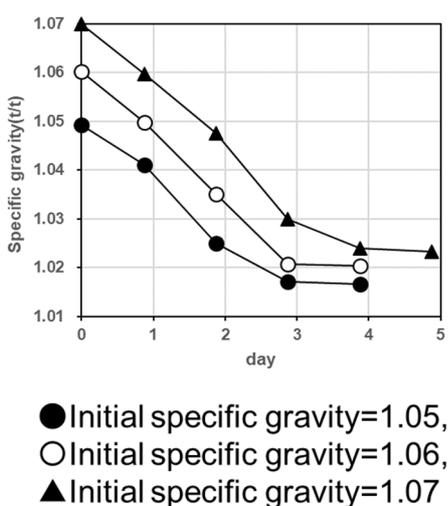


Figure 4 Time-dependent fermentation profiles of DG23 in dry malt medium adjusted to an initial specific gravity of 1.05-1.07. Fermentation was carried out at 23°C. The initial cell density in the fermentation medium was adjusted to OD₆₀₀ = 0.50.

酢酸イソアミルはいずれの温度帯においても初期菌数が多いほど、発酵温度が低くなるほど多量に生成される傾向が認められた。特に発酵温度が 13°C、初期 OD₆₀₀ = 5.0 のときに最大値で 2.99 ppm の酢酸イソアミルが生成された。酢酸イソアミルの生成量は前駆体であるイソアミルアルコールと相関すると言われている。そこでイソアミルアルコール生成量を確認したところ、酢酸イソアミルと同様に初期菌数が多いほど多量に生成する傾向が認められたが、発酵温度が低くても必ずしも多量に生成しなかった。

次にドライモルト培地の初期比重がエステル生成に与える影響を評価した。初期比重 1.05、1.06 とした場合においては比重の低下が停止するまでに 3 日間、1.07 では 4 日間を要した。最終比重はそれぞれ 1.01669、1.02036、1.02334 であり、初期比重に依存して高い値となった。最終 OD₆₀₀、酢酸イソアミル、イソアミルアルコールは培地の初期比重が高くなるにつれわずかに生成量が増える傾向が認められた一方で、カプロン酸エチルは大きな変化は確認されなかった。

Table2 Analysis of culture fermented with DG23.

Initial specific gravity (t/t)	Temperature (°C)	Initial OD ₆₀₀	Final OD ₆₀₀	Ethyl caproate (ppm)	Isoamyl acetate (ppm)	Isoamyl alcohol (ppm)
1.05	28	0.04	8.8	1.38	1.15	59.8
		0.2	9.6	1.46	1.47	62.7
		1.0	13.0	1.15	1.99	94.8
		5.0	17.9	0.84	1.97	116.9
	23	0.04	9.3	3.35	2.30	62.4
		0.2	9.4	3.29	2.30	64.8
		1.0	11.2	2.27	2.72	88.3
		5.0	16.7	1.04	2.77	113.5
	18	0.04	8.4	3.03	2.77	69.2
		0.2	8.8	3.61	2.91	73.5
		1.0	11.0	2.45	2.94	86.2
		5.0	16.2	1.67	2.99	109.1
13	0.04	7.7	1.40	2.01	88.8	
	0.2	8.5	1.88	2.81	94.4	
	1.0	9.7	2.24	2.93	96.5	
	5.0	13.4	1.93	2.99	105.1	
1.05	23	0.5	9.6	3.26	2.25	72.2
1.06			10.7	3.16	2.94	75.2
1.07			11.7	3.13	3.36	88.4

3-4 県内ブルワリーでの試験醸造

岩手県内ビールメーカーでビール試験醸造されたビールに含まれる吟醸香を分析した結果を Table 3 に示した。各ブルワリーでの仕込条件、酵母添加量、レシピは異なるものの含まれるカプロン酸エチルは 0.77-4.89 ppm、酢酸イソアミルは 2.24-5.42 ppm と通常のビールと比較しても多量に吟醸香が含まれるビールが製造できることが確認された。

4 考察

本研究では、ビールを製造可能な清酒酵母を開発することを目的として特に清酒の吟醸香の成分であるカプロン酸エチルと酢酸イソアミルを指標に酵母の評価を行った。酢酸イソアミルについてはビール酵母でも高生産するものが知られており、ビール製造における生成機構についても多数の報告がなされている^{13) 14)}。そこで本章においては、清酒酵母を使った特異性を十分に示すためのカプロン酸エチルの生成について考察を行う。

酒類に含まれるカプロン酸エチルは酵母が有する中鎖アシル CoA/エタノール転移酵素によってヘキサノイル CoA とエタノールのエステル化によって生成される。酵母で上記の酵素遺伝子を過剰発現してもカプロン酸エチルの生成量は増加しないこと、培地中へ前駆体脂肪酸を添加することでカプロン酸エチル生成量は増加することから、この酵母がカプロン酸エチルを生成する酵素反応は基質供給量が律速になっていると考えられている¹⁵⁾。セルレニンなどの薬剤耐性となり中鎖脂肪酸が高蓄積するような変異を獲得した酵母はカプロン酸エチル生成量が大幅に増加することから、香りを多く出したい清酒を製造しようとしたとき、多くの場合はこの変異を有する吟醸用酵母が用いられるのが一般的である¹⁶⁾。今回育種に使用した親株であるジョバンニの調べ F2 株も同様の変異を有しており、親株のもつ高い中鎖脂肪酸の生産能がビール醸造においてもカプロン酸エチルの高生産につながったものと考えられる。

Table 3 Concentration of ethyl caproate and isoamyl acetate in beer after a brewing test.

Brewer	Trial	Manufacturing scale (L)	Yeast starter culture volume (L)	Ethyl caproate (ppm)	Isoamyl acetate (ppm)
A	1	20	0.5	1.24	5.42
A	2	20	20 ^a	1.97	2.87
A	3	2000	20	4.34	3.27
A	4	2000	20	2.17	2.42
B	1	100	3	4.88	4.01
B	2	1000	100	0.77	2.24
C	1	20	2	1.56	4.05

^aResuse yeast of brewing test trial 1 in brewer A.

麦汁にはリノール酸などの不飽和脂肪酸は含まれているが、カプロン酸などの中鎖脂肪酸は含まれていない。麦汁に含まれる不飽和脂肪酸が酵母による発酵の過程で消費される一方で、酵母からの漏出によってビール中に中鎖脂肪酸が残存すると報告されている¹⁷⁾。ビールに含まれる中鎖脂肪酸のフレーバーは "Beer Flavour Terminology"において"Caprylic"と分類され、"Soapy, fatty, goaty, tallowy"などの好ましからざる特徴を有する成分と記載されている¹⁸⁾。また、Zurcher と Krauss によるビールへの添加実験からはビールの泡持ちを低下させることが報告されており¹⁹⁾、中鎖脂肪酸それ自体はビールに高含有していることが望ましいものでない。今回、前駆体である中鎖脂肪酸とカプロン酸エチルの関係性を評価する目的として、栗林らが開発した清酒中の脂肪酸簡易分析法²⁰⁾を用いて発酵液中のカプロン酸濃度を測定しようと試みたが、モルト由来のポリフェノールが反応阻害をするよう十分な比色検出ができなかった。セルレニン耐性のある清酒酵母が麦汁様の培地でカプロン酸エチル高生産する機構については前駆体分析などより詳細な解析が必要であると思われる。

今回の結果から発酵に使用する初期菌体量が多くなるとカプロン酸エチルの生産性が大きく低下することが明らかとなった (Table 2)。この現象について、発酵終了後に回収酵母を再度ビールの醸造に使用するいわゆる「連用酵母」を用いて種々の発酵試験を実施したところ、生成されるカプロン酸エチル濃度は酵母の前使用履歴に関わらず発酵初期の菌体量のみに依存した (data not shown)。カプロン酸エチルの前駆体であるヘキサノイル CoA は脂肪酸合成系から供給されるが、酵母の脂肪酸生合成は分子状酸素が必要であり、酵母の増殖ステージに合わせて厳密な制御を受けていることが報告されている²¹⁾。したがって清酒酵母でのビール醸造においてカプロン酸エチルは、ある程度酸素が得られ、酵母が十分に増殖でき

る環境の方が多量に生成されるのかもしれない。

5 結言

本研究では、吟醸香を含むビールを製造するために岩手県の吟醸酵母「ジョバンニの調べ」F2株から2DG耐性株を取得した。得られた変異株の1つはマルトース資化性が飛躍的に向上しており、麦汁を模した培地で吟醸香の成分であるカプロン酸エチルと酢酸イソアミルを高生産した。また、岩手県内で試験醸造においても高い吟醸香を含むビールが製造された。今回開発した酵母を用いることで特徴的な香気を有する酒イーストビールが製造できることが期待された。

謝辞

現場での試験醸造を快諾いただいた株式会社太極舎 暁ブルワリー 中林悠 博士、世嬉の一酒造株式会社 佐藤航氏、後藤孝紀氏、株式会社遠野醸造 太田睦 博士に深く感謝いたします。

文献

- 1) クラフトビア・アソシエーション (日本地ビール協会) : ビアスタイル・ガイドライン 2204 (2022)
- 2) 堤浩子: 清酒酵母の香气生成の研究, 生物工学会誌, 89, p.717-719 (2011)
- 3) 馬場茂, 小栗勇, 福沢幹雄, 森山敬子, 飯田俊彦, 小林巖, 今井謹也: 清酒酵母のマルトースへの作用 (その1) 清酒酵母のマルトース利用性について, 日本醸造協会雑誌, 69, p.453-455 (1974)
- 4) 向井伸彦: 各種醸造用酵母によるビール醸造の可能性, 日本醸造協会誌 97, p.99-105 (2002)
- 5) 水野昭博, 天野仁, 向井伸彦, 佐藤和夫, 高橋利郎: α -グルコシダーゼを利用したビールの高濃度醸造 (第2報) 清酒酵母・ワイン酵母のビールの高濃度醸造への

- 利用, 日本醸造協会誌, 98, p.639-648 (2003)
- 6) 日本ビアジャーナリスト協会, “麦で日本酒? 否、ビールなのに日本酒?”, 日本ビアジャーナリスト協会ウェブサイト, <https://www.jbja.jp/archives/31795> (2020-11-13)
 - 7) 中島奈津子, 齋藤高典: 福島県オリジナル清酒酵母を用いたビール醸造方法の最適化, 福島県ハイテクプラザ試験研究報告書 (2022)
 - 8) Orikasa Y, Mikumo D and Ohwada T: A 2-Deoxyglucose-resistant mutant of *Saccharomyces cerevisiae* shows enhanced maltose fermentative ability by the activation of MAL genes, *Foods*, 7, p.52 (2018)
 - 9) Maruyama H, Yamamiya T, Ozawa A, Yamazaki E and Suzuki N: Beer Brewed with Sake Yeast Strain Has Unique Sake-like Flavors, *J Am Soc Brew Chem*, 82, p.150-159 (2023)
 - 10) Brouwers N, Gorter de Vries AR, van den Broek M, Weening SM, Elink Schuurman TD, Kuijpers NG, Pronk JT and Daran, J. M. G.: In vivo recombination of *Saccharomyces eubayanus* maltose-transporter genes yields a chimeric transporter that enables maltotriose fermentation, *PLoS genetics*, 15, e1007853 (2019)
 - 11) 玉川英幸, 米倉裕一: セルレニン耐性を有する清酒酵母から尿素非生産性株の取得, 岩手県工業技術センター研究報告, 22, p.57-63 (2021)
 - 12) Shi NQ, Cruz J, Sherman F, Jeffries TW: SHAM-sensitive alternative respiration in the xylose-metabolizing yeast *Pichia stipitis*, *Yeast*, 19, p.1203-1220 (2002)
 - 13) Fujii T, Nagasawa N, Iwamatsu A, Bogaki T, Tamai Y and Hamachi M: Molecular cloning, sequence analysis, and expression of the yeast alcohol acetyltransferase gene, *Appl Environ Microbiol*, 60, p.2786-2792 (1994)
 - 14) Steyer D, Erny C, Claudel P, Riveill G, Karst F and Legras J. L: Genetic analysis of geraniol metabolism during fermentation. *Food microbiology*, 33, 228-234 (2013)
 - 15) Saerens, SM, Verstrepen KJ, Van Laere SD, Voet AR, Van Dijck P, Delvaux FR, and Thevelein JM: The *Saccharomyces cerevisiae* EHT1 and EEB1 genes encode novel enzymes with medium-chain fatty acid ethyl ester synthesis and hydrolysis capacity, *J Biol Chem*, 281, p.4446-4456 (2006)
 - 16) Ichikawa E, Hosokawa N, Hata Y, Abe Y, Suginami K, and Imayasu S: Breeding of a sake yeast with improved ethyl caproate productivity, *Agric biol chem*, 55, p.2153-2154 (1991)
 - 17) 藪内精三: ビールの脂質成分と品質, 日本醸造協会誌, 75, p.273-276 (1980)
 - 18) Meilgaard MC, Dalglish CE and Clapperton JF: *J Inst Brewing*, 85, p.38 (1979)
 - 19) Zorcher CH and Krauss G: *Mschr Brauerei*, 24, p.230 (1971)
 - 20) 栗林喬, 金桶光起, 渡邊健一: 酵素法による清酒の遊離脂肪酸の定量, 日本醸造協会誌, 107, p.624-631 (2012)
 - 21) Tehlivets O, Scheuringer K and Kohlwein SD: Fatty acid synthesis and elongation in yeast, *Biochim Biophys Acta*, 1771, p.255-270 (2007)

自然環境からの *Saccharomyces cerevisiae* の分離と ビール醸造への利用*

玉川 英幸**、笹渡 繁巳***

本研究では岩手県内の自然環境中から *Saccharomyces cerevisiae* の分離およびビール醸造への利用を試みた。県内 2 カ所で採取した合計 293 の植物試料から 33 株の *S. cerevisiae* を分離することができた。*S. cerevisiae* が検出された植物試料としては樹皮が最も確率が高く、38 検体のうち 9 検体から検出された。取得したすべての *S. cerevisiae* 分離株はマルトース資化性がなく、単菌でビール製造することができないと考えられた。そこでマルトース資化性変異株の取得を試みた。分離株をマルトース培地に接種し、振とう培養したところ、培養 18 日目に 1 株の野生酵母親株からのみわずかにマルトース資化する変異株が得られた。さらに、得られたマルトース資化性変異株から 2-デオキシグルコース耐性株を取得したところ、マルトースを高効率で利用可能な変異株が取得できた。得られた野生酵母マルトース資化性変異株を用いて県内ブルワリーにおいてビールの試験醸造を実施した。その結果、取得した分離変異株は健全な発酵経過を示し、単菌でビール製造が可能であることが確認された。

キーワード：野生酵母、*Saccharomyces cerevisiae*、マルトース資化、ビール醸造

Isolation of *Saccharomyces cerevisiae* from the Natural Environment and its Use for Beer Brewing.

TAMAKAWA Hideyuki, SASAWATARI Shigemi

Key words: wild yeast, *Saccharomyces cerevisiae*, maltose assimilation, beer brewing

1 緒言

1994 年の規制緩和により、ビールの製造免許に必要な年間最低製造数量が 2000 kL から 60 kL に引き下げられた。このいわゆる「地ビール解禁」によりビール業界では新規参入が増加し、一時は小規模事業者が 300 社を超えた。10 年余りでブームは完全に沈静化し、メーカー数も 200 社ほどにまで減少したが、2010 年以降地ビールはクラフトビールと名前を変えて 2 次ブームと呼ばれる回復に転じている¹⁾。特に昨今では毎年 100 社単位で事業者が増加しており、きた産業の報告によれば 2023 年末でビールもしくは発泡酒の醸造所の数は日本国内で 803 箇所となっている²⁾。クラフトビールのシェアは未だ増加傾向ではあるものの、ビール類の市場規模は 1994 年をピークに右肩下がり続けている。激化する競争の中で、クラフトビールも「大手がつくらないスタイルのビール」というだけのセールスポイントでは差がつかなくなっている。

クラフトビールの差別化のために、各社ではビール製造に地域の特産物を利用することが少なくない³⁾。その特産物利用の観点のひとつとしていわゆる地域の「野生

酵母」が存在する。野生酵母とは枝や葉、花、果実、樹液など地域の自然環境中にもともと存在していた酵母のことであり、地元の植物試料から分離された野生酵母を用いた酒類の開発は度々報告されている⁴⁾⁵⁾。市販されている醸造用酵母とは異なり野生酵母は必ずしも醸造適性に優れたものばかりではないものの、野生酵母を利用した商品は、そのメーカーの会社としてのストーリー性や情緒性に与える価値が少なからずあり、継続してメーカーから一定のニーズが寄せられる。

こうした野生酵母を探索する場合、多くの場合は最も一般的な醸造用酵母と同種である *Saccharomyces cerevisiae* を分離することを目標として実施されるものの、最近では *Lachancea* 属酵母を利用した例も散見されるようになり⁷⁾⁸⁾、野生酵母のビール醸造への利用が拡大している。

本研究では、岩手県内の自然環境中から *S. cerevisiae* を単離し、ビール醸造適性の評価を行った。得られた分離株からマルトース資化性株の育種選抜を行い、20L スケールでの試験醸造を実施したので報告する。

* 研究開発型人材育成支援事業

** 醸造技術部

*** いわてまち発酵工房

2 実験方法

2-1 菌株

対照としてマルトトリオース資化性のないエール酵母 ALE514 (AB Mauri Food Inc, St. Louis, MO, USA) を用いた。

2-2 植物試料からの *S. cerevisiae* の分離と同定

植物試料の採取は、事前に管理者から採取および研究の許可を得て、天台宗北上山新通法寺正覚院エリア (御堂観音) および石神の丘美術館花とアートの森エリアで実施した。植物試料はアルコール消毒したピンセットで採取し、滅菌された 50 ml コニカルチューブに移した。植物試料を採取したコニカルチューブは概ね 25°C 以下となるように保管し、採取から 5 時間以内に検体が完全に浸漬するように培地を添加した。培地は殿内らが報告した培地⁹⁾を用いた。3g 酵母エキス、3g 麦芽エキス、5g ペプトン、10g スクロースを溶解させた後、乳酸で pH 4.0 に調整し 920 ml にメスアップした。オートクレーブ後に 100 mg のクロラムフェニコールを溶解させたエタノール 80 ml を添加した。培地を添加した植物試料は 30°C で静置培養した。培養開始から 1、2、3 週間後に確認を行い、培地の混濁もしくは沈殿が生成したサンプルは上下反転によりよく懸濁した後、0.5 ml を 4.5 ml の同じ培地に接種して 30°C で 2 日間培養を行った。再度沈殿が生成したサンプルは YPD2 寒天培地 (10g/L 酵母エキス、20g/L ペプトン、20g/L グルコース、20g/L 寒天) に塗布して 30°C で 2 日間培養し、シングルコロニー化を行った。コロニー形状を確認し、コロニーが小さすぎる (概ね 1 mm 以下) もの、糸状菌や細菌様のコロニー形状を示したものを除き、1 シャーレから 4 コロニーをピックアップした。同じ YPD2 寒天培地で培養を行い、マスタープレートとした。得られた酵母株はギ酸アセトニトリル法でタンパク質抽出を行い、 α -シアノ-4-ヒドロキシケイ皮酸をマトリックスとして用いたマトリックス支援レーザー脱離イオン化飛行時間質量分析 (MALDI TOF-MS ultraflex, Bruker, Massachusetts, USA) で分析およびライブラリーリサーチを実施して微生物酵母菌種の同定を行った¹⁰⁾。

2-3 マルトース資化性変異株の選抜

マルトース資化性を獲得した変異株の選抜のために分離した *S. cerevisiae* を 2 ml 容 96 穴深底プレートに分注した 0.5 ml YPD2 培地に接種し、30°C で 2 日間静置培養した。得られた培養液 20 μ L を 50 ml コニカルチューブに分注した 20 ml YPM10 培地 (10 g/L 酵母エキス、20 g/L ペプトン、100 g/L マルトース) に接種し、30°C で静置培養もしくは 100 rpm で振とう培養した。経時的にサンプリングして Brix を測定し、Brix が低下した培養液を YPD2 寒天培地に塗布して 30°C で 2 日間培養し、シングルコロニー化を行った。1 シャーレから 8 コロニーをピ

ックアップし、同じ YPD2 寒天培地でマスタープレートを作製した。得られた変異株はアンチマイシン-マルトース培地 (6.7 g/L Yeast Nitrogen base w/o amino acid、20 g/L マルトース、0.6 mg/L アンチマイシン A、20 g/L 寒天) を用いて、寒天培地上でのマルトース資化性の評価を行った。

マルトース資化性を獲得した変異株からマルトース資化性がさらに向上した変異株を選抜するために YPD2 培地で振とう培養した菌体を滅菌水で 2 回洗浄して、1 シャーレあたり 10^6 cells を 2-DG-マルトース寒天培地 (20 g/L マルトース、0.4 g/L 2-デオキシグルコース (2-DG)、6.7 g/L Yeast nitrogen base、20 g/L) に塗布した。30°C で 1 週間培養を行い、形成されたコロニーを同じ培地にストリークして増殖が確認されたサンプルを YPD2 寒天培地にストリークしてマスタープレートとした。

2-4 発酵試験

分離した酵母、マルトース資化性を獲得した変異株、マルトース資化性が向上した変異株の最初の発酵能力評価のために以下のような簡易発酵試験を行った。2 ml 容 96 穴深底プレートに分注した 0.5 ml YPD2 培地に評価菌株を接種し、30°C、静置条件で 24 時間前培養した。1 ml の YPD20 (200 g/L グルコース、10 g/L 酵母エキス、20 g/L ペプトン) もしくは YPM10 を分注した 2 ml 容 96 穴深底プレートに前培養液 50 μ L を接種して 30°C、静置条件で培養を行った。培養 48 時間後、培養液の Brix を測定して各酵母株の発酵能力を評価した。

分離酵母から選抜したマルトース資化性向上株の発酵能力の評価のためにドライモルト エクストラライト (Muntions Plc, Stowmarket, England) を用いて調製したドライモルト培地を用いた。Brix=12-13 (初期比重約 1.05 (t/t)) となるように溶解し、オートクレーブで 105°C、60 分間加熱処理した。加熱によって生成した凝集物を無菌的に遠心して除去し、発酵試験用の培地とした。評価する酵母は 30°C での静置培養で 5 ml YPD2 培地、100 ml YPD2 培地で段階的に拡大培養を行い、遠心によって菌体を回収後、800 ml のドライモルト培地で懸濁し、1L 容メディウム瓶に分注した。23°C で発酵を行い、経時的にサンプリングして Brix を測定した。

2-5 試験醸造

ビールの試験醸造は株式会社遠野醸造 (Iwate, Japan) で実施した。糖化にはインフュージョン法を用いた。65°C で 75 分保持後、麦汁ろ過、スパージング、麦汁煮沸 60 分を行い、最終的に Brix 13.8 (初期比重 1.054) の麦汁 14L を得た。なお、ホップはチヌーク、カスケード、シトラの品種のホップをケトルホップ、レイトホップ、ドライホップでそれぞれ 15g 使用した。酵母は 2LYPD2 静置培養で調製し、滅菌水で 2 回洗浄した後、60 ml の滅菌水に懸濁して全量添加した。20°C で 1 週間発酵を行

い、酵母を除去した若ビールに 0.6% (w/v)となるようにプライムシュガーを添加した。500 ml の耐圧性ペットボトルに分注し、15°C で 1 週間発酵を行った。

2-6 分析方法

発酵液の Brix 測定はポケット糖度計 PAL-J (Atago, Tokyo, Japan) を用いた。グルコース、マルトース、エタノール分析は Shi らの高速液体クロマトグラフィーによ

る方法¹¹⁾を一部改変して行った。60°C で保持した ICSeP-ION-300 カラム (Tokyo Chemical Industry, Tokyo, Japan) を用い、溶媒として 0.01 N 硫酸 (流速 0.4 mL/min) を使用した。検出には示差屈折率検出器を用いた。比重は密度比重計 DA-505 (Kyoto Electronics Manufacturing Co. Ltd., Kyoto, Japan) を用いて測定した。香気成分はエタノール 5% (v/v) を含む標準物質を用いて清酒用の国税庁所定分析法を用いて行った。

Table 1 Number of sampling and isolate yeasts.

Date	Location where collected	Number of samples;				Identification	
		Sampling	1 st culture	2 nd culture	Single colony isolation		
2023/6/1	Mido Kannon	130	94	86	35	2	<i>Lachancea fermentati</i>
						1	<i>Pichia manshurica</i>
						17	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
						9	<i>Saccharomyces paradoxus</i>
						3	<i>Wickerhamomyces anomalus</i>
						3	Not applicable to database
						6	<i>Lachancea fermentati</i>
2023/6/22	Ishigami Museum of Art	163	57	48	29	16	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
						5	<i>Wickerhamomyces anomalus</i>
						2	Not applicable to database

Table 2 Ecological origins and isolate yeasts.

Ecological origins	Number of samples	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<i>Saccharomyces paradoxus</i>	<i>Lachancea fermentati</i>	<i>Pichia manshurica</i>	<i>Wickerhamomyces anomalus</i>
leaf (litter)	83	5	3			1
branch (litter)	54	9	2	3	1	2
bark (litter)	38	9	2	1		1
flower (litter)	11	1		1		1
seed, fruit	80	6	1	2		2
sap	4					
flower (raw)	4					
leaf (raw)	5					
soil	2	1	1			
moss	3	1				1
the others	9	1		1		
Sum	293	33	9	8	1	8

3 結果

3-1 植物試料の採取、集積培養と酵母菌種の同定

採取数および選抜状況は Table1 に示した。植物試料は 2023 年 6 月 1 日に天台宗北上山新通法寺正覚院エリア（御堂観音）で 130 検体、2023 年 6 月 22 日に石神の丘美術館花とアートの森エリアで 163 検体採取した。1-3 週間の培養を行ったところ、それぞれ 94 検体、57 検体の混濁が認められた。再度同じ培地で増殖した検体を YPD 寒天培地でシングルコロニー化を行い、それぞれ 35 検体、29 検体の分離元から酵母様のコロニーを得た。得られたコロニーについて、質量分析法で酵母菌種の同定を行ったところ、それぞれ 17 検体、16 検体の採取源から *S. cerevisiae* を得ることができた。集積培養の工程で単一の酵母菌種が濃縮されているようで、1つの採取源から分離した 4 コロニーはほとんどの検体において単一の酵母菌種だった。

本研究においては、採取した植物試料に培地を添加して 1 週間おきに培養物の確認を行い *S. cerevisiae* の分離を実施した。*S. cerevisiae* は最終的に合計 33 個の植物試料から分離されたが、このうち、31 検体は培地添加から 1 週間で混濁が認められた検体であった。また、*Saccharomyces paradoxus* は合計 9 個の植物試料から分離されたが、このうち 8 検体は培養液の混濁に 2 週間もしくは 3 週間で要したものであった。このように、集積培養での培地の混濁状況は増殖した酵母菌種の特徴がある程度反映されたものとなった。

採取した植物試料数とそこから分離された酵母菌種を Table 2 に示した。*S. cerevisiae* が検出された植物試料としては樹皮が最も確率が高く、38 検体のうち 9 検体から検出され、自然に落ちた枝（9 検体/54 検体）がそれに次いだ。

3-2 グルコースおよびマルトース培地での発酵力評価

分離した *S. cerevisiae* のビールの醸造適性を評価することを目的としてグルコースおよびマルトースを炭素源とした合成培地（YPD20 培地、YPM10 培地）で簡易発酵試験を実施した。培養終了後の培養液 Brix を測定した結果を Figure 1 に示した。陽性対照として用いたエール酵母 ALE514 はグルコースとマルトースの資化性が高く、YPD20 培地、YPM10 培地での培養によって Brix が 7.2、5.5 まで低下した。一方、今回自然環境から分離した *S. cerevisiae* は YPD20 培地での Brix は大きく低下したものの YPM10 培地の Brix を大きく低下させる株はなかった。こうした糖資化による Brix の低下傾向は菌種によってある程度近い傾向があり、*S. paradoxus* も同様にグルコース資化性は高いものの、マルトース資化性のある株は

なかった。それぞれ 8 株分離された *Lachancea fermentati*、*Wickerhamomyces anomalus* はいずれもマルトース資化性があるものの弱く、グルコース資化性も *S. cerevisiae* に大きく劣るものが多かった。このように YPD20 培地での発酵力は他の酵母と比べて *Saccharomyces* 属酵母は明らかに高く、高濃度グルコース培地での発酵力を評価することで *Saccharomyces* 属かどうかの選抜はある程度可能と考えられた。

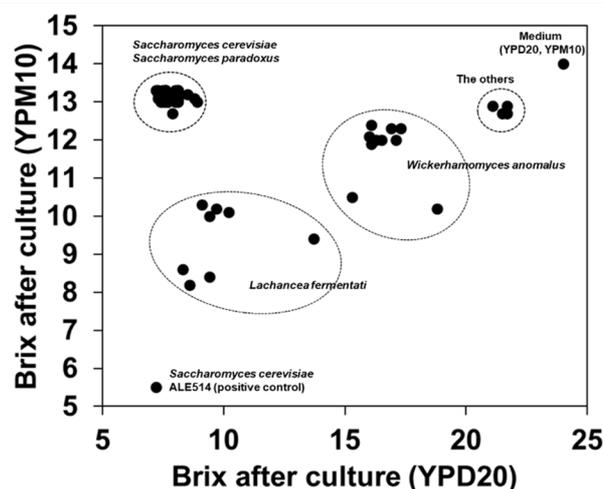


Figure 1 Brix value after micro-scale fermentation test by yeast isolates in YPM10 and YPD20 medium.

3-3 マルトース資化性変異株の選抜

今回自然環境下より分離した *S. cerevisiae* はいずれもマルトース資化性に乏しく、単菌でビール製造することが難しいと考えられた。そこで分離した *S. cerevisiae* から高効率でマルトースを利用する変異株を取得することを試みた。

マルトース資化性が向上した変異株を取得する方法として 2-DG 耐性株を取得する方法¹²⁾、アンチマイシン耐性株を取得する方法¹³⁾が報告されている。最初にこれら定法にしたがって分離した *S. cerevisiae* 33 株について各種薬剤耐性となった自然変異株の取得を試みたが、多くの株からはいずれの薬剤耐性株も取得することができず、またわずかに取得できた株も発酵試験を実施したところマルトース資化性を獲得していなかった。そこで今回、マルトース培地を用いた集積培養法を用いてマルトース資化性を獲得した変異株を濃縮することを試みた。

分離した *S. cerevisiae* 33 株をそれぞれ YPM10 培地に接種し、30°C で静置培養もしくは振とう培養を行った。接種した 33 株はいずれもマルトース資化性がないため、酵母の増殖に伴う培地の混濁や Brix の低下は起こらないはずであるが、マルトース資化性を獲得した変異株が発生し、増殖してくれば培地の混濁が認められる可能性がある。酵母種菌を接種後、長期間に渡って培養を継続し、培養液の外観を経時的

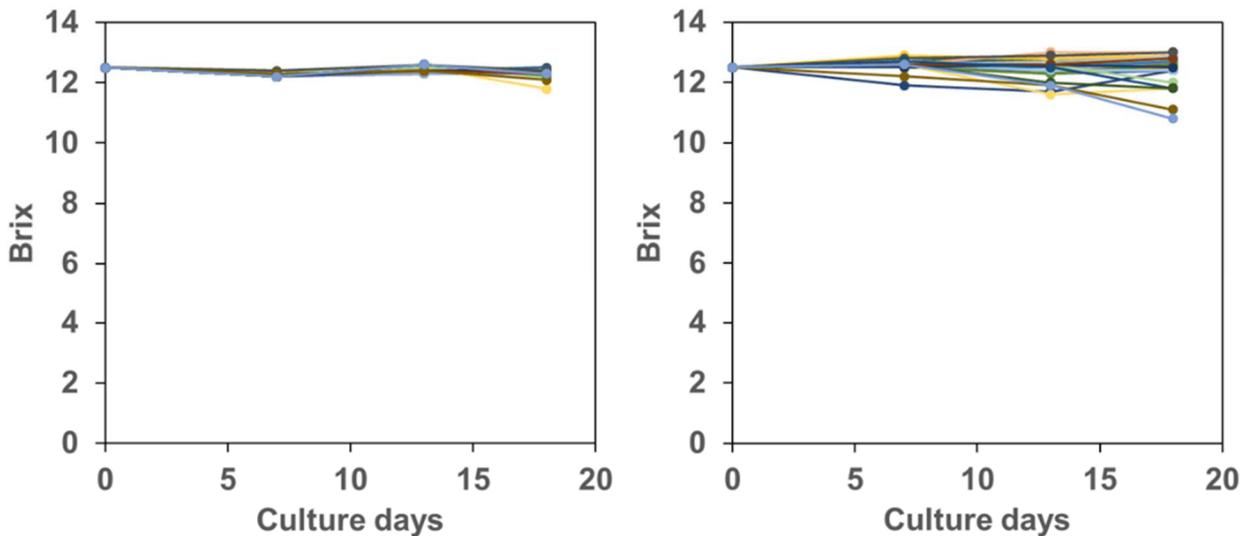


Figure 2 Change in Brix value during enrichment culture with 33 *S. cerevisiae* isolates in YPM10 medium. Panels A and B show the results for static condition and aerobic condition, respectively. See the main text for sample information.

に確認するとともにサンプリング液の Brix を測定した。その結果、培養 18 日目に振とう培養していたサンプルの中からわずかに Brix が低下し、培地が混濁したサンプルが 5 つ現れた (Figure 2, IGAM072、IGAM076、IGAM117、IGAM121、IGAM128)。振とう培養を実施していた多くのサンプルで培地の Brix は 12.5-13.0 だったが、Brix が低下したと判断した 5 つのサンプルでは培地の 10.8-11.8 だった。一方、静置培養していたサンプルでは沈殿が形成されたサンプルは認められなかった。Brix 低下が確認された培養液からシングルコロニーを単離して、各シングルクロンのマルトース資化性をシャーレ上で評価した。シャーレ上でのマルトース資化性の評価に YPM2 培地 (10 g/L 酵母エキス、20 g/L ペプトン、20 g/L マルトース) を使用すると、マルトース資化性がない株でもペプトンや酵母エキス由来のわずかな炭水化物を好氣的に利用して増殖する擬陽性が生じるため、培地条件を最小培地とし、更に呼吸増殖を抑制するアンチマイシン A を添加することでシャーレ上でのアンチマイシン資化性を正確に評価できると報告されている¹⁴⁾。そこで、アンチマイシン-マルトース培地で増殖を確認したところ、5 株の分離株親株はいずれも増殖が認められなかった。また、IGAM072、IGAM076、IGAM117 から得られた 8 クロウンも同様に増殖が認められなかったのに対して、IGAM121、IGAM128 から得られた 8 クロウンはすべてで増殖が確認された。そこで IGAM121、IGAM128 から得られた各 8 株について YPM10 培地を用いて簡易発酵試験を実施した。その結果、IGAM121 の集積培養から得られた変異株はその親株と Brix 低下の程度が変わらなかったのに

対して、IGAM128 の集積培養から得られた変異株では親株よりやや Brix が低下する株が幾つか得られた (Figure 3)。しかし、最も Brix が低下した株でも 12.9 であり、陽性対照として用いた ALE514 の Brix5.5 と比べると大きくマルトース資化性は劣っていると考えられた。なお、IGAM128 およびその変異株について PCR で *AWAI* の遺伝型を確認したところ¹⁵⁾¹⁶⁾、集積培養の前後 *AWAI* の遺伝型に変化がなかった。したがって、取得された変異株は他酵母株のコンタミネーション等ではなく、変異によって取得されたものと考えられる (data not shown)。

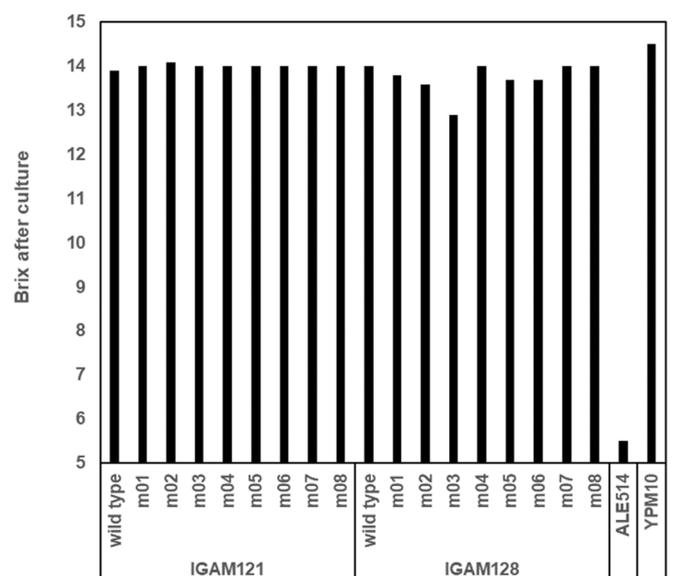


Figure 3 Brix value after micro-scale fermentation test by maltose adapted-*S. cerevisiae* isolates in YPM10 medium.

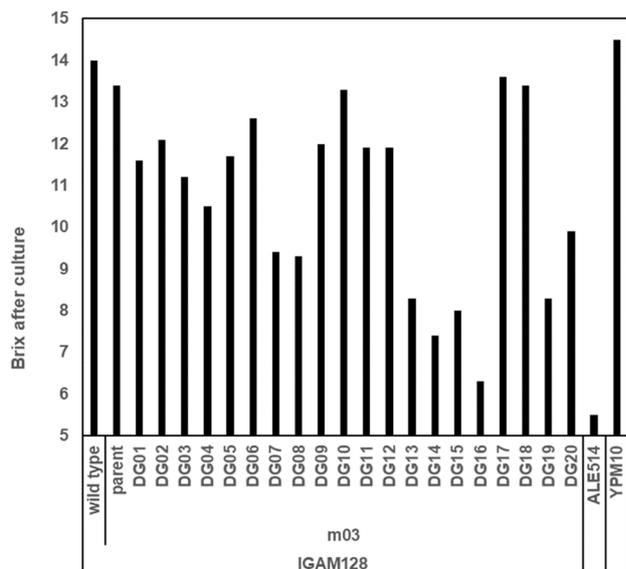


Figure 4 Brix value after micro-scale fermentation test by 2DG resistant-isolate *S. cerevisiae* strains in YPM10 medium.

3-4 マルトース資化性が向上した変異株の選抜

分離した *S. cerevisiae* の一つである IGAM128 株からマルトース培地を用いた集積培養で資化性変異株を獲得できたものの、そのマルトース資化性は高くなかった。そこで、さらにマルトース資化性が向上した変異株を取得するために、これまで得られた変異株の中から比較的 Brix 低下の度合いが大きかった IGAM128m03 株を親株として 2DG 耐性株を取得することとした。

変異株選抜のために 2DG-マルトース培地に 10^6 cells/plate もしくは 10^7 cells/plate で各 4 枚のシャーレに菌体を塗布して培養を行い、合計 20 個の 2DG 耐性クローンを得た。得られた変異株について YPM10 培地を用いて簡易発酵試験を実施したところ、評価を行った 20 株のうち 8 株で Brix が 10 以下まで低下していた (Figure 4)。特に IGAM128m03DG14 株、IGAM128m03DG15 株、IGAM128m03DG16 株の 3 株は Brix が 7.4、8.0、6.3 まで低下しており、ビール酵母である ALE514 と比べると劣ってはいるものの比較的高いマルトース資化性を示すことが明らかとなった。これらの発酵試験を複数回実施し、マルトースを最も安定的に資化した株として IGAM128m03DG15 株を選抜した。

3-5 マルトース資化性変異株の麦汁を模した培地での発酵力の評価

IGAM128m03DG15 株のマルトース資化性を麦汁に近い条件で評価することを目的としてドライモルト培地での発酵試験を実施した (Figure 5)。

ALE514 では発酵が速く、2 日後に Brix が 7.6 で停止した。IGAM128m03DG15 株では発酵開始とともに

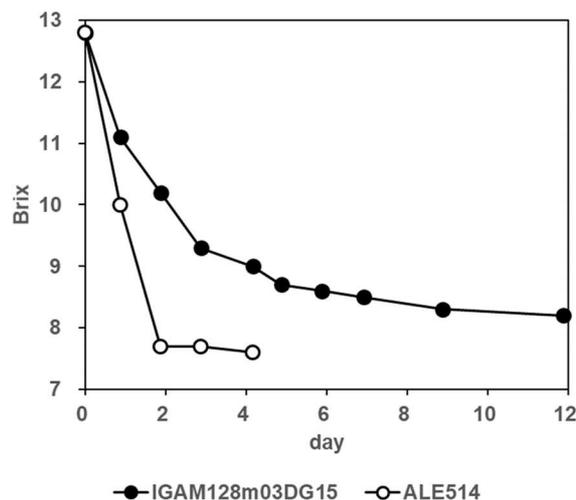


Figure 5 Time-dependent fermentation profiles of IGAM128m03DG15 and ALE514 in dry malt medium adjusted to an initial specific gravity of 1.05.

徐々に Brix 低下速度が鈍化し、4 日後に Brix 9.0 まで低下したものの発酵を 12 日目まで継続しても Brix は 8.2 までしか低下せず、ややマルトースが残存したと考えられた。

3-6 ビールの試験醸造

最後にビール製造の可能性を評価することを目的として岩手県内ブルワリーで試験醸造を実施した。ペールエールスタイルのレシピで調製した Brix 13.8 (初期比重 1.054) の麦汁に酵母を添加し、発酵を 1 週間行った。Brix 7.9 まで低下した若ビールに、プライムシュガーを用いたガス付けおよびラギングを経て、アルコール 5.5%、最終 Brix 7.7 (比重 1.013)、官能評価においても特段目立ったオフフレーバーのないまずまずの発酵度のビールとなった (Table 3)。ドライモルト培地での結果を反映するように、マルトースは約 4 g/L 残存しており、今回得られた IGAM128m03DG15 株では麦汁中のマルトース濃度が低濃度となったときマルトース資化性が大きく低下する可能性が示唆された。マルトリオースの資化性はなく、麦汁と同量のマルトリオースがビールに残存していた。ビール中に含まれる一般的なアルコール類、エステル類を測定したところ、酢酸イソアミルが 2.13 ppm 検出された。今回の試験醸造には対照を準備していないため、厳密に評価はできないが、一般的なビールと比較するとこの数値は低くはない¹⁷⁾。自然環境下から分離した *S. cerevisiae* を育種して得られた酵母 IGAM128m03DG15 株は今回、単菌である程度の品質のビールを製造することが可能であった。

Table 3 Analytical results of components in the beers.

Alcohol (v/v %)	5.52
Final specific gravity (t/t)	1.01374
Brix	7.7
pH	4.34
Sugar (g/L)	
Glucose	0.11
Maltose	3.99
Maltotriose	14.31
Flavor component (ppm)	
Ethyl acetate	27.63
n-Propyl alcohol	18.02
Isobutyl alcohol	17.13
Isoamyl acetate	2.13
Isoamyl alcohol	91.00
Ethyl caproate	0.80

4 考察

一般的に *S. cerevisiae* は糖類の利用速度が高く、自然環境中でも糖濃度が高い環境に存在しているという報告もされている¹⁸⁾。実際、糖濃度の高い樹液から分離されている例もあり⁴⁾、今回樹皮や木の枝からの *S. cerevisiae* 分離確率が高かったのも樹液との関連性が考えられる (Table 2)。花は蜜に糖類を含むため花からは *S. cerevisiae* がよく分離できるという報告¹⁸⁾がある一方で、殿内らは花からは *S. cerevisiae* があまり分離できないと報告している⁹⁾。本研究では殿内らの方法を採用して酵母の分離を行ったせいか、採取した4検体の生花からは *S. cerevisiae* を分離することができず、枯れて落ちた花11検体から1検体分離できたのみだった。花からはあまり *S. cerevisiae* を分離できないと記載した殿内らの報告を再現した。花に *S. cerevisiae* が本当に存在しないのかどうかは更なる研究が必要であるが、実作業として *S. cerevisiae* が分離されてくるかどうかは培地条件など選抜の方法によって大きな影響を受けるものと思われる。

全ゲノムの包括的な解析により、中国で分離された *S. cerevisiae* が *S. paradoxus* と最も系統的に近く、*S. cerevisiae* のルーツは中国にあると考察されている¹⁹⁾。中国に分布する *S. cerevisiae* 野生酵母は独立した9系統に分かれることが報告されており、そのうちわずかな系統のみがマルトース資化性を獲得し、現在使用されているすべての産業用酵母に分岐したと考えられている²⁰⁾。したがって野生酵母においてマルトース資化性はマイナーな形質であると言える。今

回、分離した33株の *S. cerevisiae* はいずれもマルトース資化性がなかった。また、マルトース資化性株の変異育種においても、今回分離した株では、一般的によく使用される2DG耐性株を取得する方法¹²⁾、アンチマイシン耐性株を取得する方法¹³⁾では取得することができなかった。*S. cerevisiae* がマルトース資化性変異が取得しやすいかどうかは、野生酵母の系統的距離が影響しているものと考えられる。一方、マルトース培地で集積培養して取得した変異株を親として取得した2DG耐性株から、マルトースを高効率で利用する株を取得することができた。段階的に取得した2つの変異株の変異箇所を解析すれば、マルトース資化性のレベルに寄与する染色体上のアレルが明らかとなり、進化的あるいは育種上の観点から非常に有用な知見となると思われる。

5 結言

本研究では岩手県内の自然環境中からの *S. cerevisiae* の分離およびビール醸造への利用を検討した。自然環境下より取得したすべての *S. cerevisiae* 分離株はマルトース資化性がなかったことから、マルトースを炭素源とした集積培養、2DG耐性化を経てマルトースを高効率で利用可能な変異株が取得した。得られた野生酵母マルトース資化性変異株を用いてビールの試験醸造を実施した。その結果、取得した分離変異株は健全な発酵経過を示し、単菌でビール製造が可能であることが確認された。実用に耐えうる性能かどうかは今後更なる評価が必要ではあるものの、自然環境下から分離されたマルトース資化性がない *S. cerevisiae* に、マルトース資化性を付与し、ビール製造を検討した本研究は近年進展する日本のクラフトビール業界に有用な知見を提供するものと思われる。

謝辞

野生酵母育種株のビール試験醸造には株式会社遠野醸造にご協力いただきました。前醸造長の太田睦博士に深く感謝いたします。

文献

- 1) 一般社団法人日本ビール文化研究会：知って広がるビールの世界，翔泳社 (2024)
- 2) きた産業株式会社：全国醸造所リスト，<https://kitasangyo.com/beer/MAP.html> (2024-7-17)
- 3) 丸山裕慎，小澤敦揮，山崎栄次，藤原孝之：地域特産果実を副原料として用いた新香気クラフトビールの開発，日本食品科学工学会誌，68，p.21-31 (2021)
- 4) 鈴木成宗，坂宮章世，金澤春香，栗田修，矢野竹男，荻田修一：樹液から単離した香気生産野生酵母の

- ビール香气特性および実用性の評価, 日本食品工学会誌, 17, p.59-69 (2016)
- 5) 堀江祐範, 中川智行, 杉野紗貴子, 吉村明浩, 奈良一寛, 梅野彩, 田尾博明: 地産微生物の応用として四国遍路道から分離した野生酵母による清酒醸造の試み, 美味技術学会誌, 15, p.12-20 (2016)
 - 6) 松田義弘, 上木厚子, 上木勝司: 各種果実から分離された香气生産性野生酵母の同定と香气生産特性, 日本醸造協会誌, 104, p.57-74 (2009)
 - 7) 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, NSK-KK-D-24-00043 (2024)
 - 8) 久富泰資: 福山バラの酵母プロジェクト, 生物工学会誌, 102, p.418-420 (2024)
 - 9) 殿内暁夫, 森山裕理子, 青山嘉宏, 土岐春歌: 白神山地から分離した酵母 *Saccharomyces cerevisiae* の利用, 日本醸造協会誌, 111, p.437-444 (2016)
 - 10) 川崎浩子: MALDI-TOF MS を用いた微生物迅速同定の食品微生物分野への展開, 日本食品微生物学会雑誌, 37, p.165-177 (2020)
 - 11) Shi NQ, Cruz J, Sherman F, Jeffries TW: SHAM-sensitive alternative respiration in the xylose-metabolizing yeast *Pichia stipitis*, *Yeast*, 19, p.1203-1220 (2002)
 - 12) Orikasa Y, Mikumo D and Ohwada T: A 2-Deoxyglucose-resistant mutant of *Saccharomyces cerevisiae* shows enhanced maltose fermentative ability by the activation of MAL genes. *Foods*, 7, p.52 (2018)
 - 13) Maruyama H, Yamamiya T, Ozawa A, Yamazaki E and Suzuki N: Beer Brewed with Sake Yeast Strain Has Unique Sake-like Flavors, *J. Am. Soc. Brew Chem.*, 82, p.150-159 (2023)
 - 14) 畠中治代: ラガービール酵母の・-グルコシドトランスポーターの機能解明と変異型トランスポーター高発現による発酵速度改善, 大阪大学博士論文 (2018)
 - 15) Shimizu M, Miyashita K, Kitagaki H, Ito K and Shimoi H: *Journal of bioscience and bioengineering*, 100, p.678-680 (2005)
 - 16) 玉川英幸: PCR 法による独自清酒酵母の判別, 岩手県工業技術センター研究報告, 24, p.66-69 (2022)
 - 17) Schneiderbanger H, Koob J, Poltinger S, Jacob F and Hutzler M: Gene expression in wheat beer yeast strains and the synthesis of acetate esters, *J Inst Brew*, 122, p.403-411 (2016)
 - 18) 数岡孝幸: 清酒製造用酵母の分離および実用化, 日本醸造協会誌, 110, p.298-355 (2015)
 - 19) Peter J, De Chiara M, Friedrich A, Yue J X, Pflieger D, Bergström A, Sigwalt A, Barre B, Freel K, Llored A, Cruaud C, Labadie K, Aury JM, Istace B, Lebrigand K, Barbry P, Engelen S, Lemainque A, Wincker P, Liti G, Schacherer J: Genome evolution across 1,011 *Saccharomyces cerevisiae* isolates, *Nature*, 556, p.339-344 (2018)
 - 20) Duan SF, Han PJ, Wang QM, Liu WQ, Shi JY, Li K, Zhang XL, Bai FY: The origin and adaptive evolution of domesticated populations of yeast from Far East Asia, *Nature communications*, 9, p.2690 (2018)

麴菌紅樁を用いた味噌の製造試験*

畑山 誠**、平野 高広**

岩手県工業技術センターで育種・選抜した清酒用麴菌白樁および紅樁の味噌製造への適性を検討した。その結果、麴菌紅樁は味噌製造用として十分な酵素力価を有し、その米麴を用いて製造した味噌は、一般的な味噌の製造に使われる麴菌と比べて、 α アミラーゼ力価が高く、味噌の熟成が早い傾向にあった。また、官能評価の結果、味噌製造用として使用できるという評価であった。
キーワード：麴菌紅樁、味噌製造、高 α アミラーゼ力価

Manufacturing Test of Miso Using the Spore of Malted Rice “Beni-tsubaki”

HATAKEYAMA makoto, HIRANO takahiro

Key words: malted rice “Beni-tsubaki”, manufacturing test of miso, high titer of α -Amilase

1 緒言

稲穂に発生した稲麴（野生カビの塊）の中から弊所で分離と菌種同定を行い、(株)秋田今野商店が清酒用種麴として製造販売を始めた麴菌²⁾の、味噌製造への転用の可能性を模索することとした。まず、味噌製造に利用したとき、大豆たんぱく質や米でんぷんを分解するために十分な量の酵素を持つ米麴製造が可能か、そして、企業においてその麴を使った味噌の実製造が可能かを分析および官能評価を基に検討した。

2 実験方法

2-1 微生物と原材料

酒造用種麴として、弊所で育種し麴菌白樁（商品名：Roots36）および紅樁（商品名：Oriza1061）、対照試験用として(株)秋田今野商店の汎用種麴（商品名：みそ用）を使用した。粉状種麴として市販されている「みそ用」はそのまま使用したが、白樁および紅樁は、市販されている粒状種麴から孢子だけを分取し、均一に接種できるよう必要に応じ増量剤（米粉）を混合して使用した（表1）。味噌発酵用微生物として、弊所保存耐塩性酵母 *Zygosaccharomyces rouxii* RM-3 を使用した。耐塩性乳酸菌は使用しなかった。

製麴試験用白米には、岩手県産ひとめぼれおよびアメリカ産白米（品種不明）を使用した。味噌仕込み用大豆として、県産リュウホウを使用した。塩は市販の並塩を使用した。

2-2 米麴の試験製麴

ひとめぼれおよびアメリカ産白米各 300 g を洗米し一

晩浸漬吸水させたのち水切りし、これを家庭用蒸し器で 1 時間蒸した。放冷後、蒸米をそれぞれ三分割し、種麴を表1のとおり接種したのち、通気用の穴を開けたジップロックのコンテナ容器に入れ、30°C に設定した恒温機内で 3 日間製麴した。

表1 製麴に使用した種麴、増量剤および白米

試験区分	原材料	種 麴			白米
		白樁	紅樁	みそ用*	
試験製麴	孢子(mg)	5.2	6.8	35	100g
	増量剤(mg)	394.8	393.2	365	
味噌仕込み	孢子(g)		0.54	2.8	8kg
	増量剤(g)		8.0	0	

*粉状種麴である「みそ用」は、孢子欄記載の量を使用

2-3 味噌仕込み用米麴の製麴

2-2 の試験結果から味噌仕込み用として選択したアメリカ産白米 8 kg を洗米し、一晚浸漬吸水させたのち水切りし、これをサンキュウボイラー 2 型（品川工業所）で 1 時間蒸した。放冷した蒸米に種麴を表1の通り接種したのち、通風ファンを付加した麴発酵機こうじ君 15S（池田機械工業）に入れ、3 日間製麴した。

2-4 味噌の仕込みと発酵熟成

大豆リュウホウは(株)八木澤商店の味噌製造ラインで蒸煮・雷砕したものを必要量入手した。これに 2-3 で製麴した米麴と並塩および種水（酵母 RM-3 培養液を水道水で 6 倍希釈したもの）を表2の割合で混合し、プラスチック製味噌樽に、米麴を潰さない粒麴味噌として仕込んだ。麴歩合（大豆量に対する白米の使用量割合）は、

* 令和4年度、令和5年度技術シーズ創生・発展研究（可能性調査研究）

** 醸造技術部

昔の東北地方太平洋側で生産が多かった7割麴と現在の岩手県における製造販売の主流である10割麴とした。

初めの1ヶ月間は味噌樽を15℃の低温室に置き、そのあと味噌物料を天地返ししたのち30℃の恒温器内で、さらに5か月間発酵・熟成し、味噌を成分分析と官能検査に供した。

表2 味噌仕込み配合量

試験区分		原料の配合量(kg)				
種麴	麴歩合	蒸煮大豆	米麴	並塩	種水	
紅椿	7	9.8	4.1	2.2	1.2	
	10	8.8	5.2	2.2	1.4	
みそ用	7	9.8	4.0	2.2	1.2	
	10	8.8	5.1	2.2	1.4	

2-5 分析

米麴の水分分析は基準みそ分析法³⁾に従った。大豆たんぱく質を分解する酸性カルボキシペプチダーゼ（以下ACPと略）と米でんぷんを分解するαアミラーゼの測定には醸造分析キット（キッコーマン）を用いた。

味噌のY値（明度）、水分、たんぱく分解率、エタノールは基準みそ分析法に従い分析した。塩分は塩分計TS-70（東亜ディーケーケー）を用いて、乳酸はRQflex 10(Merck)を用いて分析した。

2-6 官能評価

味噌は、県内味噌製造企業経営者・技術者18名および弊所研究員2名の計20名のパネラーによる4点法で官能検査を行った。点数が小さい方が評価良好である。

3 結果及び考察

3-1 米麴

2種類の白米で米麴を造り、麴菌の比較試験を行った。米麴の分析結果を表3の区分試験製麴に示す。対照の麴菌と比較し、種麴白椿はαアミラーゼが同程度の力価を示すも、ACP力価はかなり見劣りした。紅椿はACPがやや低いものの、αアミラーゼは約2倍の力価を示した。この結果から、味噌の製造には紅椿が適していると考え、味噌仕込み試験には、紅椿を使うこととした。

県産ひとめぼれとアメリカ産白米の麴を比較すると、水分はアメリカ産白米が低く、酵素力価は高い結果となった。これは、麴菌にとってアメリカ産白米が利用し易いということを示す。この結果から、味噌仕込み試験にはアメリカ産白米を使うこととした。

味噌製造用に製麴した米麴の分析結果を表3の区分味噌仕込みに示す。種麴紅椿の酵素力価は対照と比較し、ACP力価が同等、αアミラーゼ力価は約7割増しであった。試験製麴の力価と比較するとかなり低く、特にACP力価の低下が顕著であった。力価低下の原因は、ジップロックコンテナを利用した製麴の場合、自然放冷で熱の

放散が行われるのに対し、通風製麴機では通風で放熱するため、水分の抜けが早く、かつ通風に伴い麴品温が上下動する（図1）ため麴菌にストレスが掛かると考えられる。

表3 米麴の分析値

試験区分	白米	種麴	水分 (%)	酵素力価(U/g 麴)	
				ACP*	αアミラーゼ
試験製麴	岩手県産ひとめぼれ	白椿	23.9	9482	1933
		紅椿	23.9	10376	3073
		みそ用	26.1	12606	1663
	アメリカ産	白椿	22.1	15423	2480
		紅椿	22.7	18984	3727
		みそ用	24.2	20576	2664
味噌仕込み	アメリカ産	紅椿	22.5	7480	2332
		みそ用	21.5	7431	1343

*ACPは、酸性カルボキシペプチダーゼの略

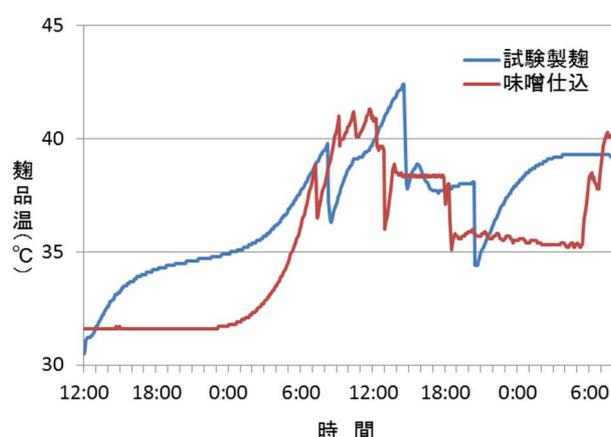


図1 みそ麴の製麴品温経過

3-2 味噌

味噌は、昔の東北地方太平洋側で生産が多かった7割麴と現在の岩手県における製造販売の主流である10割麴で仕込んだ。発酵熟成期間が6ヶ月経過した時点で分析した（表4）。

表4 味噌の分析値

試験区		分析値					
麴歩合	種麴	水分 (%)	塩分 (%)	乳酸 (mg/dl)	Et-OH (%)	PD (%)	Y値 (%)
7	紅椿	46.8	2.3	0.03	0.91	17.8	13.2
	みそ用	45.8	11.4	0.04	1.21	17.9	12.5
10	紅椿	44.8	11.9	0.03	1.18	18.7	11.8
	みそ用	44.3	1.5	0.05	1.20	18.5	13.6

* Et-OH：エタノール PD：たんぱく分解率

同じ塩分となるよう実験計画を立てていたものの、実際には7割味噌では紅麴味噌の方が1%程高くなった。そのため酵母の発酵を抑制し、エタノール分が低めとなった。また塩分が高いと酵素活性が早く低下するため、熟成もゆっくりでY値が高く（色が薄く）なったものと

思われる。

10割麹味噌では、どちらの種麹でもほぼ同程度の分析値を示した。唯一Y値だけ紅麹味噌の方が低かった（色が濃い）。紅麹味噌の発酵熟成では、物料の軟化が早いことが観察された。これはαアミラーゼ力価が高く、米麹の溶解が早いためと考えられる。

味噌の官能評価を表5に示す。7割麹味噌では種麹紅椿の方がやや良く、10割麹味噌では同程度であり、香味ともに良好という評価であった。紅椿の7割麹味噌のコメントに「香が良い・好み」というものが複数あったが、逆のコメントもあり、品質の差というより審査員の嗜好の差による点差ではないかと思われる。官能評価の依頼に併せて「種麹紅椿は商品の製造に使えるか」という質問を行った。回答を表6に示す。県内味噌製造企業からは前向きな回答が多く得られた。

表5 試作味噌のきき味評価 n=20

試験区		評価点*の分布 (人)				平均点	コメント
麹歩合	種麹	1	2	3	4		
7	紅椿	5	15	0	0	1.8	塩角
	みそ用	2	17	1	0	2.0	やや塩角
10	紅椿	8	11	1	0	1.7	まとまる
	みそ用	8	11	1	0	1.7	まとまる

*1点(良い) 2点(普通) 3点(やや悪い) 4点(悪い)

表6 種麹に関する質問の回答 n=18

質問内容	使える	何とも言えない	使えない
種麹紅椿は商品の製造に使えるか	17	1	0
コメント	自社製品に使いたい、試験醸造を行いたい		

4 結 言

弊所で稲麹より分離した清酒製造用の種麹を、味噌製造へ利用する用途拡大を目的に試験を行った。その分離菌である麹菌白椿および紅椿を用いて製麹試験を行った結果、麹菌紅椿は味噌製造が可能な酵素力価をもつことが明らかとなった。

そこで、紅椿を用いて味噌製造試験を行った結果、対照の味噌より着色と物料の軟化が進みやすく、熟成が早かった。試作味噌の官能評価は良好であり、紅椿は将来的な味噌製造販売に道を開く結果となった。

謝 辞

蒸煮大豆を快く分譲して下さった(株)八木澤商店様および試作味噌のきき味にご協力いただいた県内味噌製造企業関係者様方には心から感謝いたします。

文 献

- 1) 佐藤稔英：稲麹から分離・選抜したオリジナル麹の特性, 温故知新, 59, p.37-42(2022)
- 2) (株)秋田今野商店生産・技術部研究室：種麹新商品「Root36」「Oriza1061」のご紹介, 温故知新, 59, p.43-47(2022)
- 3) 全国味噌技術会：みそ技術ハンドブック付基準みそ分析法, 全国味噌技術会(1994)
- 4) van der Maaten, L. J. P., Hinton, G. E.: Visualizing Data using t-SNE, Journal of Machine Learning Research, 9, p.2579-2605 (2008)

燻製フレーバーホイールの作成とスモークチップの香り特性*

伊藤 菜々**、及川 和宏***

スモークチップの樹種による燻製の香りの違いを表現することを目的に、燻製のフレーバーホイールを作成した。また、高性能スモークチップ及びアカマツスモークチップで燻製した鶏団子の官能評価を行い、各チップの香り特性をサクラスモークチップと比較した。さらに、SPME法とGC-MSを用いた香気成分分析を行い、香り特性に寄与している成分を推定した。高性能スモークチップはサクラスモークチップと同様の樹種由来の香りを保っており、アカマツスモークチップはナツ様の甘い香りが少なく、黒コショウ様のスパイシーで刺激のある香りが確認された。

キーワード：燻製、フレーバーホイール、香気成分、サクラ、アカマツ

Development of Smoked Food Flavor Wheel and Evaluation of Aroma Characteristics of Smoked Foods using various Smoke Chips

ITO Nana and OIKAWA Kazuhiro

Key words: smoked food, flavor wheel, aroma compounds, cherry wood, redpine

1 はじめに

燻製加工は、樹木若しくは樹木をチップ状に加工したスモークチップを熱することで発生させた燻煙によって食材に風味付け等をおこなう加工法である。

燻製食品の製造に使用するスモークチップは市場に流通するもののほとんどが広葉樹の幹を原料としている。

当センターは、岩手県産木材を使用したスモークチップの製造を行っている株式会社昭林（販売会社：進誠産業株式会社）及びトーア木材株式会社と協力し、高性能スモークチップ¹⁾や針葉樹のアカマツなど新たな樹種のスモークチップ開発に取り組んできたが、それらを使用した燻製食品の香りは「燻感」の強弱で表されるに留まり、製品の特徴を十分に表現しているとは言い難かった。

一方でビールや清酒では、香りや味の表現用語を車輪状にまとめたフレーバーホイールが作成され、味や香りを表現する際のコミュニケーションツールとして活用されている。そこで、本研究では燻製の香りの用語を収集、整理し、燻製の香りをより詳細に表現するためのツールとして燻製のフレーバーホイールの作成を試みた。また、これまでに開発したスモークチップを使用した燻製食品の香りについて、日本で最もポピュラーで香りが強いとされるサクラのスモークチップ²⁾と比較することで香りの特徴を表現した。さらに、SPME法とGC-MSを用いた香気成分分析を行い、開発したスモークチップに特徴的な香気成分について調査した。

2 実験方法

2-1 実験試料

燻煙材は、スモークチップ8種類（サクラ、ナラ、クルミ、クリ、アカマツはトーア木材株式会社、ブナ、リンゴ、ヒッコリーは進誠産業株式会社）と、サクラをベースとし予め加熱による分解処理を施した、高性能スモークチップ¹⁾（進誠産業株式会社）の計9種を使用した。

実験試料に用いる被燻製食材の検討にあたっては、農産物（ナツ、大豆加工品）、畜産物（蒸し鳥、豚肉団子）、水産物（ベビーホタテ）のそれぞれを燻製し、複数名で試食した結果、香辛料等を含まず、大きさを均一化しやすい等の理由から、半球体状の鶏団子に決定した。

鶏むね挽肉重量100%に対し、鶏卵（20%）、食塩（1%）、片栗粉（5%）、トレハロース（5%）を加えフードプロセッサー（Cuisinart DLC-NXPLUS）を用いて混合した。混合した原料をシリコン製半球モールド（シリコンフレックス半φ30×H15、シリコマート）で成形し、80°Cに設定したスチームコンベクションオーブンで20分間蒸し、鶏団子を作成した。燻製を行うまでの間は-30°Cで保管し、都度解凍し使用した。

解凍後の鶏団子はスモーカー（くんちゃんII、進誠産業株式会社）を使用し約70°Cで30分間乾燥させた後、各樹種のチップ40gを用いて約80°Cで60分間燻煙処理を行い、各実験試料とした。

実験試料は、各試験に使用するまでの間、真空包装後-30°Cで保管し、都度湯せん解凍し使用した。

* 令和4年度、令和5年度技術シーズ創生・発展研究事業(発展研究)

** 食品技術部

*** 食品技術部(現：企画支援部)

2-2 官能評価

(1) パネル選定

官能評価パネルは参加の同意を得た6名の食品技術部職員及びスタッフとした。香り表現の用語に対するイメージを統一するため、マスターウイスキーアロマキット（アロマスター社）の香り見本の中から、燻製と共通する要素のある香り見本25種類を選抜し、それぞれの香り見本と対応する用語を明示した用語集一覧を用い、言葉出しの訓練を行った。

(2) 用語収集とフレーバーホイールの作成

6種類の樹種（サクラ、ナラ、クルミ、リンゴ、ヒッコリー、アカマツ）で燻製した実験試料を評価用試料として提示し、鼻先香、風味をそれぞれ自由に記述する形式で言葉出しをおこなった。言葉出しで得られた用語についてパネルで討議し、KJ法により重複する用語の削除及び用語のグループ化³⁾によりフレーバーホイールを作成した。

(3) サクラスモークチップと高性能スモークチップ、アカマツスモークチップの比較

フレーバーホイールの作成と並行し、評価用語の絞込みを行った。パネル5名に6種類の樹種（サクラ、ナラ、クルミ、ブナ、クリ、アカマツ）で燻製した実験試料を評価用試料として提示し、知覚した香りを評価用語のなかから選ぶ手法をとり、選ばれた頻度の高かった用語11語について仮の評価用語とした。その後パネル間で話し合いを行い、特徴を評価するうえで適切でないとした「ロースト肉」「だし」等の用語をはずし、鼻先香と風味それぞれ5項目の評価用語を設定した（表1）。

高性能スモークチップ及びアカマツスモークチップについて、サクラスモークチップで燻製した実験試料を比較基準とし、それぞれ7段階のカテゴリー尺度（非常に弱い -3、とても弱い -2、やや弱い -1、どちらでもない 0、やや強い 1、とても強い 2、非常に強い 3）を用いた評価を実施した。なお、評価にあたっては燻製に使用したスモークチップの樹種名を伏せた状態でパネルに提示した。

2-3 GC-MS 分析

(1) GC-MS 分析試料及び揮発成分抽出方法

20ml バイアル管に塩化ナトリウム4gを加えた後、コルクボーラーで円柱状に切り出した実験試料各1gを加えたのち、超純水を加えて10mlにメスアップし、直ちにセプトム付きキャップをして分析試料とした。

揮発成分の抽出にはSPME法（SPMEファイバー：DVB/CAR/PDMS, 50/30µm, 1cm）を用いた。分析試料は50°Cで20分間加温、その後気相に10分間SPMEファイバーを露出させて揮発成分を吸着させた。

(2) 装置及び分析条件

揮発成分の分析にはGC-MS（GC7890A, MSD5975C, Agilent Technologies）を用いた。注入口はスプリットレスモードで温度は240°Cとし、SPMEファイバーを3分間加熱し揮発成分を脱離した。カラムはINNOWAX（60m×0.25mm i.d.、膜厚0.25µm）を用いた。カラムの昇温条件は40°C5分間保持後、230°Cまで3°C/minで昇温、230°C10min保持とした。得られたマススペクトルをもとに、解析ソフト（Agilent ChemStation）を用いてライブラリデータと照合し、候補化合物の推定を行った。

3 結果及び考察

3-1 フレーバーホイールの作成

パネルによる言葉出しの結果、88語の燻製の香り表現用語を抽出した。抽出した用語の中から類似する用語を統一し、11グループ50語にまとめた（図1）。グループ分けについては、大まかな特徴表現に使用することを想定している。

今回は、原材料入手や試食サンプルとしての大きさの均一化の容易さ、もとの食材の香りが比較的弱い等の理由から鶏団子を選択して言葉出しに使用したが、燻製する食材によって別の表現用語が加わる可能性もある。

また、スモークチップの樹種の特徴をつかむために幅広く用語を収集する方針とし、好ましくない表現も含め作成したことから、将来的に県内企業がさらに新しい種類のスモークチップを展開し、その香りの特徴を表現して商品PRに使用するためには、様々な食材での言葉出しと、さらなる用語の精査が必要と考える。

表1 評価用語と定義

先香	風味	定義
ローストナッツ様	ローストナッツ様	煎ったナッツのような甘香ばしい香り
* 刺激臭	*** 酸味	* 鼻に刺すような香り、酢酸臭 *** 酢酸の香り、味
火薬様	火薬様	花火の燃え残りのような刺激のある香り
黒コショウ様	黒コショウ様	スパイシーな香り
煙	煙	-

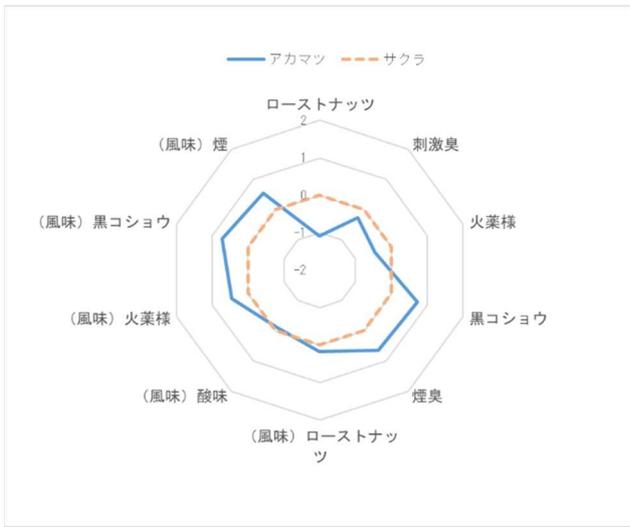


図3 アカマツスモークチップの評価結果

3-3 GC-MS 定性分析の結果

(1) 高性能スモークチップ

分析の結果、TIC (Total ion current chromatogram) 上で複数のピークを確認することができた (図4)。ピーク面積値が大きい上位 10 化合物について、マススペクトルから候補化合物を推定したところ、表2の結果が得られた。なお、比較としてサクラスモークチップについても同条件で分析したところ、高性能スモークチップと同一の化合物を検出した。官能評価の結果からも、高性能スモークチップは元のサクラスモークチップと同様の揮発性成分を有していることが示唆された。

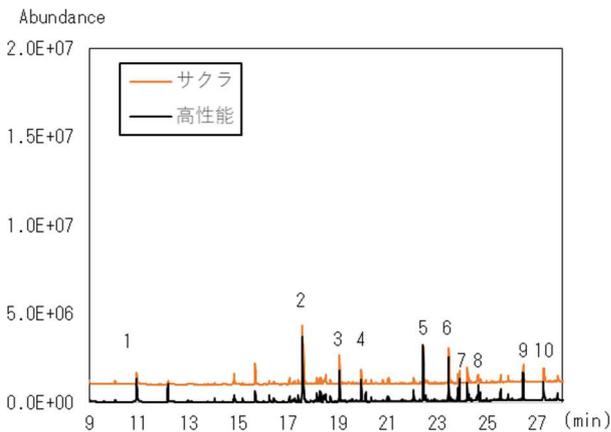


図4 高性能スモークチップのTICクロマトグラム

表2 高性能スモークチップの分析結果

No.	R. T	推定化合物
1	10.9	Hexanal
2	17.6	Furfural
3	19.0	5-Methylfurfural
4	19.9	Furfuryl alcohol
5	22.4	Guaiacol
6	23.4	4-Methylguaiacol
7	23.9	Phenol
8	24.6	p-Cresol
9	26.4	2,6-dimethoxyphenol
10	27.2	Vanillic acid

(2) アカマツスモークチップ

分析の結果、TIC 上で複数のピークを確認することができた (図5)。ピーク面積が大きい上位 10 化合物マススペクトルから候補化合物について推定したところ、表3の結果が得られた。このうち9成分はサクラスモークチップの分析においても、面積値は上位でないものの、検出が確認された成分であった。

また、マツ属の代表的なセスキテルペン⁴⁾であるロンギホレンは、アカマツスモークチップでのみ検出された。このほか、面積値は上位ではないが、 α -テルピネオールも検出した (図6)。これらテルペン系化合物も複合して、サクラスモークチップとの香りの違いに寄与しているものと考えられる。

今回、定量分析を行うまで至らなかったが、アカマツスモークチップでは全体のピーク面積値に占めるグアヤコール及び4-メチルグアヤコールのピーク面積値の割合がサクラスモークチップの2~3倍であったことから、これら2成分がアカマツスモークチップの官能評価において「煙」「黒コショウ様」の香りが強く評価された要因の一つと推察した。

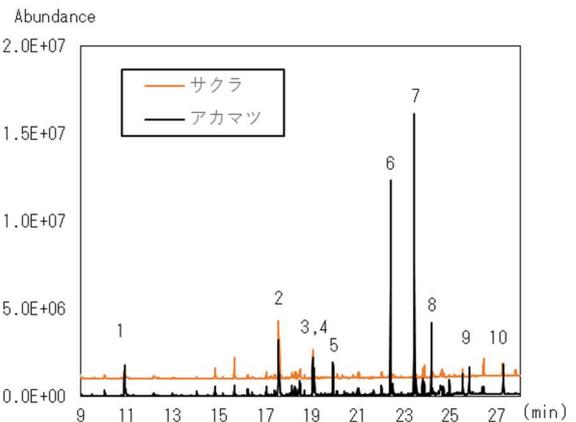


図5 アカマツスモークチップのTICクロマトグラム

表3 アカマツスモークチップの分析結果

No.	R. T	推定化合物
1	10.9	Hexanal
2	17.6	Furfural
3	19.0	5-Methylfurfural
4	19.1	(+)-LONGIFOLENE*
5	19.9	Furfuryl alcohol
6	22.4	Guaiacol
7	23.4	4-Methylguaiacol
8	24.2	4-Ethylguaiacol
9	25.8	4-Vinylguaiacol
10	27.3	4-Propenylguaiacol

*アカマツでのみ検出した推定化合物

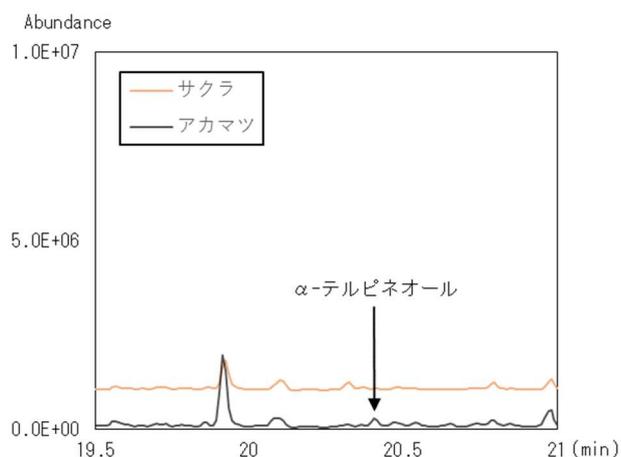


図6 アカマツスモークチップのTICクロマトグラム (一部拡大)

4 結言

燻製した鶏団子の試食と言葉出しをもとに、燻製の香りを表現する用語を収集整理して11グループ50語のフレーバーホイールを作成した。

官能評価及び定性分析の結果から、高性能スモークチップはサクラスモークチップと同様の香り特性をもつことが示された。また、アカマツスモークチップの香りの特徴を表現することが可能となった。

フレーバーホイールについては、他の食材を燻製した場合には異なる香り表現が現れると考えられることから、今後さらに評価と話し合いを重ね、燻製食品の香り表現への活用につなげていきたい。

謝辞

本研究にあたり、スモークチップの御提供及び実験への御助言をいただいた、株式会社昭林様、進誠産業株式会社様、トーア木材株式会社様、株式会社岩泉フォレストマーケティング様に感謝申し上げます。

文献

- 1) 晴山聖一：岩手県産木質資源を活用した高性能スモークチップの開発，岩手県工業技術センター最新成果集 2023, p.36 (2023)
- 2) 一柳明宏（編）：燻製の基本，株式会社樾出版社
- 3) （一社）日本官能評価学会（編）：官能評価士認定テキスト，株式会社霞出版社，233p. (2020)
- 4) 佐藤惺：木材抽出成分のガスクロマトグラフィー，油化学，17(11)，p.599-605 (1968)

IoT 機器を用いた麺の簡易乾燥(II)* ～半生麺の乾燥制御～

武山 進一**

既報¹⁾では、麺の調湿乾燥に家庭用除湿機等の機器を用いた簡易設備による乾麺製造法を報告した。今回、同じ手法及び設備を用い、半生麺の乾燥法を検討した。乾燥後の麺水分を一定にするため、麺水分を基にした乾燥制御を実施したので報告する。

キーワード：IoT 機器、Raspberry Pi、半生麺、簡易乾燥

Simple Drying of Noodles Using IoT Devices (II)

TAKEYAMA Shinichi

Key words: IoT devices, raspberry Pi, semi-dried noodles, simple drying

1 はじめに

半生麺は、麺を半乾燥することで生麺の食感や美味しさを残しつつ脱酸素包装で保存性を高めた商品で、主に土産用として販売されている。コロナ渦を機に麺料理の事業者の中には自家製麺の外販を検討する事例もあり、半生麺への関心も高くなっている。このようなニーズに対応するため、令和3年度に実施した「IoT 機器による麺の簡易乾燥」¹⁾で構築した手法・設備を基に、半生麺のための乾燥制御に取り組むこととした。

半生麺に関しては、「生めん類の表示に関する公正競争規約施行規則の逐条解説(公正取引委員会)」²⁾において、「半生めんとは、常法で製造された生めんを、常温又は加熱空気、或いは湿熱空気を使用することにより、乾めん類よりも高水分の段階で乾燥を止めたものをいう。半生製品の水分は20～27%程度で生めんの特徴に近く、乾めんの欠点を除こうとして土産物を中心に開発されたもの」と解説されている。

そこで、今回の取組みでは、前記の簡易乾燥と同様に常温で乾燥を行なうこととし、麺水分に関しては逐条解説記載の範囲20～27%の中間値である23.5%を目標値に設定し、検討することにした。

2 実験方法

2-1 製麺方法

麺の原料は、小麦粉「金すずらん」、「道産子U」(いずれも日清製粉株式会社製)を使用した。原料粉1kgに対し、食塩3%、リンゴ酸0.15%、70%アルコール2%、加水率33%の配合とし、切刃10番角、麺帯1.5mm厚でロール製麺した。

製麺後の麺は直ちに竿(ステンレス製パイプ)に掛け、

その竿を大型のステンレス製室内物干しに固定し、麺線の長さを約3m(片側約1.5m)に調整して麺を切断し乾燥した。

乾燥後の半生麺は120gずつ、ガスバリアー性フィルム袋「バリア OP Y タイプ規格袋 No.11A」(0.06mm×180mm×280mm、福助工業株式会社)に、脱酸素剤「バイタロン RH-250S」(株式会社常盤産業)、酸素検知剤(錠剤タイプ、株式会社常盤産業)とともに入れ、シールした。

2-2 実験環境、乾燥機器類

麺の乾燥に関わる環境、機材機器類は、既報¹⁾の通りとした。すなわち、乾燥室には広さ21m²(約13畳)の実験室を充て、乾燥にはサーキュレーター衣類乾燥除湿機 IJDC-K80、気化ハイブリッド加湿器 HVH-700R1(いずれもアイリスオーヤマ)を用い、それらの操作パネルのボタン部分に無線式スイッチ操作機器 SwitchBot ボット(SwitchBot 株式会社)を適宜取付け、機器制御用コンピュータから無線(bluetooth方式)でそれらのボタンを操作する仕組みをとった。

なお、乾麺乾燥の取組みにおいて、冬期の低温及び低湿度対策として、乾燥機材類全体をポリエチレンシートで覆いビニルハウス状の密閉環境とすることで湿度制御が容易となったため、季節に関わらず同様の環境で乾燥を行なうこととした。

2-3 機器制御用コンピュータ及び各種センサー

機器制御用コンピュータ、各種センサー類は、既報¹⁾の通りとした。すなわち、シングルボードコンピュータ Raspberry Pi 4 Model B(4GB)に、温度湿度測定のための高

* 令和5年度技術シーズ創生・発展研究(可能性調査研究)

** 食品技術部

精度温湿度センサーSHT31 (SENSIRION 社)、麵の乾燥時の麵重量測定のための2kg用ロードセル (シングルポイント、ビーム型、Sensor and Control Co. Ltd.) を、それぞれGPIOポート経由で接続し、また麵の乾燥状態撮影用としてC270n HD ウェブカメラ(ロジクール社)をUSB接続した。

2-4 機器制御用プログラム

機器制御用プログラムは、プログラム言語pythonで作成した。既報¹⁾に記載の乾麺用に作成した乾燥制御プログラムをメインとして用い、乾燥の途中段階より、半生麺用として麵水分を基にした乾燥制御を行なうプログラムに引き継ぐ構成とした。それらの処理概要を図1に示す。

2-4-1 乾燥制御メインプログラム

麵乾燥のための機器制御用プログラムの機能等は概ね既報¹⁾に記載の通りである。収集した湿度実測値と予め設定しておいた目標湿度を比較して、除湿機能のON/OFF制御(除湿ボタン操作)を行なうもので、このとき測定湿度が設定値を下回った場合に除湿機能を止め、設定した待機時間後に除湿機能を再開するという処理ロジックとし、一連のすべての処理を1分間隔で実行した。設定項目は、目標湿度と待機時間であり、それらをステップと称し(奇数ステップは湿度値、偶数ステップは時間)、湿度を徐々に低下させる内容での設定組合せをCSVファイルとして作成しておき、プログラム開始時に読み込ませるつくりとしている。今回使用した設定内容を表1に示す。

2-4-2 半生麺乾燥用補助プログラム

麵の乾燥を麵水分の目標値で終えるため、乾燥中の麵水分を基にした乾燥制御を行なう補助プログラムを作成した。乾燥開始時の生麵水分値、制御開始水分値、乾燥終了水分値、ならびにその間を緩慢乾燥時間(分)として設定し、制御開始水分値に達したら乾燥制御メインプログラムから処理を引き継ぎ、緩慢乾燥時間の前半1/2では除湿器を完全停止させ、緩慢乾燥時間の後半が経過した時点でその間における乾燥速度を算出し、後半1/2内に乾燥終了水分値に達する様、必要があれば除湿器を適宜稼働させる処理内容とし、半生麺の乾燥を行なう処理とした。なお、麵水分計算の基となる乾燥開始時の生麵水分値に関しては、乾燥開始時には仮の値(推定値)を設定しておくが、乾燥中に求められた実測結果を反映させるため、1分間隔で設定ファイルを読み込むつくりとしている。今回用いた設定ファイル内容の一例を表2に示す。

2-5 水分測定

麵の水分測定は、前処理としてミル(IFM-C20G、岩谷産業)で粉碎処理後に、水分測定用アルミ製容器を用いる方法により135℃、1時間乾燥で測定した。なお、乾燥法での水分測定のため、麵に配合したエタノールを含む見掛けの水分値となる。また、乾燥終了後の麵では、竿掛けにより麵線の上部和下部に水分差が生じていたため、麵線単位でのサンプリングを行ない試料として用いた。

表1 湿度、待機時間の設定例

Step No.	時間(分)	湿度(%)
0	10	
1		72
2	10	
3		70
4	10	
5		68
6	10	
7		66
8	10	
9		65
10	10	
11		65
12	120	

表2 半生麺乾燥補助プログラム用の設定内容(例)

項目	値
生麵水分値(%)	32.5
制御開始水分値(%)	25
最終水分値(%)	23.5
緩慢乾燥時間(分)	60

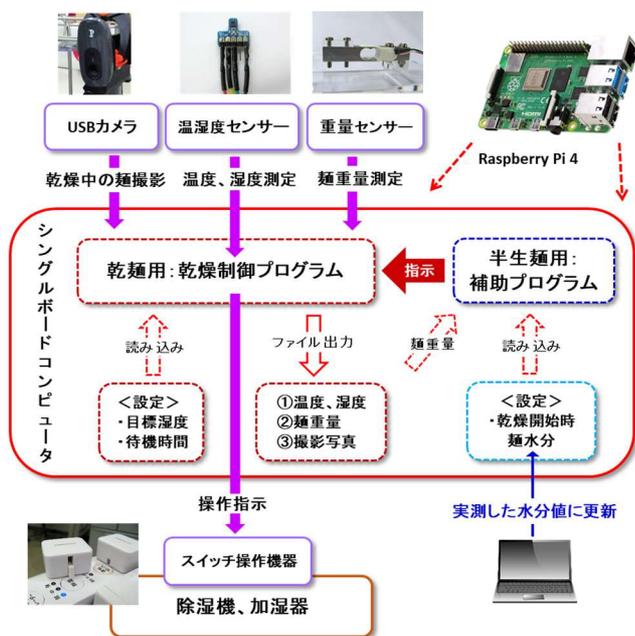


図1 処理概要ダイアグラム

2-6 水分活性測定

水分測定用と同様に前処理した試料について、水分活性測定器アクアラブ Series 4TEV (デカゴン社) を用いて測定した。

2-7 水分活性測定

半生麺の色差は、分光色彩計 SD500 (日本電色工業製) を用い、6mm φ 試料台の上に麺線 3 本を並べ、測定径 6mm φ、SCE (正反射光抜き) モードで測定した。

2-8 水分活性測定

定法により、標準寒天培地で 35°C、48 時間培養してカウントした。なお、300 CFU/g 以下の場合、陰性 (－) とした。

3 結果及び考察

3-1 乾燥条件の検討

3-1-1 緩慢乾燥の検討

本試験では半生麺乾燥終了時の目標水分値を 23.5% に設定しており、この半乾燥状態だと麺線に柔軟性があり、麺線に乾燥過程で一時的に反り等の変形が生じても支障なかった。この点は一旦変形が生じると戻らなくなる乾麺の場合とは大きく異なるものであり、乾燥速度を上げることが出来た。しかしながら、一時的ながら反り等の変形が生じるのは、麺線の表面部分と内部の乾燥程度に大きな差が起きていることによるもので、なお且つこの状態の麺線は表面部分のみが硬く内部は柔らかいままであることから、大変折れ易い状態であった。その対策として、乾燥終了後に除湿を止め約 1 時間放置したところ、麺に柔軟性が戻り、麺線が折れたりすることなく半生麺が回収でき、裁断～袋詰め作業が支障なく行えた。

この時の麺水分、湿度、温度のプロット結果を図 2 に示す。

乾燥時の設定は、湿度は乾麺の乾燥の場合同様 72%～66% 間を 2% ずつ低下させた後 65% 維持とし、その間の待機時間を各 10 分 (乾麺の場合は 60 分) とすることで、

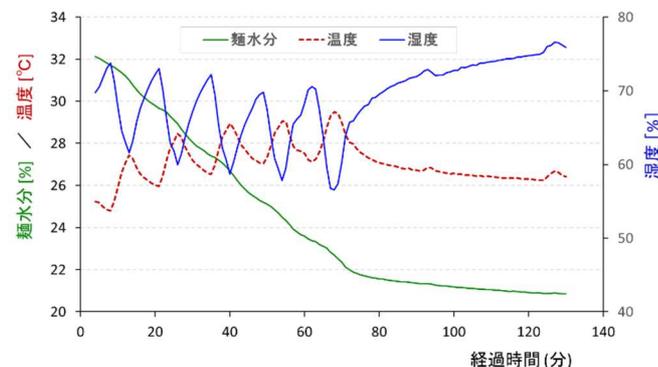


図 2 間欠除湿時及び除湿停止時の半生麺水分の変化

目標麺水分 (23.5%) までの乾燥を約 1 時間で行なえた。乾燥終了後の放置時間中にも乾燥が進んだことから、目標値をさらに下回る結果となったものの、乾燥終了前に緩慢乾燥を行なう必要性を確認出来た。

3-1-2 麺水分量に基づく乾燥制御

目標の麺水分前に約 1 時間の緩慢乾燥を行なうことで、半生麺に柔軟性が戻る事がわかったことから、この緩慢乾燥時の水分減少分を見込んで、緩慢乾燥を前倒しする乾燥試験を行なったものの、目標麺水分に合わせることは困難であった。緩慢乾燥時における乾燥速度はその際の温度を受け一定ではなく、また乾燥開始時の麺水分量に関しても、例えば竿掛けに手間取ったりすると乾燥が進行してしまい一定ではなかった。そこで、毎回乾燥開始時の麺水分を実測し、その麺水分量に基づく乾燥制御を行なうことを考え、その為の補助プログラムを作成した。具体的には、緩慢乾燥開始時の麺水分 (25% に設定) に達したら、緩慢乾燥時間 (1 時間) の前半は除湿器を完全停止させることで麺線内の水分均一化を促し、後半の時間内に必要があれば追加の乾燥を行ない目標麺水分に調整させることにした。これは、緩慢乾燥の前半における乾燥速度を計算することで、後半終了時の麺水分を予想し、この値から目標値を差し引いた差がプラス側であれば、除湿器を一時的に再稼働してその差分の乾燥のみを行なうもので、あとは麺の水分監視を継続することで、目標水分に達した時点で乾燥制御を終えるつもりとした。

この実測した麺水分量に基づく乾燥制御の実施結果を図 3 に示す。

このときの結果では、緩慢乾燥の後半開始時に追加乾燥が実行され麺の乾燥が速まり、緩慢乾燥約 1 時間で目的の麺水分値で乾燥を終えたことになる。

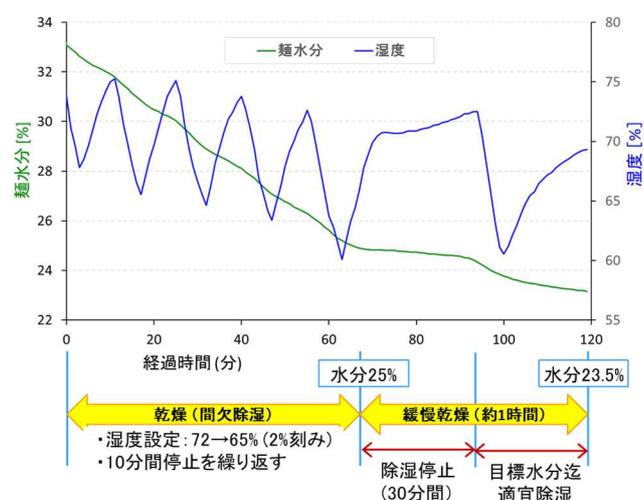


図 3 乾燥制御における湿度、半生麺水分の変化

3-2 半生麺試作品の品質

3-2-1 水分活性値

今回の半生麺試作では麺水分の目標を23.5%と設定しているが、その麺の乾燥状態を把握する目的で水分活性も測定した。なお、露点式による水分活性測定結果は、エタノールの影響を受けるため、あくまで相対的な指標として用いることとした。そして試作の検討段階においては乾燥状態がバラついたことから、目標値とその前後での水分活性値を得た。麺水分範囲21~25%での水分活性値の結果を図4に示す。

結果より、今回の配合の場合には目標水分23.5%での水分活性値は0.87前後であることが判った。また、水分と水分活性値は高い相関性を示していることから、測定が短時間で済む水分活性値から麺水分を計算し、乾燥終了の判断に用いることが可能と考えられた。

3-2-2 30°C 保存時での一般生菌数変化

半生麺の水分は20~27%程度とされ、またその乾燥を含む製造法や設備もメーカー毎に異なるため、市販される半生麺の賞味期限も概ね30~90日と幅がある。今回の製法による半生麺の保存性について、30°C保存試験を実施して賞味期限を設定することにした。

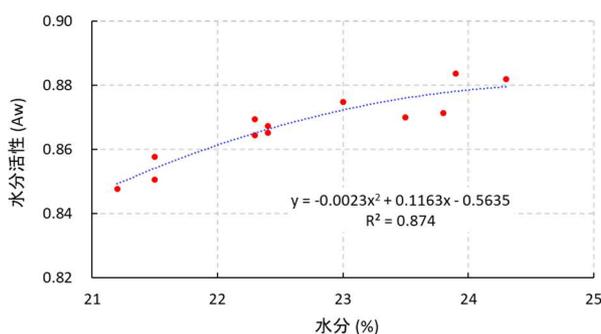


図4 半生麺試作品の麺水分とその水分活性値

半生麺の30°C保存時の一般生菌数測定結果を図5に示す。なお、一般生菌数の結果に関しては、陰性(300 CFU/g以下)の場合には便宜上一律300 CFU/gとして扱い、対数平均値(n=4)を求めた。

常温約2時間乾燥した麺で、初発の菌数が問題となることは無かったが、10週まで陰性(300CFU/g以下)の場合や、8週に105台迄上昇する場合もあった。この様に試作回でバラつくことはあったが、概ね30°C保存1ヶ月は一般生菌数に問題ないことを確認した。

3-2-3 30°C 保存による色変化

半生麺30°C保存品を写真1に、色差測定結果を表3に示す。

30°C保存時の麺線の色の変化に関しては、保存期間に比例して褐色化が進行し、a*値、b*値の上昇も確認されたが、1ヶ月保存品の色は保存開始時とほぼ変わらない状態(写真1)であった。そこで、一般生菌数測定結果も考慮に入れ、半生麺試作品の賞味期限に関しては、概ね1ヶ月と判断した。

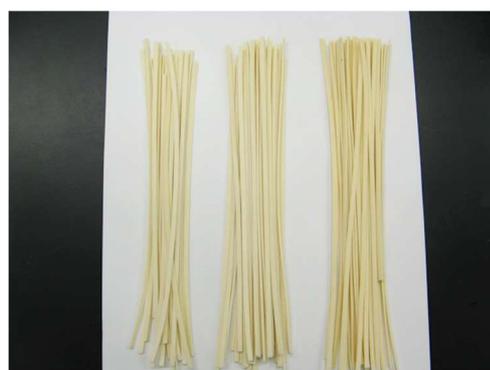


写真1 半生麺の30°C保存品

(左：製麺直後、中央：1ヶ月保存、右：3ヶ月保存)

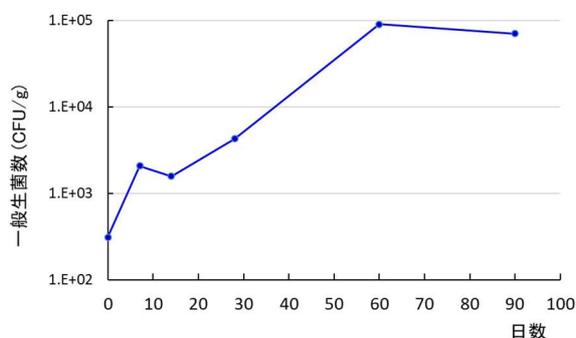


図5 半生麺30°C保存品の一般生菌数変化

表3 半生麺30°C保存品の色差測定結果

	L*	a*	b*
製麺直後	85.40	0.00	8.73
30°C・1ヶ月保存	87.29	0.19	10.09
30°C・3ヶ月保存	86.62	0.48	12.62

4 結 言

家庭用除湿乾燥機等を IoT 機器で制御することによる麺の簡易乾燥検討として、半生麺の乾燥に取組み、以下結果を得た。

- (1) 乾麺での取組みで行った間欠除湿による乾燥制御に加えて、麺水分を基にした緩慢乾燥制御を行なうことで、目標に設定した麺水分 (23.5%) 迄の正確な乾燥が可能となった。
- (2) 原料粉 1 kg の場合、間欠除湿乾燥に 1 時間、緩慢乾燥も 1 時間と 2 時間で半生麺を乾燥することが出来た。
- (3) 試作半生麺の品質に関しては、麺水分 23.5% の場合の水分活性は概ね 0.87 であり、包装品での 30°C・1 ヶ月保存での一般生菌数にも問題なかったが、麺線の褐変進行を考慮し、賞味期限は 1 ヶ月程度と判断した。

以上により、簡易的な機器での半生麺づくりが可能となった。半生麺は包装面でのコストは掛かるものの、製麺から袋詰め工程が短時間で済み、常温保存が可能で、食感も生麺に近いことから、今回の取組みよりその長所を見直す機会となった。麺の試食評価時の試作アイテムとしての活用、ならびに小規模事業者（麺の製造販売者）への提案から技術面での協力につなげて行きたい。

謝 辞

本研究の実施にあたり、株式会社小山製麺代表取締役高橋政志様、高橋春輝様より半生麺製造に関する貴重な御助言をいただきましたことを感謝いたします。

文 献

- 1) 武山進一：IoT 機器を用いた麺の簡易乾燥, 岩手県工業技術センター研究報告, 25, p.47-51 (2022)
- 2) 全国製麺協同組合連合会, “生めんの種類”, 全国製麺協同組合連合会ホームページ,
<https://www.zenmenren.or.jp/men/about/index.html>, (参照 2024-11-22)

地方独立行政法人岩手県工業技術センター研究報告 第 27 号
ISSN 2759-1573

発行 令和 7 年 3 月 21 日

地方独立行政法人岩手県工業技術センター

〒020-0857 岩手県盛岡市北飯岡 2-4-25

電話 : 019-635-1115

FAX : 019-635-0311

URL : <https://www2.pref.iwate.jp/~kiri/>

E メール : CD0002@pref.iwate.jp

