ISSN 1349-2608
No. 22 (2025)



栃木県元気ニコニコ部長
とちまるくん

令和６（2024）年度

研　究　報　告

Reports of Industrial Technology Center of Tochigi Prefecture

― 発信します　明日を拓く　確かな技術 ―

栃木県産業技術センター

目　　次

Ⅰ　重点共同研究（実施：４テーマ）

- 樹脂 3D プリンタを活用した加工治具の作製(自動車、航空宇宙分野) ・・・・・・・・・・・・　1
- PP 細孔内面の接着性改善に向けた紫外線改質システムの開発(医療福祉機器、光学) ・・・　7
- 麹造りにおけるデジタル技術活用(AI・IoT、フードバレーとちぎ) ・・・・・・・・・・・・　13
- 吟醸粕を用いたビール等の製造に関する研究（フードバレーとちぎ）・・・・・・・・・・・　19

Ⅱ　共同研究（実施：７テーマ）

- 加速度センサと切削シミュレーションを用いたリアルタイム工具摩耗
  モニタリングシステムの開発　（第２報）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　27
- 大谷洞窟熟成生ハムの高品質化に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　33
- 県産いちごを利用した乳酸発酵食品の開発 ～とちおとめ・とちあいか～　・・・・・・・・　39
- 二軸エクストルーダーによる大麦未利用部位活用法の検討 ・・・・・・・・・・・・・・・　47

非公開：４テーマ

Ⅲ　受託研究（実施：11 テーマ）

- 高濃度セルロース繊維複合樹脂における二軸ロール機の混練条件が射出成形条件及び
  成形時のフィラー凝集・物性に及ぼす影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　53

非公開：10 テーマ

Ⅳ　重点研究（実施：２テーマ）

- 未利用野菜の活用に向けたブランチング及び乾燥方法に関する研究　・・・・・・・・・・　57

非公開：１テーマ

Ⅴ　経常研究（実施：11 テーマ）

- チタン合金のエンドミル加工における MQL の油剤が工具寿命に及ぼす影響 ・・・・・・・・ 63
- 被削材保持方法が加工面品質および工具寿命に及ぼす影響 ・・・・・・・・・・・・・・・ 67
- X 線 CT による空間分解能が測定精度に及ぼす影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
- ローコード・ノーコードツールを活用した設備の監視に関する研究 ・・・・・・・・・・ 76
- デザイン資料を利活用したトーションレースの試作開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 81
- 現場に即した衣類用織物の曲げ特性評価手法に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・ 86
- 水熱処理によるセルロースナノファイバー/無機ナノ粒子多孔質体の作製
  に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
- 抗菌剤複合シートの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 93
- 交差穴加工におけるばり抑制手法の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 96
- 結城紬縮織に用いる強撚糸の有効活用に関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100
- 低温焼成可能な坯土及び釉薬に関する研究 （第１報）・・・・・・・・・・・・・・・・・ 105

本研究報告における研究区分については、次により分類したものとなっています。

Ⅰ　重点共同研究：戦略３産業（自動車、航空宇宙、医療福祉機器産業）、未来３技術（AI・IoT・ロボット、光学、環境・新素材技術）及びフードバレーとちぎプロジェクトの食品産業分野において、企業、大学などと課題を分担して重点的に行うもの。

Ⅱ　共 同 研 究 ：企業、大学などと課題を分担して行うもの。

Ⅲ　受 託 研 究 ：企業や団体などからの委託を受けて行うもの。

Ⅳ　重 点 研 究 ：県内産業の振興のため県が単独で特に重点的に行うもの。

Ⅴ　経 常 研 究 ：上記以外にて実施したもの。

また、知的財産権の保護等の観点から、非公開となっている研究テーマがございますので、御了承ください。

Contents

Ⅰ Selected Cooperative Research

- Fabrication of Machining Jigs Utilizing a Resin 3D Printer・・・・・・・・ 1
- Development of an Ultraviolet Modification System for Improving the Adhesive Properties of PP Inner Pore Surfaces・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
- Exploring Digital Technology Utilization in Koji Making・・・・・・・・・ 13
- Research on the Production of Craft Beer with Ginjo Sake Lees・・・・・・ 19

Ⅱ Cooperative Research

- Development of Real-time Tool Wear Monitoring System by using Accelerometer and Cutting Simulation (2nd Report)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
- Research on Improving the Quality of Oya Cave-aged Dry-cured Ham・・・・・ 33
- Development of Lactic Acid Fermented Food using Strawberries from Tochigi Prefecture・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39
- Study on Usage of Barley Bran using Twin-screw Extruder・・・・・・・・・ 47

Ⅲ Contract Research

- Effects of Two-shaft Kneading Conditions on Injection Molding Conditions, Filler Agglomeration and Mechanical Properties of High-content Cellulose Fiber Composite Resins ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53

Ⅳ Selected Research

- Study on Blanching and Drying Methods for Processing Unutilized Vegetables・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 57

V　Ordinary Research

- Effect of Various Oils on Tool Life in MQL Milling of Titanium Alloys・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
- Effect of Workpiece Clamping Method on Surface Quality and Tool Life・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 67
- Impact of Spatial Resolution on Measurement Accuracy in X-ray CT Dimensional Metrology・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
- Research on Equipment Monitoring using Low-code and No-code Tools・・・・ 76
- Torchon Lace Trial Production Development by Utilizing Design Materials・・ 81
- Study on Practical Evaluation Method for Bending Properties of Textile Fabrics for Clothing・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 86
- Study on the Fabrication of Cellulose Nanofiber/Inorganic Nanoparticle Porous Materials by Hydrothermal Treatment・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
- Development of Antibacterial Composite Sheet・・・・・・・・・・・・・・ 93
- Development of Method for Burr Suppression in Cross-hole Drilling・・・・・ 96
- Study on the Effective Utilization of High-twist Yarn in Yuki-chijimi Weaving・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100
- Study on Low-temperature Firing Clay and Glaze (1st Report)・・・・・・ 105

Ⅰ　重点共同研究

Selected Cooperative Research

重点共同研究（自動車、航空宇宙）

樹脂 3D プリンタを活用した加工治具の作製

片岡　智史*　　八木澤　秀人*　　廣田　有作**

Fabrication of Machining Jigs Utilizing a Resin 3D Printer

KATAOKA Satoshi, YAGISAWA Hideto, HIROTA Yusaku

電解研磨工程で使用される治具を樹脂 3D プリンタで内製化し、従来の POM 製治具とコストやリードタイムを比較した。治具は加工対象部品との間に摩擦を生じるため、3D プリンタ材料に対して、テーバー式摩擦摩耗試験、ピンオンディスク式摩擦摩耗試験、ロックウェル硬さ試験を実施し、材料の選定を実施した。選定した材料で治具形状を造形し、加工対象部品と嵌め合う円柱部の寸法の追い込みを実施した。造形した治具を電解研磨工程で使用し、電解研磨が問題なく実施できることを確認した。光造形方式の Clear, Durable については、５日間問題なく使用できることを確認した。熱溶解積層方式の PLA, PEEK+PLA では電解液の漏れが発生したため、連続での使用は不可であった。光造形方式の２材料で耐用日数、リードタイム、コストを算出し、従来の POM 製治具よりも優位性があることを示した。

Key words:　3D プリンタ、治具、電解研磨、熱溶解積層、光造形

１　はじめに

ものづくり企業の加工や検査の現場では、製品への傷防止のために、製品と接触する箇所には樹脂製の治具が使用されている[1)]。このような樹脂製の治具は、企業が独自に設計し、単純形状であれば自社内で作製するが、複雑形状の場合は治具作製を外部に依頼することも多い。特に中小企業においては多品種少量生産を請け負うことが多く[2)]、樹脂製治具を外注することにより、治具作製にかかるコストや納期など課題が発生することに加え、製品形状や加工技術が流出するといったリスクにも晒されている[3)]。このような課題やリスクを解決するために、樹脂 3D プリンタで治具を内製化する手法が注目されている。樹脂 3D プリンタは材料となるフィラメントやレジンから直接部品を造形するため、射出成形のような金型は必要なく、切削加工のような切子は生じず材料のムダが少ない。樹脂 3D プリンタは、様々な産業分野において試作開発サイクルの短縮やコスト削減のために盛んに活用されている。

本研究では、樹脂3Dプリンタを用いた治具作製を目的とし、従来材料と樹脂3Dプリンタ材料の耐摩耗性の比較や、作製にかかわるコストやリードタイムを比較することで、樹脂3Dプリンタを用いた治具内製化による生産の効率化が可能かを検証した。

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊　京浜精密工業株式会社

２　研究の方法

２．１　対象工程の選定と治具の CAD 設計

本研究では、共同研究先にて自動車用部品の電解研磨工程で使用される治具を対象とした。電解研磨工程の模式図を図１に、従来治具を図２に示す。電解研磨の対象となる部品（材質：ダイカスト用アルミ合金 ADC12）には、ドリル加工により部品内部を貫通する穴を加工するため、ドリル出口にバリが発生する。電解研磨工程では、部品を樹脂製治具にはめ込み、エアシリンダを用いて部品と治具を接触させ、治具内部からノズルを介して電解液を供給し、バリを除去する。樹脂製治具の設計は共同研究先で実施しているが、治具内部には電解液が通る流路が存在し、自社での作製は難しいため、外注にて治具を作製している。従来治具の材質はポリアセタール（POM）で、価格は１個当たり２万円、１回の発注で２個発注し納期は１か月かかることから、治具のコストやリードタイムの長期化、治具の在庫管理が課題となっている。また、加工対象部品と治具の接触により、治具の円柱部が摩耗するため、従来材料の POM の耐用日数は 60 日である。従来治具は 2D 図面で設計しているため、3D プリンタでの造形のために 3D モデルを作成する必要がある。リバースエンジニアリング技術を活用し、従来治具から 3D モデルを作成した。3D モデル作成の流れを図３に示す。X 線 CT で治具のボリュームデータを取得し、メッシュデータとして出力した。Geomagic Design X を

用いてメッシュデータをCADデータにリバースした。

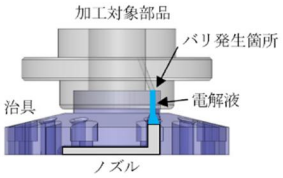


図１　電解研磨工程模式図

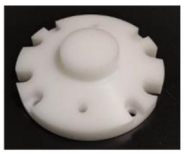


図２　従来治具



図３　治具の3Dデータ作成

２．２　耐摩耗性、摩擦係数の評価と材料の選定

電解研磨工程では、加工対象部品と樹脂製治具の間に摩擦が生じるため、樹脂3Dプリンタ材料の耐摩耗性や硬さを評価し、良好な結果が得られた材料で治具の試作を行うこととした。今回の研究では、当センターが所有する熱溶解積層方式と光造形方式の樹脂3Dプリンタを使用した（図４）。それぞれのプリンタの仕様について、表１に示す。各方式で表２、３に示す３種類の材料で耐摩耗性や硬さを評価し、２種類の材料を選定した。試験片の粗さを小さくするために、熱溶解積層方式ではノズル径φ0.25 mm、積層ピッチ0.10 mmとし、光造形方式では積層ピッチを0.05 mmとした。インフィル率は100%で造形した。試験片は表面処理を行わず、造形したままの状態で評価を行った。従来治具材料のPOMについても、市販の板材を購入し耐摩耗性や硬さを評価した。



（a）熱溶解積層方式　　（b）光造形方式

図４　樹脂3Dプリンタ

表１　樹脂3Dプリンタ仕様

方式	熱溶解積層	光造形
メーカ	INTAMSYS	Formlabs
型式	FUNMAT HT Enhanced	Form3L
造形範囲	260×260×260 mm	335×200×300 mm

表２　熱溶解積層方式の検討材料[4) 5)]

材料	特徴	１kg当たりの価格(円)
ABS	低価格	5,280
PLA	低価格	5,280
PEEK	高強度、耐摩耗性	129,800

表３　光造形方式の検討材料[6)]

材料	特徴	１L当たりの価格(円)	主成分
Clear	低価格	26,180	メタクリル酸２－ヒドロキシプロピル
Durable	耐摩耗性、靭性	36,080	メタクリレートモノマー
Rigid10K	ガラス粉末入	52,580	ウレタンジメタクリレート

２．２．１　テーバー式摩擦摩耗試験

治具の耐用日数は、材料の耐摩耗性の影響を受けると考えられる。樹脂3Dプリンタ材料の耐摩耗性を評価するために、テーバー式摩擦摩耗試験を実施した。試験の様子を図５に示す。試験条件を表４に示す。樹脂3Dプリンタで造形したディスク状の試験片を、試験機のテーブル上に設置した。1000 gの荷重を加えた摩耗輪を試験片に接触させた状態で、60 rpmで1000回転試験片を摩耗させた。試験前後の試験片重量を比較し、重量変化を摩耗量として求めた。

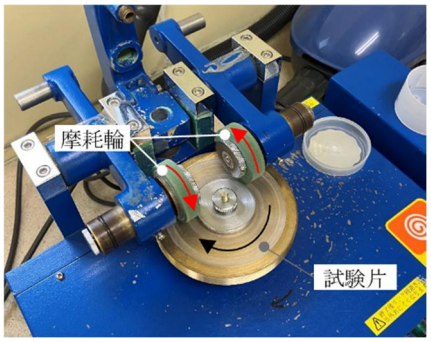


図５　テーバー式摩擦摩耗試験

表４　試験条件

試験機	テスター産業　AB-101
摩耗輪	CS-10（樹脂用）
荷重	1000 g
回転数	1000回
回転速度	60 rpm

２．２．２　ピンオンディスク式摩擦摩耗試験

摩擦係数が低い材料は摩耗量も低いと推測し、ピンオンディスク式摩擦摩耗試験により樹脂3Dプリンタ材料の摩擦係数を評価した。試験の様子を図６に示す。試験条件を表５に示す。樹脂3Dプリンタで造形した試験片を、試験機のテーブル上に設置した。2000 gの荷重を加えた圧子を試験片に接触後、試験片を60 rpmで１分間回転させ、摩擦係数を求めた。

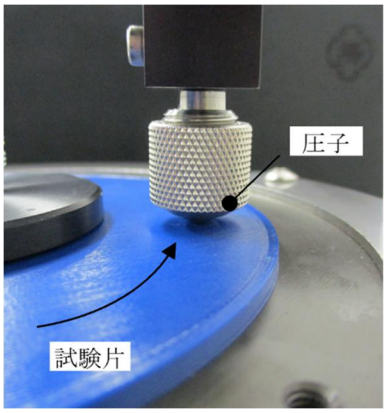


図６　ピンオンディスク式摩擦摩耗試験

表５　試験条件

試験機	新東科学HEIDON TYPE:20
圧子	ステンレス球、φ10 mm
荷重	2000 g
回転速度	60 rpm
試験時間	1 min

２．２．３　ロックウェル硬さ試験

材料の耐摩耗性には、材料の硬さも関与していることから[7]、樹脂3Dプリンタ材料のロックウェル硬さを評価した。ロックウェル硬さ試験の模式図を図７に示す。試験条件を表６に示す。ロックウェル硬さ試験では、圧子をF_1, F_2で試験片に接触させ、圧子の押し込み量の差から、硬さを算出した。

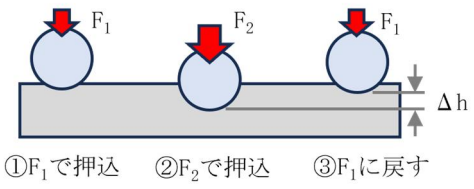


図７　ロックウェル硬さ試験模式図

表６　試験条件

試験機	フューチュアテック LC-200R
圧子	12.7 mm　超硬球圧子
硬さスケール	HRR

２．３　樹脂 3D プリンタによる治具の試作、寸法評価

２．２の結果より選定した材料で治具を造形し、治具円柱部の造形精度を検証した。熱溶解積層方式では積層ピッチ 0.10 mm、ノズル径φ0.25 mm とし、光造形方式では積層ピッチ 0.05 mm とした。インフィル率はどちらの方式も 100%とした。PEEK は造形難易度が高く、材料費が高価であるため、加工対象部品の接触する円柱部のみを PEEK で、ベース部分は PLA で造形し、嵌め合いによって円柱部とベース部を固定する方法を採用した（図８）。造形した治具の円柱部直径を三次元測定機で測定し、寸法公差 37.8～37.9 mm を満足するように CAD データを修正した。

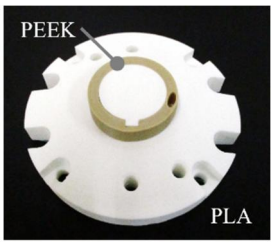


図８　PEEK と PLA を組み合わせた治具

２．４　試作治具の生産性、コストの評価

試作した治具を電解研磨工程で使用し、加工対象部品のバリ取りの状況や、治具作製にかかるリードタイムとコストの評価を実施した。治具裏面と土台の密着性を良くするために、治具裏面をフライス加工で平らにし、電解研磨を実施した。

３　結果及び考察

３．１　耐摩耗性、摩擦係数の評価結果と材料の選定

３．１．１　テーバー式摩擦摩耗試験

試験結果を図９に示す。PLA, Clear, Durable については従来材料の POM と同程度の摩耗量を確認できた。PEEK は POM の 1/10 の摩耗量であり、他の材料と比べて耐摩耗性が良好であることが明らかになった。一方で、ABS と Rigid10K については、POM よりも摩耗量が大きいことがわかった。

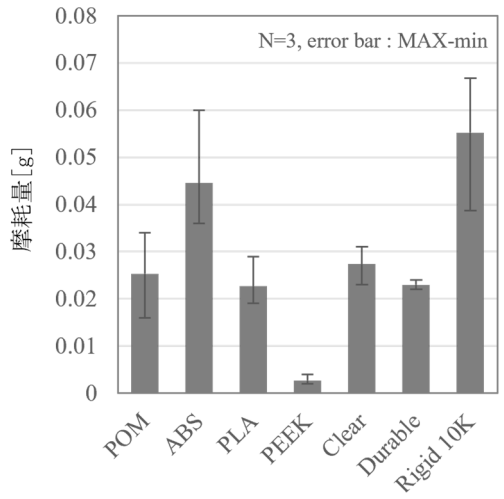


図９　試験結果

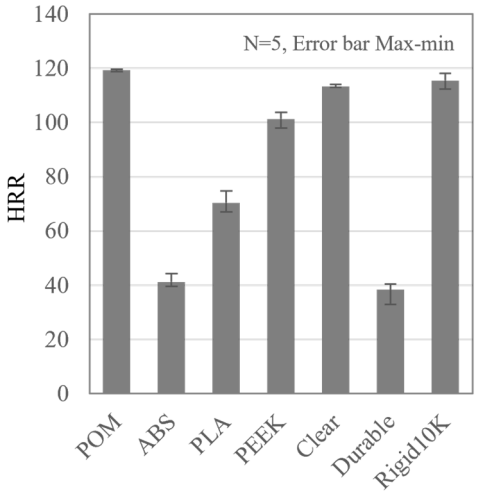


図11　試験結果

３．１．２　ピンオンディスク式摩擦摩耗試験

試験結果を図10に示す。摩擦係数が最も小さいのは従来材料のPOMで，PEEK，PLA，ABS，Clear，Durable，Rigid10Kの順に大きくなることが明らかになった。

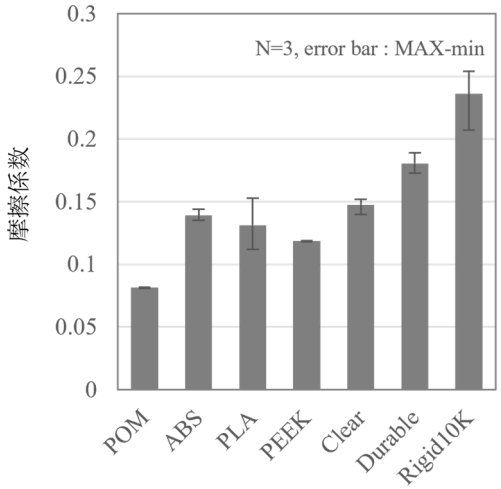


図10　試験結果

３．１．３　ロックウェル硬さ試験

試験結果を図11に示す。光造形方式のClear，Rigid10KでPOMと同等の硬さを確認した。Durableは靭性を特徴としていることから、他の材料と比較すると柔らかいことが明らかになった。PEEK，ABSについては、一般的な成形品と比較すると硬さが低下する傾向があった。熱溶解積層方式ではインフィル率100%でも、造形時にわずかな空隙が生じるため、硬さが低下したと考えられる。

３．１．４　材料の選定について

熱溶解積層方式では、各試験において最も結果が良好であった PEEK と次点の PLA を、治具を造形する材料として選定した。光造形方式では、各試験で結果が良好であった Clear と、テーバー式摩擦摩耗試験とピンオンディスク式摩擦摩耗試験の結果から、耐摩耗性と靭性を併せ持つ Durable を、治具を造形する材料として選定した。

３．２　樹脂 3D プリンタによる治具の試作、寸法評価

治具円柱部の CAD データの設計値と三次元測定機で測定した測定値を図 12 に示す。PLA，Clear，Durable では公差中央の 37.85 mm で造形すれば公差を満足する。PEEK は、二次硬化による直径膨張率は 1.009 であり、約 0.3 mm 膨張することから、37.5 mm で造形すれば公差を満足する。

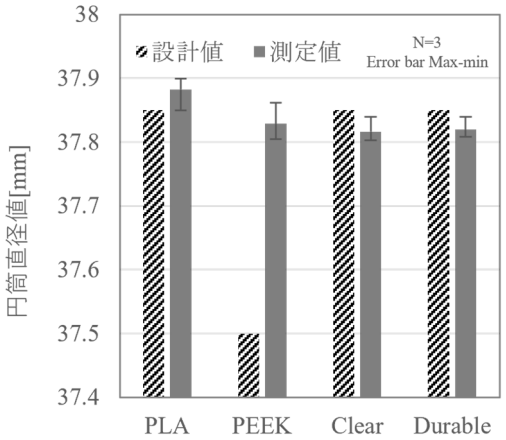


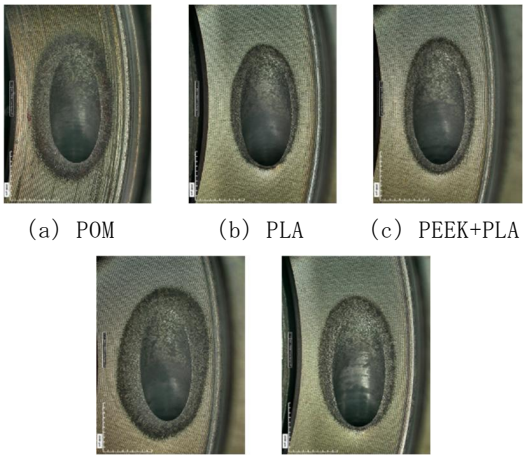
図 12　円柱部の設計値と測定値の関係

３．３　試作治具の生産性、コストの評価

樹脂3Dプリンタで造形した治具を電解研磨工程で使用し、バリ取りを行った箇所のマイクロスコープ画像を図13に示す。従来材料のPOMと同様に、樹脂3Dプリンタ製治具で問題なくバリ取りができていることを確認

した。光造形方式のClear，Durableでは５日間使用できることを確認した。一方で熱溶解積層方式のPLA，PEEK+PLAでは、治具内部から電解液が漏れ出てしまったことから、半日程度で使用を中止した。熱溶解積層方式では、熱で溶かしたフィラメントを積層させて造形するため、積層時にできるわずかな隙間から、電解液が漏れ出たと考えられる。テーバー式摩擦摩耗試験の摩耗量の比と、従来材料のPOMの耐用日数60日より、ClearとDurableの治具の耐用日数を推定した。Clearでは55日、Durableでは66日使用できると推定される。図14に治具作製にかかるリードタイムとコストを示す。リードタイムについて、POMは発注から納品までの所要日数である30日をプロットした。3Dプリンタ材料については、スライスソフトから計算される造形時間、洗浄乾燥、二次硬化、サポート除去、フライス加工までにかかる時間を算出し、プロットした。Clearは１日、Durableは1.7日で治具が作製可能であり、POMと比較して90%以上リードタイムを削減できることから、治具の在庫管理の労力や在庫を抱えるコストを削減できると考えられる。コストについては、POMは外注の費用をプロットした。3Dプリンタ材料の治具作製コストの内訳を表７に示す。一度に２個造形すると仮定し、治具体積から算出した材料費、治具作製リードタイムのうち人による作業が必要な時間を１時間、人件費を3,000円/１時間、3Dプリンタの消耗品（レジンタンク、ビルドプラットフォーム）の維持費、装置の電力と使用時間から求めた電気代を足し合わせ、コストを算出した。Clearでは5,969円、Durableでは8,518円で治具が作製可能であり、Clearではコスト70%減、Durableではコスト57%減となる。

以上により、従来のPOM製治具を樹脂3Dプリンタ材料に置き換えることで、リードタイムやコストを大幅に削減し、生産の効率化が可能であることを示した。



(a) POM　(b) PLA　(c) PEEK+PLA

(d) Clear　(e) Durable

図 13　電解研磨の顕微鏡画像

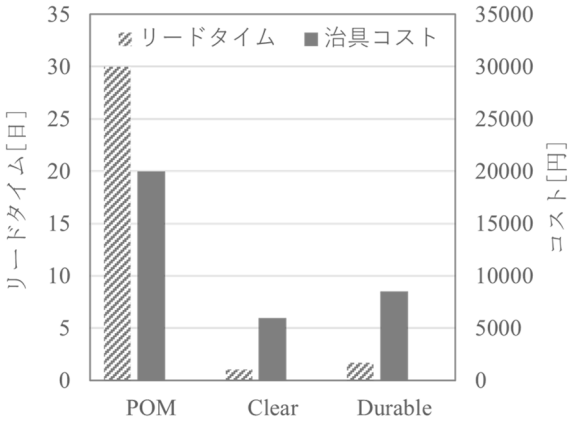


図 14　試作治具のリードタイム、コストの比較

表７　治具１個当たりのコスト内訳

項目	Clear(円)	Durable(円)
材料費	3,822	5,859
人件費	1,500	1,500
維持費	607	1,087
電気代	40	72
合計	5,969	8,518

４　おわりに

電解研磨工程で使用される治具の樹脂 3D プリンタによる内製化に取り組み、以下の知見を得た。

(1) テーバー式摩擦摩耗試験では、PLA, Clear, Durable で従来材料の POM と同等の摩耗量を確認し、PEEK では POM の 1/10 の摩耗量を確認した。ABS と Rigid10K については POM よりも摩耗量が多かった。

(2) ピンオンディスク式摩擦摩耗試験では、従来材料の POM が最も摩擦係数が小さく、PEEK, PLA, ABS, Clear, Durable, Rigid10K の順で摩擦係数は大きくなることが明らかになった。

(3) ロックウェル硬さ試験では、Clear と Rigid10K で POM と同等の硬さを確認した。

(4) 治具円柱部の公差は、PLA, Clear, Durable では公差中央の 37.85 mm で造形することにより、公差を満足する。PEEK では二次硬化により約 0.3 mm 膨張するため、37.5 mm で造形することにより公差を満足する。

(5) 試作した治具を電解研磨工程で使用し、問題なくバリ取りができることを確認した。Clear, Durable では５日間使用できた。PLA, PEEK+PLA については、電解液の漏れにより、半日程度で使用を中止した。

(6) 従来材料の POM の耐用日数と、テーバー式摩擦摩

耗試験の結果から、樹脂 3D プリンタ製治具の耐用日数を推定した。Clear では 55 日、Durable では 66 日使用できると推定される。

(7) 従来材料の POM と Clear, Durable で治具作製にかかるリードタイムとコストを比較した。リードタイムは POM と比較し 90%以上削減できるため、治具の在庫管理の労力や在庫を持つコストを削減できると考えられる。コストについては、POM と比較し Clear で 70%減、Durable で 57%減となり、生産の効率化が可能であることを示した。

謝　辞

本事業で用いた測定機の一部は公益財団法人 JKA の補助事業によるものであり、競輪マークを記して謝意を表する。

参考文献

1) 當間隆司：″日本画像学会誌″, 60（４）, 366-372, (2021)
2) 井上善海:″中小企業季報″,2023(2-4),11-20,(2024)
3) 渡部俊也：″RIETI Discussion Paper Series″, 16-J-014, (2016)
4) polymaker：” https://www.poly-maker.jp”
5) i-maker：” https://i-maker.jp”
6) BRULE：“https://www.brule.co.jp”
7) 服部修次:″ターボ機械″, 30 (11) , 644-651, (2002)

KEIRIN

本研究は、公益財団法人 JKA 補助事業により整備した機器を活用して実施しました。

重点共同研究（医療福祉機器、光学）

PP 細孔内面の接着性改善に向けた紫外線改質システムの開発

男澤　嶺*　　小林　愛雲*　　大森　和宏*　　西間木　潤**　　吉田　友幸**　　佐藤　蒼**

Development of an Ultraviolet Modification System for Improving the Adhesive Properties of PP Inner Pore Surfaces

OTOKOZAWA Ryo, KOBAYASHI Azumi, OMORI Kazuhiro, NISHIMAKI Jun, YOSHIDA Tomoyuki and SATO Aoi

光ファイバーを用いてポリプロピレン（PP）細孔内部へ紫外線（UV）を照射するシステムの構築を目指し、光ファイバーのフロスト処理条件を検討した。石英ガラスをフロスト液（フッ化アンモニウム 10 mass%、フッ化水素酸 20 mass%、蒸留水 70 mass%）に 10 秒間浸漬後、フロスト液から引き上げ、６時間以上静置後、蒸留水で洗浄する処理を行うと表面が粗面化され、光を拡散することが明らかになった。この表面からは、フッ素及び窒素が走査型電子顕微鏡付属 X 線分析装置で検出されなかった。このフロスト液で処理した光ファイバーと UV ランプを組み合わせたシステムで表面処理した PP と SUS304 の接着強度は、未処理 PP と比較し、約２～３倍程度高い値になった。

Key words: PP 細孔内面、光ファイバー、UV 拡散、フロスト処理

１　はじめに

ポリプロピレン（PP）は安価で成形性の良いプラスチック材料であり、自動車や医療等、様々な分野で用いられている[1)]。マルチマテリアル化が進む昨今、PP と異種材料の接着ニーズが増えているが、PP は極性基を持たない難接着材料であるため、PP を接着するには表面処理により親水化する必要がある[1)]。例えば医療用シリンジには PP 製針基（ニードルベース）と SUS304 製注射針（カヌラ）が利用されているが、これらを接着するため、ニードルベースをオゾン処理している。しかし、オゾン処理では突発的な接着不良が発生するという課題が生じている。また、オゾン処理にはバッチ式で時間がかかり、必要箇所以外も改質されるという課題がある。PP 製ニードルベース細孔内面のみを表面処理するシステムを構築できれば、これらの課題を解決できると考えられる。

PP の表面処理方法として、紫外線（UV）による改質が有効であることが知られている[2)]。しかし、UV 照射装置は主に平面を処理する構造となっていることが一般的で、シリンジ先端の PP 製ニードルベース細孔内面の UV 照射による改質は困難である。

そこで本研究では、PP 製ニードルベース細孔内面の改質を可能とする UV 照射システムを構築することを目的に、フロスト処理による光ファイバーの粗面化条件を明らかにし、UV ランプとフロスト処理光ファイバーを組み合わせたシステムによる PP 細孔内面の表面改質を試みた。

＊　栃木県産業技術センター　材料技術部
＊＊　栃木精工株式会社

２　研究の方法

２．１　細孔内面 UV 改質システム用材料

光ファイバーは、ソーラボジャパン(株)製 Multimode Fiber（φ0.2 mm, φ0.4 mm, φ0.6 mm）をニッパー（クニペックス、光ファイバー用ニッパー）で長さ 50 mm にカットし、ファイバー両端を３種類の研磨紙（トラスコ中山(株)、ラッピングフィルム研磨剤　TLF-200・400・600）を用いて研磨して使用した。集光レンズは、ソーラボジャパン(株)製 UV Fused Silica Plano Convex Lens φ12.7 mm　（焦点距離:20.1 mm）を用いた。UV ランプは、フィルジェン(株)製 UV オゾンクリーナー253MINI（波長：184.9 nm, 253.7 nm）を用いた。UV ランプ、集光レンズ、光ファイバーは、自作の治具を用いて、それぞれを組み合わせて、実験に供した。

２．２　フロスト処理条件

フッ化アンモニウム（NH_4F、関東化学(株)、特級）、フッ化水素酸（HF、関東化学(株)、特級）、蒸留水の混合液をフロスト液として調製し[3)]、試料をフロスト液に浸漬させた後、フロスト液から引き上げた状態で所定時間静置し、流水にて洗浄した。フロスト処理条件は、表１のとおりである。

表１　フロスト処理条件

条件	フロスト液組成	フロスト処理時間	
		浸漬時間	静置時間
A-1	NH_4F 10 mass %,	10 秒間	0～16 時間
A-2	HF 20 mass %,	１時間	なし
A-3	H_2O 70 mass %	６時間	
B	NH_4F 30 mass %, HF 20 mass %, H_2O 50 mass %	10 秒間	0～16 時間

２．３　PP 製ニードルベースの細孔内表面の UV 改質及び接着

PP 製ニードルベース（細孔内径φ0.8 mm）細孔内部にフロスト処理した光ファイバーを挿入し、UV 照射を 30 分又は２時間行った後、SUS304 製カヌラをニードルベース細孔内に挿入し、UV 硬化接着剤（ヘンケルジャパン、LOCTITE　AA 3301）を 2.3 mg 注入後、 30 秒間 UV 照射（波長：365 nm）し、ニードルベースとカヌラを接着させた。

２．４　評価

光ファイバーから照射される UV の照射範囲は、光ファイバー末端と UV 感光紙（(株)エスコ、紫外線検知材(高感度)）間の距離が 1 mm となるようにそれぞれを配置して UV 照射し、呈色された範囲を評価した。光ファイバーからの透過光を評価する場合は、光ファイバーに対して感光紙が垂直となるように、拡散光を評価する場合は、感光紙が平行となるようにそれぞれを配置した。UV 拡散光による PP の表面改質の検証の際には、サンプルに PP シート（(株)光、P922-1 t=0.2 mm）を用いた。UV 照射時間は 30 分とした。

UV 照射強度は、紫外線強度計（(株)マザーツール、YK-37UVSD）を用い、光ファイバー末端と UV 検出器を密着させて計測した。測定波長は 248～260 nm（UVC 領域）とした。得られた照度は、単位面積あたりの値に換算した。

走査型電子顕微鏡（SEM）観察は、日本電子(株)製 JSM-6010PLUS/LA を用いて行った。また、元素分析は、 付属のエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置にて行った。原子間力顕微鏡（AFM）観察は、ナノスケールハイブリット顕微鏡（(株)キーエンス、 VN-8010）を用いて、タッピングモードにて行った。

PP 製ニードルベース/SUS304 製カヌラ接着試料の接着強度は、引き抜き試験機（(株)エーアンドディ、STB-1225L）を用いて測定した。

３　結果及び考察

３．１　細孔内面 UV 改質システムの構築

UV ランプから照射された UV を光ファイバーに効率良く導入することを目的として、UV ランプ、集光レンズ及び光ファイバーを組み合わせた実験装置を検討した。図１に実験装置の模式図を示す。本研究では、UV 光源と光ファイバーを接触させる方法（方法①、図１(a)）と、UV 光源と光ファイバーの間に集光レンズを設置する方法（方法②、図１(b)）を比較した。各照射方法における照射強度を表２に示す。方法①の方が光ファイバーから照射される UV の強度が強く、効率良く UV を光ファイバーに導入できることが明らかになった。方法①では、UV ランプから照射される UV を直接光ファイバーに導入できるのに対し、方法②では、UV ランプの構造上、光源とレンズの距離を 20 mm 以上とする必要があったことや、レンズの焦点距離が 20.1 mm であったため、レンズとランプ又は光ファイバー間に存在する大気により UV の減衰が生じ、UV 照射強度が弱くなったと考えられる[4)]。

よって、これ以降の検証は、方法①にて実施した。

３．２　UV 拡散方法の検討

３．２．１　石英ガラスのフロスト処理条件の検討

細孔内面に UV を照射するためには、光ファイバーから照射される光を拡散させる必要がある。そこで、光ファイバーをフロスト処理により粗面化し、UV を拡散することを考え、石英ガラス板を用いてフロスト処理条件を検討した。

条件 A-1（表１）によりフロスト処理した石英ガラスの外観を図２に示す。静置時間１時間から石英ガラス表面が白化し、静置時間が長いほど白化の度合いが高まることが確認された。フロスト処理石英ガラス(条件 A-1、静置時間６時間）の SEM 観察像を図３に示す。白化した箇所は、石英ガラス表面に凹凸が生じていることが明らかになった。条件 A-2、A-3、B でも同様に、石英ガラスを粗面化することができた。

フロスト処理石英ガラス表面の元素分析結果を図４に示す。石英ガラス表面の凹凸箇所を元素分析した結果、条件 A-1 では、フッ素（F）及び窒素（N）は検出されなかった（図４（a））。一方、処理条件 A-2、A-3、B では、いずれも石英ガラス表面から F 及び N が検出され、フッ化アンモニウムやケイフッ化アンモニウムが残存していることが示唆された（図４(b),(c),(d)）。よって、全てのフロスト処理条件で、石英ガラス表面の粗面化による UV 拡散効果が期待できるものの、安全面の担保という観点から、条件 A-2、A-3、B は目的の用途に適さないと考えられる。以上より、本研究におけるフロスト処理は、条件 A-1 を採用することとした。

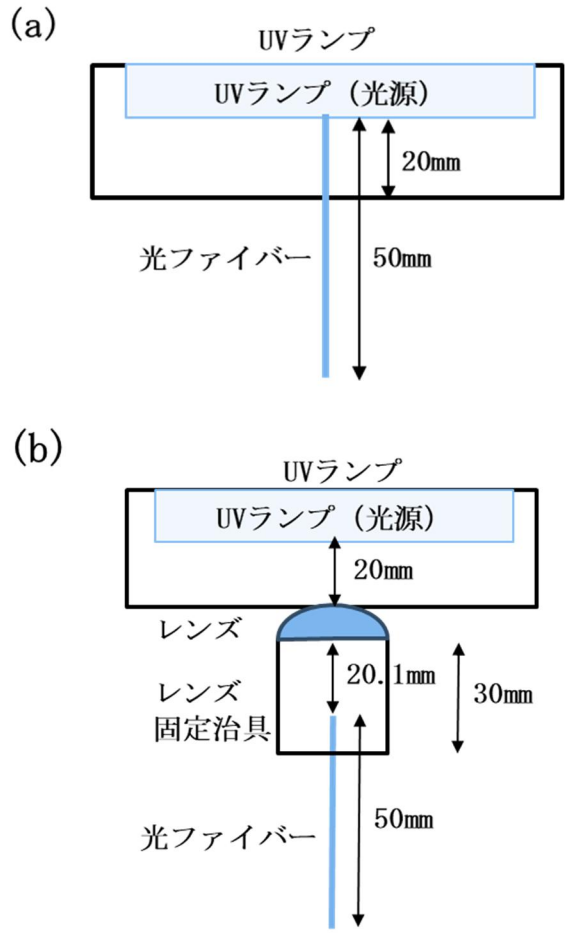


図１ UV 照射システムの模式図；
(a) 方法①、(b)方法②

表２　各 UV 改質システムと照射強度

	照射強度 (mW/cm²)
方法①	11.3
方法②	6.08

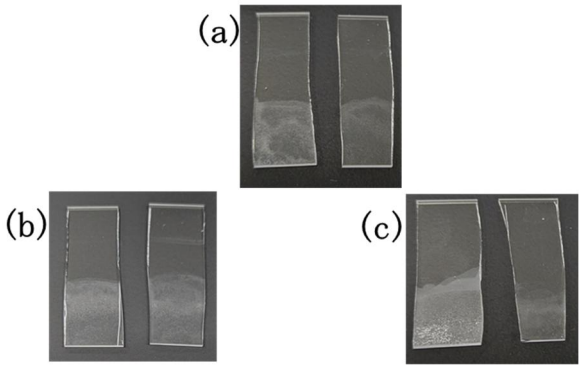


図２　フロスト処理（条件 A-1）後の石英ガラスの外観；
(a) 静置時間１時間、(b) 静置時間６時間、
(c) 静置時間 16 時間

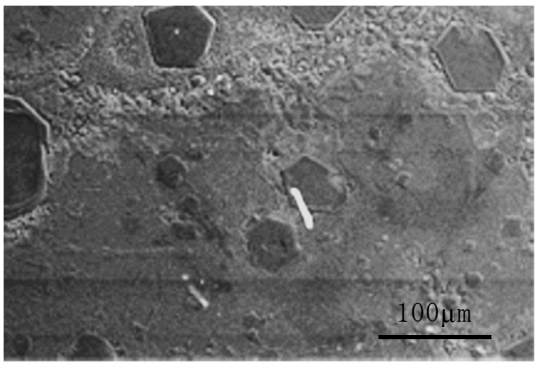


図３　フロスト処理石英ガラス
（条件 A-1、静置時間６時間）の SEM 像

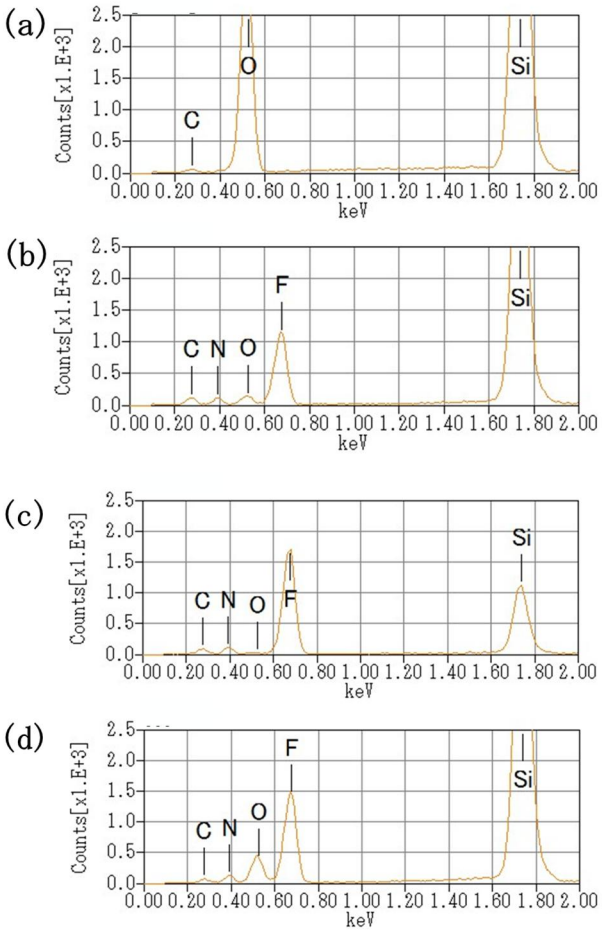


図４　フロスト処理石英ガラス表面の元素分析結果；
(a)条件 A-1（静置時間６時間）、(b)条件 A-2、
(c)条件 A-3、(d)条件 B（静置時間６時間）

次に、フロスト処理した石英ガラスに、可視光レーザを照射した際の透過光の拡散度合いを確認した。図５のとおり、未処理石英ガラスでは、透過光はほとんど拡散せず直進したのに対し、フロスト処理石英ガラスではレーザ光が拡散し、照射領域が拡大した。また、静置時間１時間では、直進光によるスポットが濃く出ていたが、６及び 16 時間では直進光のスポットが薄くなり、拡散領域は 50 mm を超えた。

以上の結果より、静置時間６時間以上とすることが、石英ガラスの粗面化に有効であることが示された。これ以降の検証では、静置時間６時間に設定した。

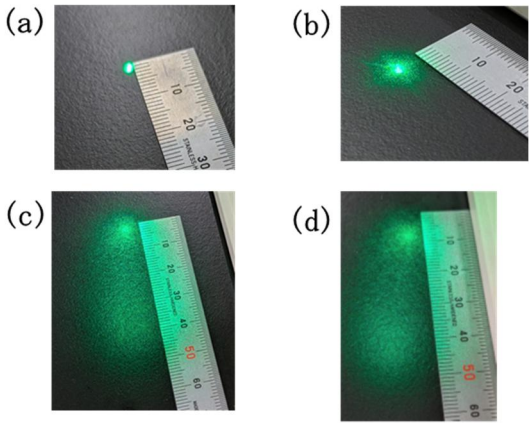


図５　未処理又はフロスト処理した石英ガラスの透過光の様子；
（a）未処理、（b）静置時間１時間、
（c）静置時間６時間、（d）静置時間 16 時間

３．２．２　フロスト処理光ファイバーによる UV 拡散

φ0.6 mm 光ファイバーを用いて、条件 A-1 に示すフロスト液に光ファイバー先端を約 10 mm、10 秒間浸漬し、６時間静置することによるフロスト処理を行った。未処理又はフロスト処理した光ファイバーを用いて感光紙に UV 照射した結果を図６、７に示す。フロスト処理した光ファイバーを用いると、未処理よりも照射領域が広がり、UV が拡散していることが確認された（図６）。しかし、UV 照射強度は未処理よりも低下した（未処理：11.3 mW/cm^2、フロスト処理：9.65 mW/cm^2）。低下した理由として、フロスト処理による光ファイバー末端の粗面化によって、一部の UV が乱反射し、光ファイバー末端から照射されなかったことが考えられる。

また、光ファイバーと平行に UV 感光紙を設置し、拡散光の比較をした結果、フロスト処理した光ファイバーの方が、未処理よりも広範囲に呈色し、フロスト処理により UV が拡散することが確認された（図７）。特に、フロスト処理光ファイバーの末端近辺が濃く呈色しており、フロスト処理の効果を示しているものと考えられる。

フロスト処理した光ファイバーを用いて PP シートに UV 拡散光を 30 分間照射した。UV 照射前後の PP 表面の AFM 像を図８に示す。照射表面の AFM 像から、UV 照射後の PP からは、UV 照射前では見られなかったドット状のものが観察された。PP を UV ランプにより直接表面改質すると、ドット状のものが観察されていることから、フロスト処理した光ファイバーで拡散された UV により PP 表面が改質されているものと考えられる。

３．３　光ファイバー種の検討

φ0.4 mm 及びφ0.2 mm の光ファイバーについて、φ0.6 mm と同条件でフロスト処理を行い、光ファイバー種によるフロスト処理の効果を確認した。未処理又はフロスト処理した光ファイバー（φ0.4 mm,0.2 mm）について、前項と同様に UV 照射範囲を測定した。結果を図９、10 に示す。ファイバー径がφ0.4 mm 及びφ0.2 mm においても、未処理と比較して、フロスト処理した光ファイバーの UV 照射領域は拡大しており、光ファイバー径に関わらず、フロスト処理により UV が拡散することが確認された。

また、未処理ファイバー（φ0.6 mm）を用い、長さを 50～100 mm に変動させた場合の UV 照射強度を測定した。ファイバー長と UV 照射強度の関係を図 11 に示す。その結果、UV 照射強度はほぼ一定であり、光ファイバーの長さの影響を受けにくいことが確認された。

以上の結果より、光ファイバーの径や長さによらず、UV を拡散照射できることが確認された。このことは、本 UV 照射システムを実際の生産ラインに導入する際、製品毎に光ファイバーの径や長さを変えることができることを示しており、当該システムの汎用性を高める結果が得られたと考えられる。

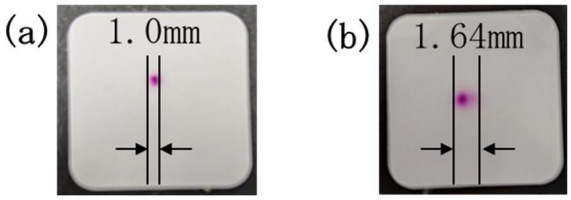


図６　（a）未処理及び(b)フロスト処理光ファイバーによる UV 透過光照射領域

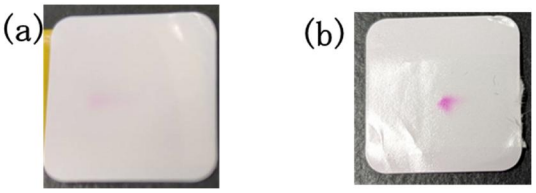


図７（a）未処理及び(b)フロスト処理光ファイバーによる UV 拡散光照射領域

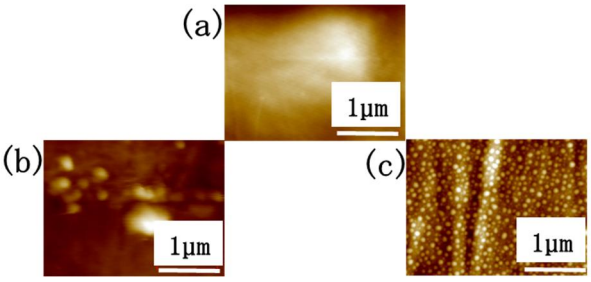


図８ UV 照射前後の PP 表面の AFM 像；
（a）　未処理、（b）UV 拡散光照射、
（c）UV ランプにより直接 UV 照射

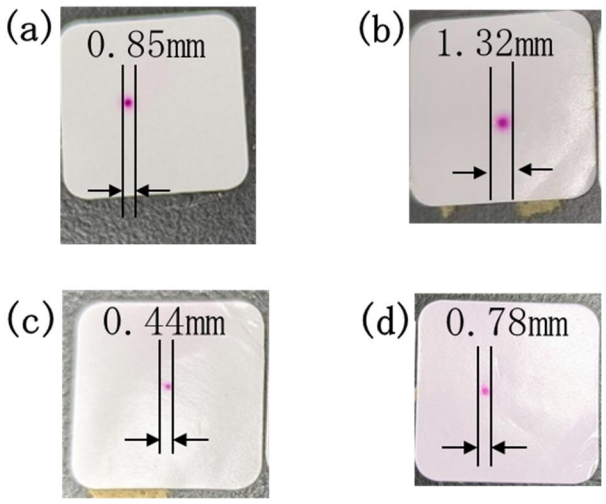


図９ 各光ファイバーの UV 透過光照射領域；
(a) 未処理、φ0.4 mm、(b)フロスト処理、φ0.4 mm、
(c)未処理、φ0.2 mm、(d)フロスト処理、φ0.2 mm

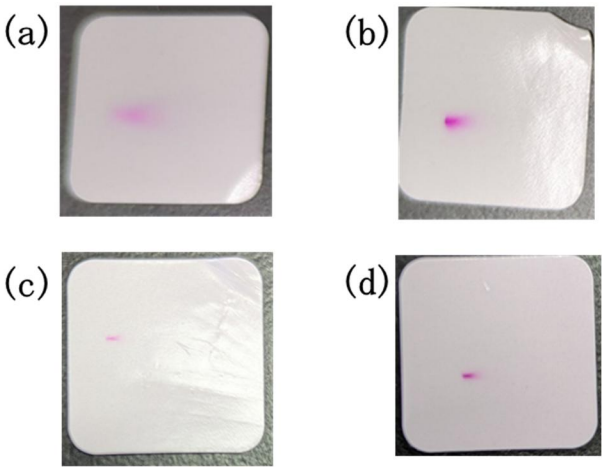


図 10　各光ファイバーの UV 拡散光照射領域；
(a) 未処理、φ0.4 mm、(b)フロスト処理、φ0.4 mm、
(c)未処理、φ0.2 mm、(d)フロスト処理、φ0.2 mm

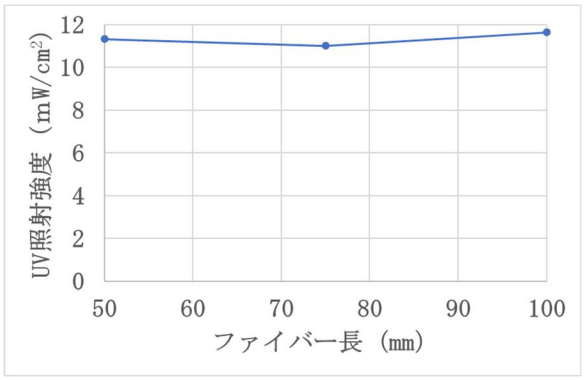


図 11　ファイバー長さと UV 照射強度の関係

３．４　実成形品細孔内面の UV 改質・接着試験の検討

ニードルベースに接着したカヌラの引き抜き試験の結果を表３に示す。UV 照射システム未使用時の引き抜き強度は、およそ 50 N であったのに対し、UV 照射システムを使用し、UV を 30 分間照射すると 98 N 以上の引き抜き強度を示した。この引き抜き強度は、JIS T3209 に準ずる強度（34 N）を大幅に上回る結果であったが、ばらつきは大きくなった。２時間照射における平均引き抜き強度は 30 分照射の場合と同等であり、ばらつきはより大きくなった。この理由の一つとして、光ファイバーとニードルベース細孔内面間距離のばらつきが考えられる。フロスト処理光ファイバー径とニードルベース細孔径は約 0.2 mm 程度の差があり、クリアランスが生じていた。そのため、光ファイバーを挿入した際の光ファイバーと細孔内面の位置関係や光ファイバーの挿入角度が一定にならず、改質度合いにばらつきが生じたと考えられる。

一方、本研究で最大引き抜き強度を示した試験品において、引き抜き後のカヌラ表面を顕微鏡で観察すると、接着剤が凝集破壊したと思われる破断面が観察された（図 12）。この試験品では、PP 細孔内面が適切に改質できていることがうかがえる。UV 照射位置を適切に、安定的に設定できれば、高い接着強度が常に担保された製品を作製できる可能性がある。

表３　引き抜き試験の結果

	引き抜き強度（N）		
	細孔内面 UV 未照射	細孔内面 UV30 分照射	細孔内面 UV2 時間照射
①	50.8	98.5	95.7
②	44.8	106	160
③	56.4	135	90.3
平均	50.7	113	115
標準偏差	5.84	19.4	38.5

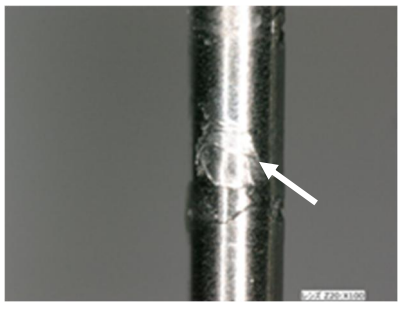


図 12 細孔内面 UV２時間照射サンプルにおける
引き抜き試験後のカヌラ表面
（図中の矢印は凝集破壊した接着剤を示す）

また、本検討で構築した UV 照射システムにおける UV 照射時間は 30 分で検証したが、実際の生産ラインへの

導入実現に向け、UV 照射時間の短縮が望まれている。本検討で用いたUV光源よりも強い照射強度を有するUV光源[5]を探索し、本システムに構築できるかの検証が今後の課題として考えられる。

4　おわりに

PP 製ニードルベース細孔内面の改質を可能とするため、光ファイバーを用いた UV 照射システムを構築し、次の知見を得た。

(1) 石英ガラスのフロスト処理条件を検討し、 UV を拡散させる処理条件（フッ化アンモニウム 10 mass %、フッ化水素酸 20 mass %、蒸留水 70 mass %の混合液に 10 秒間浸漬後、6 時間以上静置）を見いだした。

(2) 光ファイバー径によらず、フロスト処理した光ファイバーは UV を拡散することが明らかになった。また、光ファイバー長さによらず、照射強度はほぼ一定であった。

(3) フロスト処理した光ファイバーで拡散した UV により、PP の表面改質が可能であることが示された。

(4) 本研究で開発した UV 照射システムを用いることで、PP 製ニードルベースと SUS304 製パイプ（カヌラ）の接着強度は、約２～３倍に向上した。

参考文献

1) 片田一喜,豊永匡仁,後藤啓介,小林史紘,千葉響,谷池俊明,寺野稔:“高分子論文集”70, 12,693-699,(2013)

2) 益子朱音,男澤嶺,大森和宏：“栃木県産業技術センター　研究報告” 20,71-74,(2023)

3) 保坂達也,菊地典生:“表面技術” 44, 205-208,(1993)

4) 正木光,田中一:“照明学会誌” 47, 234-239, (1963)

5) 藤本靖,中原正盛,BINUN Paul,本越伸二,渡部棟之,山嵜正明,佐藤毅,深川正基：“レーザ加工学会誌” 28, 49-55, (2021)

KEIRIN

本研究は、公益財団法人 JKA 補助事業により整備した機器を活用して実施しました。

重点共同研究（AI・IoT、フードバレーとちぎ）

麹造りにおけるデジタル技術活用

松本　健司*　　髙岩　徳寿*
筒井　達也**　　古口　久美子**　　西堀　哲也***

Exploring Digital Technology Utilization in Koji Making

MATSUMOTO Kenji, TAKAIWA Noritoshi,
TSUTSUI Tatsuya, KOGUCHI Kumiko and NISHIBORI Tetsuya

他産業と同様に酒造業界も労働力不足が問題となっており、多様な酒造文化を継続するためにも対策が必要である。複数工程で成り立っている日本酒造りにおいて、重要な工程の１つである麹造り（以下、製麹）は特に作業者の負担が大きい。本研究では、製麹工程の管理負荷軽減にはデジタル技術の活用が有効と考え、システムの試作に取り組んだ。本システムを利用することで、製麹工程において一般的に管理される品温や周辺温湿度の経過情報が自動で記録され、また、品質管理の指標とされている麹の品温の経過についても時系列予測技術を用いて一定精度での予測が成り立つことを確認した。

Key words:　清酒、麹、IoT、時系列予測

１　はじめに

近年、日本酒全体の国内出荷量は減少しつつある中においても、栃木の酒蔵では海外展開も視野に入れた酒造りを行っている。今後、一層の高品質化・差別化が必要とされるが、熟練杜氏の高齢化が進み、人材の確保も難しいなか、高度な技術の継承者を養成するには時間を要する。

日本酒造りは複数の工程からなり（図１）、「一麹、二酛、三造り」といわれるように、製麹は重要な作業工程の１つである。製麹は、昼夜を通し約２日間、細かな管理が必要となることから負担が大きい作業である。更に、昨今では人手不足から他業務との兼任も発生しており負担軽減が急務である。

自動製麹機の研究開発も目覚ましいが、高額であることや大掛かりな装置となりがちなことから中小酒造メーカーでは導入が難しい。そこで、現状の製麹装置のままで細かな品質管理を実現し、省力化を図るため、デジタル技術の活用が有効と考えた。

本研究では、製麹工程における管理負担の軽減を目指し、IoT 技術や AI 技術等を組み合わせたシステム試作に取り組んだ。実施にあたっては、中小酒造メーカーの実情を鑑み、現在の手法をなるべく崩さず、安価に実現することに留意した。

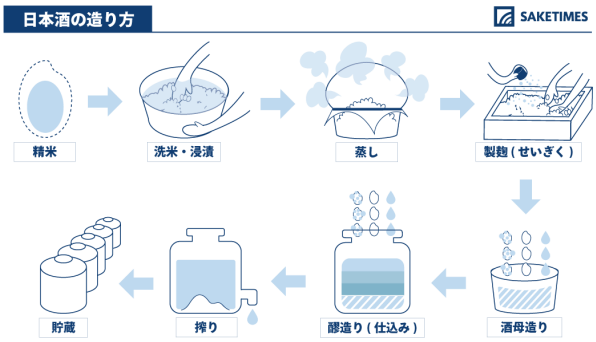


図１　日本酒造り

出典：https://jp.sake-times.com/infographics-free-download

２　研究の方法

２．１　対象作業

本研究で試作する製麹管理システムは製麹工程管理の負担軽減に資することを目指す。製麹工程は大きく２つの工程に分けられ、本研究では、より管理負担の大きい棚作業に主眼を置くこととした。対象工程の概要を図２に示す。

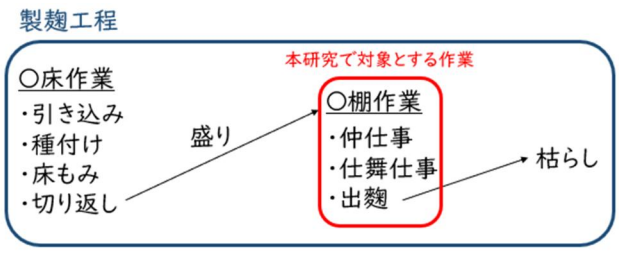


図２　対象工程の概要

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊　栃木県産業技術センター　食品技術部
＊＊＊　西堀酒造株式会社

２．２　開発方針

製麹管理システムの開発にあたり、開発内容を以下のように定めた。

①　製麹記録のデータベース化
②　現場モニタリング
③　作業標準化に有用な情報の提示

これらの機能を有するシステムを安価に構築するため、図３に示すRaspberry Pi [1)]をサーバマシンとした。



図３　Raspberry Pi

２．２．１　製麹記録のデータベース化

西堀酒造において製麹関連情報は一部電子化されており、スプレッドシート等で記録されていた。しかし、各情報は分散して記録されており、必要な情報を得にくく活用し難いことが課題となっていた。これらの課題解決のため、データベース構築に取り組んだ。

２．２．２　現場モニタリング

製麹において重要とされる品温や周辺温湿度について経過を自動記録するセンサも市販されているが、２次利用が困難なデータ形式であり、関連する経過情報を一度に確認できないという課題があった。課題解決のため、これらの情報を自動記録するシステムの構築と、管理に必要な経過情報を一括確認できるダッシュボード機能の開発に取り組んだ。

また、麹の水分量は酵素生産に影響する要素であること[2), 3)]から、麹の水分量を把握するために重量変化の経過情報取得に取り組むこととした。

２．２．３　作業標準化に有用な情報の提示

製麹現場では刻々と変化する麹の状態を作業者が判断したうえで適切な作業を実施している。その指標として麹の品温経過が重視されている[3)]が、麹の状態遷移の把握や予測には高度な経験等が求められる。

また、その後の酒造工程に影響することから出来上がった麹の品質確認も重要である。酵素力価は酒質に影響する重要な指標の１つである[3)]が把握するのに化学分析を要することから、現場での即時確認は困難である。

これらのことから作業標準化に有用であると考えられる品温経過と酵素力価について、それぞれを予測する機能の開発に取り組んだ。予測機能開発に使用するデータセットについて、品温経過については西堀酒造より提供された過去の仕込み情報と品温経過を記録した198レコード分のデータセット（以下、製麹時品温データセット）を使用した。酵素力価については、測定した過去データが十分に存在しなかったことからデータセット作成から取り組むこととした。

３　結果及び考察

３．１　試作システムについて

試作システムの全体像を図４に示す。各センサ情報はM5stack[4)]で集計され時刻情報を付与し、Raspberry Piへ送信される。Raspberry Piには開発した各種機能を実装している。

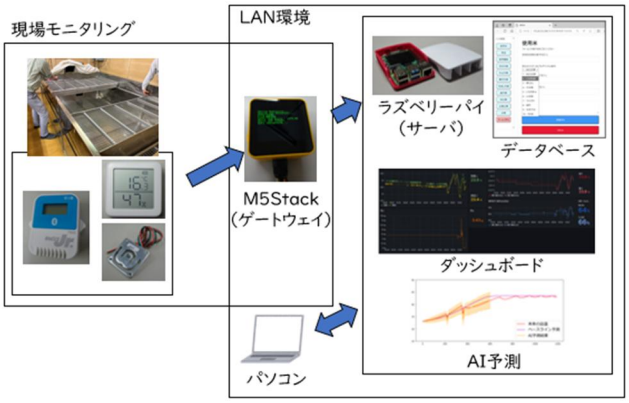


図４　試作システム

３．２　各開発項目の詳細

３．２．１　製麹記録のデータベース化

製麹作業者からの聞き取り調査を基に設計したデータベースをMariaDB[5)]で実装した。

データベースへの入力方法として、Apache[6)]を利用したWEBアプリケーションサービスを構築した。構築サービスの情報入力WEBアプリケーションを図５に示す。



図５　情報入力の画面例

３．２．２　現場モニタリング

構築したモニタリング機能の概要を図６に示す。

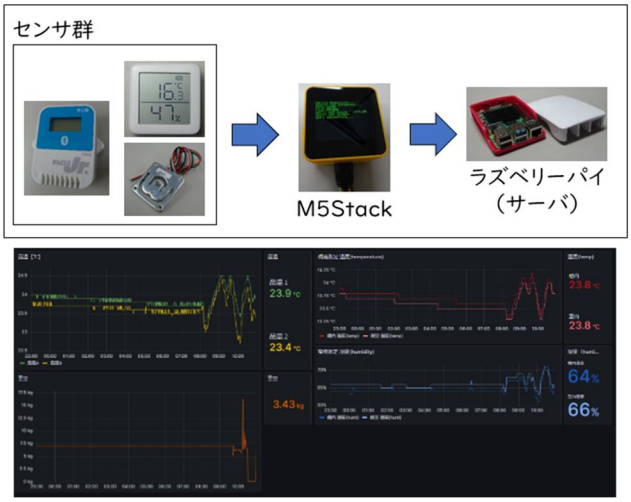


図６　現場モニタリングの概要

上：IoT システム構成

下：ダッシュボード閲覧の画面例

モニタリングに使用するセンサ類は、業界の導入実績や駆動方式などの情報を基に選定した。センサは基本的に無線通信が可能、かつ安価なもので統一した。センサ情報は M5stack を経由しサーバ上の時系列データベースへ記録することとし、各種開発に取り組んだ。

重量測定に関しては、要求を満たす安価なセンサユニットがなかったため開発に取り組んだ。試作した重量測定ユニットを図７に示す。

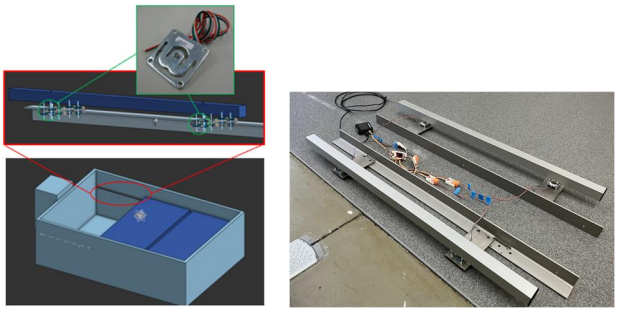


図７　重量測定ユニット

左：ユニット設計

右：試作したユニット

組み上げた重量測定ユニットは、約２週間のあいだ 30 kg 程度の重りを乗せた状態で動作検証し、問題がないことを確認した。

サーバ上の時系列データベースには InfluxDB[7] を採用した。同一サーバ上には Grafana[8] サービスも構築し、ダッシュボード提供機能を実装した。ダッシュボードは同一 LAN 内のクライアント PC からブラウザ経由で閲覧できる。

３．２．３　作業標準化に有用な情報の提示

３．２．３．１　品温経過予測について

従来、作業者は原材料情報や仕込み作業に係る情報を基に麹の成り行きを推察している。このことから、麹の品温経過は従来と同等の情報を基に予測が可能であると考えた。

製麹時品温データセットのうち、特定条件のものをテストデータ（20 件）、それ以外（178 件）を学習データに用いて予測モデル構築に取り組んだ。様々な手法を検討した結果、複数予測を組み合わせた処理で西堀酒造と定めた目標予測精度が達成できることを確認した。予測処理の概要を図８に示す。

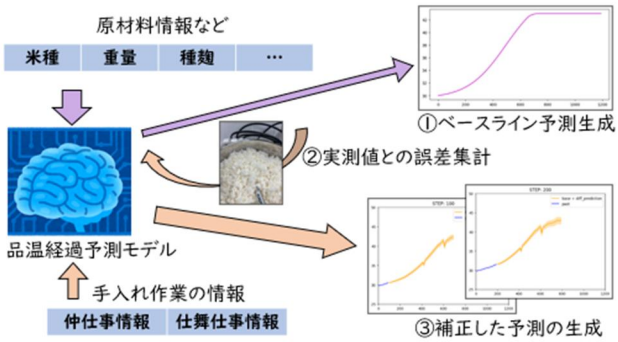


図８　予測処理の概要

試作した品温経過予測モデルは以下のフローで予測を行う。

①　棚作業までの情報からベースラインを予測

②　ベースライン予測と実測値の予測誤差を集計

③　誤差の推移及び手入れ情報を基に予測を補正

まず、ベースライン予測手法について述べる。棚作業における麹の品温経過は、経過時間に対して最小温度から最大温度までなめらかに変化する経過を辿ることが一般的である。麹の品温経過 $T(t)$は経過時間 t に対し、最小温度を $T_{\min}$、最大温度を T_{MAX}、最大傾きを S、変曲点を P とすると、次のようなロジスティック関数で近似できる。

$$T(t) = T_{\min} + \frac{T_{MAX} - T_{\min}}{1+e^{-S(t-P)}} \qquad （式１）$$

ただし、本研究で対象とした製麹棚作業において、西堀酒造では温度閾値による送風機の ON/OFF 制御装置を現場に導入していたことから、温度閾値 $Thresh$ による次のような条件処理を加えた。

$$\begin{cases} T(t) = T(t) & (T(t) < Thresh) \\ T(t) = Thresh & (T(t) \geq Thresh) \end{cases} \qquad （式２）$$

式１をグラフ化したものを図９に示す。事前に得られる仕込み情報を用いて、式１右辺の各変数を予測することができれば品温経過の概形が予測できることがわかる。

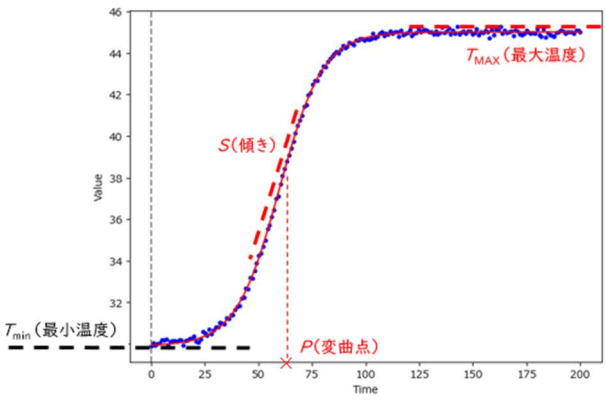


図９　ロジスティック関数

式１における右辺の各変数は仕込み毎に異なる値をとる。最小温度 T_{min} は麹の種菌をきった際の温度や棚作業に移行する際の温度から推察でき、作業者が任意に調整することも容易である。

一方、最大温度 T_{MAX}、最大傾き S、変曲点 P の３つの変数（以下、目的変数）については、原材料や仕込み条件が複雑に影響した結果として定まることから予測することが困難である。

そこで、目的変数を予測するモデル構築に取り組んだ。製麹時品温データセットの品温経過を曲線近似して得た各仕込みの目的変数を予測対象とし、仕込み情報を特徴量とした教師データを用いて、複数機械学習手法でモデルを構築した。その結果得られたモデルのうち、精度が良かった勾配ブースティング決定木などを組み合わせたものをベースライン予測モデルとして採用した。

ベースライン予測モデルは、棚作業までの事前情報しか用いないため、経過が進むにつれ実測値から乖離していく。乖離していく様子の例を図 10 に示す。

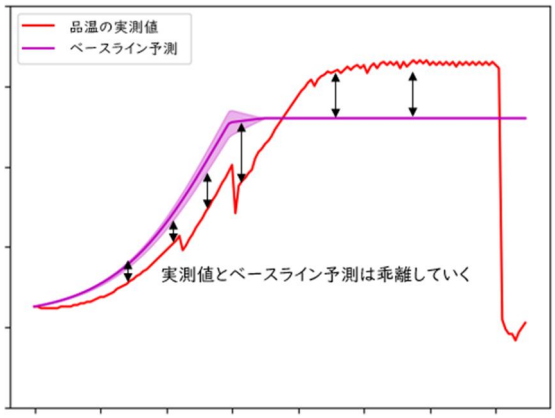


図 10　ベースライン予測と実測値の乖離

この誤差を補正するため、製麹時品温データセットの品温経過とベースライン予測の差分時系列を予測対象とした誤差予測モデルの構築に取り組んだ。なお、作業者の手入れによって品温経過が大きく変化することから、学習用データには手入れ作業に関する時系列情報を共変量として加えている。

誤差予測モデル構築には AutoML 用 Python ライブラリの AutoGluon[9] を利用した。複数手法を比較した結果、基盤時系列モデルである CHRONOS[10] をファインチューニングしたモデルが最も精度が良かった。精度が良かった本モデルを主とし、その他の予測モデルを組み合わせた重み付きアンサンブル予測を誤差予測モデルに採用した。なお、誤差予測モデルの予測長は、十分な予測精度が確認された 10 時間先までとした。本モデルにより予測された誤差系列をベースライン予測に加算することで最終的な予測結果が得られる。

３．２．３．２　酵素力価予測について

十分な過去データがなかったことから、本研究では酵素力価予測の可能性を検討するためのデータセット（以下、酵素力価データセット）構築に取り組んだ。

酵素力価データセット作成にあたって、所内製麹が可能であるか確認するテストを複数回実施後、データの作成方針を表１のように定めた。

表１　酵素力価データセット作成方針

原材料の種類	・米種１種類（精米歩合 55%） ・種麹１種類
原材料使用量	・米　200 g ・種麹　2 g
前処理の内容	・洗米及び浸漬後 260 g を目標に水分量調整 ・１時間の蒸し
製麹毎に固定する条件	・32℃から 40℃まで昇温 ・昇温速度は 0.66℃/h（32℃から 40℃まで 12 時間） ・相対湿度 95%
製麹毎に変更する条件	周辺温度の昇温開始時刻を 18 時間後から 28 時間後まで２時間刻みで変更（計６パターン）

方針に基づき、図 11 のとおり所内製麹試験を実施し、麹の経過情報及び出麹後の酵素力価測定結果が紐づいたデータセットを構築した。本製麹試験は、岡山工業技術センターにて報告のあった先行事例[11]を参考にした。

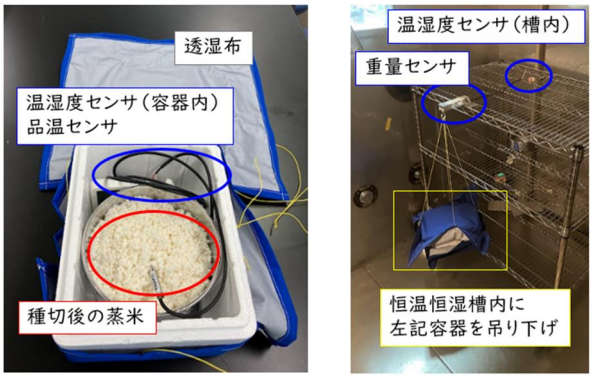


図 11　所内での製麹試験

製麹試験により、製麹時の品温及び重量の経過が異なる 29 サンプルを得ることができた。経過プロットを図 12 に示す。

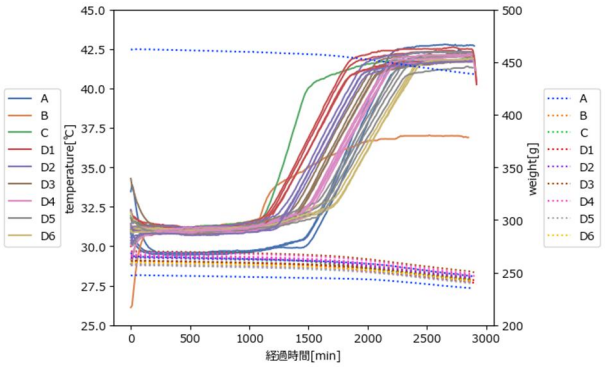


図 12　所内製麹の経過プロット

酵素力価の測定はαアミラーゼ及びグルコアミラーゼの２種類を実施し、それらの比である G/A 比を算出した。G/A 比は酵素バランス評価として一般的に用いられる指標である。図 13 に G/A 比算出結果を示す。

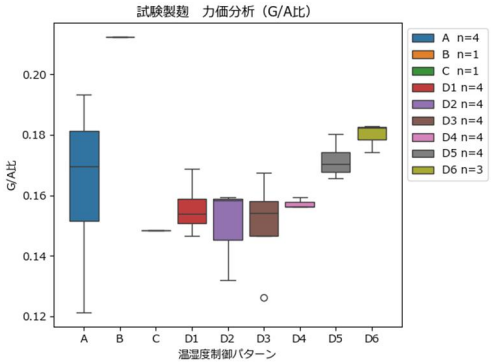


図 13　G/A 比算出結果

酵素力価測定結果について、酵素生産の至適温度帯 [3]に注目して解析した結果を図 14 に示す。

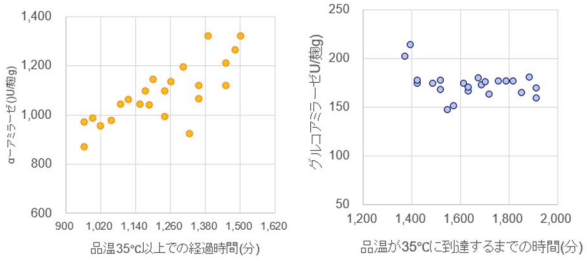


図 14　至適温度帯経過時間と酵素力価の関係

左：αアミラーゼについて

右：グルコアミラーゼについて

αアミラーゼに関しては、品温経過における酵素生産の至適温度帯（35℃以上）の経過時間と酵素力価の関係性が確認された。

グルコアミラーゼに関しては、品温経過における酵素生産の至適温度帯（35℃未満）の経過時間と酵素力価の明確な関係は確認されなかった。

これらの結果を踏まえ、所内製麹 29 サンプルのうち、23 サンプルをトレーニングデータ、６サンプルをテストデータとし、機械学習手法による G/A 比予測モデルの試作を行った。モデル試作で使用したデータを図 15 に示す。また、

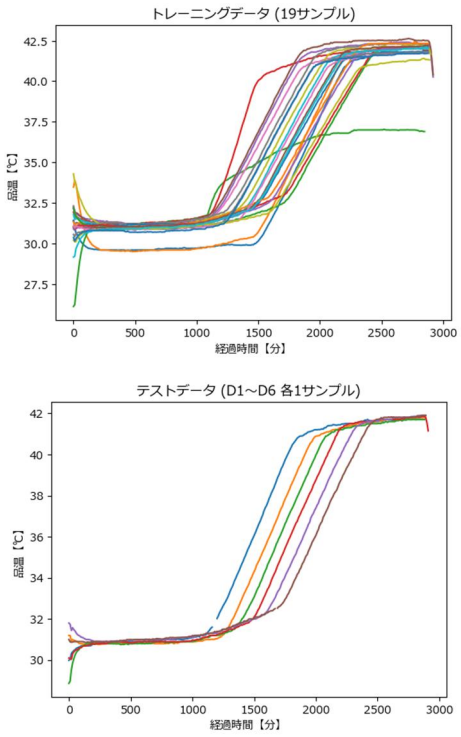


図 15　酵素力価予測モデル試作に用いた経過情報

上：学習用データ

下：評価用データ

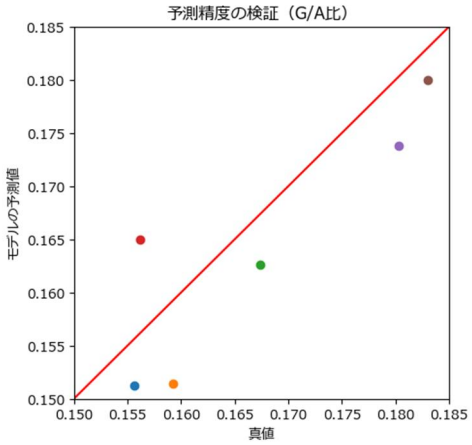


図 16　テストデータにおける G/A 比予測結果

本データによる予測精度検証結果を図 16 に示す。

データの多様性と量は不十分ではあるが、経過情報を基にした機械学習手法で酵素力価を予測できる可能性が確認できた。

３．３　実証試験

試作開発した内容の一部について、10 月１日から２月４日までの約４か月間、西堀酒造にて検証を実施した。

検証において、確認したのは以下の２点である。

①　現場モニタリング

②　品温予測モデルの精度

３．３．１　現場モニタリングについて

時系列データの取得に関して、温湿度関連の情報取得及び各種サーバ機能は問題なく動作したことを確認した。た

だし、品温センサ及び重量測定ユニットに関して、過酷な湿度環境による影響などにより動作不良を起こすことが確認され、対策が必要であることがわかった。

品温センサ動作不良に関しては対策が容易であったことから、その後も測定を継続できた。

重量測定ユニット動作不良に関しては配線経路や従来作業との干渉が原因と推察された。推察原因に対して各種対策を講じたが解決には至らなかったため、本研究にて試作した重量測定ユニットを用いた経過記録は現場導入が困難であると判断した。

３．３．２　品温予測モデルの精度

品温予測モデルの精度について、３．３．１において記録された９サンプル分のデータを用いて品温の予測精度検証を実施した。その結果、品温経過予測モデルの４時間先までの予測精度 MAE は 1.102℃（全サンプル平均）であった。予測結果の例を図 17 に示す。

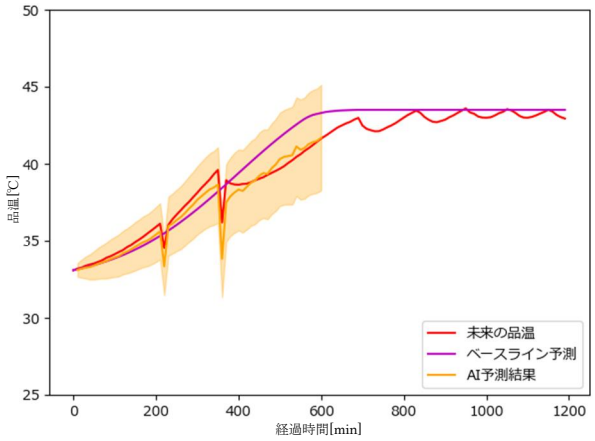


図 17　品温経過予測結果の例

９サンプルのうち、７サンプルについてはモデル構築時の予測精度を維持していたが、残りの２サンプルについては予測精度が悪化していた。２サンプルについてデータを精査したところ、従来とは異なる手法を試していた。つまり類似する品温経過パターンが学習データにほぼ含まれていないサンプルであることが確認された。このことから、本予測モデルが異常検出用途での利用可能性があることが確認された。

４　おわりに

酒造工程における製麹工程について、管理負担の軽減を目標としたシステムを試作した。

(1) 従来、紙やスプレッドシートで記録していた各種情報を一元管理するデータベース及び情報入力用 WEB アプリケーションを試作できた。

(2) 製麹現場に関する時系列情報を自動記録する現場モニタリング機能を試作した。記録対象は、品温、周辺温湿度、重量とした。重量測定に関しては、想定用途に適したユニットを自作し、２週間の所内動作検証で正しく動作することを確認した。

(3) 過去の製麹記録を基に、製麹時の品温推移を予測するモデルを構築した。原材料情報や仕込み作業記録を入力することで棚作業における麹の品温変化を予測することができる。

(4) 事前情報及び麹の経過情報から、酵素力価の予測が可能であるか検討した。検討にあたり、麹の昇温開始時間を２時間間隔で変化させた所内製麹試験を実施し、29 サンプル分の経過情報と酵素力価のデータを作成した。本データを用いた予測モデルから予測実現の可能性があることを確認した。

(5) 現場モニタリング機能について、製麹現場において約４か月間の動作検証を実施し、品温、周辺温湿度の記録及びダッシュボード閲覧機能の稼働を確認した。試作した重量測定ユニットは通信経路などの問題により現場導入が困難であった。

(6) 過去データで学習した品温経過予測モデルについて、現場モニタリング機能の実証試験で得た今期のデータを用いて予測精度を検証した。その結果、学習データと同傾向の作業をしたサンプルは予測精度を維持し、従来とは異なる傾向の作業をしたサンプルは予測精度が悪化することを確認した。これは異常検出用途での利用可能性があると考えられる。

参考文献

1) “Raspberry Pi”, https://www.raspberrypi.com/
2) 岡崎ら：″日本醸造協会誌″, 74(10),p683-686,(1979)
3) 奈良原：″日本醸造協会誌″, 89(11),p873-881,(1994)
4) “M5Stack”, https://m5stack.com/
5) “MariaDB”, https://mariadb.com/kb/ja/mariadb/
6) “Apache”, https://httpd.apache.org/
7) “InfluxDATA”, https://www.influxdata.com/
8) “Grafana”, https://grafana.com/ja/
9) “AutoGluon”, https://auto.gluon.ai/stable/index.html
10) Ansari et al.: ″Transactions on Machine Learning Research″, ISSN 2835-8856, (2024)
11) 伊藤ら: ″日本醸造協会誌″, 116(3), p134-150, (2021)

重点共同研究（フードバレーとちぎ）

吟醸粕を用いたビール等の製造に関する研究

筒井　達也*　　郡司　崇浩*　　岡本　竹己*　　横須賀　貞夫**　　山下　創***

Research on the Production of Craft Beer with Ginjo Sake Lees

TSUTSUI Tatsuya, GUNJI Takahiro, OKAMOTO Takemi, YOKOSUKA Sadao and YAMASHITA Hajime

酒造メーカーで発生する吟醸粕（黒粕）をビール等の製造に活用することを目的に、黒粕を使用した際の糖化及び発酵試験を実施し、香味が良好なクラフトビールの製造方法を検討した。糖化試験では、麦芽歩合が減少（酒粕歩合が増加）することで糖度が低下したが、糖化温度65℃、麦芽歩合50%以上（酒粕歩合50%以下）で糖度11以上を確保できた。発酵試験では、麦芽歩合50%以上のいずれの条件でもアルコール度数5%以上を達成し発酵は順調に進行した。酒質については、酒粕の添加によりフルーティな香りや後味のキレが感じられ、麦芽歩合が低い（酒粕歩合が高い）試験区では脂肪酸臭や酸味が現れた。実地醸造試験では濾過に時間がかかる場面もあったが糖化及び発酵工程に大きな問題は確認されず、最終的な酒質はクリアでキレが良く後味に旨味が残り、酒粕特有の吟醸香も移行した。

Key words:黒粕、吟醸粕、 発泡酒、糖化、酵母

1　はじめに

日本におけるクラフトビール事業所数は近年増加傾向にあり、2010年代以降、日本国内でクラフトビールブームが起こり、多くの小規模ブルワリーが設立されている。本県のクラフトブルワリー数も2010年は３社であったが、2023年には12社まで増え、今後も数が増えることが予想される。日本のクラフトビールは多様性に富んでおり、日本の伝統的な食材や風味を取り入れた製品や国際的なスタイルに挑戦する製品など、様々な味わいのクラフトビールが製造されるようになっている。

クラフトビール業界における課題として、市販ビールとの差別化や麦芽価格の高騰などがあげられ、各ブルワリーにおいては製造コストを抑え、かつ特色がある良好な副原料が求められている。一方、酒造業界では吟醸粕、特に黒粕の有効利用が課題となっている。黒粕は一般的な酒粕よりもデンプン質が高く、風味豊かな特性を持っている。しかしながら、一部高級な吟醸酒製造で発生する褐変した黒粕（図１）は黒カビを連想するその外観から消費者に忌避され、肥料や飼料として非常に安価で取引されている他、一部は廃棄されている現状にある。ビールの原料である輸入麦芽は１ kgあたり300円以上かかることから、黒粕をビール等の副原料として利用することは、麦芽に替わるデンプン源としてだけでなく、特色ある商品開発にも繋がる他、黒粕の有効利用も図られ双方の業界にとって大きなメリットとなると考えられる。

そこで本研究では、吟醸粕のクラフトビールへの活用可能性を探り、クラフトビール業界と酒造業界の課題を解決するため、吟醸粕を有効利用した特徴あるビール等の開発に取り組んだ。



図１　黒粕の写真

2　研究の方法

2．1　原料

麦芽はペールモルト（北米産）を使用した。吟醸粕は令和４酒造年度に栃木県内の蔵元で生じたものを小分けにして包装し、使用時まで冷凍保管したものを使

＊　栃木県産業技術センター　食品技術部
＊＊　栃木マイクロブルワリー
＊＊＊ 株式会社ファーマーズフォレスト

用した。ホップはカスケード（北米産）を、酵母はエールタイプのドライイースト（Fermentis S-04, English Ale）を使用した。なお、麦芽やホップ、酵母は県内ブルワリーで一般的に使用されているものを選択した。

２．２　糖化試験

麦芽及び酒粕の糖化については、原料 100 g、水 400 mL の条件で、卓上型恒温槽（TAITEC PERSONAL-11）を用い温度一定のもと試験を行った。

２．２．１　糖化温度の検討

糖化温度の違いによる糖度（ºPlato）の推移を測定した。温度は 60℃,65℃,70℃とし、麦芽歩合 100%及び 70%（重量比で酒粕 30%）の条件で、麦汁濃度計（アタゴ PAL-麦汁）を用いて糖化液の糖度を 120 分まで測定した。

２．２．２　麦芽歩合の検討

麦芽歩合による糖化の進み方を検討するため、表１に示す試験区で試験を実施した。糖化温度は 65℃とし、最長 120 分まで糖化液の糖度を測定した。

表１　糖化試験区

試験区	麦芽歩合（%）	酒粕歩合（%）
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50
7	40	60
8	30	70
9	20	80
10	10	90
11	0	100

２．２．３　官能評価

調製した糖化液の官能評価はセンター職員３名で、記述式で実施した。

２．３　発酵試験

２．３．１　発酵試験

原料（麦芽、酒粕）合計 2.7 kg、水 16 L、ホップ 51.6 g、ドライイースト５ g で発酵試験を行った。試験区一覧を表２に示す。糖化は 20 L の寸胴鍋で行い、発酵は 12 L 透明 PET 製発酵容器を用いた。発酵試験の手順は以下に記載のとおり。なお、発酵期間中は比重計による比重の測定と、蒸留法によりアルコール濃度を毎日測定した。

（１）65℃で 120 分糖化
（２）ホップを加えて 60 分煮沸
（３）濾引き後 30℃以下に冷却し乾燥酵母５ g 接種
（４）20℃で１週間発酵
（５）瓶内二次発酵後、官能評価を実施

表２　発酵試験区

試験区	麦芽歩合（%）	酒粕歩合（%）
1（control）	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50

２．３．２　官能評価

発酵液の官能評価はセンター職員と共同研究者計８名で実施した。コントロール（麦芽歩合 100%）を基準（3.0）とし、以下の項目について５段階評価で行った。

香り（１：良い⇔５：難あり）
味　（１：良い⇔５：難あり）
キレ（１：良い⇔５：難あり）
酒粕らしさ（１：強い⇔５：弱い）
総合評価　（１：良い⇔５：難あり）

２．４　実地醸造試験

共同研究先で実地醸造試験を行った。仕込配合は表３のとおり。その他の諸条件については各社の製造環境によるところもあるため一任した。

表３　実地醸造試験仕込配合

仕込条件	栃木ﾏｲｸﾛﾌﾞﾙﾜﾘｰ	ﾌｧｰﾏｰｽﾞﾌｫﾚｽﾄ	
		仕込１	仕込２
麦芽(kg)	6	25	25
酒粕(kg)	6	20	24
酒粕歩合(%)	50	45	49
ホップ(g)	100	50	50
酵母	エール	清酒	エール

２．５　糖分析

糖化液及び発酵液の糖（グルコース、スクロース、フルクトース、マルトース、マルトトリオース）含量は、衛生試験法･注解[1)]を参考に高速液体クロマトグラフ(島

津製作所製　Prominence）により分析した。試験溶液の調製は試料 5 mL を 10 mL メスフラスコに取り、エタノールで定容後、メンブレンフィルター（孔径 0.45 μm）でろ過し、ろ液を試験溶液とした。

２．６　香気成分分析

蒸留水で等倍希釈した糖化液及び発酵液を 3.0 mL 採取し、内部標準として 2.5%(v/v)ベンジルアルコール水溶液を 50 μL 加えたものを測定試料とし、DHS-GC/MS 法により測定した。前処理として 30℃に保温した試料を N_2 パージし、発生する揮発性成分を吸着管（Carbopack B&X）に捕集後、加熱脱着装置（Gerstel 社製 TDU2）付 DHS-GC/MS（Agilent Technologies 社製 5977B）に供した。加熱脱着装置の温度条件は、TDU:初期温度 30℃（0.3 min 保持）-昇温速度 720℃/min-到達温度 300℃(3 min)とし、CIS:-50℃（0.5 min）-720℃/min 昇温-210℃（20 min 保持)とした。GC/MS 条件は、カラム:DB-WAX(30 m,0.25 mm,0.25 um)、オーブン温度：40℃（5 min 保持）-昇温速度 10℃/min-到達温度 240℃（10 min 保持）、キャリアガス：He 1.6768 mL/min、トランスファーライン温度：240℃、イオン源温度：230℃、イオン化モード： EI、イオン化電圧：70 eV で測定を行った。得られたガスクロマトグラムのピークから、Aroma Office 2D（Gerstel 製）によりにおいを有する化合物のみを抽出してピーク面積値の平均値を算出した。その値を香りのキャラクターごとに積算して比較した。

３　結果及び考察

３．１　糖化試験

３．１．１　糖化温度

ビール醸造の工程は、麦芽の糖化を経て発酵工程へと移行する。作業性の観点から、糖化温度の違いが糖度に及ぼす影響を把握することは重要である。そこで、麦芽歩合 100%と麦芽歩合 70%（酒粕 30%）において、60℃、65℃、70℃の各温度で糖化試験を行った。結果を図１、図２に示す。麦芽歩合 100%では糖化温度が高いほど短時間で糖化が進むことが確認できた。30%酒粕を添加した場合でも、糖化温度が高いほど糖度が高くなり、同様の傾向を示したが、酒粕を添加することにより終濃度の糖度は低くなった。糖化温度 70℃では麦芽糖を生成する糖化酵素である β-アミラーゼの失活が進み、酵母が資化できないオリゴ糖が多くなるという報告[2)]があることから、共同研究者と協議の上、以後の試験は 65℃で実施することとした。

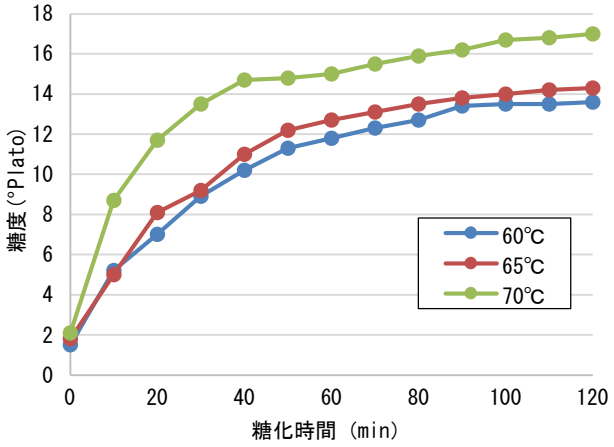


図１　糖化試験結果（麦芽歩合 100%）

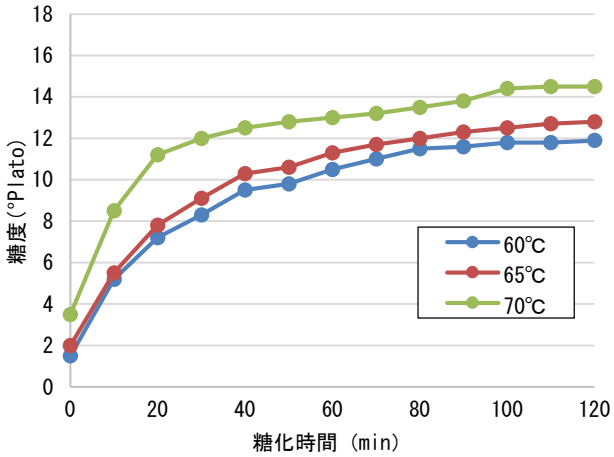


図２　糖化試験結果（麦芽歩合 70%（酒粕 30%））

３．１．２　麦芽歩合

酒粕を麦芽の代替として使用することで、酒粕由来のエキス分や成分が麦汁中に移行することが予想される。一方で、麦芽と比較してどの程度糖度が得られるのか、また香味成分にどのような特徴が現れるのかを把握することは重要である。そこで、麦芽歩合を変えた糖化試験の結果を図３に、成分値と官能評価結果を表４に示す。麦芽歩合が低下するほど糖度は低くなり、エキス分（糖度×液量）は麦芽歩合 40%以下で低下した。官能評価において、麦芽歩合 50%以下（酒粕歩合 50%以上）では粕臭や酸臭、酵母臭といったオフフレーバーが感じられた。糖度が 11 以上であれば、煮沸工程後に糖度を 12 以上（アルコール 5%相当）に調整できるため、以後の発酵試験については共同研究者と協議の上、糖度が 11 以上を確保できオフフレーバーが少ない No.②（麦芽歩合 90%）～No.⑥（麦芽歩合 50%）の条件にて実施することとした。

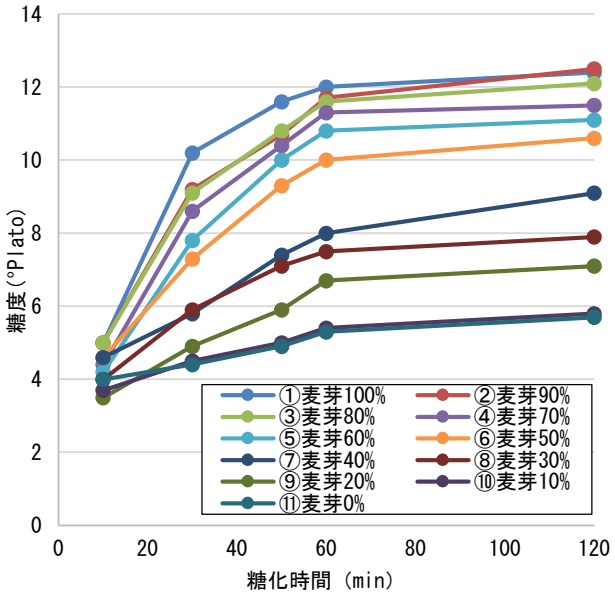


図３　麦芽歩合による糖化試験結果

表４　成分値と官能評価結果（糖化試験）

No	麦芽歩合(%)	糖度(°Plato)	液量(mL)	エキス分(L)※	官能評価
①	100	13.0	343	4.5	旨味
②	90	13.1	360	4.7	旨味、キレイ
③	80	12.7	360	4.6	キレイ
④	70	12.1	372	4.5	ｶﾙｲ、ｷﾚｲ
⑤	60	11.7	386	4.5	ｶﾙｲ、ｷﾚｲ
⑥	50	11.2	383	4.3	やや粕臭、ｳｽ
⑦	40	9.7	382	3.7	粕臭、やや酸臭
⑧	30	8.5	378	3.2	粕臭、酸臭
⑨	20	7.7	364	2.8	粕臭、酸臭
⑩	10	6.4	335	2.1	粕臭、酵母臭、酸臭
⑪	0	6.3	304	1.9	粕臭、酵母臭、酸臭

※糖度×液量

３．２　発酵試験

コントロールとして麦芽歩合 100%の区分も含めた発酵試験を行った。比重とアルコールの経過をそれぞれ図４、図５に示す。アルコール 5%の収得を目標に糖化液の初期比重を 1.048 に調整し、終了比重が 1.012 を下回ることを目標に実施した。いずれの試験区でも発酵過程における最終比重が 1.012 を下回り、アルコールも目標値である 5%以上となったことから、発酵は順調に進んだ。

官能評価の結果を表５に示す。香りについては麦芽歩合が高いと「モルト感」や「ホップ香」が強く感じられ、酒粕を添加することでエステル様（フルーティさ）が感じられた。香りの評価は各処理区ともコントロール（麦芽歩合 100%）と同等であった。味については麦芽歩合が高い方が評価はやや高くなった。キレに関しては、酒粕を添加することで全体的にクリアで、後味にキレが感じられる酒質となった。酒粕らしさについては、麦芽歩合が高いほど、酒粕らしさが少なくなり麦芽やホップの特徴が際立つ一方で、麦芽歩合 60%（酒粕歩合 40%）、麦芽歩合 50%（酒粕歩合 50%）では、脂肪酸臭や味のキレイさ、酸味、旨味が感じられる酒質となった。

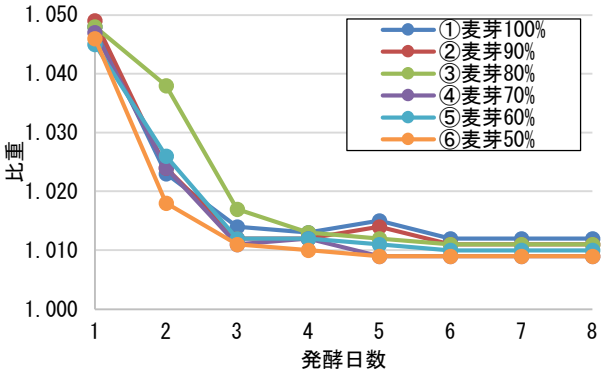


図４　麦芽歩合と発酵経過（比重）

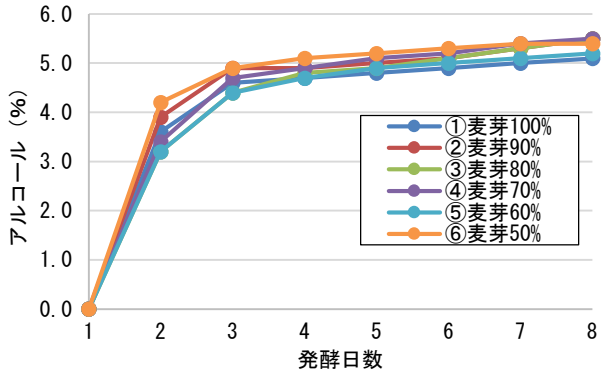


図５　麦芽歩合と発酵経過（アルコール）

表５　官能評価結果（発酵試験）

麦芽歩合(%)	香り	味	キレ	酒粕らしさ	総合評価	特徴
90	2.9	2.6	2.9	4.4	2.9	ﾓﾙﾄ感、ﾎｯﾌﾟ香
80	3.0	2.8	2.5	4.0	3.0	まとまる
70	2.8	3.1	2.5	3.4	2.8	ｷﾚ、ｷﾚｲ、ｳｽ、ｴｽﾃﾙ(ﾌﾙｰﾃｨ)、ﾏｲﾙﾄﾞ
60	3.0	3.1	2.6	3.3	2.9	ﾌﾙｰﾃｨ、やや脂肪酸、酸味、ｷﾚ、ｷﾚｲ、苦、旨味、味幅
50	3.0	3.3	2.8	2.8	2.6	ﾌﾙｰﾃｨ、脂肪酸、ｷﾚ、ｷﾚｲ、酸味、苦、旨味、余韻

３．３　糖組成

麦芽歩合を変え糖化試験を行った際の糖化液の糖組成を図６に示す。麦芽歩合が高い場合、マルトースやマルトトリオース、スクロースの割合が高く、麦芽歩合が低くなるにつれグルコースの割合が高くなることが分かった。これは酒粕中にグルコースに加えて、グルコアミラーゼやマルターゼといった糖化酵素が含まれているため、酒粕を添加することで麦汁中の主成分であるマルトースやマルトトリオース等が分解されているものと推察される。

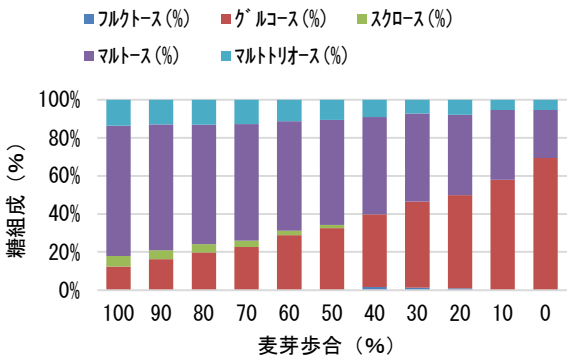


図６　酒粕糖化液の糖組成

発酵試験の発酵液について糖含量を測定した結果を図７に示す。麦芽歩合が高いとマルトースやマルトトリオースが発酵液中に残るが、麦芽歩合が 70%以下（酒粕歩合 30%以上）ではこれらの残糖が少なくなる結果となった。米麹の麹甘酒からは糖化が進んだ影響でマルトトリオースが検出されないという報告[3)]がある。この現象を考察すると、酒粕の添加により酒粕中に含まれる糖化酵素の働きにより糖化液中のマルトースやマルトトリオースの分解が促進されることに加え、酵母が二糖類であるマルトースや三糖類であるマルトトリオースよりも、単糖であるグルコースを資化しやすいため[4)]と推察される。この糖含量の低さが、官能評価における後味のキレの良さに繋がっているものと推察される。

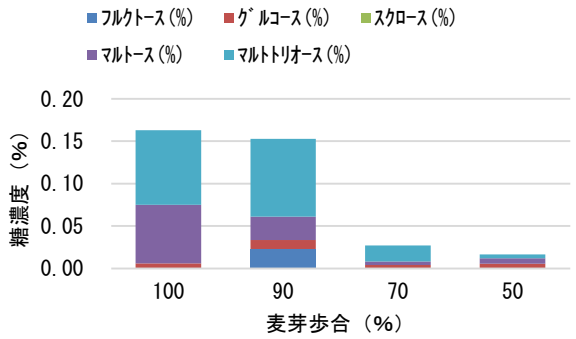


図７　酒粕発酵液の糖含量

３．４　香気成分

糖化試験の糖化液及び発酵試験の発酵液について、香気成分を測定した。酒粕の特徴的な香り成分として、果実香や脂肪酸臭が確認された。果実香及び脂肪酸臭の香り強度をグラフ化した結果を図８に示す。果実香及び脂肪酸臭は麦芽歩合 100%の発酵過程でも生成されるが、酒粕糖化液中での強度が高く、酒粕歩合が高くなるほど強度が高くなることが分かった。このことから、酒粕からこれらの香気成分が発酵液中に移行しているものと推察された。

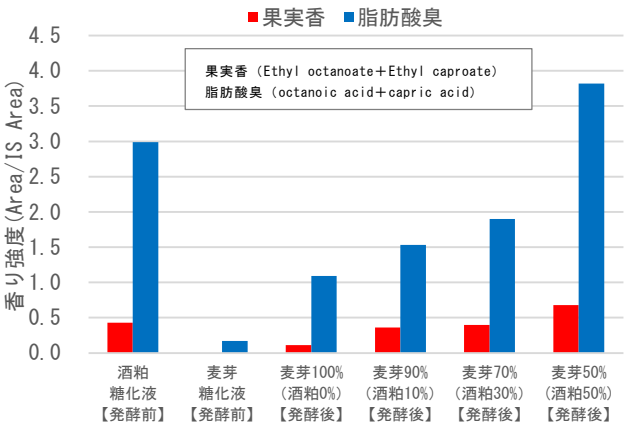


図８　香気成分測定結果

３．５　実地醸造試験

共同研究先２社の仕込データと比重経過について、それぞれ表６及び図９に示すとともに、仕込工程における製造現場の所感を表７に示す。製造現場の所感として、作業工程に大きな支障はなく、各社の製造設備環境に合わせて対応できることが分かった。共同研究者とセンター職員で酒質を評価した結果、栃木マイクロブルワリーのエール酵母を使用した実地醸造酒では以下の特徴が見られた。

① 外観はクリアで透明感がある。
② 香りは粕っぽさを感じず、丸くフルーティ。
③ 味はキレイで適度な苦味があり、後味に旨味を感じる。

ファーマーズ・フォレストでは、清酒酵母及びエール酵母を使用した実地醸造酒について以下の特徴が見られた。

（清酒酵母）
① 外観はクリア。
② 香りは華やかで甘い香り、やや脂肪酸臭。
③ 味はキレが良く、日本酒のニュアンスが感じられ、旨味あり。

（エール酵母）
① 外観はクリア。
② 香りはフルーティ。
③ 味はシャープでキレが良く、米感を感じる。旨味あり。

表６　実地醸造試験仕込データ

	栃木ﾏｲｸﾛﾌﾞﾙﾜﾘｰ（エール酵母）	ﾌｧｰﾏｰｽﾞﾌｫﾚｽﾄ１（清酒酵母）	ﾌｧｰﾏｰｽﾞﾌｫﾚｽﾄ２（エール酵母）
糖化温度（℃）	62.0	62.9	61.8
糖化時間（分）	70	75	120
煮沸時間（分）	65	100	100
初期麦汁糖度（°Plato）	11.4	11.6	11.7
発酵温度（℃）	23	13	20
発酵日数（日）	5	7	7
アルコール（%）	4.3	6.0	5.8

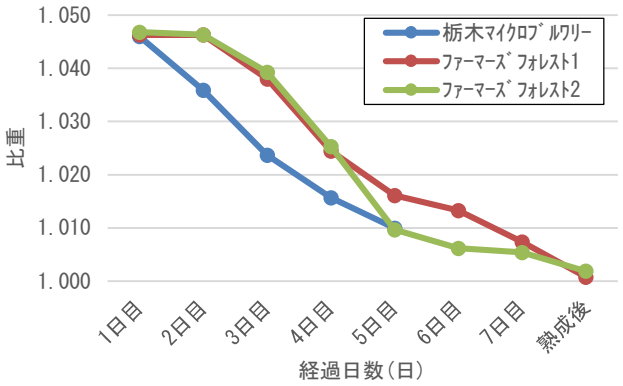


図９　実地醸造試験の比重経過

表７　製造現場の所感

○栃木マイクロブルワリー ・糖化工程は問題なく進行し、麦汁ろ過はやや濁り気味になるものの、煮沸で澱下げが可能。 ・発酵工程において不具合はなく、通常通りの作業が可能。 ・発酵は旺盛で、比重のキレが早く、試作品はクリアで透明度が高い。 ・酒粕は麦芽換算で 50%程度のエキス分が出る。
○ファーマーズ･フォレスト ・麦汁ろ過時に濾層の粘度が高く、濾液回収率が悪い。酒粕の使用割合を少し減らした方が良い。 ・発酵経過に問題はなく、比重がよくキレる。 ・酒粕中の酵素の影響か、発酵度が通常 83%のところ 96%に達する。 ・試作品はクリアで透明度が高い。 ・酒粕は麦芽換算で 30%程度のエキス分が出る。

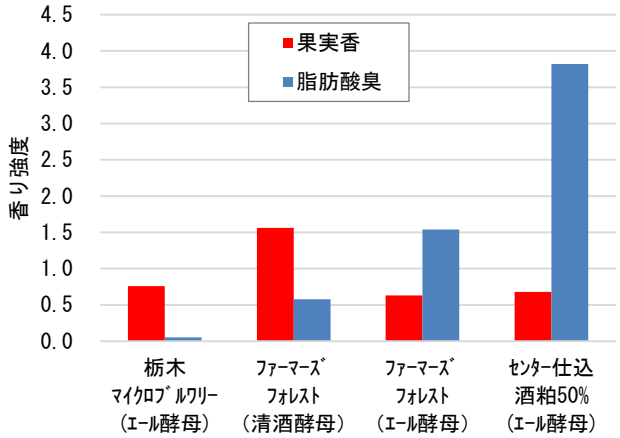


図 10　実地醸造試験における香気成分分析結果

香気成分の分析結果を図 10 に示す。実地醸造酒における酒粕の特徴香である果実香と脂肪酸臭を分析したところ、発酵試験時と同様にこれらの成分が検出された。果実香は清酒酵母を使用することでより高まることが分かった。また、脂肪酸臭は実地醸造においてセンターで実施した発酵試験時よりも低くなった。これは使用する原料や酵母、醸造設備の違いに起因するものと考えられ、酒質としてはよりプラスになるものと考える。

4　おわりに

吟醸粕（黒粕）のクラフトビールへの利用を検討し、以下の知見を得た。また本研究によりビール等の製造において酒粕の利用が可能であることが分かった。今後は、地域の酒造メーカーとクラフトブルワリーとの連携を促進し、酒粕の割合やタイプの違いによる商品企画支援を通じて、酒粕の利用拡大を目指したい。

(1) 糖化試験の結果、麦芽歩合が低下する（酒粕歩合が高くなる）ほど糖化後の糖度が低くなり、特に麦芽歩合 40%以下（酒粕歩合 60%以上）では低くなった。また糖化温度 65℃、麦芽歩合 50%以上の条件で糖度 11 を確保できた。

(2) 発酵試験の結果、麦芽歩合 50%以上（酒粕歩合 50%以下）の条件でアルコール 5%以上を収得し、発酵は順調に進行した。酒質に関しては、酒粕歩合が高くなるにつれてエステル様の香り（フルーティさ）や後味にキレが感じられ、酒粕歩合が高い条件（酒粕歩合 40%,50%）では脂肪酸臭や味のキレ、酸味、旨味が感じられた。香気成分分析の結果、果実香や脂肪酸臭が検出され、これらが酒粕の特徴的な香りであると推察された。

(3) 実地醸造試験の結果、一部濾過に時間がかかるものの、糖化工程や発酵経過に問題は見られなかった。酒質としては懸念された粕臭や酵母臭は感じられず、クリアでキレが良く、後味に旨味が感じられた。また、特徴的な香りとして果実香や脂肪酸臭が感じら、酒粕から移行しているものと推察された。

(4) 酒粕糖化液には、麦芽単体で糖化した場合と比較してグルコースが多くなることが分かった。発酵試験でも発酵液中の残糖が少なくなることから、これが酒粕を添加した際の味のキレに繋がっているものと推察された。

(5) 味のキレやフルーティな香りなど酒粕を添加した際の特徴は、酒粕の成分や残存する酵素の影響によるものと推察された。

参考文献

1) 公益社団法人日本薬学会編：”衛生試験法・注解”，金原出版株式会社,(2015)

2) 日下一尊：”砂糖類・でん粉情報 2017.2. ビール系酒類とでん粉”
https://www.alic.go.jp/content/000134378.pdf

3) 倉橋ら：”麹甘酒に含まれる成分について”，日本醸造協会誌，2017.10，112(10)，668-674

4) 久松ら：“岐阜県内から採取された酵母のビール醸造評価（第 2 報）”，岐阜県食品研究所研究報告，2023，7，23-24

Ⅱ 共同研究

Cooperative Research

共同研究

加速度センサと切削シミュレーションを用いたリアルタイム工具摩耗モニタリングシステムの開発（第２報）

山下　健介*　　近藤　弘康*　　荒井　辰也*
松本　義則**　　松本　アサイ**　　松本　知之**　　金子　和暉***

Development of Real-time Tool Wear Monitoring System by using Accelerometer and Cutting Simulation (2nd Report)

YAMASHITA Kensuke, KONDO Hiroyasu, ARAI Tatsuya,
MATSUMOTO Yoshinori, MATSUMOTO Asai, MATSUMOTO Tomoyuki and KANEKO Kazuki

本研究では、エンドミルを用い形状違い製品の加工に対応したリアルタイム工具摩耗モニタリングを実現するため、加速度を用いた切削シミュレーションの検証及び加速度と切削力の関係の評価を行い、形状違い製品の加工をモニタリングする手法を検討することで、リアルタイム工具摩耗モニタリングシステムの開発を行った。その結果、切削方向により加速度と切削力の関係が変化することや、軸方向及び半径方向切込みを変更しても加速度と切削力の関係式は大きくは変わらないことが分かった。さらに、このシステムを用いて、実際の製品加工を行った結果、形状違い製品の加工においても工具摩耗の比較ができ、形状違い製品の加工に対応したリアルタイム工具摩耗モニタリングシステムを実現した。

Key words:　エンドミル加工、切削力、加速度センサ、切削シミュレーション、工具摩耗監視

１　はじめに

航空機部品に用いられるチタン合金やステンレス鋼は工具寿命が著しく短く、部品製造コストにおける工具費が高いという課題がある。加工現場では工具交換タイミングを設定しているが、工具の個体差等により寿命にバラツキが生じるため、実際の工具寿命に応じた対応が出来ていない現状がある。そのため、実際の工具寿命に応じた工具交換を実現するため、工具摩耗の見える化に向けた新技術開発が求められている。

このニーズに対応するため、栃木県産業技術センター及び㈱マツモトセイコーで加速度センサを用いたインプロセス工具摩耗監視システムを開発した[1)]が、現在のシステムにおける摩耗監視が可能な対象は被削材形状、製品形状、切削条件が同一の製品に限られるため、少量多品種の生産における工具摩耗を監視するためには形状違い製品への対応が必要である。

そこで本研究では、加速度を用いたインプロセス工具摩耗監視システムと主軸モータトルクを用いたリアルタイム切削シミュレーション[2)]を組み合わせ、実加工から得られる加速度から切削力を推定し、形状違い製品の加工に対応したリアルタイム工具摩耗モニタリングシステムの開発を目指す。

本報告では、加速度を用いた切削シミュレーションの検証及び加速度と切削力の関係を評価し、形状違い製品の加工をモニタリングする手法を検討することで、リアルタイム工具摩耗モニタリングシステムの開発を行った。

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊　株式会社マツモトセイコー
＊＊＊ 岡山大学

２　研究の方法

２．１　加速度を用いた切削シミュレーションの検証

金子らが開発したリアルタイム切削シミュレータは主軸モータトルクとシミュレーションで推定したトルクを比較し切削係数を算出することで切削力を予測できる[2)]。一方、栃木県産業技術センター及び㈱マツモトセイコーで開発したシステムは加速度の比から工具摩耗に伴う切削力変動を推定している[1)]ため、工具摩耗と製品形状の違いによる切削力変動を分離できない。そこで、加速度から切削力を推定し切削係数を同定することで、形状違い製品の加工における工具摩耗を推定するシステム開発を行うため、リアルタイム切削シミュレータの入力データを主軸モータトルクから加速度へ変更し

検証を行った。

加速度から切削力を推定する換算式を算出するため、マシニングセンタ（森精機製作所 NV5000α1A/40）を用いて、切削動力計（日本キスラー　9257B）に固定したSUS630 被削材（70×70×50　mm）とバイスに固定したSUS630 摩耗試験材（500×53×50 mm）（図１）に対して、表１の工具・切削条件で水溶性切削液を用いて摩耗試験を行い、主軸モータトルクと主軸に設置した加速度センサで加速度を取得した。なお切削力は、切削長 0～1 m は 0.5 m 毎、1～4 m は 1 m 毎、4～20 m は 2 m 毎に測定した。

換算式の算出は切削力と摩耗試験材切削開始時の加速度を、バンドパスフィルタ処理を行い、加速度は１切込み毎の絶対値の最大値平均、切削力は１切込み毎の最大最小幅の平均値を用い比較を行った。

シミュレーションの検証のため、算出した換算式を用い摩耗試験材切削時の主軸モータトルクと加速度を入力データとして、それぞれ切削シミュレーションを実施し比較を行った。

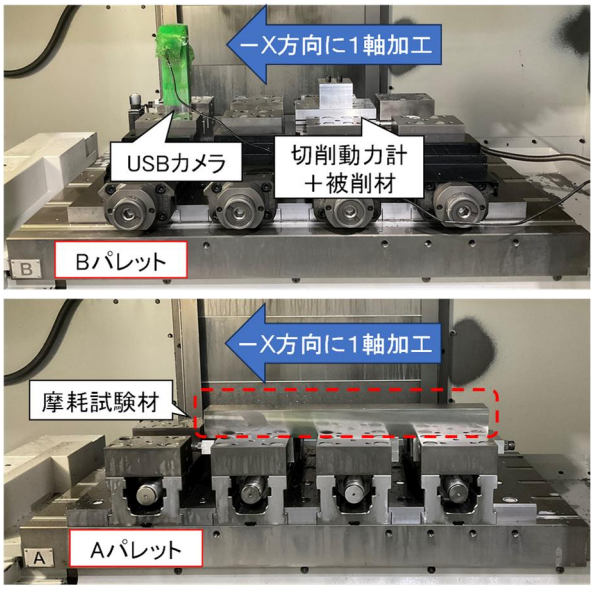


図１　実験段取り
（上：切削動力計、下：摩耗試験材）

表１　工具・切削条件

工具	径	16 mm
	形状	ラフィングエンドミル
	ねじれ角	30°
	コーティング	AlTiSiN-AlCrSiN
	母材	超硬
	刃数	４枚刃
切削条件	切削速度	50.22 m/min
	１刃送り	0.045 mm/tooth
	軸方向切込み	7.0 mm
	半径方向切込み	4.0 mm

２．２　切削方向による加速度と切削力の関係

実製品は形状や加工パスによって切削方向が変動することから、切削方向による加速度と切削力の関係を評価する必要があるため、マシニングセンタ（森精機製作所 NV5000α1A/40）を用いて、切削動力計（日本キスラー　9257B）に固定した円筒形状の SUS630 被削材（φ75×50 mm）に対して、円加工を行い、加速度と切削力の関係を評価した（図２）。工具は表１のとおりとし、切削条件は、切削速度 50.22 m/min、１刃送り 0.045 mm/tooth、軸方向切込み 7.0 mm、半径方向切込みは 4.0,7.0 mm の２条件とし、水溶性切削液を用いて試験を行った。

２．３　切込み変更による加速度と切削力の関係

実製品は形状や加工パスによって軸方向切込み及び半径方向切込みが変動することから、切込みによる加速度と切削力の関係を評価する必要があるため、３軸マシニングセンタ（安田工業 YBM-640V3）を用いて、切削動力計（日本キスラー　9257B）に固定した SUS630 被削材（70×70×50 mm）に対して、表１の工具、表２の切削条

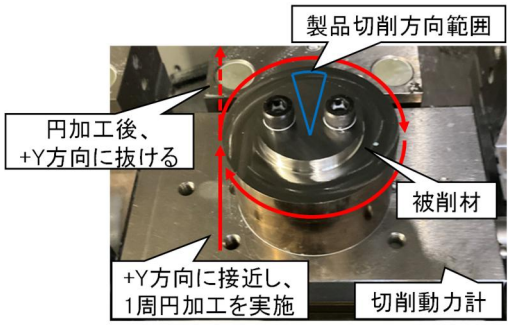


図２　切削動力計・被削材（円加工）

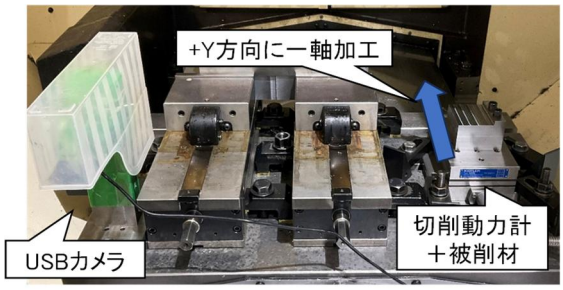


図３　実験段取り（切込み変更試験）

表２　切削条件

切削条件	切削速度	50.22 m/min
	１刃送り	0.045 mm/tooth
パターン A	軸方向切込み	6.25,6.5 mm
	半径方向切込み	9.0,10.0,11.0, 12.0,13.0,14.0 mm
パターン B	軸方向切込み	7.0 mm
	半径方向切込み	1.0,2.0,4.0,6.0, 8.0,12.0,15.5 mm

件で水溶性切削液を用いて切込み変更試験を行い、加速度と切削力の関係を評価した（図３）。

２．４　形状違い部品のリアルタイム工具摩耗モニタリングシステムの開発

２．１～２．３の結果を踏まえ、形状違い製品の加工をモニタリングする手法を検討するとともに、リアルタイム工具摩耗モニタリングシステムの開発を行った。

２．５　実証試験

開発したシステムの実証のため、マシニングセンタ（森精機製作所 NV5000α1A/40）を用いて、主軸に設置した加速度センサで加速度を取得しながら実製品の荒加工を行った。

被削材は析出硬化系ステンレス、工具は表１のとおりとし、切削条件は、切削速度 50.22 m/min、1 刃送り 0.045 mm/tooth で水溶性切削液を用いて試験を行った。なお、軸方向切込みと半径方向切込みは製品形状や加工パスに応じて変化する。

今回実証試験の対象とした形状は全 10 種類中の３種類であり、個数の内訳は形状 A　３個、B　５個、C　５個とした。なお加工現場では形状に依らず 10 個で工具交換を行うため、C は１個加工毎に現場オペレータが工具刃先の状態を確認しながら試験を進めた。

３　結果及び考察

３．１　加速度を用いた切削シミュレーションの検証

入力データを主軸モータトルクから加速度へ変更するため、主に以下の２点を変更し加速度を用いた切削シミュレーションを検証した（図４）。

・加速度を切削力に換算する機能
・実平均切削力と推定平均切削力の差から切削係数を算出する機能

比較した加速度と切削力の関係を図５に示す。加速度と切削力は線形性が良い結果が得られたため、近似直線である「y=0.002052x-0.6239」を切削力の換算式とした（x：切削力[N]、y：加速度[m/sec²]）。

得られた換算式を用い、摩耗試験材切削時の主軸モータトルクと加速度を入力データとして、切削シミュレーションを実施した結果を図６に示す。

その結果、トルクと加速度シミュレーションともに切削長の増加に伴い、工具摩耗による切削力増加の傾向が得られた。

加速度結果の切削長 0.5, 7, 13.5, 20 m については、摩耗試験材の段取り替え時の被削材端面（手前）の切削であり、工具の底刃の一部しかが当たらない（工具径 16 mm に対し半径方向切込み ae=4.0 mm）ため加速度が大きくなり、切削長 6.5, 13, 19.5 m は、段取り替え前の切り残し（奥）であり、切り残した立壁の影響により加速度が小さくなるため、シミュレーションから出力される切削力にも影響が出たと考えられる。なお、実際の製品加工では工具径に対して切込みが大きく（半径方向切込み ae=約 9～13 mm 程度）、工具の底刃が半分以上当たることや立壁が残る加工ではないことから影響は少なく補正は必要ないと考えられる。

また、加速度は幅 500 mm の摩耗試験材を加工中に値が右肩下がりに変動している。これは加工位置により加工機の振動特性が変化したためと考えられ、実製品の加

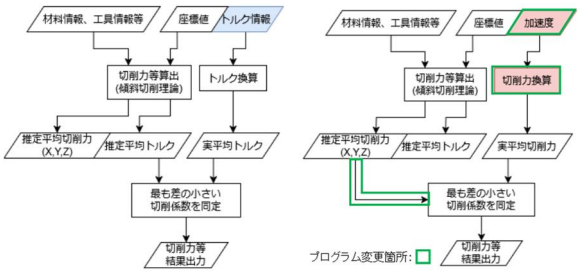


図４　簡略版プログラムフロー
（左：トルク、右：加速度）

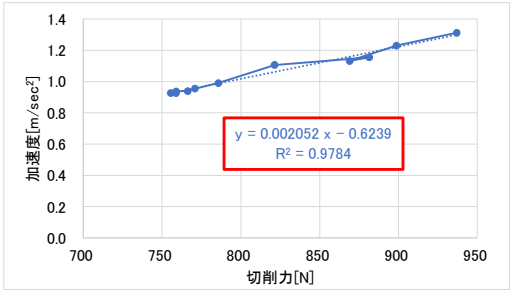


図５　加速度と切削力の関係

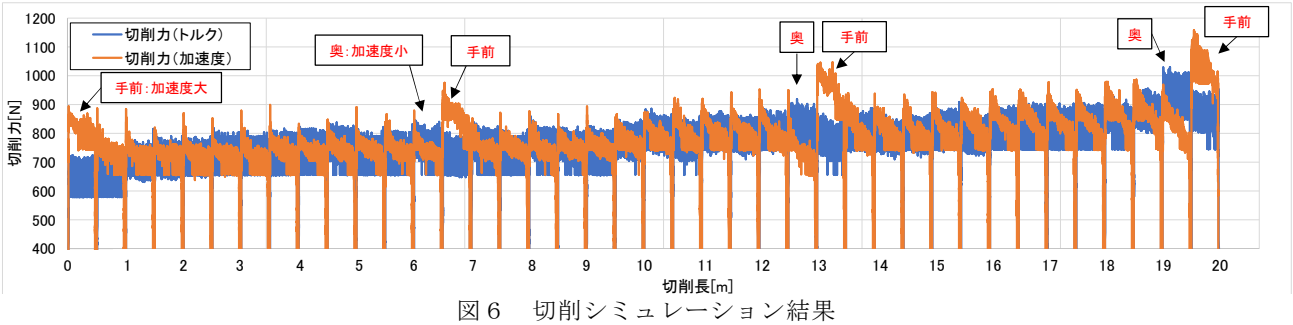


図６　切削シミュレーション結果

工時に異なる位置で切削力を比較する場合は加工位置における補正が必要になると考えられる。

加えて、トルク結果の切削長 13.5,19,19.5 m については、前後の結果と比較して値が変動している。これは、工具摩耗の影響ではなく、連続運転による発熱等の影響により主軸モータの摩擦係数が変化し主軸モータトルクが変動したためと考えられる。

３．２　切削方向による加速度と切削力の関係

円加工における加速度と切削力を比較した結果を図７、８に示す。なお、各図における切削方向は、加工開始点を 0 deg、加工終了点を 360 deg とした。

その結果、半径方向切込みと切削方向により加速度と切削力の関係が変化することが分かった。なお、本研究対象の製品は加工パスによって切削方向が異なり、75～105 deg 範囲内にある。また、形状違い部品の切削条件を網羅する形で補正式を算出することができれば、切削方向の補正は可能ではあるが、加工現場で製品毎に補正式を作成することは現実的ではない。そのため、今回の研究では切削方向の補正は見送り、形状違い製品毎の加工パスから切削方向が近いパスを選定し比較することとした。

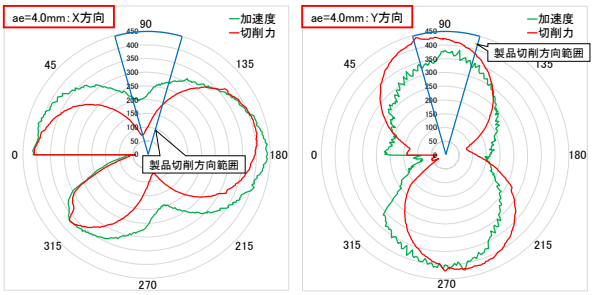


図７　円加工における加速度と切削力の関係
（ae=4.0 mm）左：X方向、右：Y方向

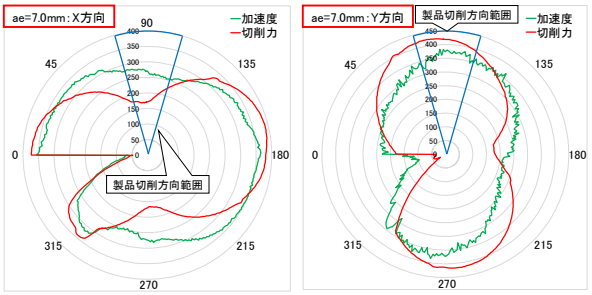


図８　円加工における加速度と切削力の関係
（ae=7.0 mm）左：X方向、右：Y方向

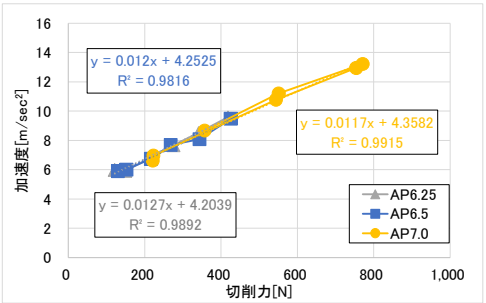


図９　切込み変更における加速度と切削力の関係

３．３　切込み変更による加速度と切削力の関係

切込み変更における加速度と切削力を比較した結果を図９に示す。

その結果、すべての条件において線形性が良い結果になった。今回の切削条件では切込みを変更しても、加速度と切削力の関係式は大きく変わらないため、形状違い製品の加工においても同じ関係式を使用できると考えられる。

３．４　形状違い部品のリアルタイム工具摩耗モニタリングシステムの開発

切削シミュレーションは加工機のトルクや各軸の座標値などの情報を取得可能なソフトウェア（ファナック SERVO VIEWER）を用い、主軸モータトルクと各軸の座標値のデータを取得している。SERVO VIEWER を用いてデータを取得する場合は、一度 CSV ファイル等に変換する必要があり、インプロセスでのデータ処理が難しい問題があるため、主軸モータトルクと各軸の座標値のデータを取得可能なライブラリ（ファナック FOCAS）を使用し、栃木県産業技術センター及び㈱マツモトセイコーで開発した加速度センサを用いたインプロセス工具摩耗監視システムと組み合わせ、形状違い製品の加工に対応したリアルタイム工具摩耗モニタリングシステムを開発した。システム構成を図 10 に示す。

当システムは、加工機主軸の X･Y 方向に設置した１軸加速度センサの MEMS 素子搭載振動ピックアップ（IMV VP-8021A）から出力された加速度（電圧値）をデータロガーの SENSPIDER（マクニカ SSP-1000）を介して、開発ソフトウェアに直接取り込み、加工機の座標値は FOCAS を用い無線接続で取り込んでいる。

データ処理プロセスについては、図 11 のとおり、加速度は０点補正、バンドパスフィルタ処理、１切込み毎の絶対値最大値を算出後、実平均切削力に換算する。並

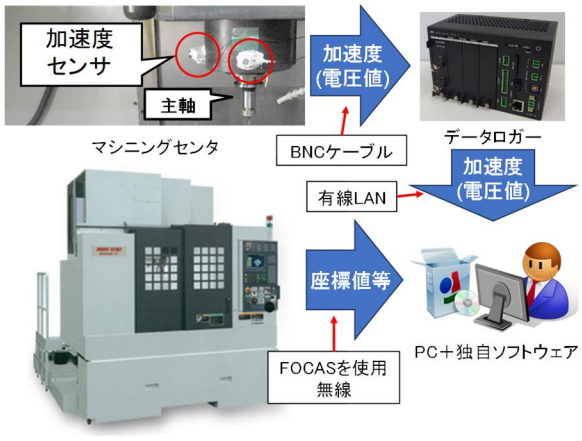


図 10　システム構成

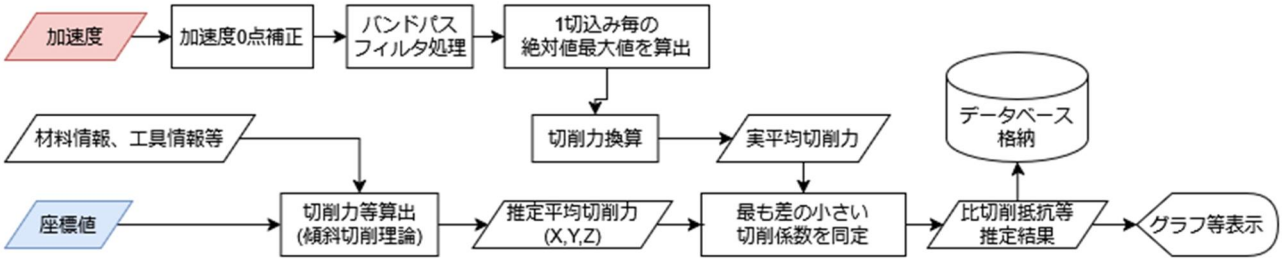


図 11　データ処理プロセス

列で材料や工具情報等とFOCASを用いて取得した加工機の座標値から推定平均切削力を算出し、加速度から換算した実平均切削力と最も差の小さい切削係数の同定を行い結果出力する。なお、形状違い製品の加工の場合、切削力は形状により大きさが変わり単純な比較が出来ないため、切削係数として同定された比切削抵抗 Ktc（主分力を切削断面積で除した値）を結果として出力する。

開発したソフトウェアの外観を図 12 に示す。また、現場利用での利便性向上のため、当ソフトウェアは以下の機能を実装した。

・工具情報や被削材形状等が格納されたパラメータファイルの読み込み
・過去の評価結果が格納されたデータベースファイルの読み込み
・NC プログラム番号を読み取り、シミュレーションに必要な被削材形状等の情報を自動設定する機能
・自動でデータ収集を開始できるトリガ機能
・評価結果のグラフ表示
・閾値を用いた摩耗状態表示
・評価結果のデータベース化及び CSV 出力

これらの機能を実装することにより、事前にパラメータファイルを作成し、モニタリングを行う NC プログラムにトリガ命令を追記すれば、オペレータが直接 PC に触れることなく工具摩耗モニタリングを実現出来ると考えられる。

３．５　実証試験

３．１～３．３の結果から、実製品をモニタリングするためには、位置や切削方向による加速度と切削力の関係を評価する必要があるが、切削方向をすべて補正するのは難しいことが分かった。そこで実製品の類似の加工パスの中から、切削方向と位置が近い加工パスを抽出し、工具摩耗モニタリングが可能か検証することとした。なお、切削方向は X 方向に近い領域に分布しており、側面切削では、工具進行方向の垂直方向に最も大きい切削力（主分力）が発生するため、Y 方向の加速度のみ用いた。

加工個数に対するシミュレーション結果の比切削抵抗 Ktc を図 13 に示す。

その結果、トルク及び加速度ともに加工個数増加に伴い、比切削抵抗は増加していることが分かる。形状 A がトルク結果に比べ値が異なるが、全体的な傾向は概ね一致しているため、開発システムは形状違い製品の加工においても工具摩耗モニタリングを実現できると考えら

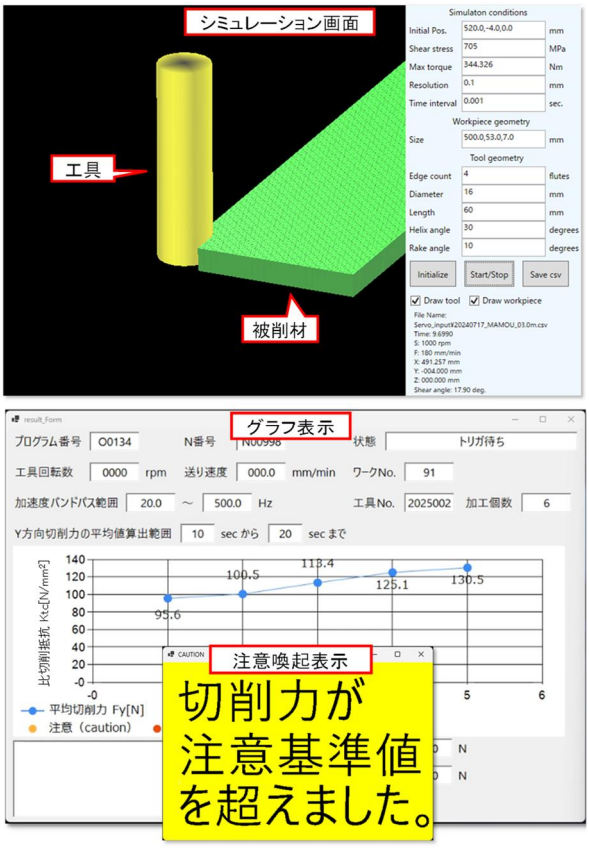


図 12　ソフトウェア外観

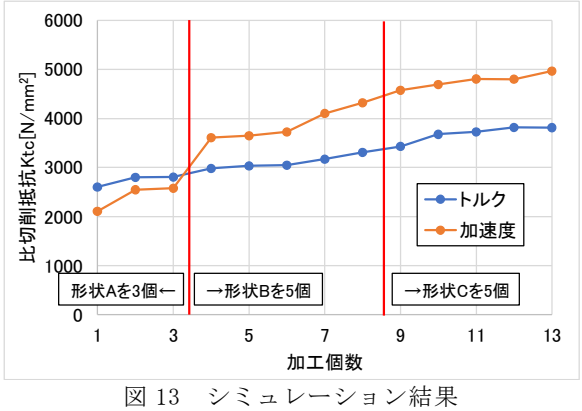


図 13　シミュレーション結果

れる。

形状Aの値が異なる要因は、形状Aは他の形状に比べサイズが大きく切削位置が異なり、加工位置による加速度の補正を行っていないため、加速度を切削力換算した際の切削力が過小評価され、比切削抵抗が小さく評価されたと推察される。また、形状B及びCの加工の際に、比切削抵抗がトルク結果に対し全体的に大きい値になっている要因としては、シミュレーションの切削係数同定の際に、主軸モータトルクは回転方向の力であるため半径方向の力は情報として得ることが出来ない。そして、加速度はY方向のみ今回利用しているため、トルクと加速度の結果が異なった可能性がある。

なお、３．１の結果から主軸モータトルクは連続運転等により値が安定しない課題があるため、今後の展望として、加速度における切削力推定に影響を与える要因を排除すれば、トルクよりも高精度な工具摩耗監視を実現出来ると考えられる。

４　おわりに

本研究では、加速度を用いた切削シミュレーションの検証及び加速度と切削力の関係を評価し、形状違い製品の加工をモニタリングする手法を検討することで、リアルタイム工具摩耗モニタリングシステムの開発を行うことで、以下の知見が得られた。

(1) 切削方向により加速度と切削力の関係が変化する。

(2) 軸方向及び半径方向切込みを変更しても、加速度と切削力の関係式は大きくは変わらない。

(3) 開発システムを用いて、実際の製品を加工した結果、トルクと加速度のシミュレーション結果は概ね一致し、形状違い製品の加工における工具摩耗モニタリングを実現した。

謝　辞

本研究は公益財団法人栃木県産業振興センターが実施する令和５、６年度オープンイノベーションプロジェクト支援補助金の支援により進めた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 近藤 弘康ほか: ″栃木県産業技術センター研究報告″, 20, 1-9, (2023)

2) 金子 和暉ほか: “精密工学会誌”, 86(9), 708-713, (2020)

共同研究

大谷洞窟熟成生ハムの高品質化に関する研究

伊藤　和子*　　益子　朱音*　　大森　悠嘉**　　蒲地　誠**

Research on Improving the Quality of Oya Cave-aged Dry-cured Ham

ITOH Kazuko, MASHIKO Akane, OMORI Yuka and KAMACHI Makoto

生ハム製造における新たな工程（バキュームパック熟成）を加えた大谷洞窟熟成生ハムを試作し、確立した味・香り分析方法及び遊離アミノ酸分析により、熟成の最適条件を検討した。真空・脱気・脱気（脱酸素剤）の３つのバキュームパック熟成方法のうち、真空条件のみが熟成可能と考えられ、熟成期間については、おいしさ分析と官能評価結果から、モモは60日以上の熟成、ロースとバラは90日熟成が適すると思われた。熟成につれて、旨味関連アミノ酸はあまり変化がなかったが、甘味関連アミノ酸及び遊離アミノ酸総量は増加する傾向を示した。また、熟成により香り成分の多様化・複雑化がみられ、大谷洞窟熟成生ハムのおいしさに寄与していると考えられた。

Key words:　生ハム、バキュームパック熟成、味覚センサー、香気分析、遊離アミノ酸分析

１　はじめに

ヨーロッパの生ハムは数ヶ月～数年間熟成して製造されているが、国内では短期熟成が主流であり、熟成による旨味や香りが少ない製品になっている。滝沢ハム(株)では大谷洞窟を利用した熟成に取り組んでおり、独特の香りの付与に成功している。現在、新たな工程（バキュームパック熟成）を加え、海外の長期熟成生ハムの風味に近づけることで、さらなる高付加価値化を目指している。そこで、生ハムの味・香りを評価するための分析条件を検討し、確立した方法により分析を行い生ハムの最適な加工熟成条件を決定するとともに、そのおいしさを見える化して、数値に裏付けされた高品質短期熟成生ハムを開発することを目的として研究を行ったので報告する。

２　研究の方法

２．１　生ハム

滝沢ハム(株)における熟成前及びバキュームパック熟成後の生ハムを供した。生ハム原木は大きいため、モモ・ロース（リブ側・ヒレ側）・バラ（頭側・モモ側）の５部位に分けて評価した（図１）。

２．２　バキュームパック熟成

生ハム原木を第１漬け込み（塩漬け）、第２漬け込み（ピックル液）処理及び低温スモーク後、新たな製造工程であるバキュームパック熟成を行った。真空・脱気・脱気（脱酸素剤）の３つの方法を実施した。その後包装から取り出し、大谷洞窟にて吊して乾燥熟成を行い、燻製処理後、スライスして測定に供した。

２．３　比較サンプル

ハモンセラーノは、スペインにおいて乾燥状態でモモの部分を７ヶ月から 36 ヶ月にわたって熟成し、高品質な味と香りを実現していることから、熟成による変化を知るための比較サンプルとした。なお、今回は 14 ヶ月熟成したものを用いた。

２．４　味の分析

２．４．１　試料調製方法

生ハム 25 g に 40℃に保温した 225 g の蒸留水を加えて、フードプロセッサーで１分間粉砕したサンプルを高速冷却遠心機（Hitachi 製）で 10,000 rpm・５分間遠心分離し上清を採取した。その上清をフィルターでろ過し測定サンプルとした。旨味先味の検討は、1/3 に希釈した味覚センサー用基準液により、測定サンプルを２～512 倍まで倍々希釈した液について旨味センサーで測定を行った。

２．４．２　機器測定

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

＊　栃木県産業技術センター　食品技術部
＊＊　滝沢ハム株式会社

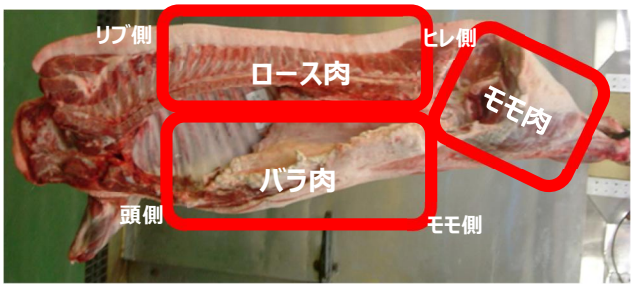


図１　生ハムサンプル採取部位

２．５　香りの分析

２．５．１　試料調製方法

分析まで冷凍保存していた生ハムを解凍後細断し、5 g（BXX2・TX 法）又は 0.1 g（FEDHS・MVM 法）を測定試料とした(N=2)。測定試料の脂部分の比率が全体の脂部分の比率と同じになるように採取した。

２．５．２　機器測定

DHS-GC/MS 法により行い、各測定試料を N_2 パージして香気成分の各吸着管(Carbopack B&X, ShincarbonX 及び Tenax TA)への吸着を行った。さらにその吸着管を 30℃下で 50 mL/分の流速で所定時間ドライパージを行い、加熱脱着装置（Gerstel 製 TDU2）付 DHS-GC/MS（Agilent Technologies 製 5977B）に供した。

加熱脱着装置の温度条件は、TDU:初期温度 30℃(0.3 min 保持)-昇温速度 720℃/min-到達温度 300℃(3 min)とし、CIS:-50℃(0.5 min)- 720℃/min 昇温-210℃(20min 保持)とした。GC-MS 条件は、カラム:DB-WAX(30 m,0.2 5 mm,0.25 um)、オーブン温度：40℃(5 min 保持)-昇温速度 10℃/min-到達温度 240℃(10 min 保持)、キャリアガス：He 1.6768 mL/min、トランスファーライン温度：240℃、イオン源温度：230℃、イオン化モード：EI、イオン化電圧：70 eV で測定を行った。得られたガスクロマトグラムのピークから、Aroma Office 2D（Gerstel 製）によりにおいを有する化合物のみを抽出してピーク面積値の平均値を算出した。その値を香りのキャラクターごとに積算して比較した。

２．６　遊離アミノ酸の分析

２．６．１　試料調製方法

生ハムを細断して 5 g を採取（脂部分は除去）し、3%スルホサリチル酸溶液 20 mL を数回に分けて添加し磨砕した。超音波洗浄装置に氷水を入れ、その中で磨砕後のサンプルについて 15 分間超音波抽出を行った。その後、高速遠心機にて 15,000 rpm・5℃・10 分間遠心分離し、上清を採取した。上清を等量の蒸留水で希釈し、0.45 μm のフィルターでろ過した。

２．６．２　機器測定

高速アミノ酸分析計（日本電子㈱製　JLC-500V）にて測定した。

２．７　微生物検査

食品衛生検査指針[1]に準じて実施した。

２．８　官能評価

滝沢ハム(株)職員 15 名で実施し、特においしい・おいしい・普通・苦手のうちあてはまるものを記入する方法で行った（複数選択可）。

３　結果及び考察

３．１　生ハムの味・香り分析条件の確立

３．１．１　旨味先味測定方法の検討

1/3 に希釈した味覚センサー用基準液により測定サンプルを２～512 倍まで倍々希釈した液について旨味センサーで測定を行った代表的な結果を図２に示す。

直線性が認められる部分の中央値として、20 倍希釈が最適と考えられたため、旨味先味測定にはこの方法を採用することとした。

３．１．２　香り測定方法の検討

生ハム熟成前のサンプルを用いて、BXX2（トップ/ミドルノート）・TX（ミドル/ベースノート）及び FEDHS（不揮発性成分）の香気成分を比較した（図３）。その結果、TX で検出される fruity な香りと FEDHS で検出される fatty な香りが、生ハムの香気を代表していると考えられたため、3 種類の香気を一度に分析できる MVM(Multi-Volatile Method)法を選択することとした。

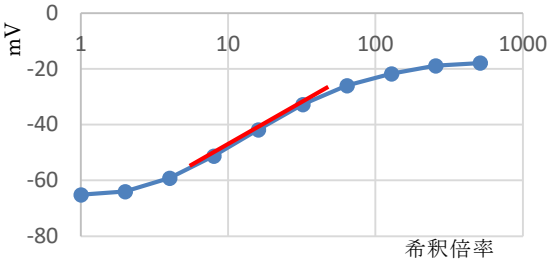


図２　ロース旨味希釈倍率検討

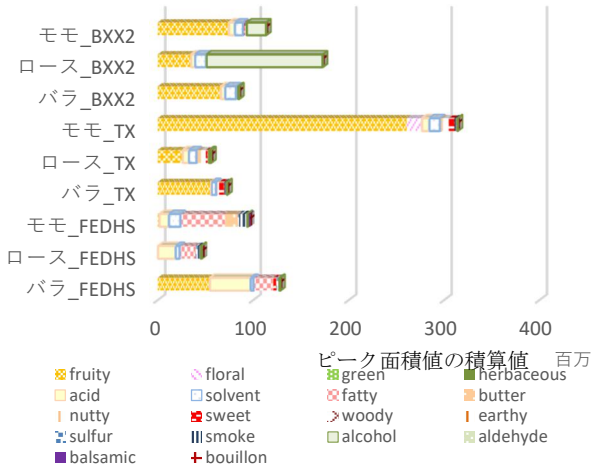


図３　香気成分分析方法検討結果

３．２　バキュームパック熟成実施状況

バキュームパック熟成３条件（真空・脱気・脱気（脱酸素剤））での実施状況を表１に示す。熟成 60 日以降は、脱気・脱気（脱酸素剤）において離水・白濁がみられ、包装材のふくらみが生じたため、それ以降の処理を中止した。したがって、真空条件のみが熟成可能と判断し、以降の検討を行った。

表１　バキュームパック熟成条件と実施状況

	モモ	ロース		バラ	
		リブ	ヒレ	頭	モモ
真空	○	○	○	○	○
脱気	△	△	△	△	△
脱気(脱酸素剤)	△	△	△	△	△

○:30,60,90 日熟成　△:30 日熟成のみ（60 日以降中止）

３．３　熟成生ハムの味・香り・アミノ酸含有量の分析

３．３．１　味の分析

３．３．１．１　モモの分析

苦味雑味は熟成日数による違いがほとんどなく、渋味刺激は熟成につれて増加傾向であった。塩味と旨味は熟成につれて減少傾向であり、旨味コクは熟成 60 日までは増加したが、その後は減少した（図４、５）。

３．３．１．２　ロースの分析

塩味は熟成前よりは増加していたが、熟成が進むにつれて減少する傾向を示した。旨味はバラつきが大きく、一定の傾向は認められなかった。その他の味には大きな違いがみられなかった。

３．３．１．３　バラの分析

苦味雑味と渋味刺激には、はっきりとした傾向が認められなかった。塩味と旨味及び旨味コクは熟成につれて減少傾向であった（図６）。

３．３．１．４　味の分析結果の考察

バキュームパック熟成により生ハムのタンパク質が分解し、旨味や旨味コクを呈するアミノ酸が生成されると考えられたが、モモ・ロース・バラとも、明確な変化がみられなかった。その理由としては、アミノ酸の一種であるアラニンが熟成とともに増加して（後述）、旨味増強に寄与していると考えられるが、旨味センサーの反応性が弱いことが一因として考えられた。

３．３．２　香りの分析

３．３．２．１　モモの分析

香気成分分析結果を図７に示す。香気成分総量は 60 日熟成までは増加した。また、スペイン産長期熟成生ハムのハモンセラーノとの比較では、ハモンセラーノはチーズ香(butter)や脂肪臭(fatty)が多いことが特徴であるが、大谷洞窟熟成生ハムは fruity・floral・green・sweet など多様な香気を持っていることがわかった。

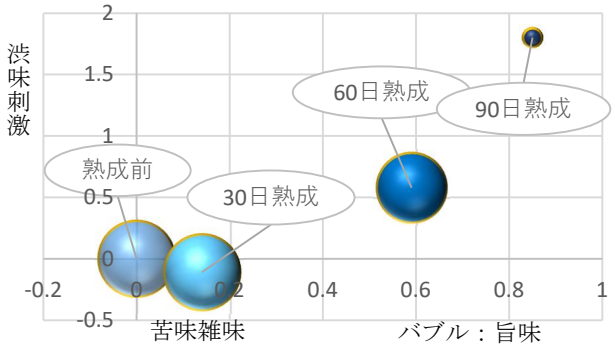


図４　モモの熟成期間と味分析結果
（苦味雑味・渋味刺激・旨味）

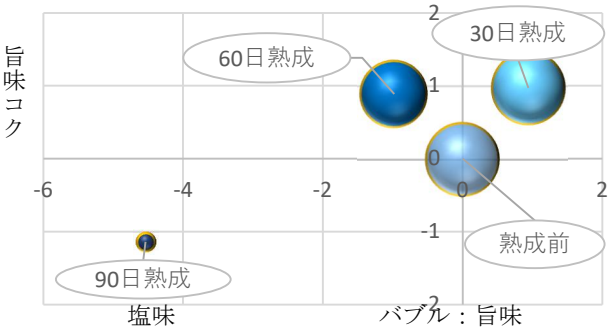


図５　モモの熟成期間と味分析結果
（塩味・旨味コク・旨味）

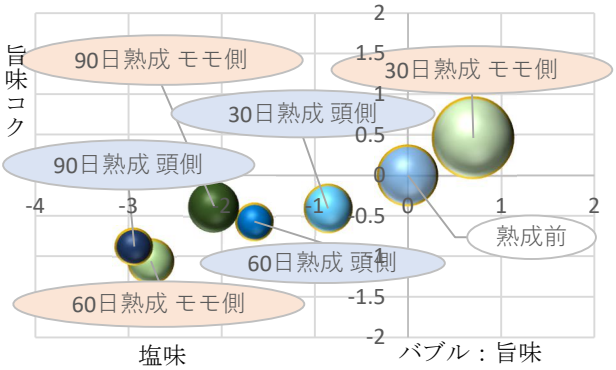


図６　バラの熟成期間と味分析結果
（塩味・旨味コク・旨味）

３．３．２　香りの分析

３．３．２．２　ロースの分析

リブ側、ヒレ側とも熟成前と比較して、fruity・floral・green・sweet な香りが増加し、香りの多様化がみられた（図８、９）。

３．３．２．３　バラの分析

頭側の香気成分総量は熟成 60 日までは増加傾向であり、モモ側は熟成につれて増加がみられた（図 10、11）。モモ・ロースと同様に、熟成により香りの多様化が認められた。

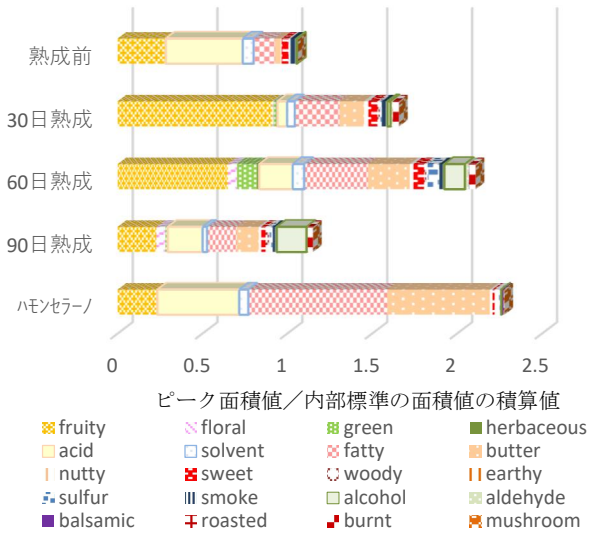


図７　モモの熟成期間と香り分析結果

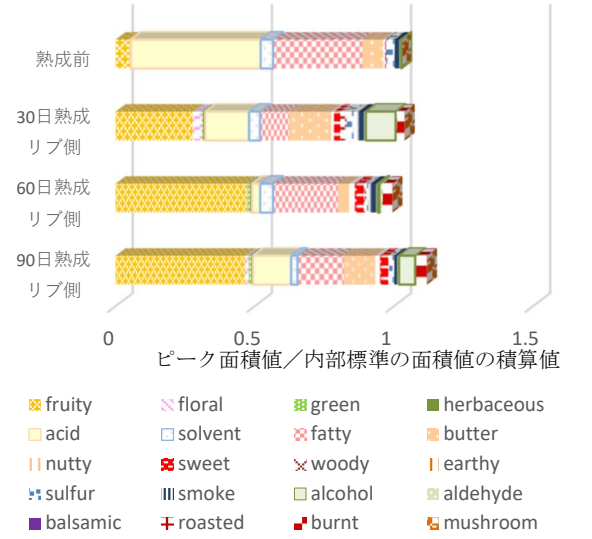


図８　ロースの熟成期間と香り分析結果（リブ側）

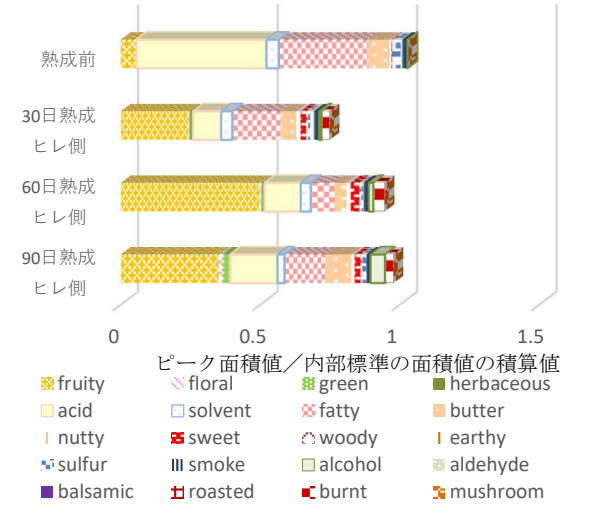


図９　ロースの熟成期間と香り分析結果（ヒレ側）

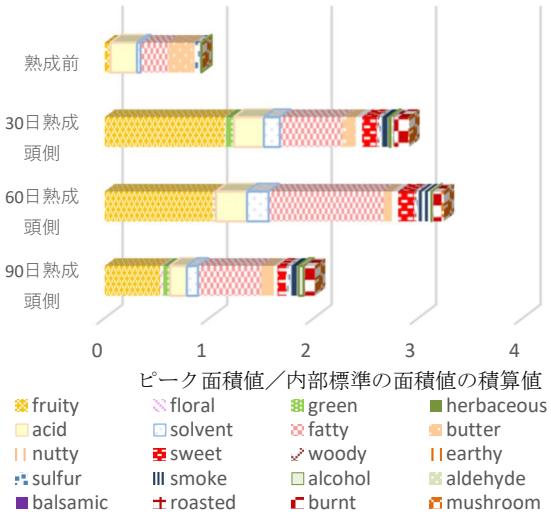


図 10　バラの熟成期間と香り分析結果（頭側）

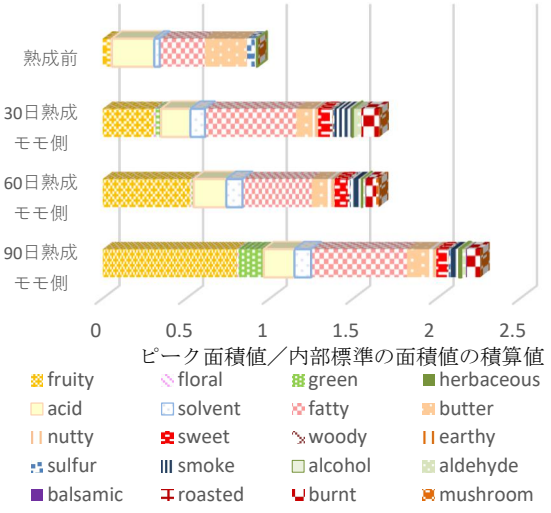


図 11　バラの熟成期間と香り分析結果（モモ側）

３．３．２．４　香りの分析結果の考察

今回、大谷洞窟熟成生ハムは fruity・floral・green・sweet など多様な香気を持っていることがわかった。

以前、滝沢ハム(株)が大谷洞窟熟成の有無による生ハムの香りを評価した際にも、熟成により fruity な香りが増加していたことから、このような変化は大谷洞窟熟成の特徴と考えられる。

部位別の違いとしては、香気成分総量が最も高いのはバラであり、低いのはロースであった。脂の含有量と香気成分総量が相関しているため、生ハムの香気には脂由来の成分が多く寄与している可能性が示唆された。特にバラで高い香気は、fatty・nutty・sweet・smoke・aldehyde・mushroom であった。

ロースのリブ側とヒレ側の違いは判然とせず、香気の差は小さいと考えられた。バラの頭側とモモ側の違いとしては、30 日及び 60 日熟成の頭側の香気が、他に比べ

て非常に高い結果であった。頭側の方が脂の含有量が高いため、このような結果になったとも考えられるが、90日熟成では減少しており、その理由については今回は明確にならなかった。

３．３．３　遊離アミノ酸の分析

３．３．３．１　モモの分析

旨味関連アミノ酸（アスパラギン酸・グルタミン酸）は熟成につれて増加傾向（図 12）であり、甘味関連アミノ酸（グリシン・アラニン・トレオニン・セリン・プロリン）は著しく増加（90 日後に約６倍　図 12）、遊離アミノ酸総量も増加（90 日後に約２倍　図 13）した。味覚センサーの旨味の結果とは合致しなかったが、その原因については明確にならなかった。

また、ハモンセラーノとの比較では、旨味関連アミノ酸は違いがみられないが、甘味関連アミノ酸・遊離アミノ酸総量はハモンセラーノが高値を示し、熟成による風味に影響していると考えられた。ハモンセラーノは長期乾燥熟成のため、赤身タンパク質の分解がより進んでいることが示唆された。

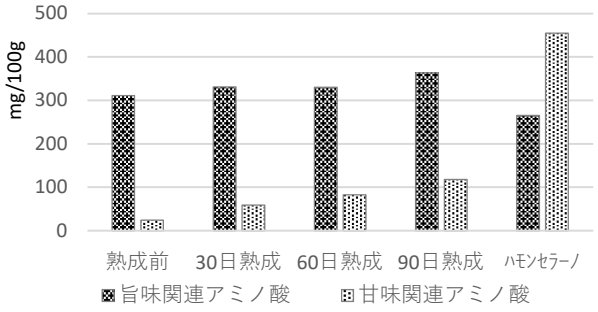


図 12　モモの熟成期間と旨味及び甘味関連アミノ酸分析結果

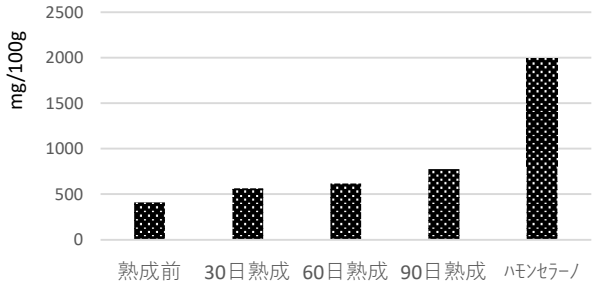


図 13　モモの熟成期間と遊離アミノ酸総量分析結果

３．３．３．２　ロースの分析

旨味関連アミノ酸には変化が認められなかった。甘味関連アミノ酸及び遊離アミノ酸総量は、熟成につれて増加傾向であった（図 14、15）。

３．３．３．３　バラの分析

頭側、モモ側とも旨味関連アミノ酸には変化が認められなかった。甘味関連アミノ酸は熟成につれて増加傾向であり（図 16）、遊離アミノ酸総量は、頭側では増加傾向、モモ側では減少傾向を示した（図 17）。

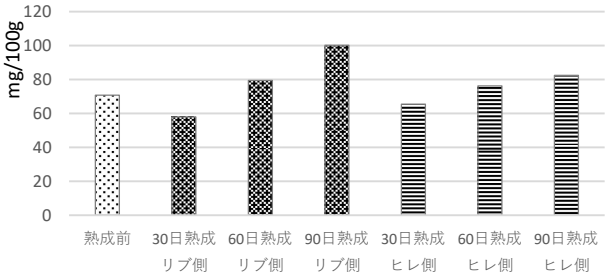


図 14　ロースの熟成期間と甘味関連アミノ酸分析結果

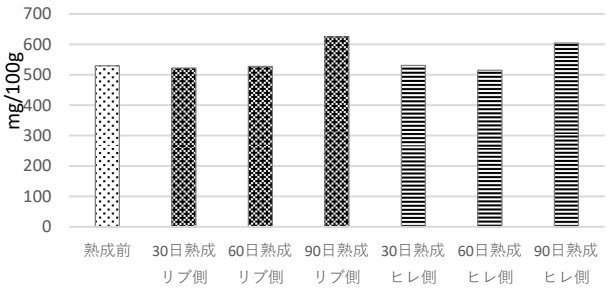


図 15　ロースの熟成期間と遊離アミノ酸総量分析結果

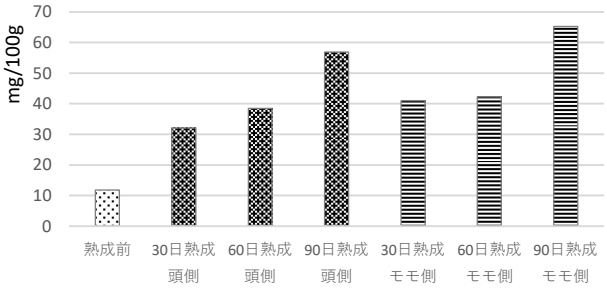


図 16　バラの熟成期間と甘味関連アミノ酸分析結果

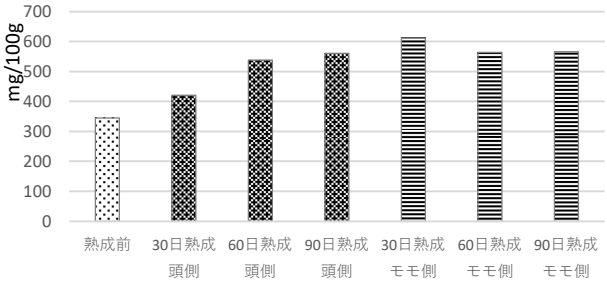


図 17　バラの熟成期間と遊離アミノ酸総量分析結果

３．３．３．４　遊離アミノ酸の分析結果の考察

熟成によるアミノ酸の変化では、モモ以外では旨味関連アミノ酸は変化が認められなかった。甘味関連アミノ

酸と遊離アミノ酸総量が増加する傾向にあった。甘味関連アミノ酸のうちのアラニンには、旨味関連アミノ酸のグルタミン酸の味を増強する作用があるという報告[2)]がある。熟成生ハムの旨味をアラニンが増強するとともに、遊離アミノ酸全体の複雑な味わいが熟成生ハムの風味に影響を与えていると考えられる。

３．４　微生物検査

熟成生ハムについて、一般生菌数・乳酸菌数・大腸菌群・大腸菌・黄色ブドウ球菌・サルモネラ属菌・リステリア・カビ・酵母について検査を行った。

その結果、一般生菌数及び乳酸菌数は熟成につれて増加傾向を示したが、すべて滝沢ハム(株)の社内規格に合致しており、安全性が確認された。

３．５　官能評価

官能評価結果を表２に示した。モモは60日熟成が最も評価が高く、次が90日熟成であった。ロース及びバラは90日熟成が最も評価が高く、次が60日熟成であった。

表２　熟成生ハムの官能評価結果

	モモ	ロース		バラ	
		リブ	ヒレ	頭	モモ
熟成前	0	0	0	0	0
30日熟成	0	0	0	0	0
60日熟成	5	3	3	6	6
90日熟成	3	6	5	10	10

数値：特においしいと評価した人数

３．６　生ハム各部位の適切な熟成期間

３．６．１　モモ

90日熟成において、旨味・旨味コク・香気成分総量の減少がみられたが、甘味関連アミノ酸及び遊離アミノ酸総量は90日熟成まで増加した。官能評価では60日熟成が最も良好であったことから、60日以上の熟成が適すると考えられた。

３．６．２　ロース

熟成により味覚センサー分析結果は顕著な変化がなかったが、香りは複雑な香りとなった。甘味関連アミノ酸と遊離アミノ酸総量は90日熟成まで増加がみられ、官能評価では、熟成により評価が高くなったことから、90日熟成が適すると考えられた。

３．６．３　バラ

熟成により味覚センサー分析結果は顕著な変化がなかった。香気成分総量については、頭側は60日熟成まで増加し、モモ側は90日熟成まで増加した。甘味関連アミノ酸は、頭・モモ側ともに90日熟成まで増加がみられた。遊離アミノ酸総量は頭側では90日熟成まで増加したが、モモ側は減少傾向であった。官能評価では熟成が進むほど評価が高くなった。以上のことから、90日熟成が適すると考えられた。

４　おわりに

生ハム製造における新たな工程（バキュームパック熟成）に関する最適な条件を検討するとともに、熟成期間の変化による味・香り・遊離アミノ酸の含有量の違いを分析して、以下のことを明らかにした。

(1) 生ハムの味を味覚センサーで評価するための旨味の希釈条件は20倍が最適であった。また、香気分析の吸着条件は、fruityとfattyな香りを一度に評価できるMVM法が適していた。

(2) バキュームパック熟成の３条件のうち、真空条件のみが熟成可能と考えられた。

(3) 味覚センサーでは、旨味に関与していると思われるアラニンに対する反応性が弱いため、おいしさを反映できていない部分があると考えられた。

(4) 大谷洞窟熟成生ハムは、熟成に従ってfruity・floral・green・sweetなど複雑な香りが形成されており、おいしさに寄与していると考えられた。

(5) 熟成に伴い、甘味関連アミノ酸及び遊離アミノ酸総量が増加しており、風味増強に寄与していると考えられた。

(6) 部位ごとの最適な熟成期間は、モモでは60日以上の熟成、ロース及びバラでは90日熟成が適すると考えられた。

適切な条件でバキュームパック熟成を行うことで、甘味関連アミノ酸及び遊離アミノ酸総量がより多く、大谷洞窟熟成独特の風味を持った高品質短期熟成生ハムを製造できることが明らかとなった。

参考文献

1)　“食品衛生検査指針　微生物編　改訂第２版”、公益社団法人日本食品衛生協会(2018)

2) 水田晴野、山本隆：〃栄養学雑誌〃、日本栄養改善学会、221（2019）

共同研究

県産いちごを利用した乳酸発酵食品の開発～とちおとめ・とちあいか～

郡司　崇浩*　　筒井　達也*　　伊藤　和子*　中村　亮**　　須谷　潤**　　梶田　尚子**

Development of Lactic Acid Fermented Food using Strawberries from Tochigi Prefecture

GUNJI Takahiro, TSUTSUI Tatsuya, ITO Kazuko, NAKAMURA Ryo, SUTANI Jun and KAJITA Naoko

いちごを原料とした乳酸発酵食品を開発することを目的に、とちおとめ、とちあいか由来の乳酸菌の分離、いちごピューレの乳酸菌発酵条件の検討及び安全性確認を行った。とちおとめから１種、とちあいかから２種（No.1 及び No.2）の乳酸菌を分離した。いずれの乳酸菌も、いちごピューレにおける最適発酵条件は、発酵温度は30℃、発酵期間は２週間、初期添加量は10^8(cfu/g)であった。乳酸生成量と官能評価の結果から、とちあいか No.2 を最適株として選抜し、遺伝子解析及び安全性試験を実施したところ、Pediococcus 属に帰属し、発酵ピューレの LD50 は 2,000mg/kg を超えるものと評価された。

Key words:　いちご、ピューレ、乳酸菌、　発酵

１　はじめに

栃木県のいちご収穫量は 24,600t と 56 年連続日本一[1)]を誇り、県育成品種の「とちあいか」、「スカイベリー」、「とちおとめ」等が栽培されている。県内では、県産いちごを使用したジャムや菓子など多種多様ないちご加工品が製造販売されており、今後更なる需要拡大が予想される。しかしながら、有用微生物による発酵を利用した商品はほとんど販売されていないのが現状である。発酵により保存期間の延長や、うま味の向上、独特な香りが加わることから、いちご加工へ発酵技術を利用することにより新たな付加価値化が期待できる。特にいちごの品種毎に分離した乳酸菌を同一品種の原料に使用することで、特徴の付与及び差別化が図られると考えられる。

そのため、本研究では県産いちごの中から、タカ食品工業(株)が製造するいちごピューレと同品種のとちおとめ、とちあいかの２品種を選び、これらの品種から分離した乳酸菌を用いて、いちごを原料とした乳酸発酵食品を開発することを検討した。

２　研究の方法

２．１　原料

２．１．１ 乳酸菌分離原料

栃木県産いちごとして、品種はとちおとめ、とちあいかを使用した。とちおとめは果実が大果で、糖酸のバランスがとれ食味が極めて良いことを特徴とし、生食からスイーツにも適したいちごである。一方とちあいかは果形がハート形で、平均一果重は 20 ｇ程度ととちおとめよりも大きく、赤味が強い鮮赤色で果汁に富み、酸度が少なく甘さが際立つ良食味であることを特徴とする県の主力品種である[2)]。

２．１．２ 発酵試験原料

タカ食品工業(株)にて加工されたいちごピューレを使用した。品種は、とちおとめ、とちあいかとし、1 kg にパッケージングされた加工品を 200 ｇ ずつに分け、再殺菌を行い冷凍保存したものを流水解凍し試験に供した。

２．２　乳酸菌の分離

２．２．１　分離方法

図１に乳酸菌の分離方法を示す。原料のいちごをコニカルチューブに詰め、MRS 培地（シクロヘキシミド及びアジ化ナトリム 30 ppm 含有）を添加し、濁りが生じるまで 30℃で静置培養した。次に、MRS 寒天培地に混釈し 30℃で数日静置培養後、シングルコロニーを釣菌し MRS 培地にて 30℃で数日静置培養した。その後、MRS 寒天培地に混釈し、30℃で数日静置培養した。分離した菌については、グリセロールストック（50％グリセロール 0.3 mL、MRS 0.6 mL、培養液 0.1 mL）し、保存した。

＊　栃木県産業技術センター　食品技術部
＊＊　タカ食品工業株式会社

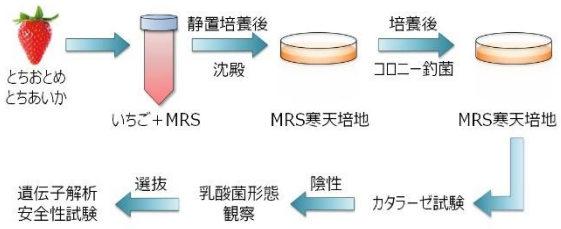


図１　乳酸菌の分離方法

２．２．２　分離菌の分析

分離した菌は、目視外観確認、香り確認、カタラーゼ試験、顕微鏡観察、遺伝子解析、安全性試験を実施した。なお、遺伝子解析、安全性試験については、ピューレの官能評価や乳酸生成量に優れる株を選抜後に実施した。

２．２．２．１　カタラーゼ試験

MRS 培地で培養した培養液を 8,000 rpm、５分間遠心分離後、上清を除去し、菌体を集菌した。次に、3%過酸化水素水を１ mL 適下して、発泡の有無を確認した。

２．２．２．２　顕微鏡観察

培養液の１～２白金耳をスライドグラス上に直接塗りつけ、生物顕微鏡（オリンパス㈱製　BX53）を使用して、1,000 倍で観察を行った。

２．２．２．３　遺伝子解析による乳酸菌の同定

16SrDNA(16SrRNA 遺伝子)の塩基配列解析結果から、検体の帰属分類群を推定した。培養条件及び 16SrDNA 塩基配列解析は表１の通りである。

表１　培養条件及び 16SrDNA 塩基配列解析

培養条件	培地	Oxoid M.R.S. Broth (Oxoid, ENG)＋寒天
	培養温度	30° C
	培養確認時間	24 時間
	その他条件	好気培養
16S rDNA 塩基配列解析	DNA 抽出	アクロモペプチダーゼ (FUJIFILM Wako Pure Chemical, Japan)
	PCR 増幅	Tks Gflex DNA Polymerase (Takara Bio, Japan)
	サイクルシーケンス	サイクルシーケンス BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit(Applied Biosystems, USA)
	使用プライマー	PCR 増幅: 9F, 1510R シーケンス (約1,500 bp): 9F, 515F, 1099F, 536R, 926R, 1510R
	シーケンス	ABI PRISM 3500xL Genetic Analyzer System (Applied Biosystems)
	塩基配列決定	ChromasPro 2.1 (Technelysium, AUS)
	BLAST 相同性検索	解析ソフトウェア: ENKI v3.2 (TechnoSuruga Laboratory, Japan) データベース　DB-BA17.0 (TechnoSuruga Laboratory) 国際塩基配列データベース (DDBJ/ENA/GenBank) 検索日: 2024 年7 月5 日
	簡易分子系統解析	系統樹の推定: 近隣結合法 塩基置換モデル: Kimura-2-parameter 樹形の信頼性評価: ブートストラップ法 (1,000 反復)

２．２．２．４ 安全性試験

マウスによる急性経口毒性試験（限度試験）を行った。乳酸菌発酵ピューレをホモジナイザーを用いて均一にし、注射用水に混濁させ、100 mg/mL の試験液を調製した。試験群及び対照群は、各群雄雌５匹ずつを用い、投与前に約４時間絶食させた。体重を測定した後、試験群には試験液、対照群には注射用水をそれぞれ 20 mL/kg の投与液量で胃ゾンデを用いて強制単回経口投与した。観察期間は 14 日間とし、投与日は頻回、翌日から１日１回の観察を行い、投与後７日及び 14 日の体重を測定し、統計学的解析を行った。

２．３　発酵試験

２．３．１　乳酸菌ピューレの作製

グリセロールストックした乳酸菌を MRS 培地で 30℃ 24 時間静置培養した。菌の安定化のために、再度 MRS 培地で 30℃、24 時間静置培養後、8,000 rpm、５分間遠心分離し上清を除去し、生理食塩水で洗浄した。再度、同様に洗浄後、遠心分離し種を取り除いたいちごピューレに植菌し、乳酸菌ピューレを作製した。

２．３．２　発酵試験１

発酵温度と発酵期間の検討を行った。発酵温度は、25℃、30℃、35℃の３条件、発酵期間は１、２、３週間の３条件、全９条件で検討を行った。チャック付き袋（滅菌済み）に入れた、とちあいか、とちおとめのピューレ 200 g に各々の乳酸菌ピューレを 2.02 mL 加え恒温槽で培養した。培養中は週に１度 20 回程度上下方向に攪拌を行った。

２．３．３　発酵試験２

乳酸菌の初期添加量と発酵期間の検討を行った。乳酸菌の初期添加量は、10^6、10^7、10^8(cfu/g)の３条件、期間は１、２週間の２条件、全６条件で検討を行った。発酵試験１と同様に、とちあいか、とちおとめ 200 g に乳酸菌ピューレを加え（10^6：0.20 mL、10^7：2.02 mL、10^8:22.2 mL）、恒温槽で静置培養した。培養中は週に１度 20 回程度上下方向に攪拌を行った。

２．３．４　分析及び官能評価

２．３．４．１　菌数の測定

発酵試験後のピューレを 10 g 量り取り、滅菌生理食塩水 90 g で希釈し(10 倍希釈)、次にその 1 mL を滅菌生理食塩水 9 mL で希釈(100 倍希釈)というように、順次希釈試料液を作成した。コロニー数が一平板上 30～300 個になるように適当な希釈段階の試料液 1 mL を標準寒天培地 20 mL に混釈後、30℃で 24 時間培養して生育したコロニー数を計測した。

２．３．４．２　pH 測定

pH 計（東亜ディーケーケー㈱製　HM-26S）により測定した。

２．３．４．３　Brix 測定

デジタル糖度計(Atago 製　DBX-55)により測定した。

２．３．４．４　色調測定

分光測色計（コニカミノルタジャパン　CM-5）により試料の表面色（反射）を測定した。結果はL*a*b*表色系を用い、いちごピューレとの差(⊿Eab)で評価した。

２．３．４．５　官能評価

発酵試験１では、記述型により全７名（産業技術センター５名、タカ食品工業(株)２名）で行った。また、発酵試験２では、１～５の５点評点法により発酵感、色、香り、風味の４項目について、全６名（産業技術センター４名、タカ食品工業(株)２名）で行い、平均点で評価した。

２．３．４．６　乳酸量測定

発酵試験２及び再現性試験で実施した発酵後ピューレを4 g量り取り、3%スルホサリチル酸0.4 mLを加え、30 分放置後、8,000 rpm、５分間遠心分離し、上清をメンブレンフィルター（孔径 0.45 μm）でろ過後、ろ液を試験溶液とした。分析は HPLC（日本分光㈱製　EXTREMA）により、表２の条件で実施した。

表２　乳酸量測定条件

カラム		Shodex Rspak KC-811 (8.0mm×300mm 6μm 昭和電工(株)製) 2本直列接続
移動相		3mM過塩素酸
反応液		0.2mMブロモチモールブルー(BTB)
流速	移動相	1.0mL/min
	反応液	1.5mL/min
カラム温度		70℃
注入量		50μL
検出器		フォトダイオードアレイ、UV(445nm)
検出法		BTBによるポストカラム誘導体化法

２．３．４．７　香気成分

香気成分はDHS-GC/MS法により測定を行った。試料5 gを80℃、６分加熱して、発生する揮発性成分をN_2パージし吸着管（吸着剤 Tenax TA）に吸着させ、加熱脱着装置（Gerstel 社製 TDU2）付 GC/MS（Agilent Technologies 社製 5977B）に供した。分析は表３のとおりに実施し、得られたガスクロマトグラムのピークから、Aroma Office 2D（Gerstel 社製）により、においを有する化合物のみを抽出した。ピーク面積値を香りのキャラクターごとに積算して比較した。

表３　香気成分測定条件

TDU条件	30℃(0.3min)→720℃/min→300℃(3min)
CIS条件	50℃（0.5min)→720℃/min→210℃(20min)
カラム	DB-WAX(30m, 0.25mm, 0.25μm)
オーブン温度	40℃(5min)→10℃/min→240℃(10min)
キャリアガス	He 1.768mL/min
トランスファーライン温度	240℃
イオン源温度	230℃
イオン化モード	EI
イオン化電圧	70eV

３　結果及び考察

３．１　乳酸菌の分離

図２に分離した乳酸菌の顕微鏡観察写真を示す。とちおとめからは、ガス発生、香りは乳酸臭が強く、顕微鏡観察では長さの異なるものが混在し、カタラーゼ試験が陰性である１株を分離した。とちあいかからは、ガス発生、香りは乳酸臭があり、長短が混在し、カタラーゼ試験が陰性である２株（とちあいか No.1、とちあいか No.2）を分離した。

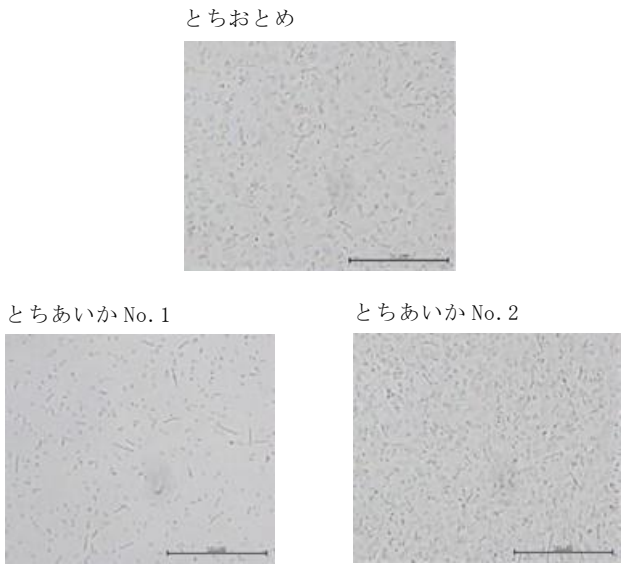


図２　分離乳酸菌の顕微鏡観察写真

３．２　発酵試験

３．２．１　発酵試験１（発酵温度と発酵期間の検討）

とちおとめ、とちあいかNo.1、とちあいかNo.2それぞれの乳酸菌株を用い、同品種のいちごピューレを温度と期間を変化させ発酵させたサンプルについて、菌数測定、pH測定、Brix測定、色調測定、官能評価を行った結果を以下に示す。

３．２．１．１　菌数変化

図３に菌株それぞれの菌数測定結果を示す。いずれの発酵温度条件でも、発酵期間が長くなるにつれて乳酸菌数は減少する傾向であった。特に、35℃では、他の温度条件に比べて、減少率が大きい傾向であり、35℃は発酵温度としては高すぎると考えられた。

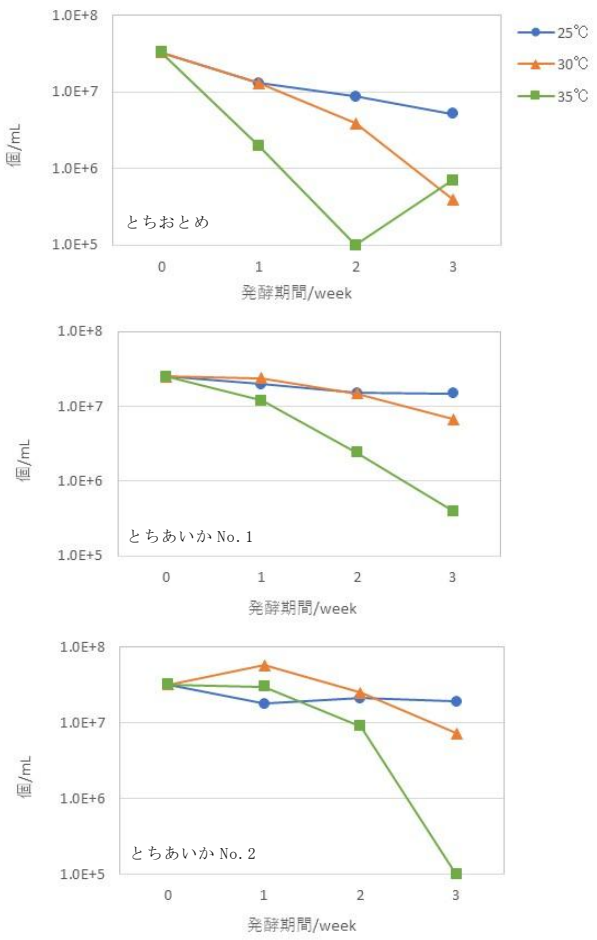


図３　菌数測定結果

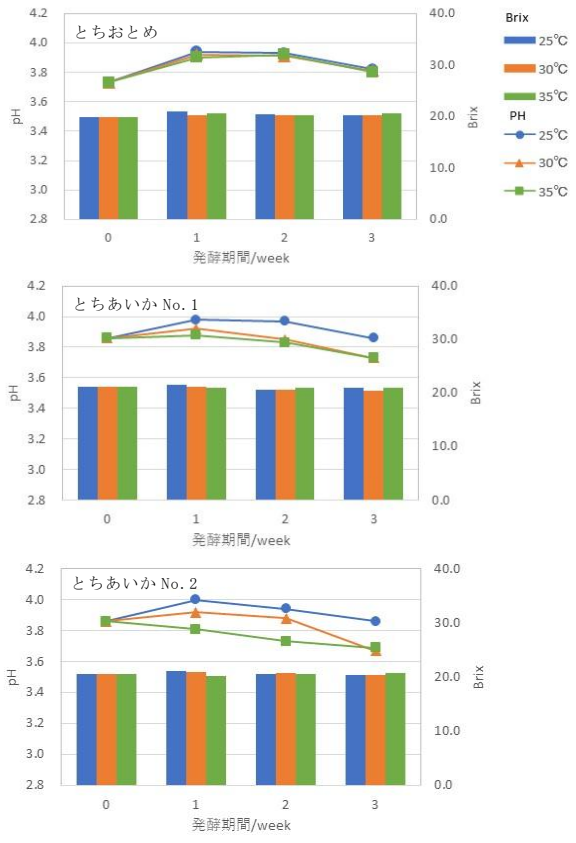


図４　pH、Brix 測定結果

３．２．１．２　pH、Brix の変化

図４に菌株それぞれの pH、Brix の測定結果を示す。発酵温度、発酵期間による変化は小さく、pH は 3.8 程度、Brix は 20 程度であり、乳酸菌添加前のピューレとほとんど差は見られなかった。

３．２．１．３　色調変化

図５に菌株それぞれの色調測定結果を示す。発酵温度の違いで比較すると、温度が高いほど色調変化は大きくなった。また、発酵期間で比較すると、期間が長いほど色調の変化は大きかった。特に 35℃、３週間の条件では色調が暗くなり、黄色度(b*)が増加するため、発酵条件としては適してないと推察される。

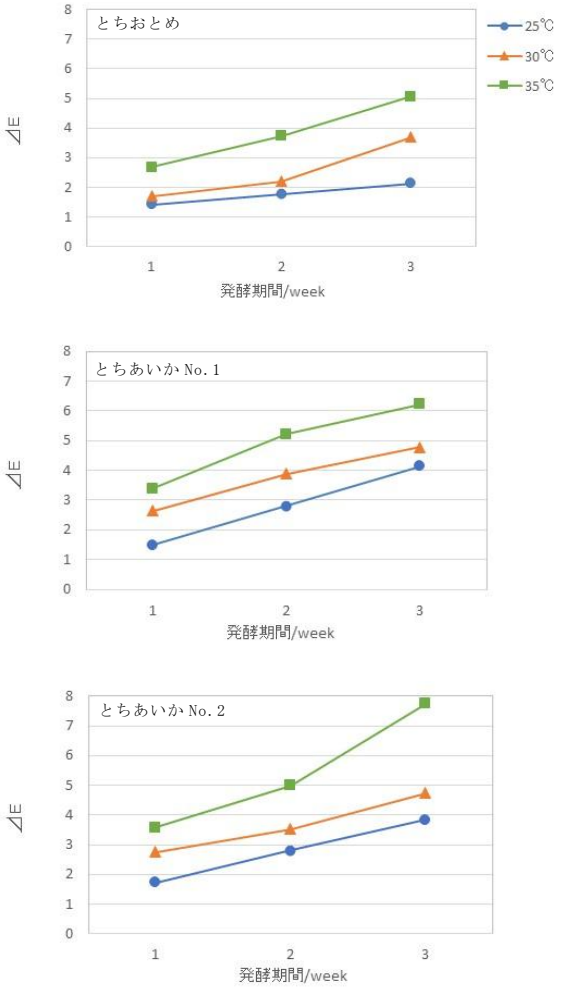


図５　色調測定結果

３．２．１．４　官能評価結果

表４に菌株それぞれの官能評価の結果を示す。発酵感を感じたのは、発酵温度 30℃、発酵期間１、２週間であった。25℃ではフレッシュ感が残っており、35℃では酸味が強く、えぐみを感じた。また、温度に関係なく３週間では、雑味や、粘度低下などを感じた。

以上、菌数変化、色調変化、官能評価の結果から、最適発酵温度は、30℃であると考えられ、菌株による

結果差はほとんどなかった。発酵期間については、発酵試験１において３週間は不適であったことから、次の発酵試験２においては、発酵温度 30℃、発酵期間１週間及び２週間で比較を行うこととした。

３．２．２　発酵試験２（乳酸菌添加量と発酵期間の検討）

とちおとめ、とちあいかNo.1、とちあいかNo.2それぞれの菌の初期添加量と発酵期間を変え発酵させた

表４　官能評価結果

とちおとめ

		発酵期間(week)		
		1	2	3
温度(℃)	25	フレッシュ 甘味強	フレッシュ 甘味 酸味弱	酸味強 薄い 雑味
	30	**発酵感** 甘味 酸味弱 薄い	**発酵感** 甘味 酸味	**発酵感** 酸味強 えぐみ 粘度低下
	35	褐変 酸味強 薄い 劣化臭	褐変 酸味強 劣化臭 粘度低下	褐変 酸味強 劣化臭 粘度低下

とちあいかNo.1

		発酵期間(week)		
		1	2	3
温度(℃)	25	フレッシュ 甘味強	フレッシュ 甘味 酸味	甘味 酸味 薄い 雑味
	30	**発酵感** 甘味弱 酸味 薄い	**発酵感** 甘味 酸味 バランスいい	甘味弱 酸味強 薄い 雑味
	35	**発酵感** 褐変 酸味強 薄い 粘度低下	褐変 薄い 酸味強 粘度低下	褐変 酸味強 劣化臭 薄い 粘度低下

とちあいかNo.2

		発酵期間(week)		
		1	2	3
温度(℃)	25	フレッシュ 甘味強	フレッシュ 甘味 酸味弱	甘味 酸味強 薄い
	30	**発酵感** 甘味 酸味弱 薄い	**発酵感** 甘味 酸味 バランスいい	甘味弱 酸味強 薄い 粘度低下
	35	褐変 酸味 えぐみ 粘度低下	褐変 酸味強 えぐみ 劣化臭 粘度低下	褐変 酸味強 えぐみ 劣化臭 粘度低下

サンプルについて、菌数測定、pH 測定、Brix 測定、色調測定、官能評価、乳酸量測定の結果を以下に示す。

３．２．２．１　菌数変化

図６に菌株それぞれの菌数測定結果を示す。初期添加量に関係なく、１週間後に菌数が 10^7 程度に収束した。初期添加量 10^6 では１週間後に菌数が増加し、10^7 では横ばい、10^8 では減少した。その後、２週間後では全条件とも菌数が減る傾向であった。

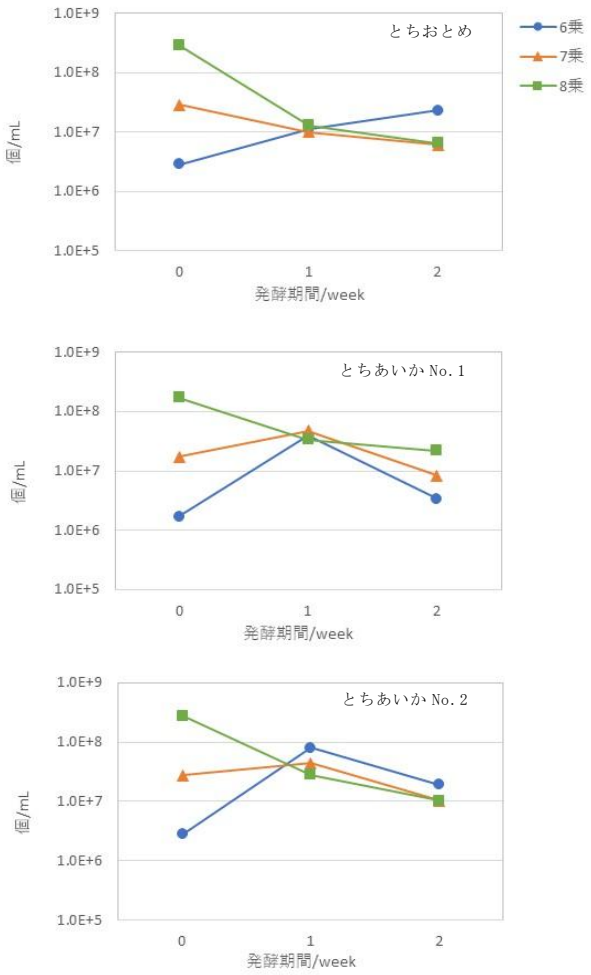


図６　菌数測定結果

３．２．２．２　pH、Brix の変化

図７に菌数それぞれの pH、Brix の測定結果を示す。乳酸菌添加量、発酵期間による変化は小さく、pH は 3.8 程度、Brix は 20 程度であり、乳酸菌添加前のピューレとの差はほとんどなかった。

３．２．２．３　色調変化

図８に菌数それぞれの色調の測定結果を示す。乳酸菌添加量、発酵期間による違いはほとんどなく、添加量、発酵期間による色調への影響は少ないものと考えられた。

３．２．２．４ 官能評価結果

図９に菌株それぞれの官能評価の発酵感に関する結果を示す。乳酸菌添加量 10^8 が他条件よりも発酵感を強く感じた。また、発酵期間による発酵感の差はほとんど感じなかった。なお、図の記載はないが、色、香り、風味についても添加量、期間による差はほとんど見られなかった。

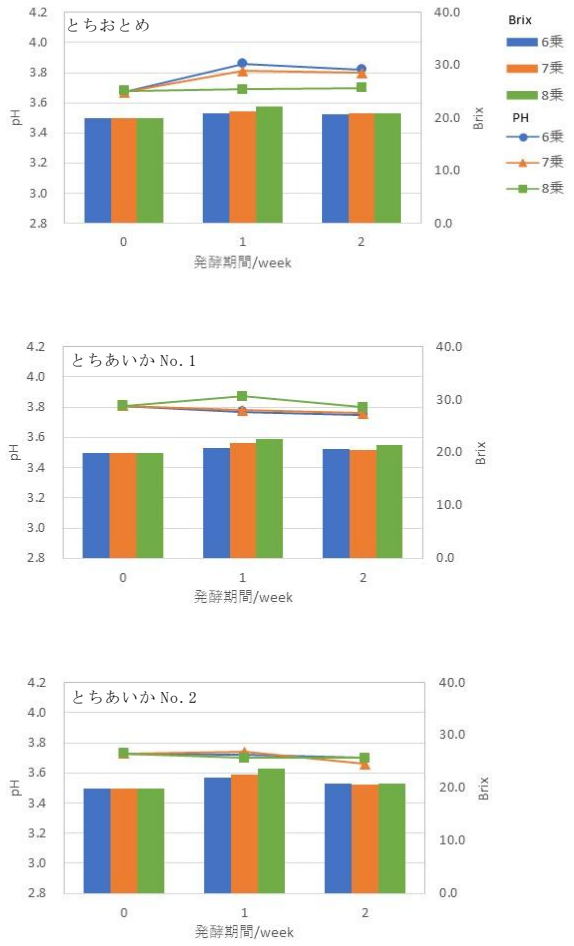


図７　pH、Brix 測定結果

３．２．２．５　乳酸量の変化

図 10 に菌株それぞれの乳酸量測定結果を示す。１週間後で乳酸の増加率が大きく、２週間後は１週間後に比べて増加の程度は小さかった。乳酸菌添加により乳酸が生成されるものの、発酵液の pH は 3.6～3.8 程度と低く、また菌数も 10^8 個/mL 以上に増殖できなかったことから、低 pH により増殖が抑制され、乳酸の生成量もそれに併せて増加率が減少したものと考えられた。

菌数変化、色調変化、官能評価、乳酸量の変化結果から、乳酸菌の最適初期添加量は 10^8 と推察され、発酵期間は１、２週間での差は小さいと考えられた。また、菌株による結果の差はほとんどなかった。この結果を元に共同研究先と協議の上、十分な発酵を得るために、官能評価、乳酸量の変化結果等から、最適発酵

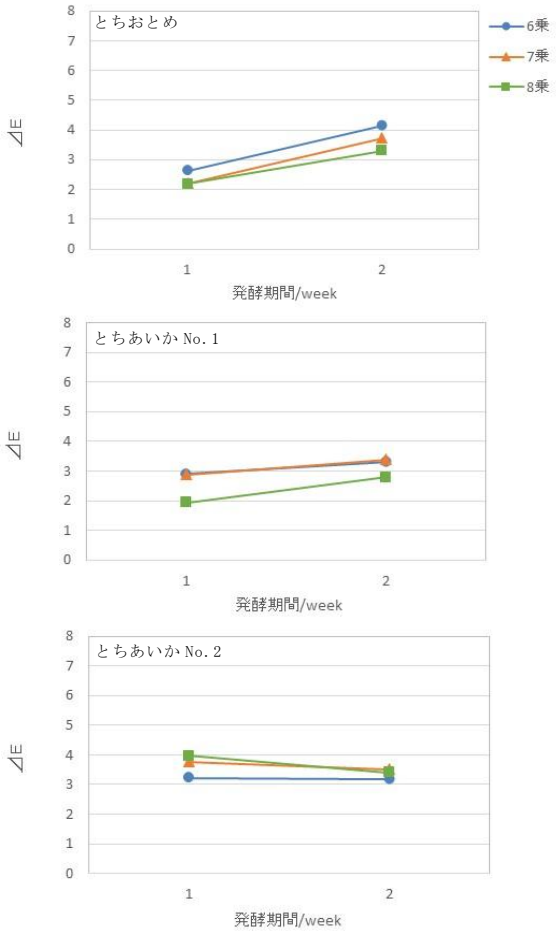


図８　色調測定結果

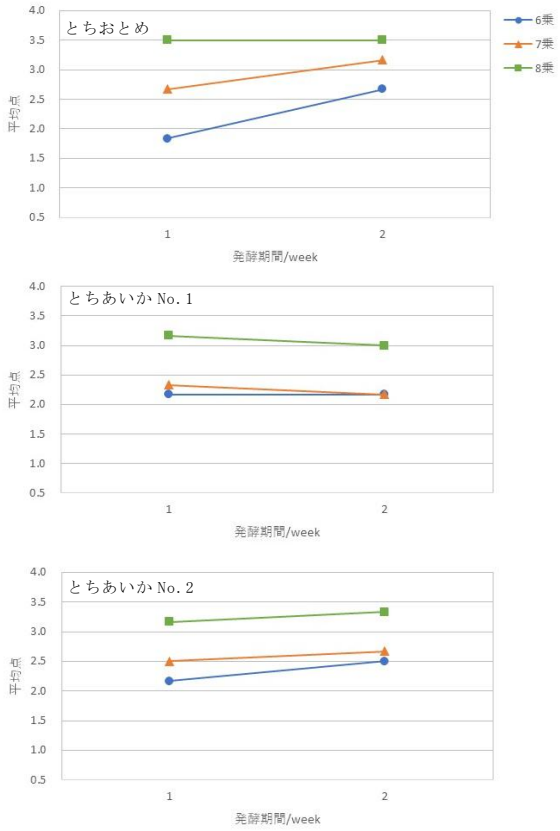


図９　官能評価結果（発酵感）

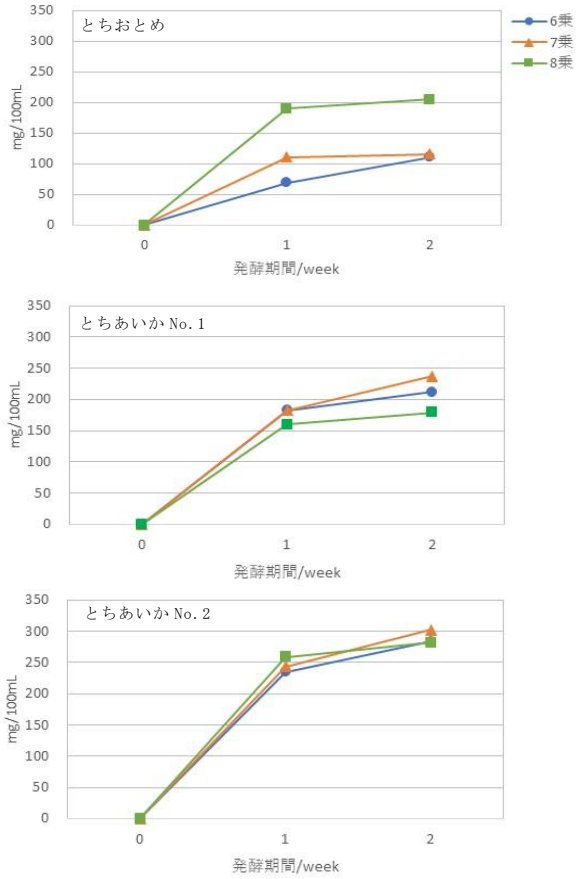


図 10　乳酸量測定結果

期間は２週間とし、菌種はとちあいか No.2 を最適菌株とした。

３．２．２．６　香気成分

初期ピューレと最適発酵条件で発酵したピューレの香気成分測定を行った。図 11 に香気成分測定結果を示す。初期ピューレでは、fruity、floral 等のいちごの香りが強く検出された。発酵後のピューレでは、香気成分のバランスが変わり、fruity、floral 等のいちごの香りは減少し、green、butter、acid、alcohol 等の発酵に伴う香りが増加していることが確認された。

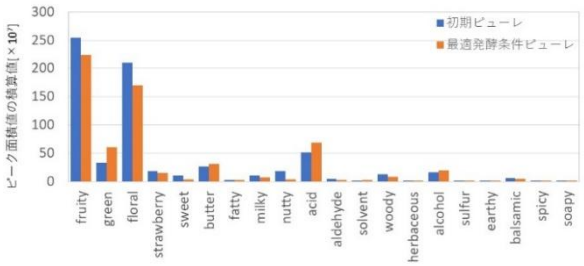


図 11　香気成分測定結果

３．２．３　再現性試験

最適条件（菌株とちあいか No.2、温度 30℃、乳酸菌の初期添加量 10^8）で再現性試験を実施した。発酵期間については、時間経過による変化を確認するため、１、２週間どちらも行った。また評価は、発酵試験２における 10^8 と比較した。分析項目は、発酵試験１及び２で発酵条件によって結果の差が顕著であった菌数測定、官能評価、乳酸量測定を実施した。

３．２．３．１　菌数変化

図 12 に菌数測定結果を示す。発酵試験２での 10^8 と同様、１週間後に菌数が 10^7 程度に収束し、その後、２週間後では菌数が減少し、同様の傾向が確認された。

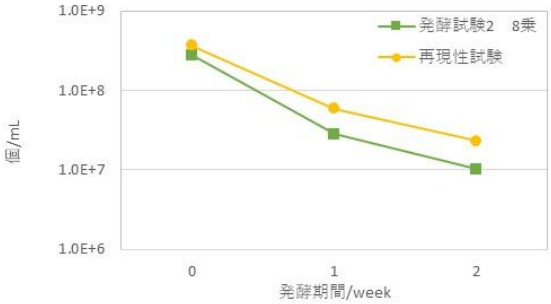


図 12　菌数測定結果

３．２．３．２　官能評価結果

図 13 に官能評価結果を示す。発酵試験２における乳酸菌添加量 10^8 と同様に、１、２週間どちらも発酵感を強く感じる傾向が確認された。

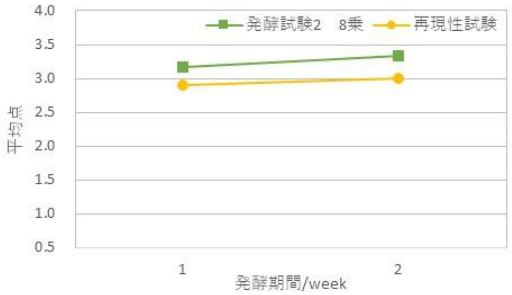


図 13　官能評価結果（発酵感）

３．２．３．３　乳酸量変化

図 14 に乳酸量測定結果を示す。発酵試験２での乳酸菌添加量 10^8 と同様、１週間後で乳酸の増加率が大きく、２週間後は増加率が小さくなり、同様の傾向が確認された。

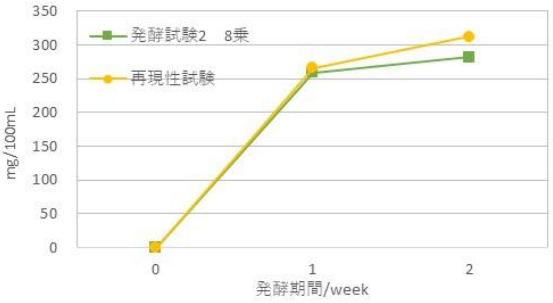


図 14　乳酸量測定結果

以上の結果から、発酵試験２での乳酸菌添加量10^8と再現性試験の結果には、差異はほとんどなく、再現性が確認された。

３．３　乳酸菌の同定と安全性確認

とちあいか No.2 について遺伝子解析を行ったところ Pediococcus 属に帰属し、既知種では P.acidilactici に最も近縁であった。とちあいか No.2 乳酸菌発酵ピューレ（初期添加量 10^8）について急性経口毒性試験（限度試験）を実施した際の雄及び雌の体重変化（平均値±標準偏差）を表５、表６に示す。観察期間中、群間での体重変化の差は見られず、雄雌ともに死亡例や異常は認められなかった。これらの結果から、乳酸菌発酵ピューレの LD50（半数致死量）は、雌雄ともに 2,000 mg/kg を超えるものと評価された。

表５　体重変化（雄）

群	投与前	投与後	
		7日	14日
試験群	38.3±1.1g	43.0±2.6g	47.6±3.3g
対照群	38.4±1.0g	42.7±1.0g	46.0±0.5g

表６　体重変化（雌）

群	投与前	投与後	
		7日	14日
試験群	28.7±1.0g	31.0±1.8g	33.2±1.6g
対照群	28.7±1.0g	29.5±1.2g	32.8±1.5g

４　おわりに

県産いちごの中からとちおとめ、とちあいかの２品種を選び、とちおとめ、とちあいか由来乳酸菌の分離、いちごピューレの乳酸菌発酵条件の検討及び安全性確認を行った結果、以下の知見を得た。

(1)とちおとめから１種、とちあいかから２種の乳酸菌を分離した。

(2)いちごピューレの乳酸菌発酵試験を行い、発酵温度、発酵期間及び乳酸菌の最適初期添加量について検討したところ、発酵温度 30℃、発酵期間２週間、乳酸菌の初期添加量は 10^8(cfu/g)が最適と考えられた。

(3)菌種については乳酸生成量及び官能評価の結果から、とちあいか No.2 を最適菌株として選抜し、発酵試験においても再現性が確認された。

(4)とちあいか No.2 を遺伝子解析したところ、Pediococcus 属に帰属し、既知種では P.acidilactici に最も近縁であった。

(5)とちあいか No.2 乳酸菌発酵ピューレのマウスによる急性経口毒性試験を実施したところ、観察期間中に死亡例や異常は認められず、LD50 値は 2,000 mg/kg を超えるものと評価された。

参考文献

1)栃木県：”全国のいちご生産割合から見た栃木県の状況”
https://www.pref.tochigi.lg.jp/g61/ichigo-seisanjokyo/ichigo-seisanryou.html

2)栃木県：”全国のいちご生産推移から見た栃木県の状況”
http://www.pref.tochigi.lg.jp/g61/index.html

共同研究

二軸エクストルーダーによる大麦未利用部位活用法の検討

金井　悠輔*　　阿久津　智美*　　岡本　竹己*
鎌田　直**　　上武　裕**　　青木　隆**

Study on Usage of Barley Bran using Twin-screw Extruder

KANAI Yusuke, AKUTSU Satomi, OKAMOTO Takemi,
KAMATA Naoshi, UETAKE Yutaka and AOKI Takashi

大麦精麦工程で生じる糠の食品素材としての活用を目的として、当該原料の二軸エクストルーダーによる押出加工適性を検討した。成分分析の結果、糠には糖質が少なく、不溶性食物繊維が多く含まれており、穀粒外層の糠ほどその傾向が顕著であった。糠に各種副原料を配合し押出加工を行ったところ、米粉を配合することで効果的に膨化が促進され、軽い食感になることが示唆された。押出加工時の二時エクストルーダー運転条件のうち、スクリューパターン及びスクリュー回転数は膨化度及び食感に大きく影響し、対原料加水率及びバレル加熱温度は押出品の脆さに影響することが明らかとなった。この知見を基に菓子類を試作し食味評価したところ、類似の市販品と比べ遜色なく、菓子等の原料として十分活用できるものと考えられた。

Key words:　大麦、糠、押出加工、膨化、食品テクスチャー

１　はじめに

大麦は、栃木県が全国有数の生産量を誇る農産物である。近年、大麦に含まれる水溶性食物繊維「β-グルカン」が持つ食後血糖値上昇抑制等の機能性が明らかにされ[1)]、大麦に対する関心が高まり食品利用が急速に進んでいる。この状況を受け、β-グルカンを多く含む大麦新品種の開発が農研機構や地方の農業試験場を中心に進められており、国内の大麦生産量は、2016 年の 16.0 万ｔに対し 2021 年は 21.3 万ｔにまで伸長している[2)]。

大麦を製粉して得られる大麦粉は、菓子・パン等の原料に使用されるが、精麦工程において原麦重量の３割にも上る大量の糠が発生している。そのほとんどが廃棄又は畜産飼料としての利用に限られており、持続可能な社会実現の観点からも、食品素材として活用することが求められている。

一方、穀物原料の加工技術としてエクストルージョンクッキングが挙げられる。食品原料をバレル内でスクリューにより混錬し、任意のダイから押出すことで成形する方法であり、主にスナック菓子などの製造に使用される。そこで本研究では、二軸エクストルーダーを用いて大麦糠の押出加工を行い、原料配合及び運転条件が押出品の品質に及ぼす影響を調査することで、当該原料を食品素材として有効利用する方法を検討した。

＊　栃木県産業技術センター　食品技術部
＊＊　株式会社大麦工房ロア

２　研究の方法

２．１　原料

令和４年産栃木県産二条大麦（品種：ビューファイバー）を精麦した際に生じた糠を原料とした。精麦歩合は 70%とし、精麦工程初期に発生する外皮付近のものを外層糠、中盤以降に発生する胚乳付近のものを内層糠として試験に供した。また、エクストルージョン試験における副原料として、前述の精麦後に気流粉砕法により粉砕した大麦粉に加え、小麦粉（薄力粉　星野物産㈱製）、コーンフラワー（㈱ニップン製）、米粉（粳米　日の本穀粉㈱製）を用いた。

２．２　成分分析

一般成分は日本食品標準成分表 2020 年版（八訂）分析マニュアルに準拠し、水分は常圧加熱乾燥法、たんぱく質は燃焼法（改良デュマ法）、脂質は酸分解法、炭水化物は差し引き法、灰分は直接灰化法、食物繊維はプロスキー変法により求めた。また、炭水化物から食物繊維を差し引いたものを糖質とした。β-グルカンはβ-グルカン分析キット（Megazyme 社製　K-BGLU）を用いて測定した。

２．３　エクストルージョン試験

二軸エクストルーダーは㈱幸和工業製 KEI45-25 型を使用した。本装置の概要を図１に示す。スクリューパターンはフォワードスクリュー(F)、パイナップルスクリ

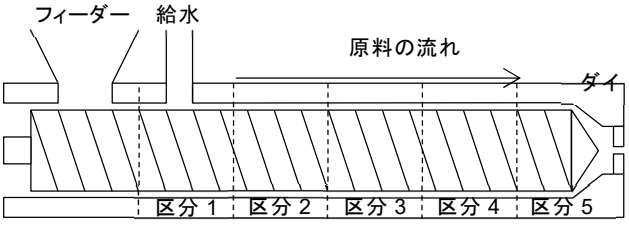


図１　二軸エクストルーダー概要

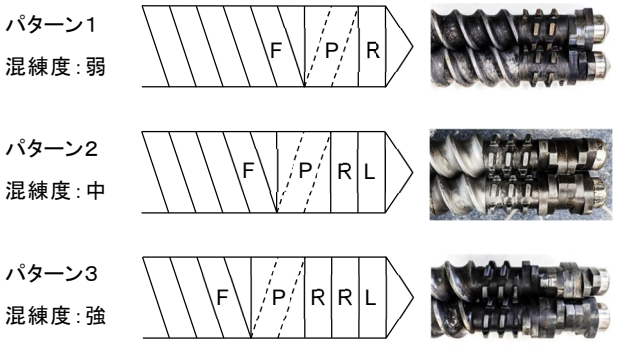


図２　スクリューパターン

F：フォワードスクリュー、P：パイナップルスクリュー、
R・L：ニーディングディスク正方向(R)・逆方向(L)

ュー(P)、ニーディングディスクスクリュー正方向(R)及び逆方向(L)を組み合わせ、混錬強度の異なるスクリューパターンを採用した（図２）。原料配合の検討における運転条件は、原料供給量 18 kg/h、対原料加水率 3%、スクリューパターン２、スクリュー回転数：200 rpm、バレル加熱温度（区分１～５に分けて温度設定可能）区分１:60℃、区分２:80℃、区分３～５:100℃とした。加工条件の検討では、実験計画法の手法である２水準系直交配列表実験に沿って運転条件を設定した。スクリューパターン(A)、スクリュー回転数(B)、対原料加水率(C)、区分４及び５のバレル加熱温度(D)を要因とし、それぞれ２水準の条件を設定し、これらを組み合わせた計８通りの実験を行った。各要因の設定水準を表１に示す。押出物を吐出するダイは、φ5 mm の１穴を使用した。ダイの吐出部にペレタイザーを設置し、２枚刃を 10 Hz で回転させて吐出物を切断した。得られた押出品は 120℃の熱風乾燥機で 90 分間乾燥させた。

表１　加工条件の検討における各要因の設定水準

要因	水準１	水準２
A：スクリューパターン	パターン１	パターン３
B：スクリュー回転数	180 rpm	250 rpm
C：対原料加水率	3%	6%
D：バレル加熱温度（※）	100℃	140℃

※区分 4,5 の設定温度。区分 1～3 はそれぞれ 60℃,80℃,100℃。

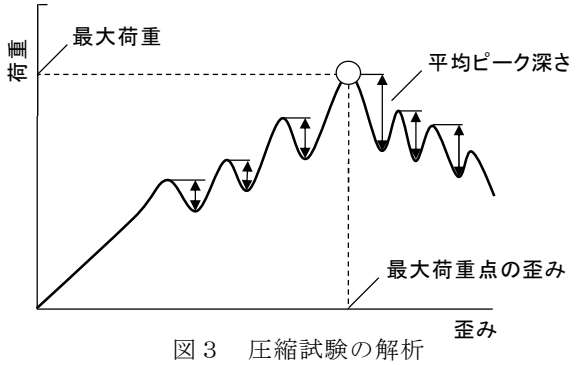


図３　圧縮試験の解析

２．４　押出品の品質評価

２．４．１　膨化度

膨化性評価のため、乾燥後の押出品の直径を計測し、ダイの口径（5 mm）で除した値を膨化度とした。各試験区 30 点測定し平均値を算出した。

２．４．２　テクスチャー測定

押出品の食感評価のため、テクスチャーアナライザー（Stable Micro Systems 社製 TA.XT plus100c）を用いて圧縮試験を行った。押出品をφ75 mm のプレート治具により、サンプル高さに対して歪み 50%の位置まで速度 5 mm/s で圧縮し、得られた荷重データから、全体的なかたさの指標として最大荷重、噛み心地の指標として平均ピーク深さ、脆さの指標として最大荷重点の歪みを求めた（図３）。各試験区 30 点測定し平均値を算出した。

３　結果及び考察

３．１　大麦糠の成分把握

エクストルージョン試験に向けた基礎データとして、内層糠、外層糠、対照として大麦粉の３種について、一般成分及び大麦に含まれる機能性成分であるβ-グルカンの含有量を測定した。結果を表２に示す。

糠は大麦粉と比べて糖質が低く、食物繊維、たんぱく質、脂質が高い傾向があり、特に外層糠においてその傾向が顕著であった。糠には、セルロースやアラビノキシランを主成分とする外皮部や、脂質や無機質を豊富に含む胚芽部が多く含まれていることが想定され、このことが成分組成に表れているものと考えられた。

食物繊維の内訳に着目すると、大麦粉では不溶性食物繊維よりも水溶性食物繊維のほうが豊富に含まれていたのに対し、糠では不溶性食物繊維の割合のほうが高く、外層糠では約９割を不溶性食物繊維が占める結果となった。また、機能性成分であるβ-グルカンは、外層の糠になるほど低値を示した。水溶性食物繊維であるβ-グルカンは胚乳細胞壁に多く含まれることが知られており[3)]、このため穀粒外周部である糠においては、水溶性食物繊維よりも外皮や糊層を由来とする不溶性食物繊維が高い割合を占めるものと考えられた。

表２　大麦粉及び大麦糠の成分分析結果

単位：g/100g

成分	大麦粉	内層糠	外層糠
水分	12.3	14.8	15.4
たんぱく質	9.1	16.2	16.8
炭水化物	73.3	59.5	51.2
糖質	54.9	40.7	11.6
食物繊維	18.4	18.8	39.6
不溶性	8.6	10.5	34.4
水溶性	9.8	8.3	5.2
脂質	4.1	6.9	11.7
灰分	1.2	2.6	4.9
β-グルカン	10.2	6.0	2.7

３．２　原料配合による加工特性への影響

はじめに、内層糠及び外層糠に大麦粉を配合して押出加工を行った。押出品外観を図４に示す。大麦粉 100%では良好に膨化したが、いずれの糠も配合量を増加させるほど膨化が抑制された。特に外層糠は、25%配合でも極端に膨化が抑制され、50%より多く配合するとダイから吐出された瞬間にフラッシュしてしまい、成形が困難であった。これは、外層糠に含まれる糖質が極端に少ないため、配合することで生地の結着性が著しく悪化することが原因と考えられ、押出加工による当該原料の成形は不適と判断し、以降の試験では内層糠のみを使用した。

次に、内層糠に小麦粉、コーンフラワー、米粉を副原料として配合し、同様に押出加工を行った。これらの押出品の膨化度を図５に示す。大麦粉及び小麦粉の配合試験区では、糠配合割合の上昇に伴い膨化度が直線的に低下する一方、コーンフラワー及び米粉の試験区では、糠の配合率 50%まで副原料単体と同等の膨化度を維持した。また、副原料単体の中では小麦粉の膨化度が最も高かったが、糠の配合割合 50%以上では、小麦粉よりもコーンフラワー又は米粉を配合した場合のほうが膨化する結果となった。糠にコーンフラワー又は米粉を配合して押出加工する際、各原料単独で押出加工する時よりもバレル内部の圧力値が約２倍に上昇する傾向が確認された。このためダイから吐出された生地内部の水分蒸発の勢いが高まることが要因となり、糠の配合割合が増えても膨化度が維持されるものと考えられた。

各押出品のテクスチャー測定で得られた最大荷重及び平均ピーク深さの結果を図６に示す。内層糠 100%の押出物と比較すると、いずれの副原料を配合した場合も最大荷重及びピーク深さが低減する傾向が見られ、副原料の配合により軽くサクサクした食感につながることが

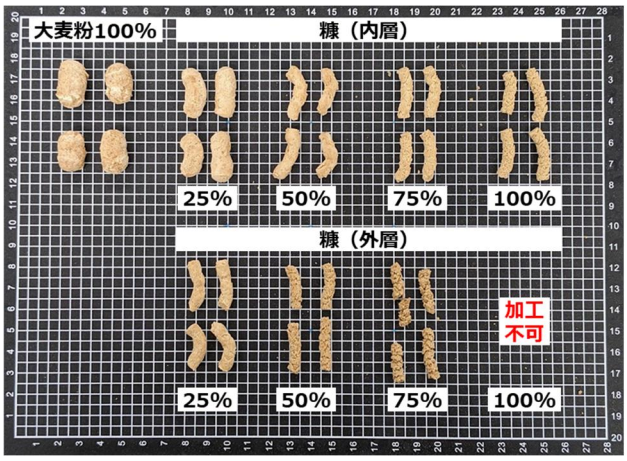


図４　大麦粉と大麦糠の配合試験における押出品外観

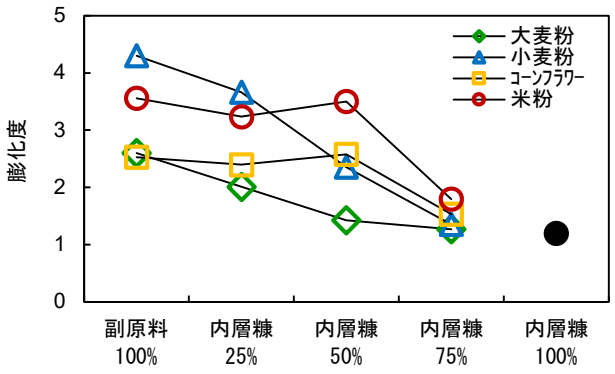
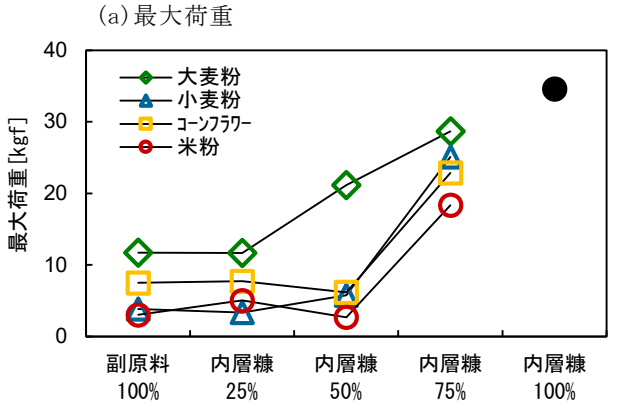


図５　原料配合による膨化度への影響



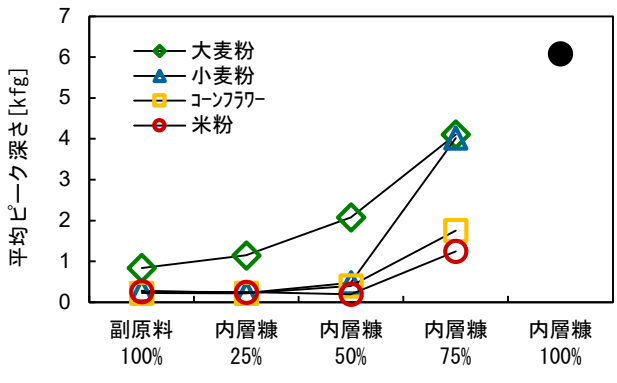


図６　原料配合によるテクスチャー特性への影響

示唆された。特に、糠配合割合 75%で比較すると、米粉を用いたものが最も低値を示したことから、糠を高い割合で配合する場合は、副原料に米粉を使用することで効果的に食感を改質できることが明らかとなった。前述のとおり、米粉を配合した押出品は膨化が促進されたことから空隙率が高いことが予想され、これにより各種テクスチャー特性が低値を示すものと考えられた。

３．３　加工条件が品質に及ぼす影響

二軸エクストルーダーには多くの運転パラメータがあり、それぞれが複雑に作用して押出品の品質に影響を及ぼすものと考えられる。そこで、当該装置による加工条件が押出品の品質に与える影響を検討するため、２水準系直交配列表実験を行った。なお、原料は内層糠：米粉＝2:1の配合を用いた。得られた押出品について膨化度及びテクスチャー測定を行い、要因ごとに２水準の平均値を算出し、分散分析による有意差検定を行った。膨化度の結果を図７、テクスチャー特性の結果を図８に示す。スクリューパターン及びスクリュー回転数は、膨化度及びテクスチャー特性に強く影響することが明らかとなり、混練能力の高いスクリューを高速回転させることで膨化度が上がり、最大荷重及びピーク深さが低減し軽くサクサクした食感につながる結果となった。一方、対原料加水率及びバレル加熱温度は、膨化度・最大荷重・ピーク深さには明確に影響しないものの、圧縮試験における最大荷重点の歪みに影響することが明らかとなった。最大荷重点は押出品の形状が大きく崩れる地点であり、最大荷重点の歪みは押出品の脆さに関与すると考えられる。この結果から、低加水率かつ高温で押出加工することで、最大荷重点が低歪み側にシフトするため、砕けやすい食感に繋がるものと考えられた。

３．４　試作品作製

以上の検討結果から、副原料の種類及び配合量並びに二軸エクストルーダーのスクリュー構成及び運転パラメータを適切に設定することで、押出品のかたさや噛み心地等を多様にコントロールすることが可能であることが明らかとなった。そこで、これまで得られた知見を基に、軽くサクサクした食感のものから噛みごたえのあるものまでいくつかの押出品を作製し、これらを用いて菓子類の試作を行った（図９）。押出品そのものは若干の穀物臭が感じられたが、チョコレート素材と合わせることでマスキングされ、穀物臭を感じにくくなった。また、食感は類似の市販品と比べても遜色なく、良好な食味であった。以上のことから、大麦糠を二軸エクストルーダーにより押出加工を行うことで、菓子類を中心として多様な製品の原料として活用できる可能性が示唆された。

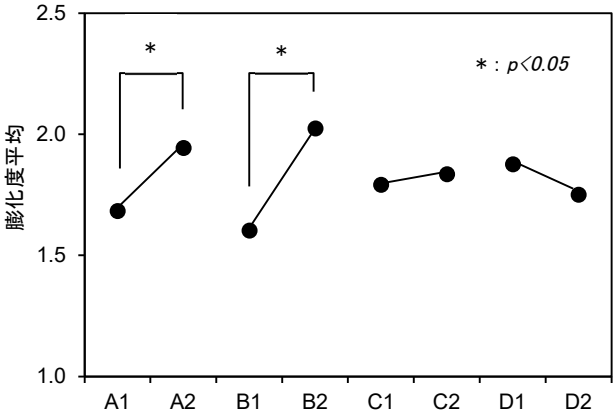


図７　加工条件による膨化度への影響

A：スクリューパターン　B：スクリュー回転数

C：対原料加水率　D：バレル加熱温度

数字は表１における各要因の水準を示す。

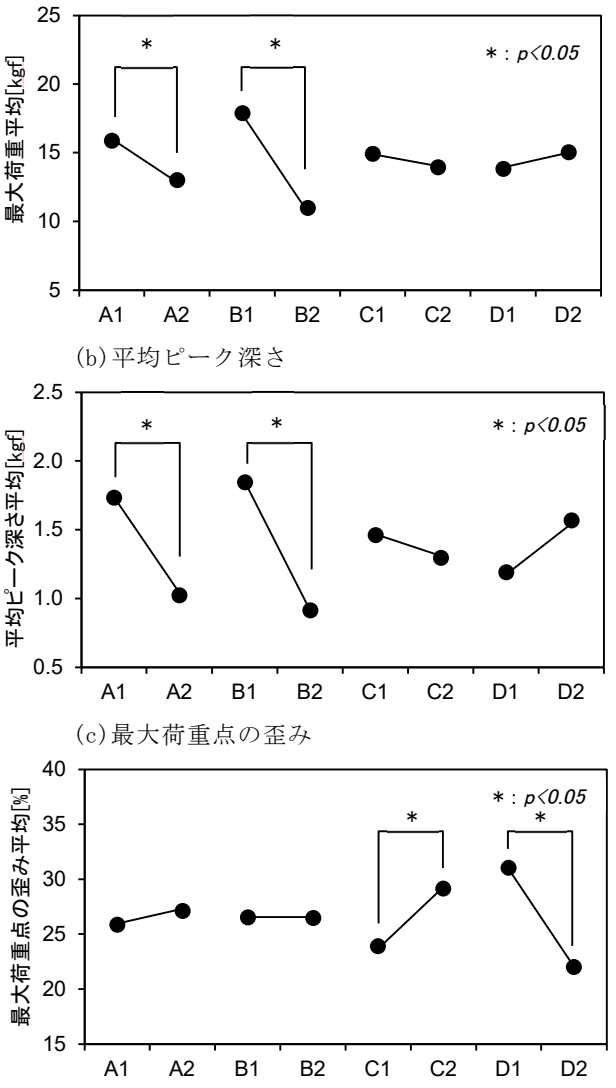


図８　加工条件によるテクスチャー特性への影響

A：スクリューパターン　B：スクリュー回転数

C：対原料加水率　D：バレル加熱温度

数字は表１における各要因の水準を示す。

(a)スナック菓子　(b)シュガーラスク風




(c)チョコレート菓子　(d)粒状パフ




図９　作製した試作品の例

４　おわりに

大麦糠の食品素材としての有効活用を目的として、当該原料を二軸エクストルーダーにより加工を行う際の、原料配合や加工条件が押出品品質に及ぼす影響を検討し、以下の知見を得た。

（1）　大麦糠には、大麦粉と比べて糖質が少なく、食物繊維、たんぱく質、脂質が多く含まれていた。また、不溶性食物繊維含量が高く、β-グルカンを含む水溶性食物繊維は大麦粉より少なかった。この傾向は内層糠よりも外層糠にて顕著であった。

（2）　内層糠に穀類副原料を配合することで押出品の膨化が促進され、テクスチャー測定における最大荷重及び平均ピーク深さが低下し食感の改質につながることが分かった。特に、糠を高い割合で配合する場合は、副原料に米粉を用いることで膨化促進及び食感改質に高い効果が得られた。外層糠は、大麦粉への配合が少量であっても膨化が極端に抑制される結果となり、押出加工には適さないともの考えられた。

（3）　二軸エクストルーダーによる加工条件のうち、スクリューパターン及びスクリュー回転数が押出品の膨化度及びテクスチャー特性に大きく影響することが分かった。対原料加水率及びバレル加熱温度は、テクスチャー特性のうち最大荷重点の歪みに影響し、押出品のくだけやすさに関与することが明らかとなった。

（4）　押出品そのものは若干の穀物臭を感じたが、チョコレート素材と合わせることで穀物臭が感じにくくなった。押出品を用いて試作した菓子は、類似の市販品と比べても遜色ない食味であり、主に菓子類の原料として活用できる可能性を見出した。

食品ロス削減や未利用資源の有効活用は、持続可能な社会実現の観点から、一般消費者においても社会全体の課題として認知が広がりつつある。大麦糠を有効活用した商品は、これらの課題に対応した取り組みとして新たな付加価値の提供を可能とし、高い市場性を持つものと考えられる。

参考文献

1）青江誠一郎：〝日本食生活学会誌〟，26（1），3-6，（2015）

2）農林水産省：〝令和３年産麦類（子実用）の作付面積及び収穫量〟，https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/sakumotu/sakkyou_kome/mugi/r3/index.html，（参照 2023 年３月８日）

3）塔野岡卓司ら：〝育種学研究〟,13(3),74-79,(2011)

Ⅲ 受託研究

Contract Research

受託研究

高濃度セルロース繊維複合樹脂における二軸ロール機の混練条件が射出成形条件及び成形時のフィラー凝集・物性に及ぼす影響

八丁　佳功*　　伊藤　繁則*　　佐伯　和彦*

Effects of Two-shaft Kneading Conditions on Injection Molding Conditions, Filler Agglomeration and Mechanical Properties of High-content Cellulose Fiber Composite Resins

HATCHO Yoshinaru, ITO Shigenori and SAEKI Kazuhiko

高濃度セルロース繊維複合樹脂ペレットの作製において、二軸ロール機の処理条件、射出成形条件、成形品の外観、及び物性の関係について調べた。ロール機の混練温度が高いと成形品は黄変が進んだ。また、混練温度を高くすると引張強さ、引張弾性率、曲げ強さ及び曲げ弾性率の機械的特性が向上した。このことは、混練温度の上昇によりセルロースの分散性の向上及び相溶化剤とセルロースの結合が促進され、機械特性が向上したと推察される。

Key words:　セルロース、複合樹脂、射出成形、ロール機、相溶化剤

1　はじめに

プラスチック関連企業では、近年 SDGs を背景に環境に配慮した取組が求められている。その中で、プラスチックの使用量削減を目的とした高濃度フィラー配合ペレットが注目されている。日本コークス工業(株)では、植物由来のセルロース繊維（以下、CeF）（幅：数μm～数十μm）を高濃度に配合した樹脂のニーズが高まっている。そのため、CeF を 50wt%以上配合したポリプロピレン（PP）ペレット（以下、CeF/PP ペレット）の作製に取り組んでいる。令和４年度の受託研究[1)]において、50wt% CeF/PP ペレットの射出成形成形品には CeF 凝集物とみられる白色部が点在し、成形品の外観不良や物性低下が予測された。また、令和５年度の受託研究[2)]において、相溶化剤（無水マレイン酸変性 PP（以下、MAPP））の添加により凝集抑制効果が確認されたものの、十分な分散には至っていない。

そこで、ロール機の処理条件を変えて試作した高濃度 CeF 複合樹脂ペレットを用いて、射出成形条件と成形品の特性（外観、物性）の関係を明らかにすることで、CeF のさらなる分散性向上を目的とした。

2　研究の方法

2．1　高濃度 CeF 複合樹脂ペレットの流れ試験

令和４年度の研究の結果、50wt% CeF/PP4/MAPP ペレット（以下 CeF/PP4/MAPP ペレット）（PP4：射出成形耐衝撃グレード PP）が最も高い物性を示した[1)]。なお、このペレットに配合されていた MAPP は MAPP1（酸価:26、分子量（Mw）:45,000）である。そこで、表１のとおり委託者がロール機の処理温度を検討して作製した No.1 CeF/PP4/MAPP1（以下、No.1）、及び No.2　CeF/PP4/MAPP1（以下、No.2）ペレットを用いて、以降の試験を行った。

No.1 及び No.2 ペレットのメルトマスフローレイト（MFR）は、メルトインデクサ（宝工業(株)製 L-207）を用いて、試験温度 190℃、公称荷重 2.16 kg で測定した（JIS K7210：1999　A 法参考）。

スパイラルフロー長さは、射出成形機（日精樹脂工業(株)製 NEX 80Ⅳ-9EG）を用いて、シリンダー温度 180℃、射出速度（v）3, 10, 100 mm/s、金型温度 48℃で成形し、測定した（金型キャビティ寸法：長さ 1, 150×幅 5×厚さ 3 mm）。

表１　高濃度 CeF 複合樹脂ペレットのロール機条件

名称	CeF/PP4/MAPP1[1)]	No.1	No.2
ロール温度（Fin）［℃］	210	210	220
ロール温度（Fout）［℃］	155	160	170
ロール温度（Bin）［℃］	150	150	160
ロール温度（Bout）［℃］	150	150	160
ペレタイザ（P）［℃］	170	170	180

＊ 栃木県産業技術センター　県南技術支援センター

表２　射出成形条件

シリンダー温度[℃]	保圧への変圧時間[s]	金型温度[℃]	射出速度[mm/s]
180	0.1	48	5，10，100

２．２　高濃度 CeF 複合樹脂ペレットの射出成形

No.1 及び No.2 のペレットを箱形乾燥機（(株)松井製作所製 PO-50SH-J）で 80℃、6 h 予備乾燥した後、射出成形機（日精樹脂工業(株)製 NEX 80Ⅳ-9EG）を用いて、表２の条件で成形した。

２．３　成形品の外観評価

成形品の外観は目視により評価した。また、No.1 及び No.2 の成形品の分光反射率は、分光測色計（コニカミノルタセンシング(株)製 CM-2600d）を用いて、光源 D65、視野 10°、測定径 8 mm、正反射光除去（SCE）方式で測定した。

２．４　成形品の物性評価

射出成形により得られた成形品をゲートカットして JIS K7139：2009 のダンベル形引張試験片タイプ A1 を作製した。また、ダンベル形引張試験片の一部を樹脂試験片ノッチ加工機((株)安田精機製作所製 No.189-PNCA)を用いて加工し、短冊形試験片を作製した。

作製したダンベル形引張試験片の引張強さ、弾性率は、JIS K 7161-1：2014 により万能材料試験機（50 kN）((株)島津製作所製 AG-50kN-XV（特型））を用いて、試験速度 v_1=0.5 mm/min、v_2=5 mm/min（速度切替位置：ひずみ 0.3%）で測定した。引張弾性率の測定には接触式伸び計((株)島津製作所製 SSG50-10SH、標線間距離 50 mm)を用いた。短冊形試験片の曲げ強さ、弾性率は JIS K 7171：2016 により万能材料試験機（50 kN）を用いて、支点間距離 64 mm、試験速度 2 mm/min で測定した。曲げ弾性率の測定にはたわみ測定装置((株)島津製作所製３点曲げ試験用たわみ測定装置）を用いた。

３　結果及び考察

３．１　高濃度 CeF 複合樹脂ペレットの流れ試験

CeF を含まない PP4(以下、ニート PP4)、令和４（2023）年度に作製した CeF/PP4/MAPP1 ペレット、No.1 及び No.2 ペレットの MFR、及びスパイラルフロー長さを表３に示す。CeF を添加したペレットは、ニート PP と比較して MFR が大幅に低下し、同等な値を示した。スパイラルフロー長さについても、CeF を添加したペレットは、ニート PP に比べて低下し、同等な値を示した。後述するが、大幅に低下した MFR を示す CeF/PP4/MAPP1 ペレットと同様に、No.1 及び No.2 ペレットも射出成形が可能であった。

表３　高濃度 CeF 複合樹脂ペレットの MFR とスパイラルフロー長さ

試験片	MFR [g/10min]	スパイラルフロー長さ[mm]		
		v=3	v=10	v=100
ニート PP4[1)]	49.4	470～480	490～500	510～520
CeF/PP4/MAPP1[1)]	0.6	-	310～320	350～360
No.1	0.7		290～300	340～350
No.2	0.9		310～320	350～360

３．２　高濃度 CeF 複合樹脂成形品の外観評価

各ペレットの射出成形条件と成形性の結果を表４に示す。令和５年度研究において、CeF/PP4/MAPP1 ペレットは、射出速度 v=5，10，100 mm/s の全ての条件で成形可能であったが、No.1 及び No.2 ペレットは、射出速度 v=5 mm/s ではショートショットとなり成形できなかった。射出成形が可能であった No.1 及び No.2 の成形品の

表４　高濃度 CeF 複合樹脂ペレットの成形条件と成形性

	シリンダー温度[℃]	保圧への変圧時間[s]	金型温度[℃]	射出速度：v [mm/s]		
				5	10	100
CeF/PP4/MAPP1[2)]	180	0.1	48	○	○	○
No.1				×	○	○
No.2				×	○	○

○：成形可能、×：成形不可（ショートショット）



図１　No.1 及び No.2 の射出成形品の外観写真
(a) No.1 v=10 mm/s、(b) No.1 v=100 mm/s、
(c) No.2 v=10 mm/s、(d) No.2 v=100 mm/s

外観写真を図１に示す。図１により、すべての射出成形品において黄変が観察された。射出速度 v=10 mm/s の成形品には、CeF の凝集物とみられる白色部が多く点在しているが、v=100 mm/s の成形品には少ない傾向があった。

図２に No.1 及び No.2 の成形品の分光反射率（SCE）を示す。CeF/PP4/MAPP1 成形品と比較すると、No.1 及び No.2 ともに L^*値（正の値が大きいほど明るい）が小さくなる傾向があり、暗色になることが分かった。一方、a^*値（正の値が大きいほど赤色が強い）及び b^*値（正の値が大きいほど黄色が強い）は No.1 及び No.2 ともに大きい傾向があり、成形品がより黄褐色化していることが分かった。表１に示したロール機条件のとおり CeF/PP4/MAPP1 ペレットよりも、No.1 及び No.2 ペレット作製時のロール機温度が高いため、熱による CeF の変色が、成形品の暗色化及び黄褐色化の原因と考えられる。

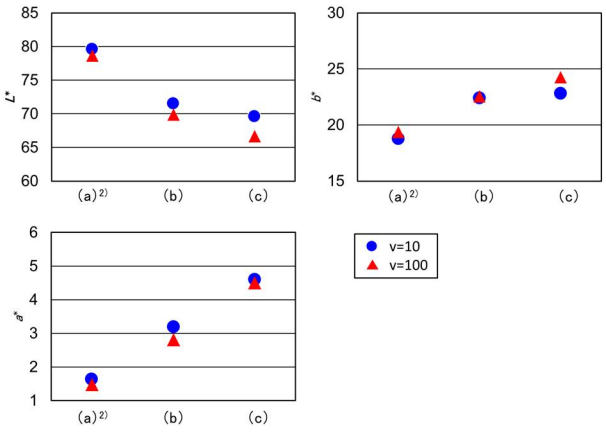


図２　CeF/PP4/MAPP1 成形品の分光反射率（SCE）
（a）CeF/PP4/MAPP1 成形品、（b）No.1 成形品、
（c）No.2 成形品

３．３　高濃度 CeF 複合樹脂成形品の物性評価

成形品の引張試験と曲げ試験の結果を図３に示す。ニート PP と比較して、CeF を添加した他の３種類の成形品では引張強さ、引張弾性率、曲げ強さ、曲げ弾性率が高くなっており、CeF の補強効果が現れていることを示している。

さらに、CeF/PP4/MAPP1 成形品に比べて、No.1 及び No.2 成形品の特性が向上した理由は、後者の混練温度が高いため、樹脂の粘度が低下し CeF の分散性が高まり、機械的特性が向上したものと考えられる。また、相溶化剤を

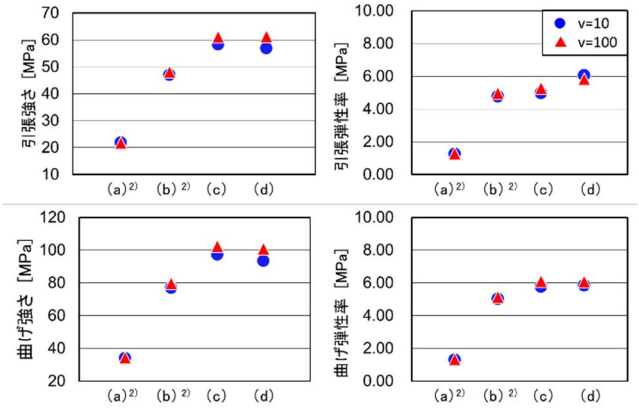


図３　CeF/PP4/MAPP1 成形品の機械的特性
（a）ニート PP4、（b）CeF/PP4/MAPP1、（b）No.1 成形品、
（c）No.2 成形品

用いたセルロースの混練において、相溶化剤のカルボキシル基とセルロースの水酸基間でエステル反応が起こり、化学結合形成により機械的特性が向上することが知られていることから[3]、No.1 及び No.2 成形品では、エステル化反応が促進されたと推察される。

４　おわりに

ロール機の処理条件を変えて作製した高濃度 CeF 複合樹脂ペレットを用いて射出成形を行い、成形品の外観及び物性を評価した結果、次の知見を得た。

（1）ロール機の混練温度を高くすると、成形品は暗色となり、黄褐色化が進んだ。

（2）No.1 及び No.2 の成形品では、射出速度 v=10 mm/s より速い v=100 mm/s の方が、CeF 凝集部が少ない傾向であった。

（3）ロール機の混練温度を高くすると、成形品の引張強さ、引張弾性率、曲げ強さ、及び曲げ弾性率が増加した。

参考文献

1）小林愛雲，渡辺克人：〝栃木県産業技術センター研究報告〟，20，29-36，（2023）

2）小林愛雲，八丁佳功：〝栃木県産業技術センター研究報告〟，21，47-54，（2024）

3）Wulin Qiu，Takashi Endo，and Takahiro Hirotsu 工藤清孝：〝Transactions of the Materials Research Society of Japan〟，29，5，2475-2478（2004）

Ⅳ 重点研究

Selected Research

重点研究

未利用野菜の活用に向けたブランチング及び乾燥方法に関する研究

金井　悠輔*　　伊藤　和子*

Study on Blanching and Drying Methods for Processing Unutilized Vegetables

KANAI Yusuke and ITOH Kazuko

未利用野菜の有効活用を目的とした乾燥処理において、ブランチング及び乾燥方法が食材の品質に及ぼす影響を検討した。アクアガスによるブランチング処理は熱湯処理と同等の殺菌効果があり、遊離糖・遊離アミノ酸の損失も抑制された。温風乾燥は、特に高温での乾燥において褐変が生じやすい一方で、香ばしく濃厚な香気成分を付与した。また、湿球温度制御による乾燥効率化は、乾球温度の設定により異なる結果となった。減圧乾燥は中心部の水分が抜けにくい食材の乾燥に効果的であり、真空凍結乾燥は色調の変化や食品成分の損失が少なく、食材本来の香気を保持する特徴が認められた。

Key words:　野菜、ブランチング、乾燥、殺菌、香気成分

1　はじめに

近年、国における SDGs やカーボンニュートラルへの対応として、食品ロス削減に関する施策が実施されている。栃木県においても、令和３年度に「栃木県食品ロス削減推進計画」が策定され、食品関連事業者及び消費者における食品ロス削減に向けた取組を促進している。

食品製造業者においては、規格外原料や加工による端材・残渣が発生する場合が多く、食品ロスにつながっている。これらの利用法として乾燥野菜が挙げられ、パン・菓子・麺などの生地に配合するなどの用途が考えられる。一般的に乾燥野菜は、ブランチングにより殺菌した上で乾燥させるが、従来から採用されている熱湯処理や温風乾燥などの方式では色調や風味、機能性成分含量の低下など、品質低下が課題となる場合があった。

一方、近年は高品質な農産加工技術として、高温の微細水滴を含んだ常圧の過熱水蒸気雰囲気（アクアガス）[1)]によるブランチング技術や、庫内の乾球温度に加えて湿度（湿球温度）を制御する乾燥機[2)]などが実用化されており、これらの技術を活用することで乾燥野菜の高品質化が期待されるが、効果が十分に検討されていない。

本研究は、県内の食品製造業で多く発生している未利用野菜等を対象とし、種々のブランチング方法や乾燥方法が品質に及ぼす影響を調査することで、これらの技術の有効性を検証するとともに、用途に応じた適切な乾燥加工条件を選択するための基礎的な知見を取得することを目的として実施した。

＊　栃木県産業技術センター　食品技術部

2　研究の方法

2．1　試料及び試料の調製

県内企業に対する未利用野菜発生状況のヒアリング結果を踏まえ、本研究で対象とする食材としてシイタケ、ニラの茎、タマネギを選定した。シイタケは上三川町で菌床栽培されたものを使用し、柄を切除した傘部分を厚さ 5 mm にスライスした。ニラの茎は真岡市のカット野菜加工業者において端材として生じたものを使用し、流水で洗浄後、長さ約 5 cm にカットした。タマネギは宇都宮市内小売店で購入した黄タマネギを使用し、外皮を剥き流水で洗浄後、厚さ 5 mm にスライスした。

乾燥品の品質評価においては、超遠心粉砕機（ヴァーダー・サイエンティフィック製 ZM300）により粉砕したものを分析用試料とした。

2．2　ブランチング処理

各試料を沸騰水中で任意の時間加熱することで熱湯処理とした。アクアガス（以下、AQG）処理はアクアクッカー（(株)タイヨー製作所　AQ-25G-SD5-OH）を使用し、条件は庫内温度：115℃、ポンプストローク：200、ファン回転速度：20 Hz とした。各試料を穴あきホテルパンに置き、任意の時間加熱した。なお、AQG に関する詳細については既報[1)]を参照されたい。乾燥試験におけるブランチング処理は 60 秒の AQG を適用した。

2．3　乾燥試験

2．3．1　温風乾燥

温風乾燥（以下、AD）は電気式小型乾燥機（木原製作所製 SM10S-EH-DPC）により行った。本装置は、熱風を循環・再利用することで庫内の温度（乾球温度）に加えて

湿度（湿球温度）を管理・制御する機能（以下、DDS）を有し、これにより乾燥物の急激な乾燥による乾燥物の表面硬化・変形を抑制するとともに使用熱量の削減が期待されている[2)]。乾燥条件は乾球温度 70℃・湿球温度 45℃または乾球温度 50℃・湿球温度 35℃とし、比較として同じ乾球温度で DDS を使用せず強制排気させる条件でも実験した。各試料 3 kg を同時に乾燥棚に並べ、乾燥中の品温の経過を熱電対で計測しながら乾燥を行った。

２．３．２　減圧乾燥

減圧乾燥（以下、VD）は角型真空定温乾燥器（ヤマト科学製 DP410）により行った。試料 1 kg をステンレス製ザルに並べ、室温で６時間減圧乾燥した後、６時間かけて庫内温度を 50℃まで昇温させ、その後 12 時間 50℃を維持して乾燥した。

２．３．３　真空凍結乾燥

真空凍結乾燥（以下、FD）は真空凍結乾燥機（日本テクノサービス製　FD-10BM-S）により行った。各試料 3 kg をステンレスバットに入れ予備凍結し、棚温度-40℃で 24 時間減圧後、40℃まで段階的に昇温させて凍結乾燥処理を行った。

２．４　品質評価

２．４．１　一般生菌数

各方式によるブランチング後の試料を滅菌袋に入れ、庫内温度 4℃のブラストチラーで急冷したものを生菌数測定用の試料とした。生菌数は食品衛生検査指針[3)]に準拠し、標準寒天培地を用いた混釈平板培地法により 35℃、２日間培養し、一般生菌数を計数した。

２．４．２　乾燥品の水分・水分活性・色調

乾燥品の水分は電子式水分計（島津製作所製 MOC-120H）により測定し、条件は試料量：5 g、測定モード：Auto、終了条件：0.05%、設定温度：120℃とした。また、水分活性は水分活性測定装置（novasina 製 LabMASTER-aw NEO）により測定した。色調は分光測色計（コニカミノルタ製 CM-5）により測定し、FD 品の色調を基準色として各乾燥品の ΔL^*、Δa^*、Δb^*を求めた。

２．４．３　遊離糖

乾燥前の試料については、試料 10 g に 80%(v/v)エタノール 50 mL を加えホモジナイズし、15 分間の超音波抽出を行った。抽出液を 80%(v/v)エタノール 10 mL 及び水で 100 mL に定容し、5A ろ紙及び 0.45 μm メンブレンフィルターでろ過したものを試験溶液とした。乾燥品については、試料 1 g にエタノール 5 mL、次いで 80%(v/v)エタノール 25 mL を加え、15 分間の超音波抽出及び 15 分間の振とう抽出を行った。水で 50 mL に定容し、3,000 rpm で 15 分間の遠心分離を行い、上清を 0.45 μm メンブレンフィルターでろ過したものを試験溶液とした。

遊離糖の分析は HPLC（島津製作所製　Prominence）により行った。分析条件は、移動相：アセトニトリル/水＝75/25、流速：1 mL/min、カラム：Shodex Asahipak NH2P-50 4E（4.6×250 mm、5 μm）、カラム温度：30℃、検出器：示差屈折計、注入量 10 μL とした。シイタケについてはトレハロース、ニラの茎及びタマネギについてはフルクトース、グルコース、スクロースを主な遊離糖として測定した[4),5),6)]。

２．４．４　遊離アミノ酸

２．４．３で調製した抽出液を遊離アミノ酸測定用の試験溶液とし、HPLC（島津製作所製　Nexera X2）による自動プレカラム誘導体化法により測定した。各アミノ酸量の総和を遊離アミノ酸総量とした。

２．４．５　ケルセチンアグリコン相当量

渡辺らの方法[7)]に従った。すなわち、タマネギ乾燥粉末 200 mg に希釈液（エタノール/水/塩酸＝50/20/8）12 mL を加えて密閉し、ボルテックス後に５分間の超音波抽出を行った。次いで 90℃のオーブン中で途中撹拌しながら 60 分間の加水分解を行った。放冷後、内容物を 20 mL 全量フラスコに移し、メタノールで定容して 0.45 μm メンブレンフィルターでろ過したものを試験溶液とした。定量は HPLC（島津製作所製　Prominence）により行い、分析条件は、移動相：メタノール/0.85%リン酸＝1/1、流速：1 mL/min、カラム：化学物質評価研究機構 L-column2 ODS（4.6×250 mm、5 μm）、カラム温度：35℃、検出器：PDA 検出器（370 nm）、注入量 10 μL とした。

２．４．６　香気成分

乾燥品 1 g に適量の水を加え、加熱脱着装置（Gerstel 製 TDU2）付き DHS-GC/MS（Agilent Technologies 製 5977B）により揮発性成分の測定を行った。吸着剤は Carbopack B&X + Shincarbon-X を用い、その他の条件は既報[8)]に従った。検出された化合物から、Aroma Office 2D（Gerstel 製）によりにおいを有する化合物のみ抽出してピーク面積値を求めた。

３　結果及び考察

３．１　ブランチング方法に関する検討

３．１．１　殺菌効果

ブランチング前後の一般生菌数測定結果を表１に示す。シイタケ及びタマネギは、いずれの殺菌方法でもほぼ無菌状態まで殺菌された。ニラの茎においては熱湯処理・AQG 処理ともに同程度の殺菌効果が見られたが、参考に葉についても同様に試験したところ AQG 処理において多くの菌が残存する結果となった。ニラの葉は扁平であるため、重なり合った箇所が AQG に曝されず、試料表面に付着している菌が生残したものと推察した。した

表１　ブランチング品の一般生菌数（cfu/g）

条件	シイタケ	ニラの茎	ニラの葉	タマネギ
未処理	9.1×10^5	4.2×10^6	8.5×10^5	2.1×10^2
熱湯 30 秒	300≧(0)	5.2×10^2	2.7×10^2	300≧(0)
60 秒	300≧(0)	1.7×10^2	1.0×10^2	300≧(0)
AQG30 秒	300≧(15)	6.2×10^2	1.2×10^3	300≧(0)
60 秒	300≧(0)	3.8×10^2	1.6×10^3	300≧(0)

（　）内は実測値

がって、AQG 処理は熱湯処理と同等の殺菌効果が認められるものの、試料形状によっては均一に AQG に曝す工夫が必要であると考えられた。

３．１．２　ブランチング後の形状

ブランチング後の試料形状を比較すると、シイタケは熱湯処理により形状が顕著に収縮している様子が確認され（図１）、シイタケを構成する菌糸の熱による軟化に加え、熱湯への成分の流出が起きている可能性が考えられた。AQG 処理では比較的元の形状を維持しており、フリーズドライ製法など、生鮮の形状保持が必要な場合には AQG 処理が効果的であると考えられた。一方、ニラの茎及びタマネギは熱湯処理による顕著な収縮は見られず、食材の組織の強度によって収縮の程度に違いがあるものと考えられた。

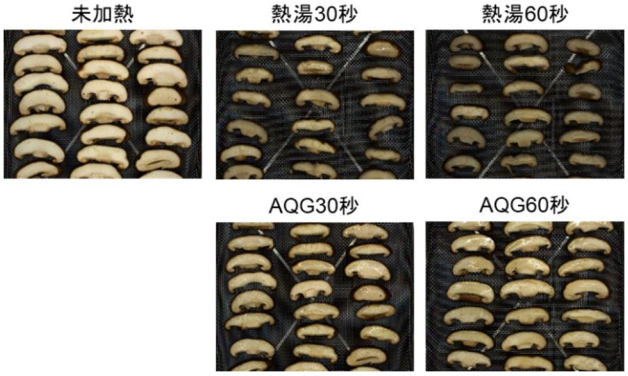


図１　ブランチング法による外観比較（シイタケ）

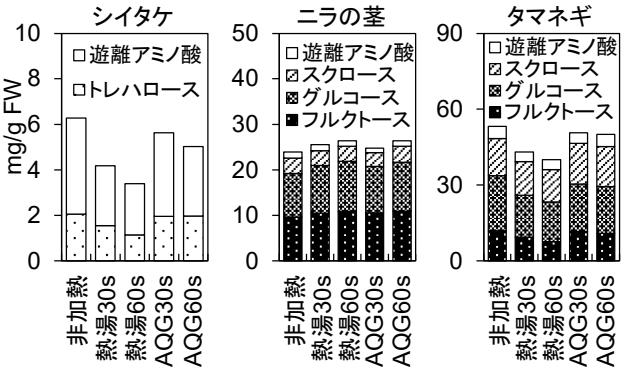


図２　ブランチング品の遊離糖・遊離アミノ酸総量

３．１．３　遊離糖・遊離アミノ酸

熱湯処理による成分流出の可能性が考えられたため、試料中の遊離糖及び遊離アミノ酸総量を測定した（図２）。シイタケ・タマネギでは熱湯処理によりいずれも減少し、AQG 処理では高い割合で保持されることが明らかとなった。AQG 処理において食材が接触する水量は熱水処理と比較して大幅に少なく、水溶性成分である糖・アミノ酸の溶出は限定的であり、成分損失を低減できたものと推察した。一方、ニラの茎を熱湯処理しても成分減少は確認されなかった。水溶性成分は下処理の際の切断面から最も多く溶出するものと予想されるが、ニラの茎は試料表面積に占める切断面の割合が小さく、熱湯処理によっても成分が溶出しにくいものと考察した。

以上の検討結果から、AQG 処理は熱湯処理と同等の殺菌効果があり、かつ成分損失を抑制できる優れた方法と判断し、以降の乾燥試験におけるブランチング処理は AQG 処理（60 秒）を適用した。

３．２　野菜の乾燥方法に関する検討

３．２．１　DDS による乾燥速度

AD の乾燥速度は、製造効率に加え食材への熱ダメージを低減するためにも重要な性能である。そこで、DDS による乾燥速度への影響を検証した。品温が設定乾球温度に到達するまでの時間を乾燥に要した時間と捉え乾燥速度を評価したところ、乾球温度 70℃の場合、いずれの食材でも DDS を使用することで使用しない場合と比べて到達時間が約 2/3 に短縮し、乾燥速度の向上が認められた（表２）。一方で、乾球温度 50℃の場合では、全ての食材において DDS の使用により逆に到達時間が延長した。乾球温度 50℃では DDS を使用せずとも急速な表面硬化が生じにくいことが推察され、湿度の保持がかえって乾燥速度を低下させたことが原因と思われた。このため、DDS による乾燥速度向上は、乾球温度や、乾燥物の表面硬化の起きやすさに影響を受けるものと考えられた。

表２　温風乾燥試験の乾球温度到達時間(h)

	タマネギ	ニラの茎	シイタケ
AD70-1	5.5	8.1	5.4
AD70-2	3.7	5.3	3.7
AD50-1	5.8	9.1	5.6
AD50-2	8.4	11.8	8.8

AD70-1：乾球温度 70℃・DDS 不使用（強制排気）

AD70-2：乾球温度 70℃・DDS 使用（湿球温度 45℃）

AD50-1：乾球温度 50℃・DDS 不使用（強制排気）

AD50-2：乾球温度 50℃・DDS 使用（湿球温度 35℃）

表３　乾燥品の水分・水分活性

	シイタケ		ニラの茎		タマネギ	
	水分	Aw※	水分	Aw	水分	Aw
AD70-1	3%	0.04	9%	0.06	18%	0.14
AD70-2	3%	0.05	9%	0.06	17%	0.14
AD50-1	4%	0.07	29%	0.72	20%	0.24
AD50-2	4%	0.09	33%	0.77	20%	0.26
VD	4%	0.10	11%	0.09	19%	0.31
FD	3%	0.04	10%	0.04	17%	0.06

※Aw：水分活性　　乾燥条件は表２注釈と同じ

３．２．２　水分・水分活性

乾燥食品の保存性のために重要な指標である水分及び水分活性を評価した。シイタケ・タマネギはいずれの方法でも十分に乾燥していたが、ニラの茎は乾球温度50℃の AD において水分・水分活性とも高く、乾燥が不十分であった（表３）。一般的に陸上植物は、乾燥をはじめとする環境ストレスから自らを保護するため、特殊な表皮組織を有している。上述のとおり二ラの茎は切断面が狭く、表皮細胞面積が広いことから乾燥が阻害されたものと推察した。一方で、VD では良好に乾燥されており、減圧による沸点降下に加え、中心部の水分が切断面まで強制的に移行されることで乾燥が促進したものと考えられた。以上のことから、AD では内部の水分が抜けにくい食材についてはVDが効果的であると結論づけた。

３．３　乾燥方法による乾燥品品質への影響

３．３．１　色調

各方式による乾燥品を目視確認したところ、いずれの食材もFDによるものが最も生鮮の色調に近かったため、FD を基準として他の方式の色調を評価したところ、AD ではいずれの食材も Δa^*及び Δb^*が高い傾向があり、褐変が認められた（表４）。その中でもシイタケは褐変の程度が小さかった。褐変の原因として還元糖とアミノ酸とのメイラード反応が考えられ、還元糖をほとんど含まないシイタケは褐変しにくいものと推察した。また、いずれの食材も VD では褐変の程度が小さく、FD 及び VD は色調の保持に効果的な乾燥法であると考えられた。

表４　乾燥品の色調

	シイタケ			ニラの茎			タマネギ		
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
AD70-1	-5	2	2	-7	12	2	-17	10	17
AD70-2	-5	2	3	-9	11	1	-19	11	16
AD50-1	-3	1	0	-13	9	0	-4	3	9
AD50-2	-3	1	0	-17	9	-1	-6	3	11
VD	-3	0	1	-2	1	-2	-4	-1	9

基準色：各食材の FD 品　乾燥条件は表２注釈と同じ

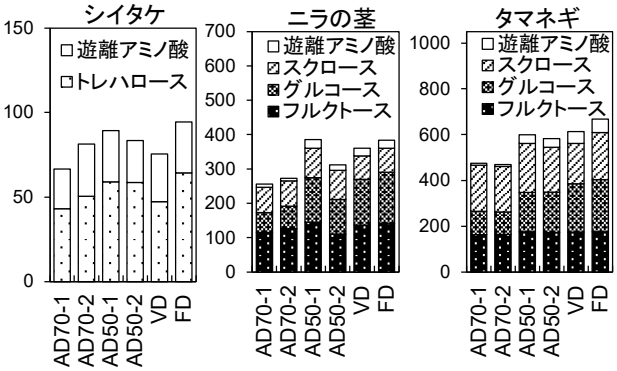


図３　乾燥品の遊離糖・遊離アミノ酸総量

単位：mg/g DW　乾燥条件は表２注釈と同じ

３．３．２　遊離糖・遊離アミノ酸

乾燥品の遊離糖及び遊離アミノ酸量を評価したところ、ニラの茎・タマネギでは乾球温度 70℃の AD により遊離アミノ酸が大きく減少し、遊離糖のうち還元糖であるグルコースも低値を示した（図３）。この２検体は最も褐変の激しかったものであることから、メイラード反応により両物質が消費された結果と推察した。シイタケでは遊離アミノ酸量に変化がないことも、色調の評価結果と合致した。この結果から、還元糖を多く含む食材は、低温での乾燥法によりメイラード反応を抑制することで、甘味・旨味物質を保持できるものと考えられた。

３．３．３　香気成分

シイタケ及びタマネギ乾燥品の香気成分を評価したところ、どちらの食材も AD では roasted、butter 様の香ばしく濃厚な香りが多く、乾燥時の熱によりこれらの香気成分が生成したものと考えられた（図４）。一方、VD 及び FD では green, sulfur, fruity, sweet 様の素材本来の香りの割合が高かった。これらの方式は熱による影響が小さく、食材本来の香気を維持しやすい特徴があると考えられた。

３．３．４　機能性成分

機能性表示食品等の開発において重要となる機能性関与成分として、シイタケ中の GABA、タマネギ中のケルセチンアグリコン含有量への影響を評価した（図５）。GABA は乾球温度 50℃の AD にて比較的高い値を示した。AQG 処理後も残存した内在酵素により、乾燥中に新たに GABA が生成した可能性が考えられたが、詳細は不明である。ケルセチンは乾燥方法による差は小さいものの、比較的低温での乾燥法により高い含有量を示した。ケルセチンはフェノール性水酸基の酸化により分解することが知られており[9]、高温での AD ではわずかに酸化分解が促進したものと推察した。機能性成分は種類により乾燥時の挙動が異なることから、成分ごとに詳しく検証する必要があるものと考えられた。

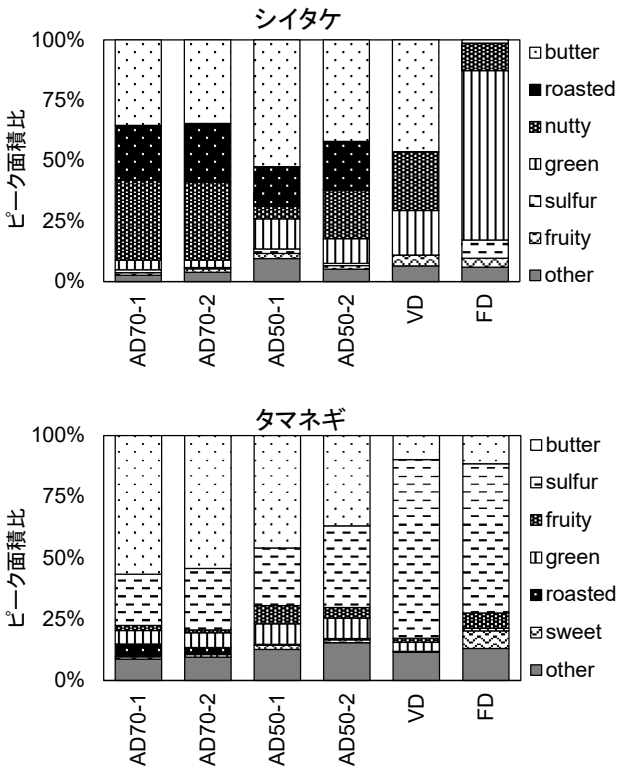


図４　シイタケ・タマネギ乾燥品の香気成分

乾燥条件は表２注釈と同じ

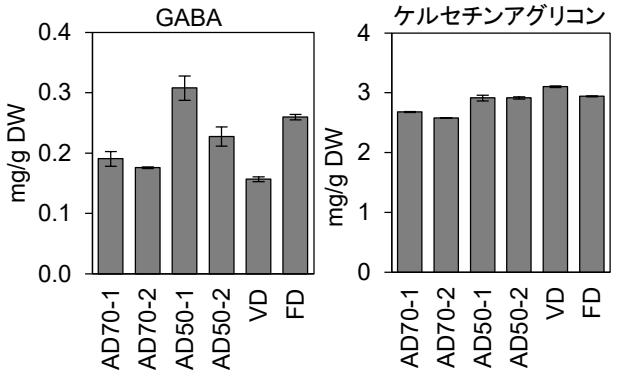


図５　機能性関与成分への影響

乾燥条件は表２注釈と同じ　エラーバー：標準偏差(n=2)

4　おわりに

未利用野菜等の乾燥加工において必要となるブランチング処理及び乾燥処理について、処理方式及び条件が品質に及ぼす影響を検討した結果、それぞれの特徴や適した用途を以下のとおり整理することができた。食品ロス削減の重要性は一般消費者にも浸透しつつあり、食品製造業者においても食品ロス削減の機運が高まっている。今後は、本研究で得た知見を活用し、未利用野菜等の活用を目指す企業の技術支援に取り組んでいく。

(1) AQG 処理は、熱湯処理と同等の殺菌効果があり、かつ試料形状を保持し、食品成分の損失も抑制できた。このことから、素材本来の呈味成分保持や、フリーズドライなどの形状保持が求められる場合のブランチング法として特に有効な手段である。一方、試料の形状によっては表面が均一に AQG に曝されるよう工夫が必要である。

(2) メイラード反応による褐変は、AD において発生しやすいものの、香ばしく濃厚な香気を付与する特徴を有し、特に還元糖を多く含む食材を高温で処理することで顕著に見られた。一般的に AD は、VD やFDと比較して装置の構造が単純で装置コストが低いと考えられるため、低コストが求められる場合や、加熱香気を活用した素材開発において有効である。

(3) DDS により、AD における乾燥速度を向上できる可能性が見出されたが、本機能を効果的に活用するためには、乾球温度などの条件を十分に検証する必要がある。なお、本研究では検証していないが、DDS により乾燥速度が向上されれば､食材が受ける熱量も低下し褐変や香気の変化も低減できる可能性が考えられた。

(4) 食材の構造上、AD では内部の水分が抜けにくく、十分に乾燥されない食材についてはVDが有効である。褐変も僅かであり､各種成分への影響も少ないため高品質な乾燥が可能である。

(5) 食材本来の形状や色調、香気の保持が求められる場合にはFDが有効である。ただし、製造コストの高い乾燥方式であるため、製品単価の高い高付加価値商品の開発において特に効果的である。

謝　辞

本研究の実施にあたり、ニラの茎を御提供いただきました成田食品(株)栃木工場に深く感謝します。

参考文献

1) 五十部誠一郎：″日本食生活学会誌″, 17 (3), 193-197, (2006)
2) 木原康博ら：″日本食品工学会誌″, 24 (2), A-4-7, (2023)
3) (公財)日本食品衛生協会：″食品衛生検査指針　微生物編　改訂第２版　2018″, 大和綜合印刷(株), 152-158, (2018)
4) 田淵諒子ら：″日本きのこ学会誌″, 28 (4), 175-181, (2020)
5) 池田英男ら：″園芸学研究″, 6 (2), 217-221, (2007)
6) 永井耕介ら：″日本食品低温保蔵学会誌″, 18 (4), 141-147, (1992)

7）渡辺純ら：″Analytical Science″, 28（12）, 1179-1182,（2012）
8）伊藤和子ら：″栃木県産業技術センター研究報告″, No.21, 41-46,（2024）
9）鈴木雅博ら：″東北農業研究″,56,259-260,（2003）