ISSN 1349-2608
No. 23 (2026)

栃木県元気ニコニコ部長
とちまるくん

令和７（2025）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：３テーマ）

- 協働ロボットによる自動化工程の更なる生産性向上に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・ 1
- 水と二酸化炭素によるカテーテルチューブ内表面改質法の開発・・・・・・・・・ ・・・・ 6
- 干し芋製造残渣の食品素材化に関する研究・・・・・・・・・・ ・・・・・・・・・・・・ 12

Ⅱ　共同研究（実施：６テーマ）

- シミュレーション技術を活用した樹脂 3D プリンタ製レンズアダプタの開発・・・・・・・・ 17
- 二次元バーコードを用いた味噌タンクの生産管理省力化に関する研究・・・・・・・・・・・ 21
- 製麹管理システムの拡充・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
- アロフェン膜を用いたゼオライト膜の作製と特性評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 31

非公開：２テーマ

Ⅲ　受託研究（実施：12 テーマ）

非公開：12 テーマ

Ⅳ　重点研究（令和７～８年度にかけて実施：１テーマ）

Ⅴ　経常研究（実施：11 テーマ）

- 熱可塑性 CFRP の穴あけ加工におけるばり抑制に関する調査研究・・・・・・・・・・・・・・・ 35
- 表面改質／熱プレスによるプラスチックの接着剤レス接着技術に関する調査研究・・・・・ 39
- 保存性向上を目的とした乳酸菌の選抜・培養に関する調査研究・・・・・・・・・・・・・・ 45
- スマートテキスタイル分野への参入に向けた繊維素材への機能性付与技術に関する調査研究・・ 52
- プラスチックの水平リサイクルに関する調査研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
- 超音波振動を援用したチタン合金の MQL エンドミル加工に関する研究・・・・・・・・・・ 63
- トロコイド加工による切削加工の生産性向上に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・ 67
- サステナブルな素材を用いたトーションレースの編成性評価と試作品の開発・・・・・・・・ 72
- 縫製条件による縫い目滑脱の抑制効果の検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 77
- 結城紬の糊付け材料及び条件の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 80
- 低温焼成可能な坯土及び釉薬に関する研究（第２報）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 84

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

- A Study on Further Productivity Improvement of Automation Processes Using Collaborative Robots・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
- Development of a Modification Method for the Inner Surface of Catheter Tubes Using Water and Carbon Dioxide・・・・・・・・・・・・・・ 6
- Research on Converting Dried Sweet Potato Production Residues into Food Ingredients・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12

Ⅱ Cooperative Research

- Development of a Resin 3D-Printed Lens Adapter Based on Simulation-Driven Design・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 17
- Study on Labor-Saving Production Management of Miso Tanks Using Two-Dimensional Barcodes・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 21
- Enhancement of the Koji Making Management System・・・・・・・・・・・・ 26
- Preparation and Characterization of Zeolite Membranes Using Allophane・・ 31

Ⅲ Contract Research

Ⅳ Selected Research

Ⅴ Ordinary Research

- Investigation of Burr Suppression in Drilling of Thermoplastic CFRP・・・ 35
- Research on Adhesive-Free Bonding Technology for Plastics through Surface Modification and Heat Pressing・・・・・・・・・・・・・・・ 39
- Study on the Selection and Cultivation of Lactic Acid Bacteria to Improve Food Preservation・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 45
- Investigation research about the functional grant technology to the textile materials for the entry to the field of smart textile・・・ 52
- Investigative Study on Horizontal Recycling Processes for Plastics・・・・ 58
- Study on Ultrasonic Vibration-Assisted MQL End Milling of Titanium Alloys・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
- Research on Productivity Improvement in Trochoidal Milling・・・・・・・・ 67
- Assessment of the Manufacturability of Torchon Lace Using Sustainable Materials and the Development of Prototype Products・・・・・ 72
- Verification of the suppression effect of sewing conditions in seam slippage・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 77
- Study of Starching Materials and Application Conditions of Yuki Tsumugi Thread・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 80
- Study on Low-temperature Firing Clay and Glaze (2nd Report)・・・・・・・・ 84

Ⅰ　重点共同研究

Selected Cooperative Research

重点共同研究（自動車、AI・IoT・ロボット分野）

協働ロボットによる自動化工程の更なる生産性向上に関する研究

藤沼　誠人*　片岡　智史*　佐藤　祐介**　石田　栄**　鈴木　優歩**　和良品　美桜**

A Study on Further Productivity Improvement of Automation Processes Using Collaborative Robots

FUJINUMA Masato, KATAOKA Satoshi, SATO Yusuke, ISHIDA Sakae, SUZUKI Yuho and WARASHINA Mio

本研究は、協働ロボットを用いた自動化工程の更なる生産性向上を目的に、ロボットを導入した加工工程における加工精度の高度化、検査工程への横展開、簡易な外観検査システム開発に取り組んだ。加工精度の高度化では、ロボットハンドの形状を最適化し、ワークの加工機への固定方法を改善する動作を考案、導入することで、作業員と同等の加工精度を実現した。検査工程の自動化では、ロボットとCNC画像測定機を連携させるための検査治具、測定プログラム、ロボット動作等を開発し、従来よりも作業員の工数を85%削減した。簡易な外観検査システムの開発では、AI異常検知フレームワークを用いた学習モデルを構築し、3 mm以上の異常やワークの取り違えを判定可能とした。

Key words:　協働ロボット、自動化、省力化、AI、外観検査

1　はじめに

近年、ものづくり企業においては、いわゆるロボットシステムインテグレータを介さず自前でロボットを導入する動きが見られるが、低コストでロボットを導入できる一方、その有効活用を図るためには、ロボット導入に関する一定の技術・ノウハウが必要不可欠となる。

共同研究者の(有)佐藤精機は、令和５年度に県先進的技術・製品開発支援補助金を活用し、作業員が行っていた加工品（ワーク）の加工機への搬送・取り付け・取り外しを協働ロボットで代替するNC旋盤加工の自動化を実現した。しかしながら、その加工精度は作業員による工程に比べ劣っている。加えて、検査工程等の他工程への横展開による更なる適用範囲の拡大、ワークの取り違え等を原因としたエラー停止のない安定した自動化工程の実現など、ロボットの更なる有効活用に向けた課題が顕在化しており、これは、県内ものづくり企業の共通課題と言える。

そこで本研究では、協働ロボットを導入した自動化工程の更なる生産性向上を目的に、ロボットハンドの最適化、治具等の見直し等による工程改善や他工程への横展開を図るとともに、簡易な外観検査システムを開発し、実証試験を実施した。また、本研究を通して、センターにおける協働ロボットの有効活用に関する技術・ノウハウを蓄積し、自動化に取り組む中小企業への支援能力の強化を図る。

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊　有限会社佐藤精機

2　研究の方法

2．1　加工精度の高度化

2．1．1　対象とする製品

図１に対象とした製品とその加工工程を示す。直径100 mm、厚さ15 mmの材料からNC旋盤、マシニングセンタの各工程を経て、最終形状に加工していく。このうち、NC旋盤工程では、図２の協働ロボット（(株)カワダロボティクス、NEXTAGE NXA）において、加工機へのワークの着脱と、加工機の操作を行う。ロボットハンドは、両腕ともに、空圧制御、平行チャックのメーカー標準エンドエフェクタを使用した。

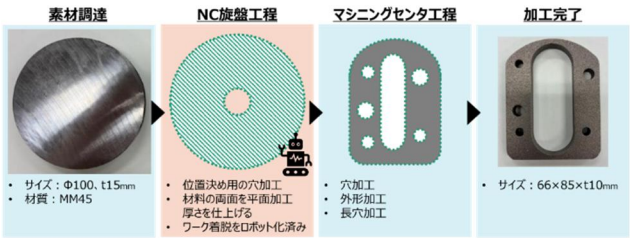


図１　対象とする製品とその加工工程

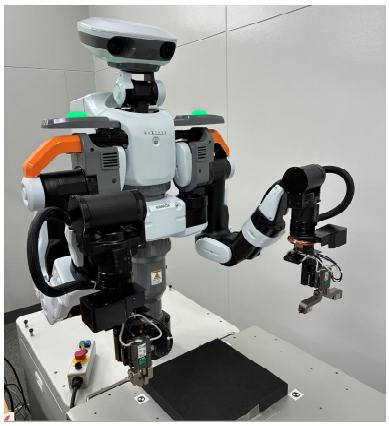


図２　協働ロボット　NEXTAGE NXA

２．１．２　ロボットハンドの開発

ワークを把持するツメを設計し、金属 3D プリンタ（(株)ソディック、OPM250L）及び樹脂 3D プリンタ（Formlabs、Form3L）にて造形した。造形したツメを協働ロボットに取り付けた様子を図３に示す。NC 旋盤加工前のワークは円盤形状であることから、両側から平行に把持するロボットハンドでは、把持が不安定になる。そこで、ツメの片側はＶ溝、もう片側は平形状とし、ワークの両側から３点で把持することで、円盤形状を安定して把持できるよう工夫した。

また、後述する補正アクションを効果的に行うため、ツメに半球形状を追加した。

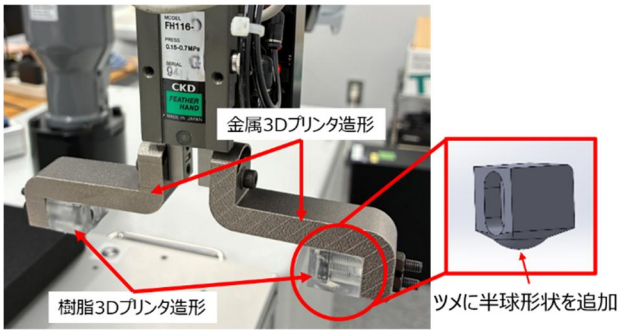


図３　ロボットハンドのツメ

２．１．３　ロボット動作の作成

加工精度が劣る要因をワークの加工機への取付精度にあると仮定し、解決方法として、ロボットハンドのツメに半球形状を追加し、ワークを加工機に固定後、半球部でワーク中心付近を押しながら、固定し直すロボット動作「補正アクション」を考案した。補正アクションの動作の概要を図４に示す。

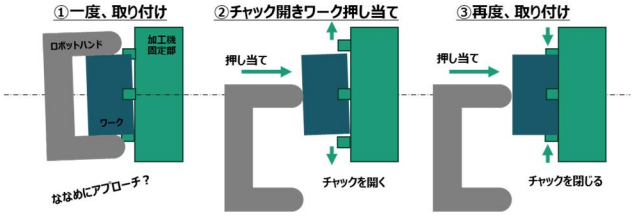


図４　補正アクションの概要

２．１．４　実証試験の実施

NC 旋盤工程において、考案した補正アクションの効果を検証するため、共同研究者社内にて実証試験を実施した。1)手作業による固定、2)従来ロボット動作のみによる固定、3)従来ロボット動作に補正アクションを追加した動作による固定の３種類でワークを固定し、５個ずつ加工した。加工後、ワークの反対面を基準面としたワーク平面の平行度を三次元座標測定機（(株)ミツトヨ、LEGEX9106）で測定した。

２．２　検査工程への横展開

２．２．１　自動化する検査工程の概要

自動化を行う現状の検査工程の測定手順を図５に示す。使用する測定機は共同研究者が保有する CNC 画像測定機（(株)ミツトヨ、Quick Vision ELF）、ワークは２．１と同様とした。測定手順は、まず、手作業でワークを測定機のガラステーブルに載せ、測定機を操作し、自動測定プログラムを実行する。測定終了後、測定結果と良否の判定が測定画面に表示され、手作業で、良否ごとにワークを取り出す。

通常であれば、測定機とロボットをケーブルで接続し、シーケンス制御により動作の連携を行うが、本測定機はロボットと接続可能な入出力インターフェイスを有していない。

そこで、この工程を自動化するため、図６に示す自動検査工程を立案した。まず、ロボットが測定機のガラステーブルに設置した検査治具にワークを６個並べる。次に、ロボットが測定機制御 PC のキーボードのエンターキーを押下し、自動測定プログラムを実行する。自動測定プログラムでは、１つのワークの測定が終わるごとに、良否の結果を PC のモニター上に表示し、ロボットのビジョンセンサにて読み取る。６個の測定の終了後、ロボットが検査治具上のワークを一つずつ取り出し、測定中に読み取った良否に応じて、搬送する。

図５　手作業による検査工程の測定手順

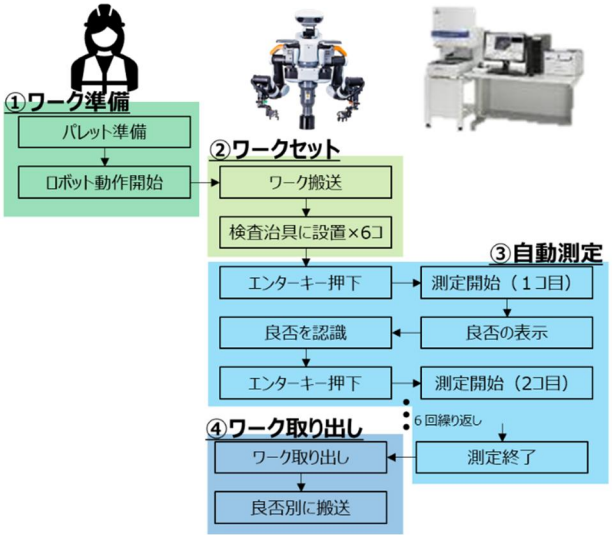


図６　立案した自動検査工程

２．２．２　検査治具、ツメの開発

ロボットがワークを測定機に容易にセットできるよう、新たに検査治具を開発した。開発した検査治具の外観を図７に示す。検査治具は、ワークを設置する上面を引き出せるような構造とし、ワーク搬送中にロボットが測定機に接触するリスクを低減させた。また、一度に６個のワークを設置できるサイズとし、検査効率を高めた。

図８に、検査工程用に開発したロボットハンドのツメを示す。ワークの中心に開いた長穴を把持する形状とした。

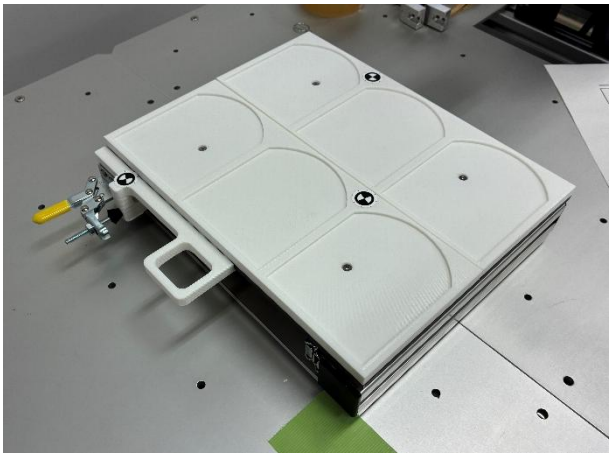


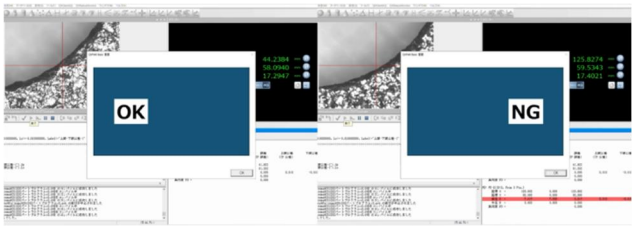
図７　検査治具の外観

図８　検査工程用のロボットハンドのツメ

２．２．３　自動測定プログラム、ロボット動作の作成

一度に６個のワークを連続測定するCNC画像測定機の自動測定プログラムを作成し、１つのワークの測定が終わるごとに、検査結果の「OK」または「NG」のダイアログを表示させる機能を追加した。図９に作成した自動測定プログラムの測定画面を示す。

立案した自動検査工程を実現するロボットの動作を作成した。開発した検査治具やツメ、自動測定プログラムの動作、後述する簡易外観検査工程を踏まえた動作とした。



（a）検査 OK 判定　　（b）検査 NG 判定

図９　自動測定プログラムの測定画面

２．２．４　実証試験の実施

立案した自動検査工程の効果を検証するため、共同研究者社内の検査室にて実証試験を実施した。実証試験用のワークを準備し、一度に検査治具に載せられる６個のワークを自動検査した際のサイクルタイムを計測した。また、従来の手作業による検査でのサイクルタイムを計測し、自動検査の場合と比較した。

２．３　簡易な外観検査システムの開発

２．３．１　AI 学習モデルの作成

ロボットのビジョンセンサで撮影したワーク画像に対して、ワークの取り違えやキズ・ゴミの有無等を検査する AI 学習モデルを作成した。AI 学習モデル作成のた

めの開発環境を表１に示す。NVIDIA GeForce RTX4060 8GB を搭載した Windows PC で anaconda の仮想環境を構築した。撮影した学習用の正常品画像 400 枚を用い、異常検知フレームワーク anomalib[1]に実装されている、異常検出アルゴリズム PatchCore[2]により、学習モデルを構築した。学習モデルは onnx 形式に出力し、ロボットと連携して外観検査を実施する Raspberry Pi 5 に実装した。表２に外観検査環境を示す。

表１　学習モデル作成環境

PC	Windows 11 Pro
CPU	Intel Core i7
GPU	NVIDIA GeForce RTX4060 8GB
RAM	16 GB
Python	3.10.18
仮想環境	anaconda 24.11.3
異常検知フレームワーク	anomalib 2.0.0
異常検出アルゴリズム	PatchCore
入力画像サイズ	750×750 pixel
画像枚数	400枚

表２　外観検査環境

デバイス	Raspberry Pi 5
OS	Raspberry Pi OS bookworm 64bit
モデル形式	onnx
Python	3.11.2

２．３．２　ロボットと Raspberry Pi 5 の連携システムの構築

ロボット制御 PC と Raspberry Pi 5 の LAN に共有フォルダを設定し、ログファイルを配置した。ロボットが撮影したワーク画像は共有フォルダに保存されるように設定した。図 10 にロボットと Raspberry Pi 5 の連携システムのフローチャートを示す。ロボットでワーク画像を撮影し、共有フォルダに保存する。ロボットからログファイルに“RUN”というコマンドを書き込む。Raspberry Pi 5 が“RUN”の書き込みを検知したら、保存された画像に対して検査を実行し、結果をログファイルに書き込む。ロボットがログファイルに書き込まれた検査結果を読み取り、結果に応じた動作を実施する。

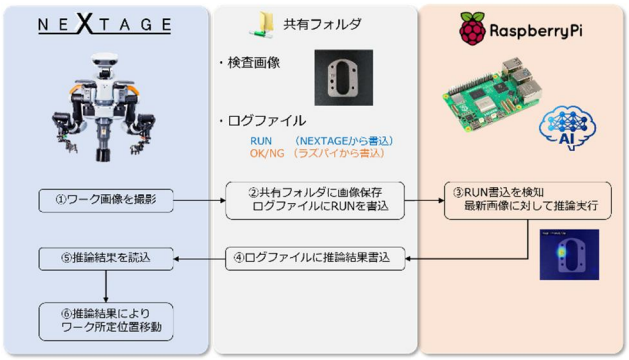


図 10　連携システムフローチャート

２．３．３　実証試験の実施

構築した外観検査システムの動作を検証するため、共同研究者社内の検査室にて実証試験を実施した。NG 品については、ワークの取り違えとして裏表を逆にしたもの、キズ・ゴミ付着物として圧痕やマジック書きしたもので再現した。

３　結果及び考察

３．１　加工精度の高度化

実証試験の様子を図 11 に、ワーク平面の平行度の測定結果を図 12 に示す。

図 12 により、手作業による固定動作での平行度 0.03 mm に対し、補正アクションでは 0.02 mm となり、同等の取付精度を実現していることを確認した。また、加工精度のバラツキについても、手作業と補正アクションは同等の水準となっていることがわかり、補正アクションが加工精度の向上に効果的であることが示された。

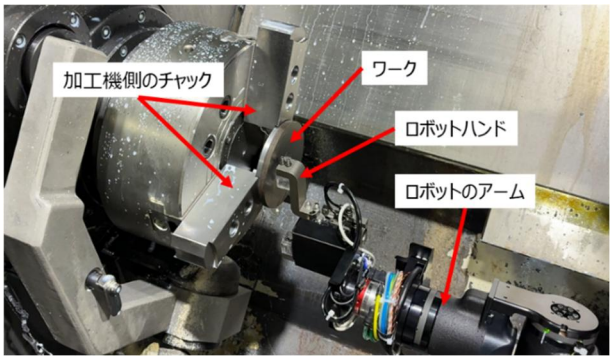


図 11　実証試験の様子

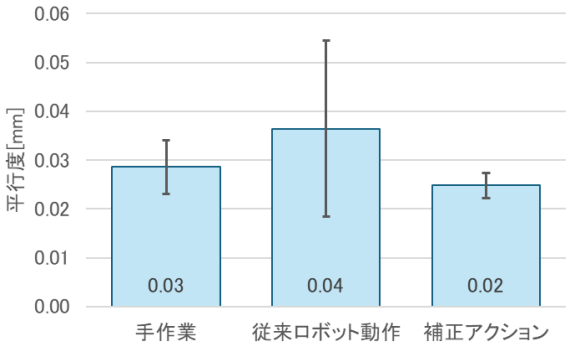


図 12　実証試験におけるワーク平面の平行度（N=5）

３．２　検査工程への横展開

図 13 に実証試験の様子を示す。立案した自動検査工程の動作がロボットで実現可能であることを確認した。

図 14 に６個のワークを測定した際の、手作業による検査とロボットによる自動検査のサイクルタイムを示す。総サイクルタイムはロボットが手作業の約５倍を要するものの、人が介入する実作業時間で比較すると、85%の削減が可能で、作業員の負担が軽減できることがわかった。

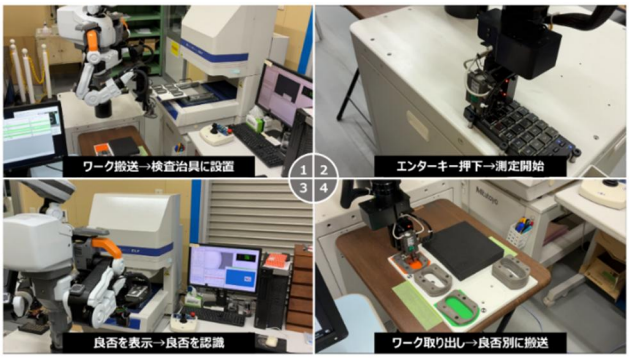


図 13　自動検査工程の実証試験の様子

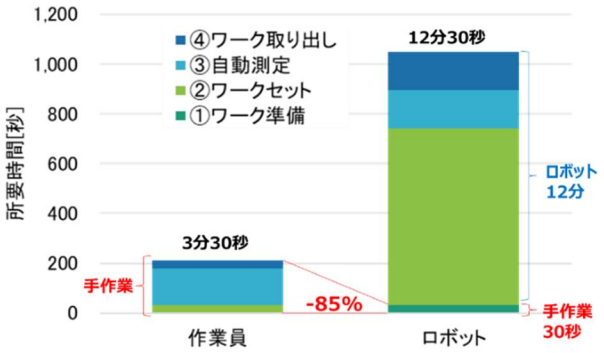


図 14　ワーク６個検査でのサイクルタイム

３．３　簡易な外観検査システムの開発

AI 学習モデルによる検査を実施した。異常がある箇所と AI 学習モデルのハイライトが一致していることが確認でき、結果として、大きさ 3 mm 以上の異常やワークの取り違えを認識し、NG 品としてロボット動作に反映させることができた。

４　おわりに

協働ロボットを用いた自動化工程の更なる生産性向上を目的に、ロボットを導入した加工工程における加工精度の高度化、検査工程への横展開、簡易な外観検査システムの開発に取り組み、次の結論が得られた。

(1) ロボットハンド、動作の開発により、作業員と同等の加工精度を実現した。

(2) 検査治具、測定プログラム、ロボット動作の開発により、検査工程を自動化し、作業員の工数を 85%削減した。

(3) 簡易外観検査システムを開発し、3 mm 以上の外観異常、ワークの取り違えを判定できた。

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) anomalib：
"github.com/open-edge-platform/anomalib" 引用日 2026/3/2

2) PatchCore：
"github.com/amazon-science/patchcore-inspection" 引用日 2026/3/2

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）

水と二酸化炭素によるカテーテルチューブ内表面改質法の開発

小林　愛雲*　　中田　あゆ美*　　大森　和宏*
西間木　潤**　　吉田　友幸**　　篠原　尚也***

Development of a Modification Method for the Inner Surface of Catheter Tubes Using Water and Carbon Dioxide

KOBAYASHI Azumi, NAKADA Ayumi, OMORI Kazuhiro,
NISHIMAKI Masaru, YOSHIDA Tomoyuki and SHINOHARA Naoya

機能性コーティングの前処理として、二酸化炭素ファインバブル（CO_2FB）水を用いたポリウレタンの表面改質法の開発を試みた。ポンプ圧力 0.1 MPa，CO_2 流量 1 L/min，恒温水槽温度 20℃で生成した CO_2FB 水の pH は最も低下し、最低で 4.1 となった。CO_2FB 水にポリウレタンシートを浸漬すると、ポリウレタンシートの表面付近に水酸基（OH 基）が生成することが FT-IR 測定で明らかになり、最も pH が低下した CO_2FB 水で改質したシートの OH 基由来ピークが最も大きく検出された。改質したポリウレタンシートとコーティング剤（MPC ポリマー）の密着性は高く、蒸留水中で撹拌しても剥がれが見られないことが AFM 観察により明らかになった。

Key words:　ファインバブル、CO_2、加水分解、ウレタン

1　はじめに

医療分野において、樹脂材料等が生体と接触すると、生体由来のタンパク質が表面に吸着し、問題を引き起こすことが知られている。カテーテルチューブでは、血液の通過によりタンパク質がチューブ内表面に吸着して血栓を生成し、詰まり等のトラブルが発生することがある。そこで、機能性コーティング処理等による問題解決が試みられている。機能性コーティングの一つに 2-メタクリロイルオキシエチルホスホリルコリン（MPC）ポリマーが挙げられるが、カテーテルチューブの素材であるポリウレタン等との密着性に課題があり、チューブ内表面の改質が必要とされている。ポリウレタンの表面改質法としては、紫外線（UV）照射や大気圧プラズマ処理が挙げられるが、カテーテルチューブ内表面の処理は困難である。また、グラフト処理等の例もあるが、医療用途であるため薬品の使用は制限されており、新たな改質法の開発が求められている。

一方、カテーテルチューブに用いられるポリウレタンは、二酸化炭素（CO_2）を触媒として用い、高温高圧下で加水分解することでモノマー化することが報告されている[1)]。この技術を応用し、マイルドな条件下で CO_2 水（炭酸水）を用いた加水分解を行うことで、表面のみを改質できるのではないかと考えた。ここで、炭酸水を製造する方法として、高圧下で CO_2 を封入する方法等存在するが、CO_2 ファインバブル（FB）を用いることで、設備上安価で比較的容易に高濃度炭酸水が製造できると考えられる。

本研究では、機能性コーティングの前処理として、CO_2FB 水を用いたポリウレタンの表面改質法を開発する。CO_2FB 水の生成条件が pH 及びポリウレタンの改質に与える影響、コーティングの密着性について検討したので報告する。

*　栃木県産業技術センター　材料技術部
**　栃木精工株式会社
***　大生工業株式会社

2　研究の方法

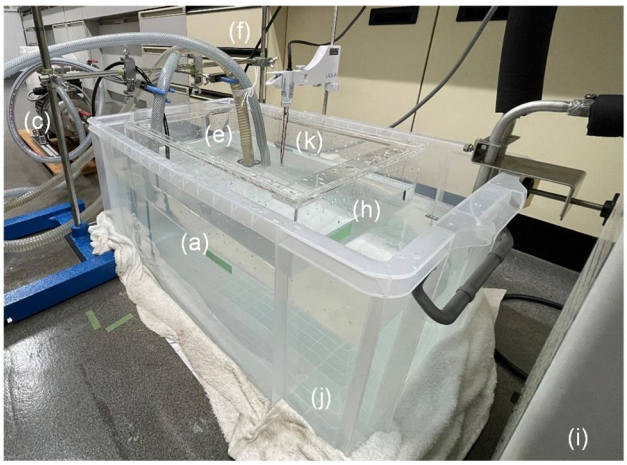
2．1　材料

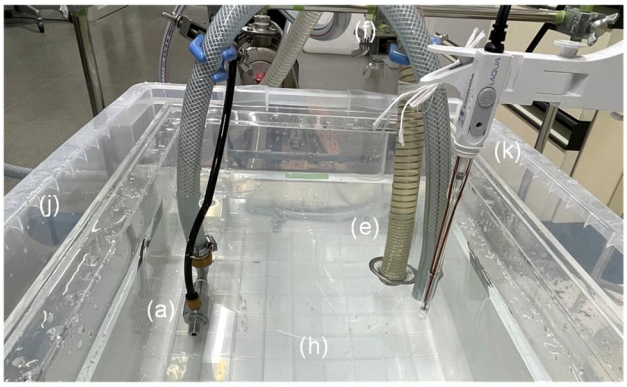
ポリウレタンは、Lubrizol 製 Pellethane 2363 80AE の射出成形シート（約 200 mm×220 mm×厚さ 3 mm）を約 20 mm×20 mm にカットし、エタノール（関東化学(株)製、特級）でふき取り洗浄した後、試験に供した。コーティング液は、インテリジェント・サーフェス(株)製 MPC ポリマー分散液を用いた。

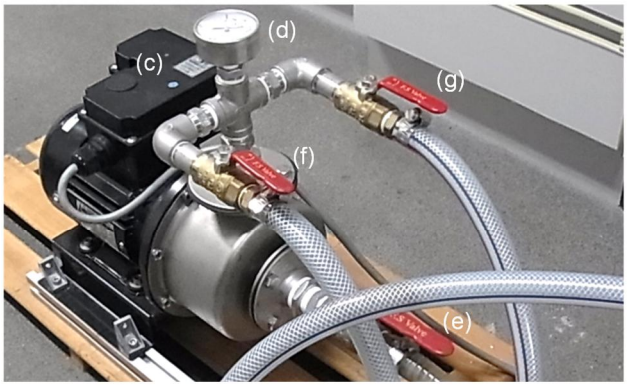
2．2　CO_2FB 水の生成及び樹脂の改質

FB 発生装置の写真及び概略図を図 1 に示す。本装置は、水槽（以下、FB 水槽）内の水を循環ポンプ（三相電機(株)製 PH2-3/3AS5.4）で吸い上げ、ノズル（大生工業

(株)製 HELIX NOZZLE TH-03）から吐出する際、CO_2 を自給し FB を発生させる仕組みである。







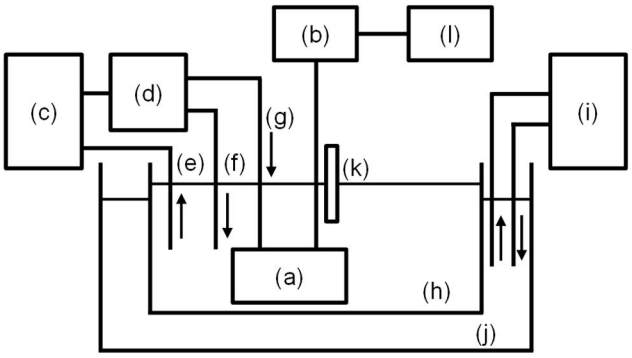


図１　FB 発生装置の写真及び概略図；(a)ノズル、(b)流量計、(c)循環ポンプ、(d)ポンプ圧力計、(e)吸水路、(f)排水路、(g)噴射水路、(h)FB 水槽、(i)低温恒温水循環装置、(j)恒温水槽、(k)pH 電極、(l)CO_2 ガスボンベ

FB 発生における溶媒には約 30 L の蒸留水を用いた。FB 発生中、図１(g)のコックは全開とし、図１(f)からの排水によりポンプ圧力を調整し、CO_2 流量は流量計により調整した。また FB 水槽の外側に恒温水槽（低温恒温水循環装置（東京理化器械(株)製 CTP-201）で温度制御）を設置し、温度を間接的に制御した。なお、今回検討した CO_2FB 水生成条件（ポンプ圧力、CO_2 流量、恒温水槽温度）は表１のとおりである。表面改質の際は、ポリウレタンシートを FB 水槽に浸漬した後､FB 生成を開始した。

２．３　改質樹脂の乾燥

CO_2FB 水に浸漬したポリウレタンシートを、エアブローすることで表面の水を除去した後、乾燥器（(株)東洋製作所製 FC-612）で 30℃または 60℃で 10 分間または 60 分間乾燥させた。

２．４　改質樹脂へのコーティング

ポリウレタンシートを蒸留水に約10秒間浸漬した後、取り出してエアブローにより表面の水を除去した。このシートをコーティング液に約 10 秒間浸漬した後、室温で約１時間静置することで、コーティング処理した。

２．５　評価

CO_2FB 水の pH は、pH・電気伝導度メータ（(株)堀場製作所製 DS-220PC）を用いて測定した。pH 電極（(株)堀場製作所製 9680S-10D）は図１(k)に示す位置に設置した。

CO_2FB 水のマイクロバブル（MB）径分布は、水槽に 40 L の水道水を入れ、液中パーティクルカウンター（ベックマン・コールター(株)製 HIAC8000A）を用いてノズル前 250　mm の位置からサンプリングし、インライン測定することにより求めた。

ポリウレタンシートの接触角は、接触角計（協和界面科学(株)製 DMs-400）を用いて測定した。測定には蒸留水を用い、滴下量は 2 μL とした。

また、ポリウレタンシートの表面及び付着物の分析は、フーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR, 日本分光(株)

表１　CO_2FB 水生成条件

	ポンプ圧力 [MPa]	CO_2流量 [L/min]	恒温水槽温度 [℃]
条件1	0.2	1	20
条件2	0.2	1	40
条件3	0.2	1	60
条件4	0.1	1	20
条件5	0.2	0.5	20

製 FT/IR-4600）を用い、ATR 法（ゲルマニウムプリズム）により行った。MPC ポリマー（以下、コーティング剤）の FT-IR 測定は、金属板にコーティング液を塗布し、室温で１時間静置した後、赤外顕微鏡（日本分光(株)製 IRT-5200）を用い、顕微反射法により行った。

コーティングの密着性は、コーティング処理したポリウレタンシートを蒸留水１Ｌ中で１時間撹拌した後、プローブ顕微鏡（AFM，セイコー電子(株)製 SPI-3800）で観察することにより評価した。

３　結果及び考察

３．１　CO_2FB 水の pH 及び MB 径分布

CO_2FB 水の pH の経時変化を図２(A)に、MB 径分布を図２(B)に示す。今回検討したいずれの条件においても、CO_2FB 水の pH は FB 生成開始から 10 分間で急激に低下し、１、２時間後まで時間経過とともに緩やかに低下した。その後 FB 生成を停止する 24 時間後まで、pH は緩やかに上昇した。また、今回検討したいずれの条件においても 24～28 μm をピークとする MB 径分布が得られた。

ポンプ圧力と CO_2 流量が同じで恒温水槽温度が異なる条件１、２、３（図２(a)、(b)、(c)）に着目すると、到達 pH はいずれも 4.3 だったが、恒温水槽温度が高いほど、時間経過に伴う pH の上昇は大きかった。また恒温水槽温度が高いほど、MB 濃度は低い傾向が見られた。FB においては、気泡の微細化に伴い内部圧力が増大し、ガスの溶解が促進されることが知られている [2]。すなわち MB やウルトラファインバブル（UFB）濃度が高いほうが、CO_2 溶解量は多いと予想される。また、水温が高いほど溶解できる CO_2 量は減少することが知られている。以上のことから、恒温水槽温度すなわち CO_2FB 水の温度が高いほど時間経過に伴う pH の上昇が大きいのは、MB 濃度が低いこと、また溶解できる CO_2 量が減少することが原因と考えられる。

恒温水槽温度 20℃の条件１、４、５（図２(a)、(d)、(e)）に着目すると、ポンプ圧力が低い条件４で生成した CO_2FB 水の pH は最も低下し、4.1 に達した。一方で、CO_2 流量が少ない条件５で生成した CO_2FB 水の pH は最も高く、到達 pH は 4.6 だった。また、最も低い pH を示した条件４の MB 濃度は最も低く、一方で、到達 pH が最も高い条件５の MB 濃度は最も高いことが分かった。このことは前述の MB 濃度と pH の関係からは説明できない。CO_2FB 水の pH は、MB 濃度や温度だけでなく、CO_2 流量や水流等が複雑に影響しているものと考える。

３．２　CO_2FB 水による樹脂の改質

ポリウレタン等のプラスチックには、滑剤等の添加剤や離型剤等、表面に付着物が存在することがあり、表面改質を阻害する恐れがあることから、ポリウレタンシートの表面を FT-IR で測定した（図３）。その結果、アミドを含む付着物が確認された（図３(a)）。これは、添加

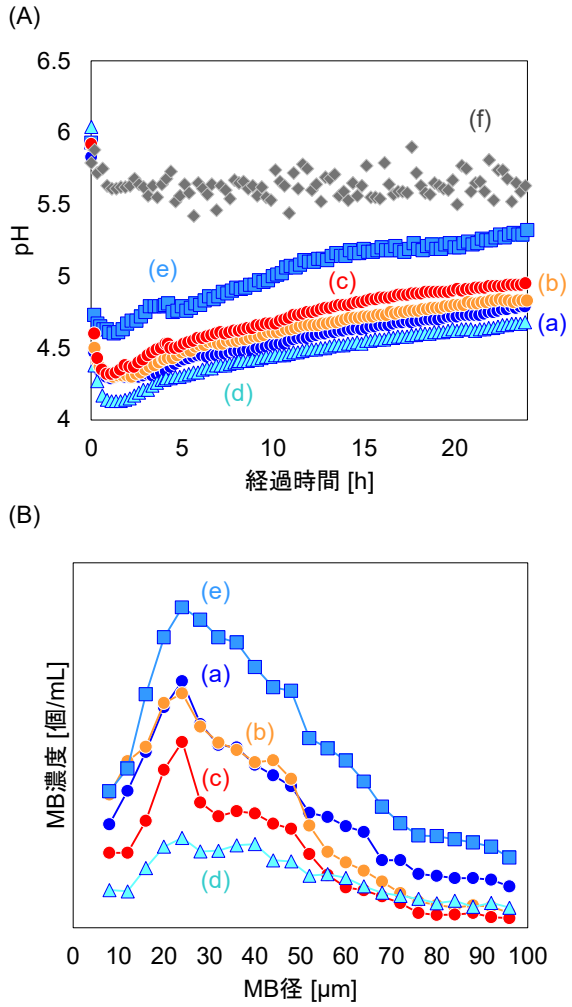


図２　CO_2FB 水の pH(A)及び MB 径分布(B)；(a)条件１、(b)条件２、(c)条件３、(d)条件４、(e)条件５、(f)蒸留水，20℃

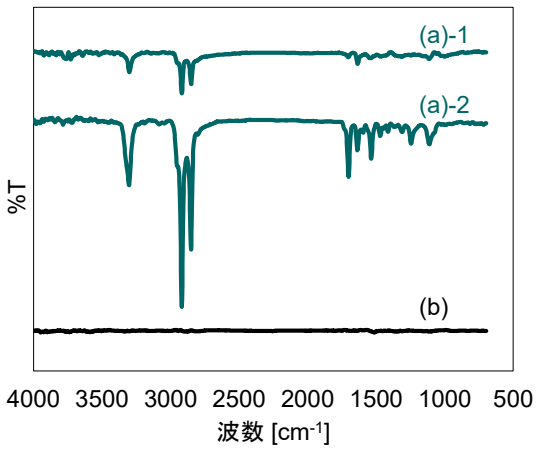


図３　ポリウレタンシート表面付着物の FT-IR スペクトル；(a)未洗浄、(b)EtOH 洗浄

剤である脂肪酸アミド[3]がブリードしたものと考えられる。

FB には洗浄効果があることが知られているが、付着物の量によっては、十分洗浄できないことが予想される。一方で、この付着物はエタノールでふき取り洗浄（以降、EtOH 洗浄）することにより除去できる（図３(b)）。そこで、ポリウレタンシートの CO_2FB 水による改質の効果を確認するため、以降、EtOH 洗浄したポリウレタンシートを実験に供した。

ポリウレタンシートを CO_2FB 水に一定時間浸漬した際の接触角の変化を図４に示す。浸漬０時間（未浸漬）のポリウレタンシートの接触角には、5° 程度のばらつきがみられた。ポリウレタンシートの表面には射出成形金型の転写によると思われる細かい線状の凹凸が多数確認されることから、表面形状にばらつきがあり、このことが接触角のばらつきの主な原因と考えられる。

また、恒温水槽温度 20℃の条件１、４、５では、CO_2FB 水浸漬時間の増加に伴い、ポリウレタンシートの接触角は低下したが（図４(a)、(d)、(e)）、40℃（条件２）、60℃（条件３）では、接触角は低下した後、高くなった（図４(b)、(c)）。これらのポリウレタンシートの表面を FT-IR で測定したところ、条件３で生成した CO_2FB 水に 4、8、24 時間浸漬したシートに付着物が確認された。また、条件２においては、４、８時間では付着物は確認されなかったが、24 時間では確認された。付着物の FT-IR スペクトルを図５に示す。本測定結果より、付着物は脂肪酸アミドと推定された。このことから、恒温水槽温度すなわち CO_2FB 水の温度が高く、浸漬時間が長いほど、ポリウレタンシート中の脂肪酸アミドのブリードが促進されることが示唆される。そのため、以降の実験では、恒温水槽温度 20℃（条件１、４、５）、40℃（条件２）のみ検討することとした。

ポリウレタンシートを CO_2FB 水及び蒸留水に浸漬した際の FT-IR スペクトルを図６に示す。条件１の 24 時間（図６(a)）、条件２の８時間（図６(b)）、条件４の４、８時間（図６(c)）浸漬において、3500 cm^{-1} 付近に水酸基（OH 基）とみられるブロードなピークが出現し、改質したことが示唆された。特に条件４で生成した CO_2FB 水に８時間浸漬したポリウレタンシートにおいては、OH 基由来のピークが他の条件より大きい傾向があった。そのため、以降の実験では当該条件を採用することとした。

３．３　改質樹脂の乾燥

条件４で生成した CO_2FB 水に８時間浸漬したポリウレタンシートを乾燥させたときの、接触角の変化を測定したところ、30℃で乾燥させたシートの接触角は、乾燥前と比べて明らかな差は見られなかった。一方、60℃で 10 分間乾燥したポリウレタンシートの接触角は、乾燥前より 7°、60 分間乾燥したものは 22° 高くなり、濡れ性が低下していることが確認された。これらのポリウレタンシートの表面を FT-IR で測定したところ、60℃乾燥後においては、ブリード物とみられる脂肪酸アミドが確認され、またそのピークは乾燥時間 10 分よりも 60 分のほうが大きく、はっきりとみられた（図７）。

またデータは示していないが、CO_2FB 水から取り出した後、24 時間室温で静置したポリウレタンシートの接触角は、取り出した直後に比べて高いことが確認されている。これらのポリウレタンシートの表面を AFM 観察したところ、CO_2FB 水から取り出した直後に比べて、24 時間静置後では付着物が増加している傾向がみられた（データ未掲載）。このことから、ポリウレタンシートのブリード物の増加が、濡れ性低下の原因と考えられる。

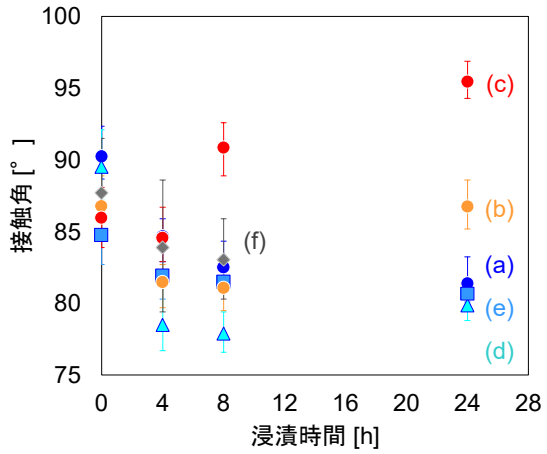


図４　ポリウレタンシートの CO_2FB 水浸漬時間と接触角の関係；(a)条件１、(b)条件２、(c)条件３、(d)条件４、(e)条件５、(f)蒸留水，20℃

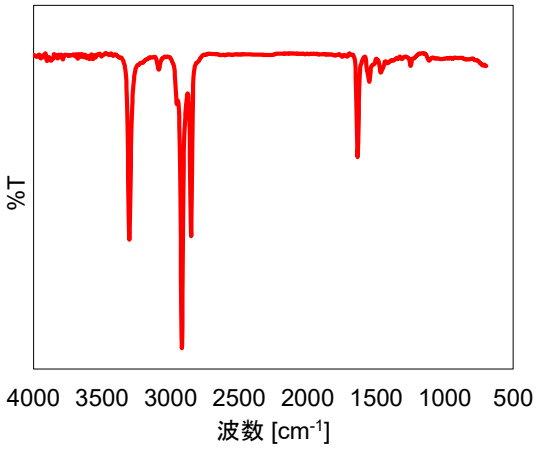


図５　CO_2FB 水（条件３）に８時間浸漬したポリウレタンシート表面付着物の FT-IR スペクトル

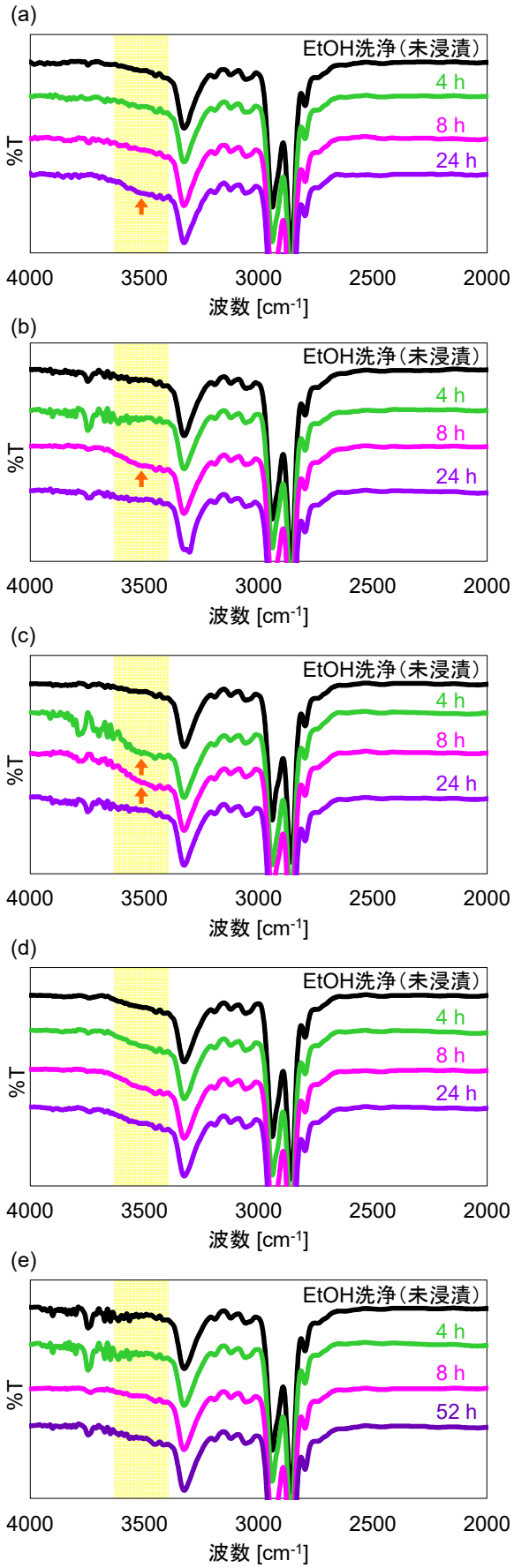


図６　ポリウレタンシート表面の FT-IR スペクトル；(a)条件１、(b)条件２、(c)条件４、(d)条件５、(e)蒸留水，20℃；図中の矢印は OH 基由来のピークを表す

以上のことから、CO_2FB 水で改質したポリウレタンの乾燥は、より低温、短時間で行うことが適していると考えられる。

ここで、CO_2FB 水に浸漬したポリウレタンシート表面の水は、ブロワーで除去でき、またこの方法はチューブの乾燥にも適していると考えられることから、コーティング前の乾燥はブロワーを用いて行うこととした。

３．４　改質樹脂のコーティング

コーティング処理後のポリウレタンシートに水滴を滴下し、濡れ性を評価したところ、EtOH 洗浄（未浸漬）、条件４の CO_2FB 水８時間浸漬、いずれのシートにおいても処理前より濡れ性が向上していることが確認された。また、ポリウレタンシート表面を FT-IR で測定したとこ

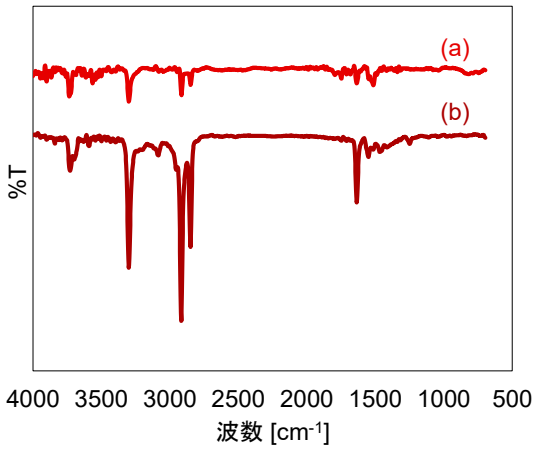


図７　CO_2FB 水（条件４）に８時間浸漬後 60℃で乾燥したポリウレタンシート表面付着物の FT-IR スペクトル；(a)乾燥時間 10 分、(b)乾燥時間 60 分

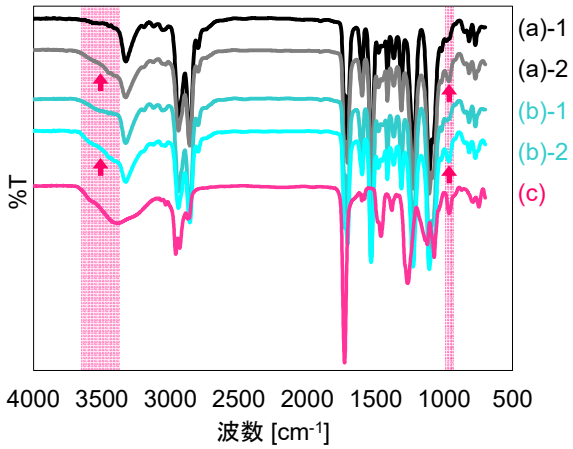


図８　コーティング処理前後のポリウレタンシートの FT-IR スペクトル；(a)EtOH 洗浄（未浸漬）、(b)CO_2FB 水（条件４）８ h 浸漬、(c)コーティング剤；1 処理前、２処理後；図中の矢印はコーティング剤由来のピークを表す

ろ、コーティング処理により 3400 cm^{-1} 及び 960 cm^{-1} 付近にコーティング剤由来のピークが出現した（図８）。さらに、コーティング処理前後のポリウレタンシートを AFM 観察したところ、処理後においては、コーティング剤とみられる形状が全体的に観察された（図９(a)-２、(b)-２）。以上のことから、EtOH 洗浄（未浸漬）、CO_2FB 水８時間浸漬、いずれのポリウレタンシートにおいてもコーティングされたことが確認された。

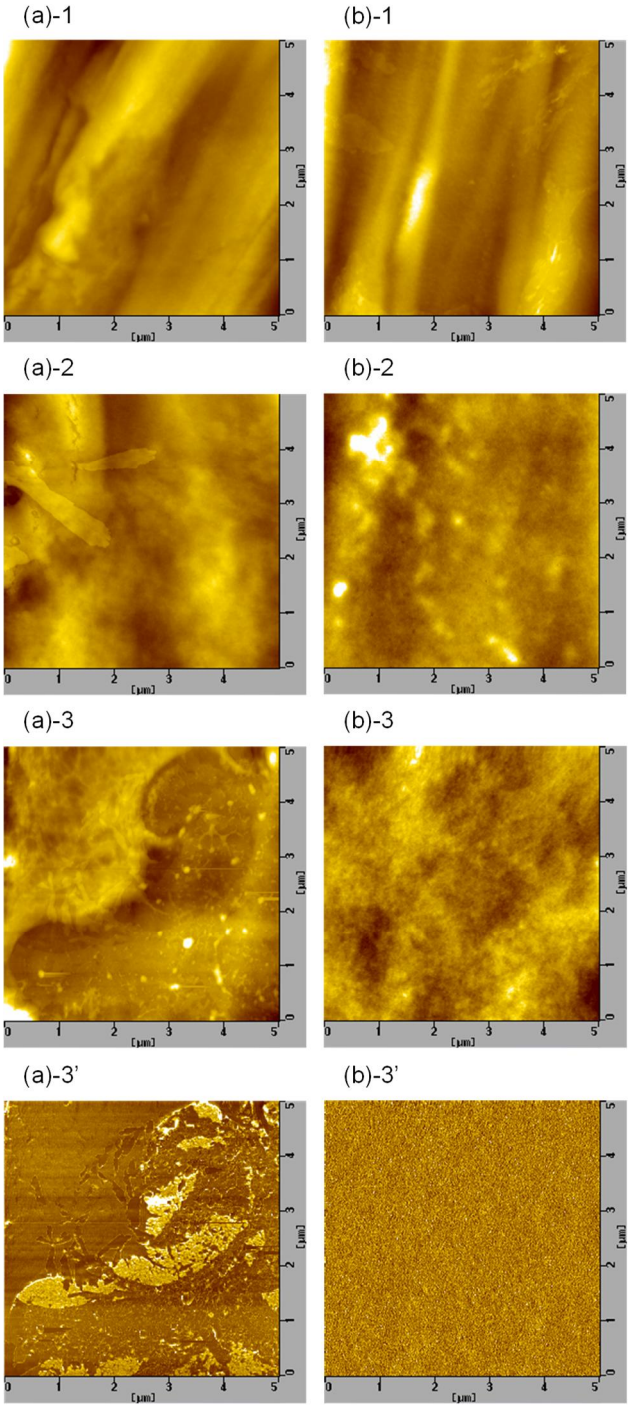


図９　ポリウレタンシートの AFM 像；(a)EtOH 洗浄（未浸漬）、(b)CO_2FB 水（条件４）８ h 浸漬；１コーティング処理前、２コーティング処理後、３洗浄後；１～３形状像、３’位相像

コーティング処理したポリウレタンシートを蒸留水 1 L 中で１時間撹拌した後、AFM 観察したところ、CO_2FB 水に８時間浸漬したものは、形状像及び位相像が均質であり、コーティング剤が全面に残っている様子が見られた（図９(b)-３、３’）。一方、EtOH 洗浄（未浸漬）では、形状像には表面性状の違いが、位相像には異なるコントラストが現れ、コーティング剤の一部に剥がれがある様子が観察された（図９(a)-３、３’）。

以上のことから、ポリウレタンシートを CO_2FB 水で改質することにより、コーティング剤の密着性が向上することが明らかになった。

４　おわりに

機能性コーティングの前処理として、二酸化炭素ファインバブル（CO_2FB）水を用いたポリウレタンの表面改質法を開発した。CO_2FB 水を生成し、ポリウレタンシートを浸漬、評価して次の知見を得た。

(1) 条件４（ポンプ圧力 0.1 MPa, CO_2 流量 1 L/min, 恒温水槽温度 20℃）で生成した CO_2FB 水の到達 pH は最も低く、またマイクロバブル（MB）濃度は最も低かった。一方で、条件５（0.2 MPa, 0.5 L/min, 20℃）の pH は最も高く、MB 濃度は最も高かった。

(2) 到達 pH が最も低い条件４で生成した CO_2FB 水に浸漬したポリウレタンシートは、改質後の水酸基のピークが最も大きく、最も改質されることが示唆された。

(3) CO_2FB 水で改質することにより、ポリウレタンシートと MPC ポリマー（コーティング剤）の密着性が向上することが明らかになった。

参考文献

1) 本九町卓：″日本接着学会誌″, 54 (9), 343-348, (2018)

2) 松本真和, 和田善成, 亀井真之介：″高圧力の科学と技術″, 32 (4), 192-204, (2022)

3) O. Mrad, J. Saunier, C. Aymes Chodur, V. Rosilio, F. Agnely, P. Aubert, J. Vigneron, A. Etcheberry, N. Yagoubi：″Radiation Physics and Chemistry″, 79, 93-103, (2010)

4) 大森和宏, 桐原広成：″栃木県産業技術センター研究報告″, 17, 36-41, (2020)

重点共同研究（フードバレーとちぎ）

干し芋製造残渣の食品素材化に関する研究

金井　悠輔*　　益子　朱音*　　岸　辰典**　　中村　亮**

Research on Converting Dried Sweet Potato Production Residues into Food Ingredients

KANAI Yusuke, MASHIKO Akane, KISHI Tatsunori and NAKAMURA Ryo

干し芋製造残渣を安全な食品素材として活用することを目的に、表面殺菌、冷却、保存の各条件を評価した。アクアガス処理はサツマイモ表面付着菌を低減し、残渣ペーストの初発菌数を低減した。ペーストの冷却は未包装では真空冷却、包装下では冷水またはブラインによる冷却が有効であった。フィチン酸による pH 調整と包装後加熱を併用すると一定の一般生菌数低減効果が見られ、エタノールを補助的に併用すると殺菌効果が大幅に向上した。フィチン酸の添加は黒変を抑制し色調改善にも寄与した。5℃での保存では、pH 調整＋加熱を基本とする多重バリア設計が有効と考えられた。

Key words:　干し芋製造残渣、アクアガス、殺菌、食品素材化

1　はじめに

干し芋は、素朴な甘味と食べやすさから安定した需要があり、加えて健康機能性が広く認知されるにつれ、近年人気が高まっている。一方、干し芋製造では皮むき工程で外皮周辺の果肉を除去する工程が一般的であり、相当量の残渣が発生する。本残渣は澱粉や食物繊維、ポリフェノール類などの成分を含むにも関わらず、微生物汚染リスクや色調（黒変）・保存性の課題から、十分に食品用途へ活用されていないのが現状である。食品ロス削減や資源循環の観点から、製造現場で運用可能かつ安全な素材化プロセスを確立し、高付加価値の用途へ展開することが求められている。また、栃木県では食品ロス削減推進計画に基づき未利用食品の活用が求められており、本残渣の食品素材化は地域産業の振興にも寄与すると考えられる。

本研究は、干し芋製造残渣を安全な食品素材として有効活用することを目的とし、表面付着菌の殺菌方法、迅速な冷却手法、保存性向上のための多重バリア設計を検討し、現場導入を見据えた実用的な素材化工程の確立に取り組んだ。

2　研究の方法

2．1　原料及びサツマイモ表面の殺菌処理

原料のサツマイモは、令和６年産または令和７年産栃木県産紅はるかを使用した。収穫後は貯蔵庫にて保管し、使用する前日に水洗いしたものを試験に供した。

＊　栃木県産業技術センター　食品技術部
＊＊　株式会社壮関

アクアガス処理はアクアクッカー（㈱タイヨー製作所、AQ-25G-SD5-OH）を使用し、庫内温度：115℃、ポンプストローク：200、ファン回転速度：20 Hz の条件で１分間または５分間加熱した。次亜塩素酸ナトリウム処理は、サラヤ㈱製「ジアノック」の 300 倍希釈液（次亜塩素酸ナトリウム濃度：200ppm）に原料を 10 分間浸漬した。過酢酸処理は、保土谷化学工業㈱製「オキシアタック」の 1,750 倍希釈液（過酢酸濃度：80ppm）に原料を 10 分間浸漬した。サツマイモ表面の微生物検査は、スタンプ培地法（島津ダイアグノスティクス㈱、フードスタンプ）により一般生菌及び大腸菌群を評価した。

2．2　干し芋製造残渣ペーストの調製・加熱処理

水洗後または表面の殺菌処理を施したサツマイモをセイロで約１時間蒸煮後、皮むきを行い、その際に外皮とともに除去される果肉を残渣として収集した。当該残渣を後述の方法で 10℃以下まで真空冷却し、刃径 φ5 mm のプレートを装着したミンサーで裏漉しすることで干し芋製造残渣ペーストを調製した。

エタノール添加ペーストは、添加後のエタノール濃度が 3%(w/w)となるよう、サラヤ㈱製「アルペット LN」をペーストに適量加えることで調製した。pH 調整ペーストは、築野食品工業㈱「フィチン酸」をペーストに適量加え、pH4.3 に調整することで調製した。

ペーストの加熱処理は、各ペースト 100 g をポリ袋に真空包装し、レトルト殺菌機（㈱サムソン、SGC60/10D-S）により、槽内温度 82℃にてペースト中心温度が 80℃に到達してから 10 分間保持することで加熱を行った。

2．3　ペーストの冷却処理

ペースト500 gをポリ袋に真空包装し厚さ約12 mmに広げ、50℃に保温したものについて以下の各方式で冷却試験を行った。①冷風冷却：5℃に設定した恒温槽により冷却、②冷水冷却：5℃に設定した水槽内に浸漬して冷却、③真空冷却：包装の一部を開封し、減圧乾燥機（ヤマト科学㈱、DP410）内で真空環境に曝すことで冷却、④ブライン凍結：-30℃に設定したブライン凍結機（米田工機㈱、RF-2）に浸漬して凍結した。熱電対により冷却時のペースト中心温度の推移を計測することで冷却特性を評価した。

２．４　保存試験

各ペーストを冷蔵（5℃）で保存し、経時的に一般生菌数、大腸菌群、pH、色調を測定した。冷凍（-18℃）での保存試験も併せて実施した。

２．５　ペーストの評価

一般生菌数は、乾式簡易培地（島津ダイアグノスティクス㈱、コンパクトドライ TCR）により測定した。大腸菌群は、BGLB培地を用いた発酵管法で評価した。pHは、pH電極（㈱堀場製作所、9611-10D）を装着したpHメーター（㈱堀場製作所、F-15）によりペーストのpHを直接測定した。色調は、分光測色計（コニカミノルタジャパン㈱、CM-5）によりペーストのL^*（明度）、a^*（赤方向の色度）、b^*（黄方向の色度）を測定した。保存試験中の色差は、製造３日目の色調を基準色として算出した。

２．６　ペーストの成分分析

ペーストの一般成分のうち水分は常圧加熱乾燥法（乾燥助剤添加法）、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、灰分は直接灰化法により求めた。総ポリフェノール量は、フォーリン－チオカルト法により没食子酸相当量として求めた。

３　結果及び考察

３．１　表面付着菌に対する殺菌効果

原料のサツマイモは水洗いされているものの、土壌由来の微生物が表面に多く付着していることが予想され、残渣を安全性の高い食品素材とするためには表面付着菌をいかに殺菌するかが重要と考えられる。そこで、各方式による殺菌処理を行い、表面付着菌の残存をスタンプ培地法により評価した（図１）。その結果、アクアガス試験区では大腸菌群が陰性となり、５分間のアクアガス処理では一般生菌数が明確に低減した。次亜塩素酸ナトリウム処理や過酢酸製剤においても一定の殺菌効果は見られたが、５分間のアクアガス処理が総合的に最も高い表面殺菌効果であると考えられた。

アクアガス処理の有効性を検証するため、実際の干し芋製造工程を再現し、発生した残渣をペーストに加工して微生物検査を行った。その結果、アクアガス処理を行わない場合の一般生菌数2.2×10^3cfu/gに対し、５分間のアクアガス処理を行ったものは＜300(130)cfu/gまで低減した。このことから、アクアガス処理はサツマイモ表面付着菌を効果的に殺菌でき、残渣から加工したペーストの初発菌数低減のために有効な手段であることが明らかとなった。なお、本研究におけるペーストの微生物検査では大腸菌群はいずれも陰性であった。一般的に大腸菌群は耐熱性が低いとされるため、アクアガス処理の有無にかかわらず蒸煮工程において殺菌された結果と考えられた。

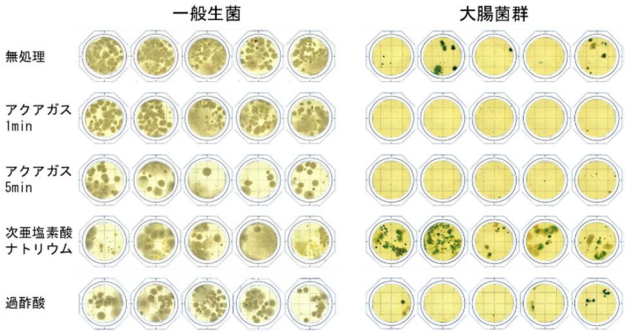


図１　スタンプ培地法による表面付着菌の評価結果

３．２　冷却方法の比較

干し芋残渣ペースト（初期温度50℃）を中心温度10℃まで冷却する条件を比較し、各方式の到達時間を評価した（図２）。その結果、冷水冷却、真空冷却、ブライン凍結はいずれも30分以内に中心10℃へ到達し、特に真空冷却およびブラインは短時間での冷却が可能であった。真空冷却は未包装条件（包装開封後）で実施しており、蒸散潜熱を利用した効率的な温度降下を確認できた。大量調理の衛生管理で一般的な「60分以内に中心温度を10℃付近まで低下」[1)]という目安に照らしても、未包装では真空冷却、包装下では冷水又はブラインによる冷却

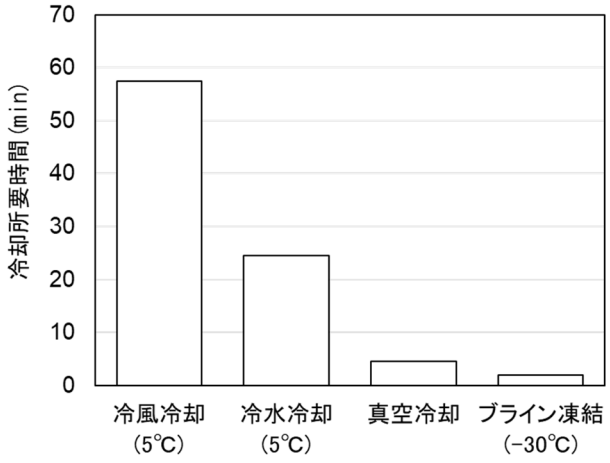


図２　冷却到達時間の比較（中心温度50→10℃）

が適当であると判断された。実際の干し芋製造工場では、残渣が断続的に発生し一時保管を要する場面が想定され、その際には未包装で迅速に冷却する必要があるため、この点で真空冷却が最適な冷却手法と言える。他方、残渣を即時にペースト化及び真空包装まで一連で処理できる環境がある場合には、冷水冷却またはブライン凍結が短時間かつ衛生的な選択肢となるものと考えられた。

３．３　pH 調整・エタノール添加・加熱処理の相乗効果

裏ごし後の残渣ペーストに対し、無添加、エタノール添加、pH 調整、エタノール＋pH 調整の４区を設定し、真空包装後に加熱処理を施して一般生菌数を評価した（図３）。なお、この検討では設備投資を抑えた運用ケースを想定し、アクアガス処理を併用しないで実施した。その結果、pH 調整区では調整直後から一般生菌数の低下が認められ、加熱後には無添加と比べて約１桁の低減が認められた。一般に、細菌胞子の死滅時間は pH により大きく異なることが知られており、酸性条件での加熱殺菌により死滅しやすい傾向を示す[2)]。今回の結果は、そうした pH 依存的な熱的不活化が促進された結果と考えられた。一方、エタノール単独は添加による低減効果が限定的であったが、エタノール＋pH 調整では最も強い低減効果を示した。これは、エタノールが細胞膜のバリア機能を弱めたことで低 pH・加熱の殺菌作用を補強した結果と考えられる。以上により、pH 調整と加熱処理を併用することが初発菌数の低減に有効であり、エタノールは補助的に相乗効果を与えることが明らかとなった。実際は、添加物を最低限に抑えつつ安全マージンを確保する観点から、pH 調整＋加熱処理を基本とし、製品規格や初発菌数が高い原料ロットではエタノールの補助使用を選択的に組み合わせるのが合理的であると考えられた。

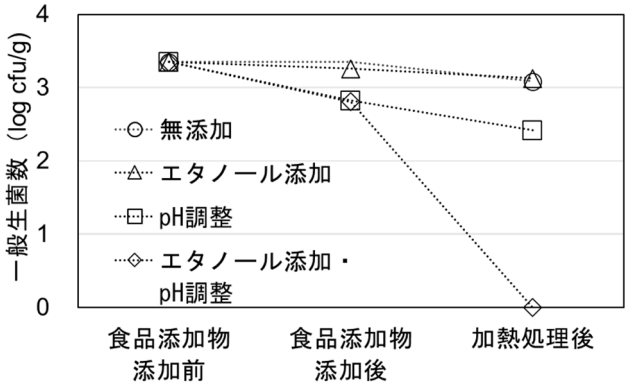


図３　pH 調整・エタノール添加・加熱処理の相乗効果

３．４　pH 調整によるペースト色調への影響

pH 調整によるペースト色調への影響を $L^*a^*b^*$ 値で評価したところ（表１）、無添加に対し pH 調整では L^* が 40.2→51.0 へ大きく上昇し、a^* は−1.5→+2.5 へ正方向に転じ、b^* も 15.1→25.3 へ増加した。エタノール単独の明度上昇は限定的（L^*=41.7）であった一方、エタノール＋pH 調整の併用で L^* は 51.3 と高値となり、外観は明るく鮮やかな黄～赤方向へシフトした。この要因として、サツマイモ調理時の黒変原因の一つである鉄－クロロゲン酸錯体の形成に対し、フィチン酸の鉄キレート効果が関与して錯体形成を抑制あるいは解消した可能性が考えられた。したがって、微生物制御のためのフィチン酸の添加は、外観品質（黒変抑制）の改善という副次的効果も同時に得られる操作であり、特に外観品質を重視する生地や生菓子系原料用途として使用する場合に有効であると考えられた。

表１　pH 調整・エタノール添加の色調への影響

	L^*	a^*	b^*
無添加	40.2	-1.5	15.1
エタノール添加	41.7	-1.1	15.4
pH調整	51.0	2.5	25.3
エタノール添加・pH調整	51.3	3.0	24.8

３．５　保存性

保存性の評価として、各ペーストを真空包装し 5℃で 90 日保存したところ、無添加、エタノール添加、pH 調整、エタノール＋pH 調整の各区、さらに加熱処理の有無に関わらず一般生菌数の大幅な増加は認められず、全期間を通じて 1.0×10^4 cfu/g 以下を維持した（図４）。特に pH 調整（＋エタノール）＋加熱区は初発菌数が低く、その後の保存中も低水準を維持したことから、多重バリアとしての有効性が示された。また、アクアガス処理＋無添加＋非加熱区においても増加は見られず、調製直後の低水準を維持した。一方、無添加＋非加熱区では、アクアガス処理の有無に関わらず保存 62 日時点で pH の低下と色差の上昇が認められ、これらの検体では包装内ガスの発生が確認された。pH 調整＋非加熱区でも同様にガス発生が確認され、これらの現象は、ペースト中に残存していた微生物（ヘテロ発酵型乳酸菌など）が保存中に炭酸ガスを生成するとともに有機酸を産生し、pH を低下させた可能性を示唆する。一方、エタノール添加または加熱処理のいずれかを適用した試験区ではガス発生が認められず、これらの操作により代謝が抑制され、品質が安定したものと推察された。以上により、5℃での長期保存を前提とする場合、少なくともエタノール添加または加熱処理のどちらかを適用する必要があるが、初発菌数低減や色調改善の観点も踏まえると、pH 調整＋加熱を基本とする多重バリア設計を採用することが、微生

物学的安全性と外観品質の両立に最も有効であると結論づけられた。

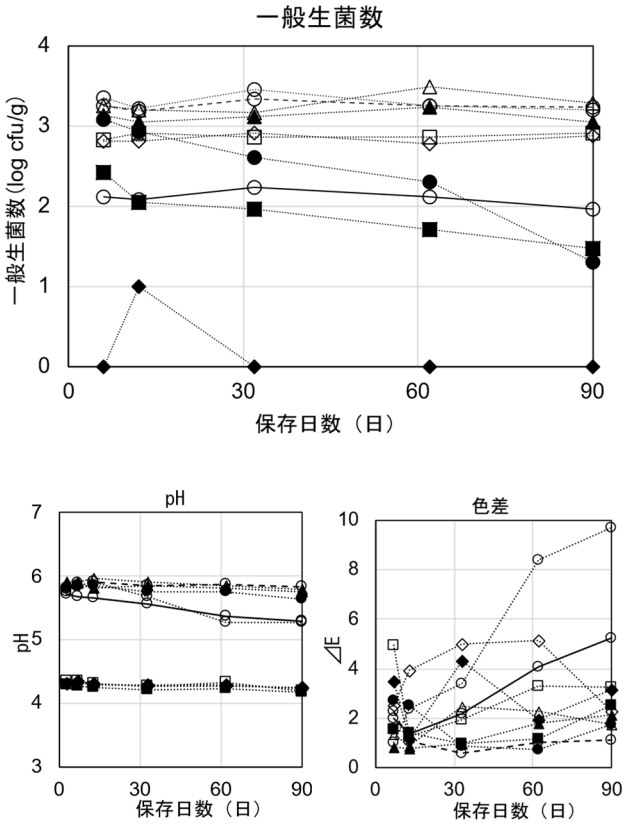


図４　保存日数と一般生菌数、pH、色差の推移
○：無添加、△：エタノール添加、
□：pH 調整、◇：エタノール添加・pH 調整
白抜きマーカー：非加熱、塗りつぶしマーカー：加熱
点線：5℃保存、破線：-18℃保存
実線：アクアガス処理、5℃保存

３．６　ペースト成分分析

無添加＋非加熱ペーストの一般成分量の測定結果を表２に示す。サツマイモ（塊根、皮つき、蒸し）文献値[3]と比較すると、本ペーストは相対的に水分が低く炭水化物が高いという特徴が確認された。同ペーストの総ポリフェノール量を測定したところ、107 mg-GAE/100gFW であった。既報[4]において、浜松市産紅はるかの総ポリフェノール量の例として 237 mg-GAE/100gFW と報告されており、これと比較すると本ペーストの総ポリフェノール量は低い水準であった。

表２　ペーストの一般成分

	一般成分（g/100g）				
	水分	たんぱく質	脂質	炭水化物	灰分
試作ペースト	58.4	1.1	0.3	39.3	0.9
サツマイモ塊根（文献値）	64.2	0.7	0.2	33.7	1.0

４　おわりに

本研究では、干し芋製造過程で発生する外皮周辺の果肉残渣を食品素材として有効活用することを目的として、表面付着菌の殺菌手法、安全性及び保存性を高める製造プロセスについて検討し、以下の知見を得た。

これらの成果に基づき残渣の食品素材化と販売が実現すれば、干し芋製造業者の収益性向上に寄与するとともに、食品ロス削減・資源循環の観点から SDGs への具体的な貢献を示すことができ、企業イメージの向上が見込まれる。さらに、干し芋残渣ペーストを活用することで、環境配慮型の付加価値を備えた製品として市場訴求力の高い新商品の創出につながり、本県食品産業の振興に寄与するものと考えられる。

（1）５分間のアクアガス処理は、サツマイモ表面の微生物を低減し、干し芋製造残渣ペーストの初発菌数を低減させる有効な手段であると考えられた。

（2）干し芋残渣ペーストの冷却では、未包装では真空冷却、包装下では冷水又はブラインにより、いずれも速やかな冷却が可能であった。実際の干し芋製造工場で残渣の一時保管を目的とする場合には、真空冷却が適すると考えられた。

（3）フィチン酸による pH 調整と包装後加熱の併用により、ペースト中の一般生菌数を効果的に低減できた。さらにエタノールを補助的に併用すると殺菌効果は一段と高まり、初発菌数の抑制に有効であった。加えて、フィチン酸の添加は黒変を抑制し色調改善にも寄与した。製品規格や原料品質に応じて処理を選択することで高品質なペースト素材を製造できるものと考えられた。

（4）5℃で３ヶ月間の保存試験では、全試験区で一般生菌数 1.0×10^4 cfu/g 以下を維持した。一方、一部の試験区ではガス発生が確認された。エタノール添加または加熱によりガス発生は抑制できたため、長期保存では少なくともいずれかを適用する必要があり、初発菌数低減の観点を踏まえると pH 調整＋加熱を基本とする多重バリア設計が最も有効であると判断された。

参考文献

1）厚生労働省：〝大量調理施設衛生管理マニュアル（平成 9 年 3 月 24 日付け衛食第 85 号別添；最終改正：平成 29 年 6 月 16 日 生食発 0616 第 1 号）〟，厚生労働省，（2017）

2）藤井建夫：″微生物制御の基礎知識－食品衛生のための90のポイント－″,中央法規出版株式会社,121,（1997）
3）文部科学省科学技術・学術政策局政策課資源室：″日本食品標準成分表（八訂）増補2023年″，文部科学省，https://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/mext_00001.html，（参照 2026-02-27）
4）小杉徹：″あたらしい農業技術″，静岡県経済産業部，683，5，(2022)

Ⅱ 共同研究

Cooperative Research

共同研究

シミュレーション技術を活用した
樹脂3Dプリンタ製レンズアダプタの開発

片岡　智史*　　八木澤　秀人*　　室井　博道**

Development of a Resin 3D-Printed Lens Adapter Based on Simulation-Driven Design

KATAOKA Satoshi, YAGISAWA Hideto, MUROI Hiromichi

レンズのCurve-Generator（CG）加工で使用されるアダプタを樹脂3Dプリンタで内製化し、従来のポリアセタール（POM）製アダプタとレンズ加工精度やコスト、リードタイムを比較した。シミュレーションによる応力解析を実施し、従来材料のPOMと同等のレンズ固定力を有する樹脂3Dプリンタ製アダプタを設計した。設計したアダプタを光造形方式の樹脂3Dプリンタで造形し、コストやリードタイムを算出した。3Dプリンタ製アダプタでは、POM製アダプタと比較して、コストとリードタイムは50%以上減となることが明らかになった。試作した3Dプリンタ製アダプタを使用し、レンズのCG加工を行った。結果として、3Dプリンタ製アダプタでは、POM製アダプタと比較し、レンズ片肉量を低減できることを確認できた。

Key words:　**レンズアダプタ、3Dプリンタ、光造形、シミュレーション、応力解析**

1　はじめに

レンズはカメラ、医療機器、半導体露光装置、天体望遠鏡など様々な産業分野に使用される光学部品である。レンズの大きさは、医療機器用では数ミリメートル、天体望遠鏡用では1メートルを超えるものも存在し、少量多品種化が進んでいる[1) 2) 3)]。

共同研究先ではレンズのCG加工を行っている。CG加工とは、レンズアダプタと呼ばれる樹脂製の治具を使用してカーブジェネレータにガラス材料を固定し、ダイヤモンド工具でレンズ曲面を創出する工程である。現在は自社で設計したレンズアダプタを外注で製作しており、コストや納期が課題である。また、レンズアダプタ設計ノウハウの定量化も課題である。外注したレンズアダプタは、加工するレンズに合わせて手加工で修正する必要があり、作業の属人化も課題になっている。レンズの少量多品種化により、上述の課題は更に深刻化すると考えられる。

そこで本研究ではシミュレーション技術を用いた数値解析結果を活用し、レンズアダプタの設計を行った。さらに、設計したレンズアダプタを3Dプリンタで作製することで、低コスト化やリードタイムの短縮が可能か、検証を行った。

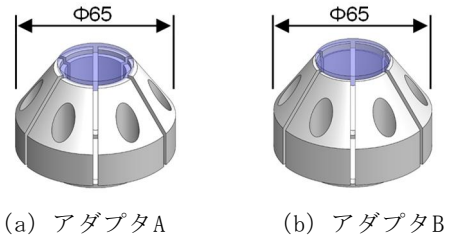
＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊　室井光学株式会社

2　研究の方法

2．1　レンズアダプタ設計

図1にレンズのCG加工の様子を示す。レンズはアダプタのツメに挟み込むように固定する。アダプタはダイヤフラムチャックと呼ばれるチャック機構を介してカーブジェネレータ上に固定される。アダプタのツメは、加工前に芯出しを行う必要がある。CG加工を行っていくと、アダプタのツメはレンズとの接触摩耗により徐々に消耗し、レンズ厚みのばらつきの絶対量を示す片肉量が悪化する。片肉量が許容値を超えた場合には、ツメの再芯出しを行い、最終的にレンズの固定が不可能になるまで使用する。従来のアダプタ材料はPOMである。共同研究先にて、図2に示すA～D4種類のレンズアダプタを設計した。アダプタA及びBは、1つのレンズの両面加工に対応したアダプタである。

図1　CG加工の様子



（a）アダプタA　（b）アダプタB

（c）アダプタC　（d）アダプタD

図２　設計したレンズアダプタ

２．２　レンズアダプタ応力解析

POMと同等なレンズ固定力を有する3Dプリンタ製アダプタを設計するために、解析ソフト（ダッソー・システムズ㈱、SolidWorks2025 simulation）にて応力解析を実施した。解析条件を表１に示す。接触条件について、レンズ側面とアダプタには接触によって応力が生じるため、接触面にシュリンク結合を設定した。シュリンク接合とは物体の干渉により応力が生じる場合に設定する接触条件である。アダプタは、レンズ厚みの1/2を把持するような位置関係とした（図３参照）。拘束条件について、アダプタはダイヤフラムチャック上にボルトを用いて固定されるため、ボルトとの座面及びダイヤフラムチャックとの接触面に固定条件を付与した（図４参照）。材料について、従来材料のPOMと、以前の研究で実施したテーバー式摩耗試験の結果[4]より、摩耗量がPOMと同程度である光造形方式3Dプリンタ材料のClearを選定した。各材料の物性値はカタログから引用し解析を実施した[5)6)]。解析結果は、レンズ側面に加わる半径方向応力の平均値をレンズ固定力として算出した。前項で設計した3Dモデルを基本形状とし、Clearのレンズ固定力がPOMと同等になるように形状修正を実施した。

表１　解析条件

解析ソフト	Solidworks2025 simulation
接触条件	シュリンク結合
拘束条件	ダイヤフラムチャック及び ボルト座面との接触面を固定
材料	POM,Clear
メッシュサイズ	2～3 mm
評価項目	レンズ側面の半径方向応力平均値

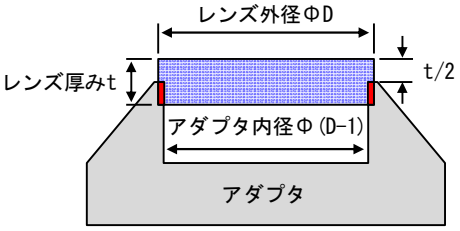


図３　レンズとアダプタの位置関係

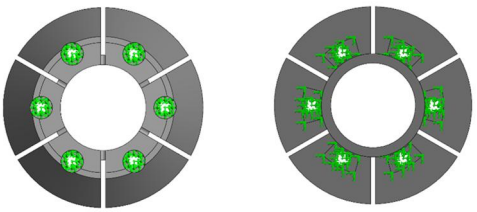


図４　アダプタ拘束条件

２．３　レンズアダプタ造形

当センターが所有する光造形方式の 3D プリンタ（Formlabs㈱、Forms3L）を用いて、形状修正したレンズアダプタを造形した。使用したプリンタの仕様を表２に示す。

表２　3D プリンタ仕様

メーカ	Formlabs
型式	Form3L
造形範囲	335×200×300 mm
積層ピッチ	0.05 mm
材料	ClearV4

２．４　レンズ加工検証

樹脂 3D プリンタで造形したレンズアダプタを使用して、CG 加工を実施した。加工検証の条件を表３に示す。共同研究先のカーブジェネレータにおいて、従来の POM 製と今回試作した Clear 製のレンズアダプタ A、B を用いて約 8,000 個のレンズ加工を実施し、200～300 個毎にダイヤルゲージでレンズ片肉量を評価した。レンズ片肉量が 0.01 mm を超えた場合は再度芯出しを行い、加工を継続した。

表３　加工検証条件

使用したレンズアダプタ	A 及び B
レンズアダプタ材料	POM, Clear
個数	約 8,000 個
評価項目	レンズ片肉量

３　結果及び考察

３．１　応力解析結果

アダプタ A、B の解析結果を表４、５に示す。アダプタ A、B は図５に示すようにツメの角を落とし、3 mm の斜め 45 度の斜面を作る面取り加工（C3 面取り）により、レンズ固定力を調整した。アダプタ C の解析結果を表６に示す。アダプタ C では、Clear は POM と比較してレンズ固定力が増加したため、図６に示すようにアダプタ外径を４ mm 小さくし、レンズ固定力を調整した。アダプタ D の解析結果を表７に示す。アダプタ D では、Clear は POM と比較してレンズ固定力が低下したため、図７に示すようにツメの根元の角に、円弧状の丸みを付けるフィレット（曲率半径 R3）を付与することでレンズ固定力を増加させた。

表４　アダプタ A　解析結果

材料/形状	固定力[MPa]	固定力比 vs POM
POM/基本形状	6.27	-
Clear/基本形状	6.27	1.00
Clear/ツメ端部 C3	6.20	0.99

表５　アダプタ B　解析結果

材料/形状	固定力[MPa]	固定力比 vs POM
POM/基本形状	6.18	-
Clear/基本形状	6.25	1.01
Clear/ツメ端部 C3	6.10	0.99

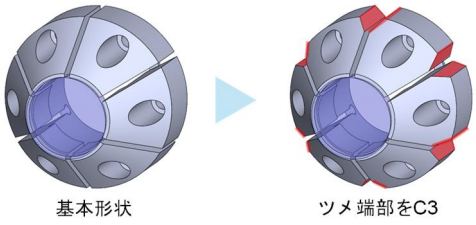


図５　アダプタ A,B　形状修正箇所

表６　アダプタ C　解析結果

材料/形状	固定力[MPa]	固定力比 vs POM
POM/基本形状	5.61	-
Clear/基本形状	6.28	1.12
Clear/外径-4 mm	5.48	0.98

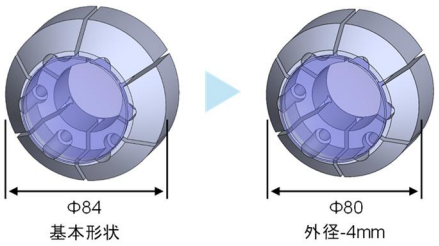


図６　アダプタ C　形状修正箇所

表７　アダプタ D　解析結果

材料/形状	固定力[MPa]	固定力比 vs POM
POM/基本形状	9.78	-
Clear/基本形状	9.43	0.96
Clear/ツメ根元 R3	9.82	1.00

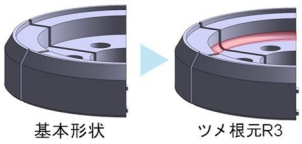


図７　アダプタ D　フィレット追加

３．２　レンズアダプタ造形

各アダプタの造形時間や、外注した場合のコストや納期の比較を表８に示す。3D プリンタ製アダプタの製造コストは、１年間で 50 個アダプタを造形すると仮定し、3D プリンタ購入費用 100 万円を５年間で定額償却する費用 4,000 円と材料費を加算し算出した。表８より、樹脂 3D プリンタでアダプタを造形した場合、コストについては 50%以上削減できることがわかった。リードタイムについても、3D プリンタ製アダプタでは設計や造形後の後処理を考慮しても約１週間で使用可能であり、外注と比較して 50%以上短縮可能と考えられる。

表８　各アダプタの造形条件と外注との比較

アダプタ	A	B	C	D
造形時間	6時間13分	6時間34分	8時間25分	8時間45分
コスト	¥5,778	¥5,865	¥7,672	¥9,336
外注コスト	¥13,000	¥13,000	¥15,000	¥20,000
外注納期	2週間	2週間	2週間	3週間

３．３　レンズ加工検証結果

検証結果を図８に示す。Clear 製レンズアダプタでは、POM 製レンズアダプタと比較して片肉量が低減しており、高精度に CG 加工ができることを確認した。POM 製アダプタでは約8,000個の加工を完了するまでに片肉量が 0.01 mm を２回超過し、アダプタの芯出しを行う必要があった一方、Clear 製アダプタでは片肉量 0.01 mm を超えることはなく、芯出しは不要であった。この理由について、Clear 製アダプタは POM と比べると硬いため、加工結果が良くなったのではないか、との仮説を立て、それぞれのアダプタから試験片を切り出し、ロックウェル硬さを評価した。図９に示すように Clear は 117.5 に対し、POM は 113.8 であった。したがって、Clear は POM に比べて硬く、より強固にレンズを固定できたため、片肉量が低減したと考えられる。

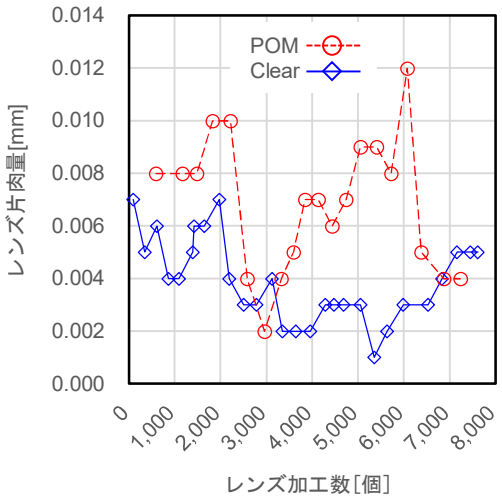


図８　レンズ加工検証結果

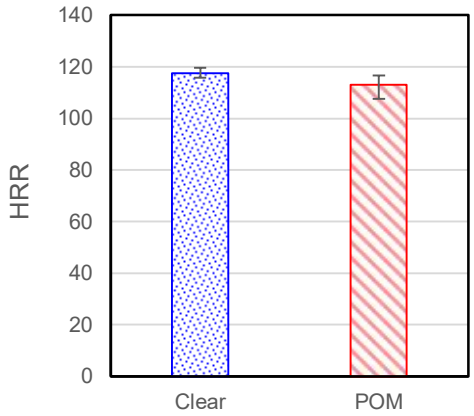


図９　ロックウェル硬さ試験結果

最後に、従来のプロセスと、樹脂3Dプリンタを導入した場合のプロセスの比較を図10に示す。従来のプロセスでは、アダプタの外注コストやリードタイムの長期化が課題となっていた。3Dプリンタを導入することにより、アダプタコストとリードタイムは50%以上短縮した。さらに、3Dプリンタ製アダプタではPOM製アダプタよりも片肉量を小さく加工をすることが可能であり、アダプタの芯出し作業の手間も省くことができた。

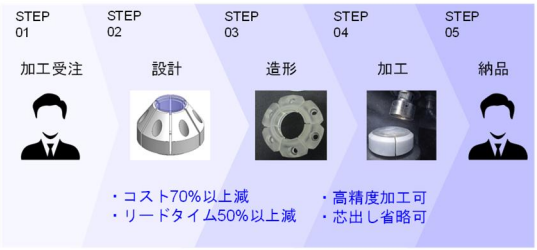


図 10　3D プリンタを活用したプロセス

４　おわりに

シミュレーション技術を活用した樹脂 3D プリンタ製レンズアダプタの開発に取り組み、以下の知見を得た。

(1) シミュレーション技術を活用し、従来材料の POM と同等のレンズ固定力を有する3Dプリンタ製アダプタを設計した。

(2) 3D プリンタ製アダプタでは、POM と比較しコストとリードタイムは 50%以上減となることを確認した。

(3) Clear で造形した 3D プリンタ製アダプタで CG 加工を実施し、片肉量が POM よりも低減することを確認した。

(4) 硬さ試験結果により、Clear は POM と比較して高硬度のため片肉量が低下したと考えられる。

参考文献

1) 大森 整：″精密工学会誌″, 77 (1), 16-20, (2011)
2) 森 啓：″電気学会論文誌 A″,129(3),139-145,(2011)
3) 小島 忠:″光学″, 11 (1), 45-49, (1982)
4) 片岡 智史:″栃木県産業技術センター令和６年度研究報告″, No.22, 1-6, (2025)
5) 三ツ星ベルト:″www.mitsuboshi.com″, 引用日 2026/2/16
6) Formlabs:” formlabs.com”, 引用日 2026/2/16

共同研究

二次元バーコードを用いた味噌タンクの生産管理省力化に関する研究

髙岩　徳寿*　　松本　健司*　　村田　浩之**

Study on Labor-Saving Production Management of Miso Tanks Using Two-Dimensional Barcodes

TAKAIWA Norihisa, MATSUMOTO Kenji and MURATA Hiroyuki

製造現場における労働力不足が社会的問題となっており、デジタル技術を活用した省力化が期待されている 。本研究では、味噌製造における生産管理を例にとり、クラウドベースの日報アプリと二次元バーコードや IoT 機器を用いた温湿度モニタリングとの連携により生産管理システムを構築し、デジタル技術を活用した管理業務の省力化を検討した 。その結果、紙日報から生産管理システムへの置き換えにより、生産管理にかかる作業時間が 53%削減できた。

Key words:　生産管理、日報、二次元バーコード、DX 化、クラウド

1　はじめに

近年、日本の製造業における労働力不足は深刻であり、製造業における若年就業者数は過去 20 年間で 384 万人から 259 万人と約 125 万人減少する等[1)]、人材の確保は喫緊の課題となっている。本県中小企業においても同様の状況にあり、デジタル技術を活用した省力化により生産性を向上させ、限られた人的リソースを有効活用することが求められている。しかし、中小企業の多くはデジタル技術活用について必要性を感じているものの「具体的な効果が見えない」ことや「何から始めてよいかわからない」といった課題を抱えており[2) 3)]、依然として紙媒体による生産管理が行われている現場も多い。紙日報での生産管理は、データ化するための PC での転記作業や在庫確認等での情報の検索作業等に多大な時間が必要となり、非効率な作業を生み出す要因となっている。本研究では、県内味噌製造企業をユースケースとして、デジタル技術導入による作業時間の短縮を目的とし、生産管理システムを構築した。

2　研究の方法

2．1　開発方針

デジタル技術を活用した生産管理システムを構築するにあたり、開発方針を以下のように定めた。

・既存の業務フローを大きく変更しないこと
・システムの管理をしやすくすること
・クラウドベースのサービスを利用すること
・中小企業でも導入可能なコストであること

業務フローが変更されるようなシステムになってしまうと、これまで慣れてきた生産管理業務の流れが変わることで現場作業者の協力が得づらくなる要因となる。あくまでも紙日報をスマホやタブレットを利用した日報アプリでの入力に置き換えることを目指し、記入する順番や項目の大幅な変更等は避ける必要がある。

中小企業においては社内で利用するシステムについて、専任の管理者を配置できないケースが多い。製造部門の管理者がシステム管理を兼ねる場合も多いため、専門的な知識が無くても現場の意見を反映した改善がしやすく、不具合等があってもメンテナンスがしやすいシステムである必要がある。そのため採用するシステムはできる限り専門的なプログラミングの知識を必要としないノーコードツールであることが望ましい。また、プログラミングが必要な場合においても、設定変更に必要な項目等が一目でわかるようにシステムを設計する必要がある。

生産管理をデジタル化するにあたってはデータベースの作成が必要となるが、ローカル環境に物理サーバーを設置するのは、購入や管理にかかるコストや保守に必要な専門知識、人材確保等がネックとなる。クラウドベースのサービスを利用することで、初期コストを抑えることができ、さらにデータのバックアップやメンテナンスはクラウド側で自動化されているためサーバー管理の専任者を置く必要もなくなる。

導入にかかるコストについては、利便性や必要な機能を考慮して適切なクラウドサービスを選定することで、

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊　青源味噌株式会社

できる限り抑えるように留意する必要がある。また、ローカル環境で構築するシステムについても、安定性やコストの観点からバランスを考慮して構築する必要がある。

２．２　温湿度モニタリング

味噌の熟成において温湿度の管理は重要であり、共同研究先においてもタンクの保管は温醸庫および冷醸庫等で適切に管理している。日常の点検業務において各庫の温度記録は取っているが定時の確認のみであり、ロットごとの詳細な温湿度データは取得されていない。そこで IoT 機器を活用した温湿度の常時モニタリングシステムと、取得した温湿度データと日報アプリとの連携によって各ロットの温湿度履歴を確認できるよう開発に取り組んだ。

２．３　タンクの保管場所マップ

共同研究先では紙日報とは別にタンクの保管場所についても紙でマップを作成し管理をしている。共同研究先での保管タンク数は 100 個以上となるため、工場内のどの位置にどのタンクを保管しているかを把握することは重要な業務であるが、温醸庫と冷醸庫間の移動や積み重なっているタンクの段数変更等により紙日報と紙マップの情報に齟齬が生じることもあり、特に棚卸作業における保管タンクの確認作業に手間が生じる原因となっている。日報アプリ内でマップの自動生成システムを構築することでこうした課題の解決を目指した。

２．４　二次元バーコードの活用

味噌タンクの管理においては非常に多くのタンクを同時に管理している事と、紙日報による管理での情報検索性の低さから、払い出し間近のタンクを探し日報を用いて情報を確認する作業や、紙日報と実際のタンクを照合して保管状況を確認する棚卸作業等において無駄な時間が多く発生していた。本研究では、日報アプリと二次元バーコードを紐づけ、情報検索性を上げることで省力化に寄与することを目指してシステムを設計した。

３　結果及び考察

３．１　システム構成

開発方針を考慮し試作した生産管理システムの構成を図１に示す。ノーコードツールの AppSheet（Google 社）を利用して日報アプリを作成し、Google スプレッドシートをデータベースとするクラウドベースのシステムを構築した。AppSheet は Google 社が提供するノーコード開発プラットフォームで、プログラミングをせずに業務アプリを作成することができるツールである。作成した日報アプリを共有することで、複数のアカウントから同一の日報アプリの閲覧や編集が可能となる。また、Google スプレッドシートをデータソースとすることで、データベースに関する知識を必要とせず、カラムの追加等のデータシートの更新やローカル環境へのバックアップ操作も表計算ソフトを使うのと同様に直感的に行うことができる。AppSheet を用いた日報アプリをベースに、二次元バーコード管理システムや温湿度モニタリングシステムと連携させた。

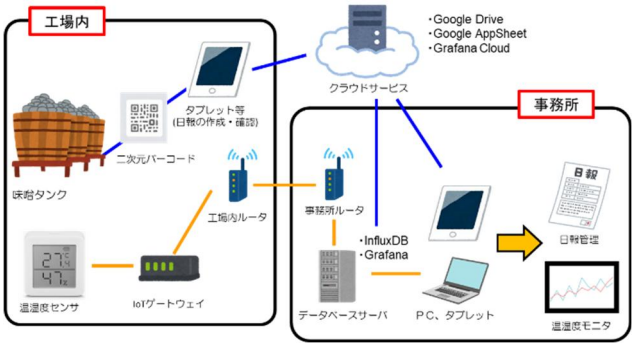


図１　システム構成

図２に AppSheet で作成した日報アプリのロット一覧画面と新規登録画面を示す。なお、入力しているデータはダミーデータである。紙日報で記載している項目と同様の項目を Google スプレッドシートで作成し、AppSheet が参照するデータソースとすることで管理に必要な項目をアプリ内で再現することができた。

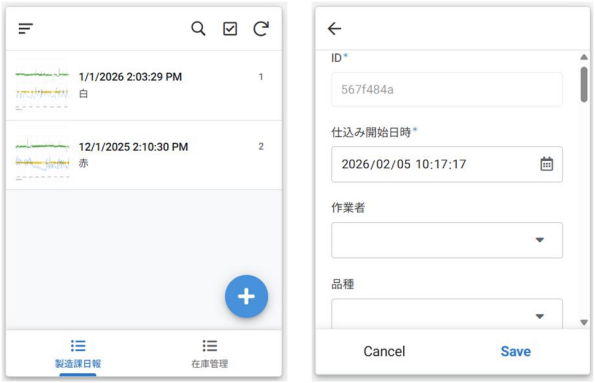


図２　ロット一覧画面および新規登録画面

また、日報をデジタル化したことで生まれたその他のメリットとして、図３に示すとおりアプリでの画像の保存が挙げられる。本システムではアプリの使用にスマホやタブレットを用いることからカメラの利用が容易であり、また Google ドライブとの連携により撮影した画像を自動的に Google ドライブ内に保存することが可能となった。これまで画像を使った引継ぎは、デジタルカメラ等で撮影後にメールやチャット等に添付をすることで情報共有をしていたが、保管場所や画像名のルール

の統一が難しく、時間がたつと対象ロットと画像の紐づけができなくなるなどの問題があった。アプリを使用することで、画像の自動命名、スプレッドシートによる対象ロットと画像の関係の管理、画像の保管場所等が自動的かつ統一的に管理できるため、画像による情報共有とその後の利用がスムーズに行えるようになった。さらに、記入するべき内容が決まっている項目や予測できる項目は自動で値を入れておく事で、作業者の手間を省く機能も実装することができた。

図３　日報アプリ内での画像の保存

３．２　温湿度データとの連携

工場内の温湿度データを収集するため、温湿度計とRaspberry Pi を用いたモニタリングシステムを構築した。まず温醸庫等の味噌タンクを保管する場所に各１台ずつ計３台の温湿度計（スイッチボット社、MeterTH S1）を設置した。次に温湿度計から BLE 通信で工場内に設置した IoT ゲートウェイ（ラズベリーパイ財団、RaspberryPi Zero2W）にデータを集約し、無線通信を使って１分ごとに事務所内のデータベースサーバー（ラズベリーパイ財団、RaspberryPi4）へ温湿度データを送信した。最後に送られてきたデータは時系列データベースである InfluxDB（InfluxData 社）に蓄積し、事務所内での温湿度モニタリングのために Grafana（Grafana Labs 社）を用いてデータを視覚化した。Grafana での温度の表示例を図４に示す。

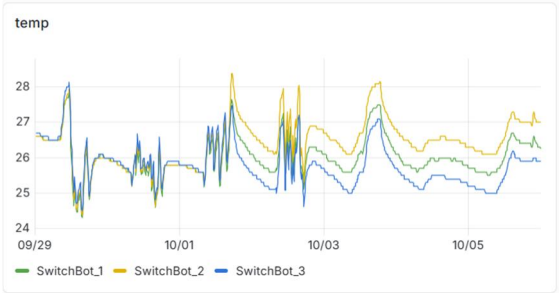


図４　Grafana での温度表示

日報アプリと温湿度データの連携について、ローカルネットワーク内のデータベースに対して AppSheet 等の外部からアクセスする際は、通常はポート開放等のセキュリティリスクを伴う設定が必要となる。今回はこうしたセキュリティリスクを冒さずにアクセスするために Grafana Cloud（Grafana Labs 社）の PDC（Private data source connect）機能を使用した。PDC とはデータベースサーバー内に常駐させた PDC エージェントが、クラウド側とセキュアなトンネルを構築する仕組みであり、外部からの不正アクセスを防ぎつつ、安全にデータをクラウドへ公開できる技術である。温湿度グラフの作成については、日報アプリで新規作成や既存ロットの情報に更新がかかると、スプレッドシートに紐づいた GAS(Google App Script）のトリガーが実行され、記入されている保管開始日時から現在時刻（もしくは払出完了時刻）の間の温湿度グラフを Grafana Cloud から取得し、Google ドライブに画像として保存するシステムとした。日報アプリで Google ドライブに保存された当該ロットの画像をアプリ内で表示するよう設定することで、図５のとおりロット詳細画面で温湿度グラフの閲覧が可能となり、日報データと環境データの統合的な管理を実現できた。

図５　日報アプリ内での温度グラフ表示

３．３　マップの生成によるタンクの保管場所管理

タンクの保管場所をマップ上に表示するために、まずロット登録画面でタンクの保管場所を記入する項目を作成した。次に記入された保管場所の情報からスプレッドシート内で自動的に場所と保管中のロット ID を紐づけてマップ状に表示するシートを作成した。最後に日報アプリ上でロットの新規登録や更新がかかると、GAS のトリガーが実行されマップ表示のシートを画像にして Google ドライブに保存するようプログラムした。生成された画像を図６のように日報アプリ内で表示するように設定することで、アプリ内でのマップ表示によるタンクの所在地管理を可能とした。

図６　日報アプリ内でのマップ表示

３．４　二次元バーコードを活用したタンク管理

情報検索性を向上させるために各味噌タンクに個別の二次元バーコードを貼り付け、タブレットやM5Stack等のデバイスで読み取ることで、即座に対象ロットの詳細情報表示やデータの追記が可能となるようシステムを作成した。二次元バーコードは日報アプリ内で保管タンクの新規登録を行うことで自動生成されるようにした（図７）。またタンク毎に固有の二次元バーコードとなるが、日報アプリ上で生成された二次元バーコードは単純にタンク番号を表すのではなく、そのタンクに保管中の最新のロットの詳細画面へ遷移できるような動的URLとした。二次元バーコードを動的URLにすることにより、タンクで仕込んでいるロットを変更する毎にタンクの二次元バーコードを貼り変える必要が無く、かつ読み込んだ時には常にそのタンクに保管中の最新のロット情報を呼び出せるようなった。この二次元バーコードをスマホやタブレットで読み込むことで、即座にロットの詳細画面へ遷移することができるようなった。また、ロットの払出作業や棚卸作業等においては、タブレット等でのロット詳細画面の表示では情報量が多すぎるため、図８に示すようにM5Stackで二次元バーコードを読み込むとIDや品種等の作業に必要最小限の情報のみを表示するようにシステムを構築した。

図７　タンク管理画面
（注：二次元バーコードは読み込めないよう加工）

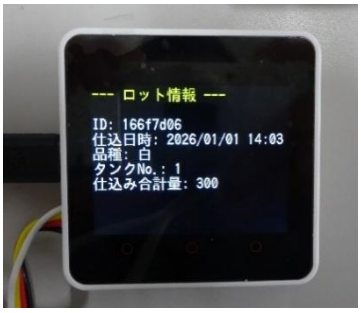


図８　M5Stackでの情報表示

３．５　効果検証

本研究で構築した生産管理システムを共同研究先にて３か月程度運用して生産管理作業の省力化ができるかを検証した。まず、仕込み担当者の生産管理に関する１回の仕込み作業当たりの作業内容について、紙管理の時には紙日報への情報の記入、タンク側面への情報の転記、タンク保管位置マップの作成等の時間が40分程度かかっていたが、タンク側面への転記およびタンク保管位置マップの作成の２つの作業が無くなった事で30分程度の作業時間に短縮された。次に事務担当者の生産管理作業は、紙管理を利用していた時は紙日報に記載されている内容を表計算ソフト等にPCで転記する作業が30分程度かかっていたが、現場作業者が日報アプリに情報を記載することで自動的にGoogleスプレッドシートに情報が記載されることになったため作業自体が無くなった。最後に管理者による棚卸作業が紙管理では３時間程度かかっていたが、情報検索性の向上により２時間に短縮された。仕込み担当者と事務担当者の作業が週３回程度、管理者の作業が月１回であるので、１か月を４週間とした時の総作業時間は17時間から８時間へ短縮され、生産管理に関する作業時間はおよそ53%削減できた。また、省力化以外の改善点として、事務所での転記作業がゼロになったことによる転記ミス等のヒューマンエラーの解消、紙の日報を廃止したことによる製品への異物混入のリスク低減、過去の温湿度データとロット情報の紐付けが容易となったことによる品質管理体制の強化といった副次的な効果が得られた。

４　おわりに

味噌製造における仕込み作業について、生産管理作業の省力化を目的に、日報管理アプリ、温湿度モニタリング、タンク保管マップ、二次元バーコード等の機能を連携させて生産管理システムを構築した。

(1) 日報アプリはノーコードツールを活用して作成し、データソースをGoogleスプレッドシートとすることで、プログラミング等の専門のスキルが無い人

でも管理しやすいアプリを作成した。

(2) IoT 機器とクラウドサービスを活用した温湿度モニタリングシステムを構築し、日報アプリと連携することでロットごとの温湿度履歴を参照できるようになった。

(3) 日報とともに紙で管理をしていたタンクの保管マップをアプリ内で再現し、日報とともに統合的に管理できるようにした。

(4) 紙日報から生産管理システムへの置き換えにより、必要なロット情報をすぐに取得できるようになった。

(5) 構築した生産管理システムを運用することで、生産管理にかかっていた作業を 53%程度削減でき、大幅な省力化を実現できた。

参考文献

1) 経済産業省，厚生労働省，文部科学省：〝ものづくり白書〟，(2025)

2) 中小企業庁：〝中小企業白書・小規模企業白書〟，(2025)

3) 独立行政法人 中小企業基盤整備機構：〝中小企業の DX 推進に関する調査〟，(2024)

共同研究

製麹管理システムの拡充

松本　健司*　　髙岩　徳寿*　　西堀　哲也**

Enhancement of the Koji Making Management System

MATSUMOTO Kenji, TAKAIWA Norihisa and NISHIBORI Tetsuya

令和６年度に開発した製麹管理システムの県内企業への普及を目的に、システムの完成度を高めた。主要機能である「麹室内のデータ収集（IoT 機能）」と「品温経過予測」を連携させ、操作性向上のためユーザ向けアプリも整備した。品温経過予測処理はライブラリ化して AI モデルの管理を容易にし、ローカルで動作する機能群はコンテナ化することで現場への新規セットアップを簡便化した。

本システムは安価な機材で構成でき、既存設備への後付けにも対応する。これによりデジタル技術導入の障壁が下がり、酒造現場の負担軽減や技能伝承への活用が期待される。

Key words:　清酒、製麹、IoT、時系列予測、情報処理

１　はじめに

日本酒造りは複数の工程からなる。「一麹、二酛、三造り」といわれるように、麹づくり（以下、製麹）は重要な作業工程のひとつである。製麹は昼夜を通した細かな管理が約２日間必要となる負担が大きい作業である。細かな品質管理を実現しつつ、作業者の負担を低減するにはデジタル技術の活用が有効と考えた。令和６年度研究[1)]では、麹づくりにおけるデジタル技術活用の有効性を確認するために各種機能を試作した。令和６年度研究成果の機能群を以下に示す。

・麹室 IoT 機能（品温、重量、環境温湿度）
・帳票入力に関する自作ユーザ用アプリケーション
・麹の品温変化を予測する機能
・麹の酵素力価を予測する機能

開発した機能群について、実際の現場で短期間の検証を行った結果、コンセプトについては一定の評価を得た一方で、複数の技術的・運用的課題が明らかとなった。

そこで、本研究では、現場利用と県内企業への横展開を見据え、「導入容易性」「保守性」「実用性」を評価軸として設計を見直すことで、令和６年度に試作したシステムの完成度向上を図った。

２　研究の方法

２．１　システム改良の指針

従来システムの実証結果を踏まえ、前述の３つの観点から整理した主な課題を表１に示す。

表１　従来システム活用における主な課題

概要	詳細
運用柔軟性の欠如	麹室 IoT 機能の通信設定がプログラム中に記述（ハードコーディング）されており、現場での環境変更に即応できない。
利用場所の制限	システム利用環境がローカルネットワーク内に限定され、出先等から情報閲覧できない。
保守コストの高さ	帳票に関するユーザ用アプリケーションの改修にソースコードの書き換えを要し、現場の改善要望を迅速に反映できない。
解析機能のシステム未統合	品温予測処理の実行に Python プログラムの知識を要し、実際のユーザが利用できる状態にない。

これらの課題解決に向け、以下の項目に取り組んだ。

２．２　麹室 IoT 機能の改修

表１で述べた「運用柔軟性の欠如」に対応する取組である。ハードウェア構成は従来設計を継承しつつ、現場での設定変更を容易にするため、ブラウザ経由で Wi-Fi 接続情報やデータ送信先を動的に変更できる仕組みを構築することとした。

＊　栃木県産業技術センター　機械電子技術部
＊＊　西堀酒造株式会社

２．３　情報参照環境のクラウド化

表１で述べた「利用場所の制限」に対応する取組である。場所を問わないデータ閲覧を実現するため、クラウドプラットフォームを導入する。選定にあたっては、「動的な時系列データの可視化」と「帳票データの入力と閲覧」の２点の機能を分離して検討することとした。

２．４　ユーザ用アプリケーションの再構築

表１で述べた「保守コストの高さ」に対応する取組である。従来システムでは独自開発のユーザ用アプリケーションを使用していたが、保守コストが高いことが課題であった。特に、帳票項目は運用の中で最適化が進むため、現場ニーズに応じた項目追加やUI（ユーザインターフェース）の改善に迅速に対応できる開発環境が必要である。

そこで、従来の開発環境から、開発・修正の工数を大幅に削減できるノーコードプラットフォームへの移行を検討した。本アプリケーションは帳票データの入出力UIを担うため、前述のクラウド化と親和性の高いプラットフォームを選定する。

２．５　品温予測処理の整理およびバックエンドへの統合

表１で述べた「解析機能のシステム未統合」に対応する取組である。ユーザの利便性向上と運用の属人化解消のため、令和６年度に試作した予測処理機能群について、本研究では、これらを統合した解析基盤を「予測エンジン」と再定義した。

具体的には、分散していた処理ファイルを整理・最適化した上で、バックエンドサーバ上に実装した。これにより、リクエストに応じて動的に予測結果を導き出す仕組みを構築し、専門知識を有しないユーザでも予測処理を活用可能とすることを目指した。

３　結果及び考察

３．１　システム全体構成

新しく構築したシステムでは、機能を「麹室IoT機能」、「ダッシュボード機能」、「ユーザ用アプリケーション」、「品温経過予測サーバ機能」の４つに再定義し、役割に応じた独立モジュールとして再構成した。

各機能間はAPI（Application Programming Interface）やクラウドを介して連携する、疎結合な構成を採用した。これにより、特定の機能における仕様変更や障害がシステム全体に波及することを防ぎ、システムの保守性と将来的な拡張性を確保した。

システムの全体像を図１に示す。

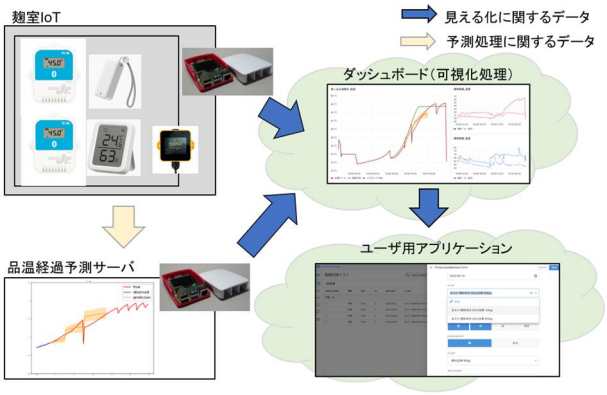


図１　システム構成

なお、品温経過予測サーバはオプション扱いとし、ユーザの要望に応じて利用の有無を柔軟に選択できる仕様とした。

従来システムからの改善の要点を表２に示す。

表２　従来システムの課題に対する改善の要点

項目	概要（詳細は後述）
通信設定の動的化	Web UI実装により、麹室IoT機能における通信設定変更を容易化（３．２）
クラウド環境の導入	外部サービスを選定し、既存DBとの安全な接続を構築（３．３）
アプリ開発基盤の刷新	ノーコード開発環境への移行による、アプリ改修の迅速化（３．４）
予測処理のAPI化	予測処理のAPI化により、専門知識不要な運用を実現（３．５）

各機能をコンテナ技術により構築することで、実行環境をパッケージ化し、システムの再現性とセットアップの簡便化を図った。これにより、現場への新規セットアップに要する時間は、動作確認を含めても約１日に短縮された。

また、本システムは汎用ハードウェアおよび無償利用可能なクラウドサービスを活用することで、低コストでの構築を前提とした設計とした。

システム構成に必要な機材一式の費用例を表３に示す。各サーバはRaspberry Pi[2]シリーズ、センサデータを集計しサーバ送信するゲートウェイにはM5stack[3]シリーズ、品温管理用の温度計はおんどとり[4]シリーズを想定している。選定するハードウェア構成による部分もあるが、必要最低限の構成であれば、システムは合計１

0 万円以下で安価に構築可能である。

表３　システム構成機材一式の費用例

システム上の役割	費用の目安
IoT サーバ	¥20,000-
IoT ゲートウェイ	¥5,000-
品温管理用の温度計	¥20,000-/台
品温経過予測サーバ	¥20,000-

３．２　麹室 IoT 機能の改修

ここでは、表２で述べた「通信設定の動的化」の具体的な取組内容について記述する。

麹室 IoT 機能のゲートウェイ（M5Stack）に通信設定用 Web インターフェースを実装した。通信設定画面を図２に示す。

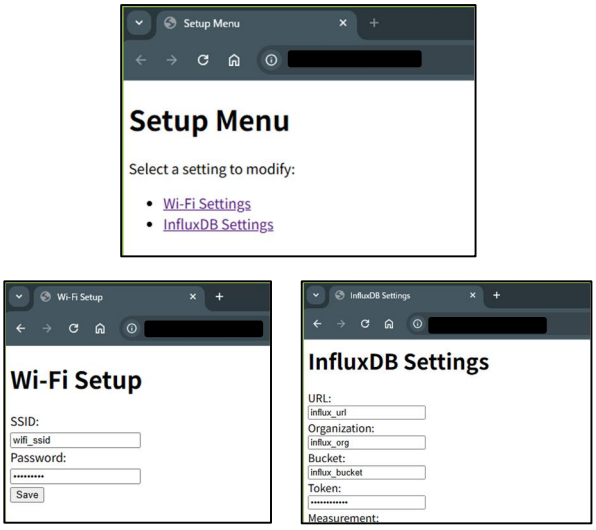


図２　設定画面

上段：トップページ

下段左：Wi-Fi の設定　下段右：書き込み先サーバの設定

本機能により、ソースコードの改修を伴わない動的な通信設定変更が可能となった。通信設定変更に関する動作プロセスを以下に示す。

(1) アクセスポイント（以下、AP）モードへの自動移行

M5Stack の起動時、既定の Wi-Fi ネットワークへの接続に失敗した場合、自動的に AP モードへと切り替わる。

(2) Web 設定画面の提供

ユーザが PC やスマートフォンから M5Stack に接続し、ブラウザ上で特定の IP アドレスにアクセスすることで、設定用ページが表示される。

(3) 設定項目の更新

当該ページを通じて、Wi-Fi 接続情報（SSID、パスワード）およびデータ保存先（データベースの URL 等）の変更が可能である。

本改修により、現場での Wi-Fi ルータ交換や保存先サーバの変更が生じた際にも、外部の専門家や開発環境を介することなく再設定が可能となった。

３．３　情報参照環境のクラウド化

ここでは、表２で述べた「クラウド環境の導入」の具体的な取組内容について記述する。用途毎に利用するプラットフォームを分離し、システムの柔軟性と現場での実用性の向上を図った。

(1) 動的な時系列データの可視化

時系列データの可視化基盤には、IoT データのリアルタイム描画および高度なグラフ表示に長けた Grafana Cloud[5] を選定し、従来システムで構築したダッシュボードをクラウド移行した。

クラウド環境からローカルネットワーク上の時系列データを参照するため、同サービスの PDC（Private Data source Connect）機能を利用した。これは、ネットワーク外部へポートを開放することなくセキュリティを担保した状態で、安全にデータアクセスするための機能である。

(2) 帳票データの入力と閲覧

帳票データの管理基盤には、ノーコード開発プラットフォームである AppSheet[6] を選定した。

同プラットフォームを活用したアプリ開発により、独自サーバの構築や複雑なコーディングを排しつつ、項目追加や UI の最適化に要するコストを最小化できる。これにより、現場の改善要望を即座に反映可能な、保守性の高い開発・運用環境を整えた。

３．４　ユーザ用アプリケーションの再構築

ここでは、表２で述べた「アプリ開発基盤の刷新」の具体的な取組内容について記述する。

本アプリケーションは、前述の AppSheet 開発環境を用いて作成した。主な役割は、ユーザが「現場でのデータ入力」および「過去データの参照」を行うための UI である。

アプリケーションを開くと、画面中央のメインビューに関連するデータが一覧表示される。新規データ登録は、メインビュー上のデータ追加ボタンから実行できる。一覧表示されたデータから参照したいデータを選択すると詳細ビューが表示される。詳細ビューでは、データの確認だけでなく修正も可能である。

スマートフォン版アプリケーション画面例を図３に示す。なお、記載情報は動作確認用のダミーデータである。

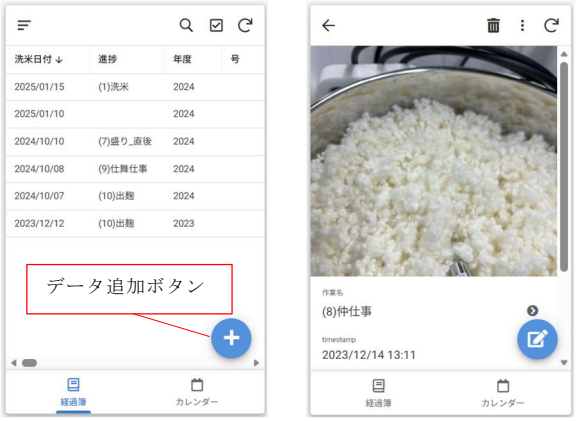


図３　ユーザ用アプリケーション画面例（スマホ版）
左：メインビュー　右：詳細ビュー

本アプリケーションは、スマートフォン、タブレット、パソコンからの利用に対応している。パソコン版アプリケーション画面例を図４に示す。

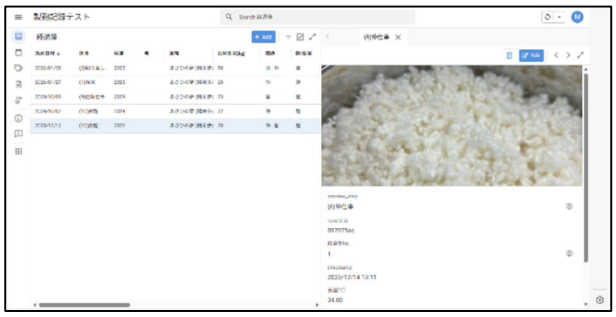


図４　ユーザ用アプリケーション画面例（PC 画面）
デバイスに応じ、画面レイアウトが自動調整される。

本アプリケーションの主要な管理項目を表４に示す。

表４　ユーザ用アプリケーションの管理項目

項目名	内容
製麹作業情報	麹の品温、室内の温湿度、作業工程（盛り、仲仕事等）、担当者メモなど。
原材料情報	原料米の種類や精米歩合、使用する種麹、各原料の在庫量など。
使用機材情報	使用機材の設定内容、製麹管理に用いた温度計（センサーID）など。

入力されたデータはクラウド上のデータベースへ即時に同期されるため、遠隔地からでもリアルタイムに状況を把握することが可能となった。

本アプリの特筆すべき機能の一つとして、図５に示すダッシュボード機能との連携が挙げられる。

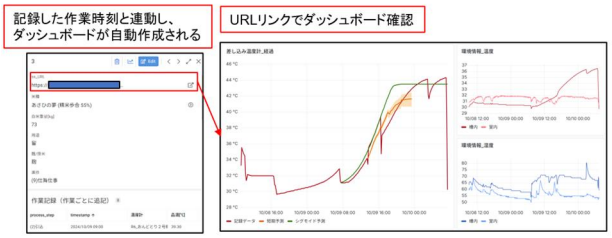


図５　ダッシュボード機能との連携

これは、アプリに登録された製麹開始時刻等の情報を基に、Grafana Cloud 上の時系列データから必要な情報だけを自動抽出してグラフ表示するものである。なお、オプションである品温経過予測機能を有効に設定することで、現在の品温経過に続く予測結果も同一画面上に重畳表示できる。

３．５　品温予測処理の整理およびバックエンドへの統合

ここでは、表２で述べた「予測処理の API 化」の具体的な取組内容について記述する。

従来の予測処理は、Python 実行環境を構築し関連ライブラリのバージョンを適切に整えたうえで、分散記述された処理プログラムを順番に実行する必要があった。このように、実行に専門知識を要していた品温経過予測処理を、再利用性の高い「予測エンジン（ForecastEngine）」として再定義し、バックエンドサーバへ統合した。サーバ機能の全体像を図６に示す。

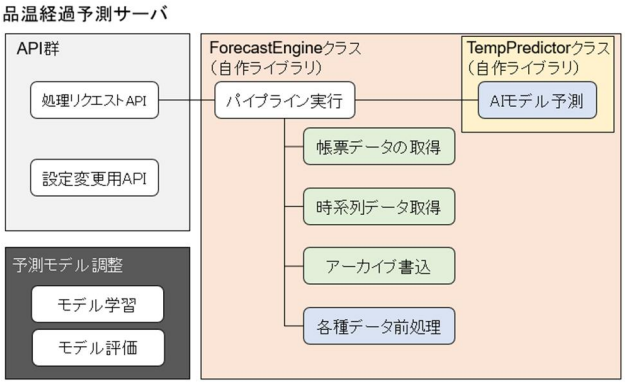


図６　品温経過予測サーバ機能の全体像

再利用を困難にしていた複雑な処理群を整理し、自作ライブラリとして再実装した。具体的には、予測に関する一連の処理（パイプライン）を管理する ForecastEngine クラス、および AI 予測アルゴリズムを担う TempPredictor クラスにモジュール化し、外部からのリクエストに応じて処理を実行する API サーバとして実装した。

モジュール整理により、「データ取得・加工」の仕組みと「予測アルゴリズム」の本体が分離された。これに

より、現場の環境変化に合わせたデータの取得方法の変更や、将来的な予測モデルの改良を、システム全体の動作に影響を与えることなく独立して実施できるようになり、保守性が大幅に向上した。

また、API サーバとして一連のプロセスはバックエンドで自動実行されるため、ユーザはプログラム実行やデータ操作を意識することなく、図５に示したように予測情報を活用することが可能となった。

図７に、ユーザのリクエストから予測結果が生成されるまでの処理フローを示す。

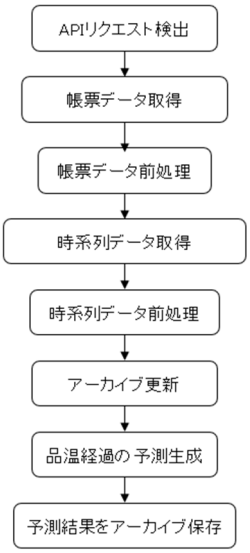


図７　品温経過予測の処理フロー

４　おわりに

本研究では、令和６年度に試作したシステムの検証結果を踏まえ、実運用および県内企業への横展開を見据えた完成度の向上に取り組んだ。その結果、既存設備に後付け可能かつ低コストである製麹管理システムの実装モデルを構築した。

特に、はじめに提示した「導入容易性」「保守性」「実用性」の３点を評価軸とし、クラウドプラットフォームやノーコード開発環境を軸とした再構築および妥当性の検討を行った。その結果、以下の通り、県内企業への横展開に資する実用的な成果を得た。

(1) 導入容易性の改善に関する評価

コンテナ技術の採用や通信設定機能の動的化により、新規セットアップに要する時間を１日程度に短縮した。また、無償枠が提供されているクラウドサービスの選定や汎用ハードウェアの活用により、システム一式を概ね 10 万円以下の費用で構築できた。これにより、大規模な設備投資を伴わないスモールスタートな導入モデルを確立し、経済的・時間的コストの観点から導入容易性が大幅に向上した。

(2) 保守性の改善に関する評価

ノーコードプラットフォーム（AppSheet）の導入により、現場のニーズに応じた UI 改善や項目追加を、従来に比べ簡便に実施できる環境を整えた。

(3) 実用性改善に関する評価

AI 技術を用いた予測処理を「予測エンジン」として API 化したことで、複雑な環境構築を介さず、必要に応じて機能を選択・追加できる柔軟な解析基盤を構築した。予測エンジンの API 化により、現場データ蓄積と並行して継続的なモデル更新が可能な構成が実現された。

謝　辞

本研究の遂行にあたり、システムの保守性向上およびアーキテクチャの最適化に関し、イーエルシステム株式会社より技術的助言とご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 松本健司ら：″栃木県産業技術センター研究報告″, No.22, 13-18, (2025)
2) “Raspberry Pi”, https://www.raspberrypi.com/
3) “M5Stack”, https://m5stack.com/
4) “おんどとり”, https://www.tandd.co.jp/product/ondotori/
5) “Grafana Cloud”, https://grafana.com/ja/products/cloud/
6) “AppSheet”, https://about.appsheet.com/home/

共同研究

アロフェン膜を用いたゼオライト膜の作製と特性評価

金子　優*　　佐伯　和彦*　　鈴木　宗**

Preparation and Characterization of Zeolite Membranes Using Allophane

KANEKO Masaru, SAEKI Kazuhiko and SUZUKI Hajime

本研究では、ポリエステル製不織布上に粘土鉱物アロフェンをコーティングしたアロフェン膜シートを支持体として、その膜上へのLTA ゼオライト膜の作製条件と膜の水蒸気吸着特性、及びエタノール／水混合溶液の分離特性について検討した。アロフェン膜へゼオライト種結晶を滴下法により固定した後に、水熱合成条件を検討した結果、合成液組成 15 Na_2O : Al_2O_3 : 2 SiO_2 : 800 H_2O において、60 ℃、24 時間の条件で LTA ゼオライト単相が得られた。得られたLTA ゼオライト膜は緻密な膜構造とゼオライト特有の水蒸気吸着特性を示した。また、浸透気化法によるエタノール／水混合溶液の分離試験において一定の分離特性を示すことを確認した。

Key words:　ゼオライト膜、アロフェン膜、水熱合成、浸透気化法、膜分離

1　はじめに

ゼオライト膜はエタノールやイソプロパノール等から水を分離するなど有機溶剤の脱水技術に利用されている。バイオマス原料のサトウキビなどから得られるバイオエタノールの脱水に商用規模で用いられるなど、普及が進んでいる[1),2)]。

代表的な分離方法の浸透気化（PV）法では、処理対象混合液と分離膜を用い、膜を減圧しながら混合液を通過させることで水分離が行われる。水分離には水親和性のあるLTA ゼオライト膜（以下、「LTA 膜」という。）が用いられている。

本手法は蒸留法に比べ低温で行えるので、蒸留法に替わる省エネルギー技術として期待されている。

LTA 膜は、主に管状の多孔質セラミック支持体上に水熱合成によって作製されている。この支持体は機械的強度、耐熱性、耐溶剤性に優れている一方で、高価で比較的重く難加工性の課題を有する。

本研究ではこれらの課題を解決するために、品川ゼネラル(株)が既に製品化している、ポリエステル製不織布に粘土鉱物の一種であるアロフェンをコーティングしたアロフェン膜[3)]を用いた。その膜上にLTA 膜を成膜することで、軽量で加工性の良い水分離膜の作製を試みるとともに、その膜特性について検討した。

＊　栃木県産業技術センター　県南技術支援センター
＊＊　品川ゼネラル株式会社　ケミカル事業部

2　研究の方法

2．1　水熱合成処理条件の検討

ケイ素(Si)原料にはケイ酸ナトリウム($Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$)、アルミ（Al）原料には、アルミン酸ナトリウム（$NaAlO_2$）の試薬を用いた。Si 原料と Al 原料は別々に水酸化ナトリウム（NaOH）と純水（H_2O）を用いて調整した。それらの溶液を混合し１時間攪拌して合成液を調製した。混合後の各成分の組成は以下のとおりとし、H_2O のモル比を n=400 と n=800 の２通り調製した。

15 Na_2O : Al_2O_3 : 2 SiO_2 : n H_2O（n= 400, 800 ）

合成液はテフロン容器を用いて、温度60℃または90℃で所定時間水熱合成し生成物を得た。

生成物は合成液を濾別後、60℃、24 時間乾燥した後、X 線回折装置（(株)マックサイエンス製 MXP-3）を用いて粉末Ｘ線回折(XRD)測定により結晶相の同定を行った。

2．2　LTA 膜の作製と評価

2．2．1　アロフェン膜への種結晶の固定

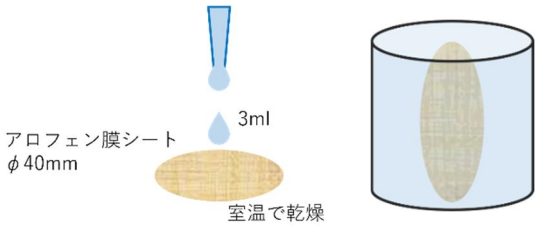
LTA ゼオライト合成の起点となるゼオライト種結晶には市販のLTA ゼオライト粉末を用いた。コーティング液は、純水 10 ml に LTA 粉末 0.1 g、0.5 g、2.5 g をそれぞれ秤り取り、超音波で 10 分間分散して作製した。続いて、図１に示すように、種結晶のアロフェン膜への固定を以下の２通り実施した。

（１）滴下法

コーティング液をアロフェン膜（直径 40 mm）にピペットで 3 ml 滴下し、室温で乾燥した。

（２）ディップコーティング法

コーティング液にアロフェン膜を垂直に浸漬し、その後ゆっくり引き上げ、室温で乾燥した。



(1)滴下法　　(2)ディップコーティング法

図１　種結晶の固定方法

２．２．２　LTA 膜の作製

種結晶を固定したアロフェン膜シートを合成液の入ったテフロン容器中に立てて合成を行った。合成条件は前項において LTA が単相で得られた条件を用いた。水熱処理後、シートを取り出し、純水を入れた容器中に１時間浸漬してシートを洗った後、60℃で 24 時間乾燥した。

２．２．３　LTA 膜の構造及び水蒸気吸着特性

得られた LTA 膜の表面及び断面状態を調べるため、走査型電子顕微鏡(SEM)（日本電子(株)製 JSM-IT200LA）を用いて観察した。また、LTA 膜の構造を調べるため、フーリエ変換赤外分光光度計（FT-IR）（日本分光(株)製 FT/IR-4600）により、赤外線吸収スペクトルを測定した。

また、LTA 膜の水蒸気吸着特性を評価するため、水熱合成した LTA 膜を 110℃で３時間乾燥後、恒温恒湿装置（(株)東洋製作所製 AGX-326）を用いて、温度 40℃で相対湿度 40、60、80 %における試料１ｇ当たりの吸湿量を求めた。比較対象として、アロフェン粉末のみの吸湿量も同様に求めた。

２．３　LTA 膜のエタノール／水分離特性評価

分離試験に用いる分離膜の作製法を図２に示す。アロフェン膜シートを中央にφ6 mm の円形の穴が開いた PET シートで挟み、その中央に種結晶として LTA ゼオライト 0.1 ｇを 10 ml の純水に分散した懸濁液を滴下した。次に、シートを容器に立てて 60℃、24 時間水熱処理して分離膜を作製した。

作製した LTA 膜のエタノール／水分離特性評価のため、浸透気化（PV）法による透過試験を実施した。使用した PV 装置の概略図を図３に示す。

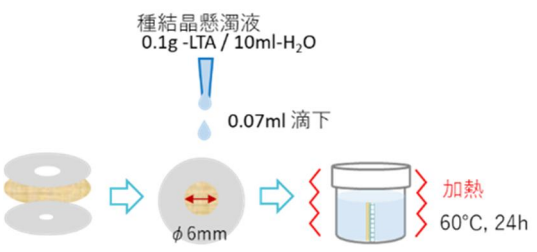


図２　分離膜の作製法

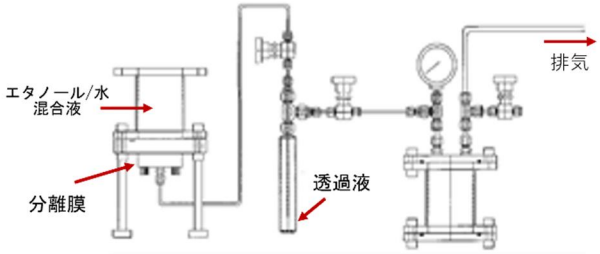


図３　PV 法装置の概略図

試験に用いる供給液はエタノール／水混合溶液とし、市販特級エタノール(99.5 %)50 ml と純水 50 ml を混合した溶液を用いた。試験中は供給液を 40℃に保った。供給液と分離膜を通過した透過液のエタノール濃度を比較することによりエタノールと水との分離特性を評価した。エタノール濃度はピクノメータ法により測定した。

３　結果及び考察

３．１　ゼオライト膜の合成と膜特性

LTA ゼオライトが得られる水熱処理条件を決定するため、異なる条件における生成物の XRD 測定を行った。測定の結果、合成液の水のモル比 n=400 の場合は、合成温度 60℃及び 70℃ともに LTA ゼオライトの単相は得られなかった。一方、n=800 では図４に示すとおり、60℃, 24 時間、及び 90℃, 4 時間で単相が得られた。

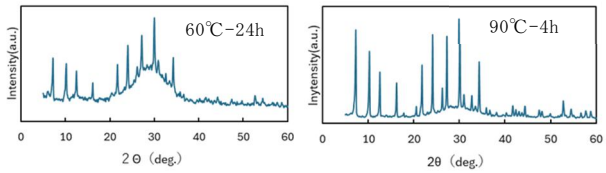


図４　生成物の XRD 図

この２つの条件でアロフェン膜シート上に作製した LTA 膜表面の SEM 像を図５に示す。60℃で得られた膜は空隙や亀裂は認められず緻密な膜であることが確認できた。一方、90℃では、クレーター状の空隙が認められることから、60℃の条件がゼオライト膜の成膜に適していることが分かった。

図６に 60℃の条件で得られた LTA 膜の断面 SEM 像を示す。図より厚さ約 0.9 μm の緻密な膜が形成されていることが確認できた。その緻密層の上に結晶粒子が積み重なり厚さ約 8.5 μm の膜を形成していることが観察された。

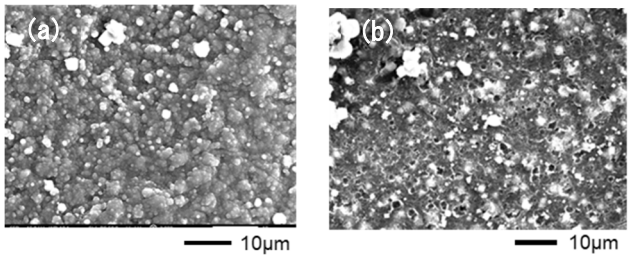


図５　LTA 膜表面の SEM 像
a)60℃，24h，b)90℃，4h

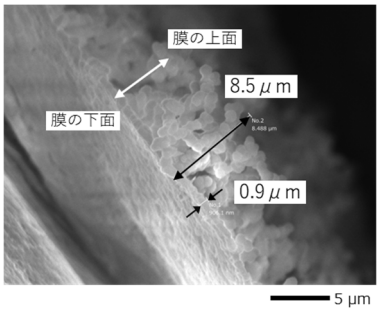


図６　LTA 膜断面の SEM 像

図７に 60℃、24 時間水熱処理により得られた LTA 膜及び試薬 LTA ゼオライトの FT-IR 測定結果を示す。約 1000cm^{-1} のピークは、T-O-Tbond(T=Si，Al)の非対称伸縮振動、約 1650cm^{-1} のピークは OH 変角振動、約 3400cm^{-1} のブロードなピークは OH 伸縮振動に帰属される。これらに帰属されるゼオライト膜のスペクトルは、試薬と同様なスペクトルを示すことから、LTA 膜は LTA ゼオライトの構造をもつことが確認できた。

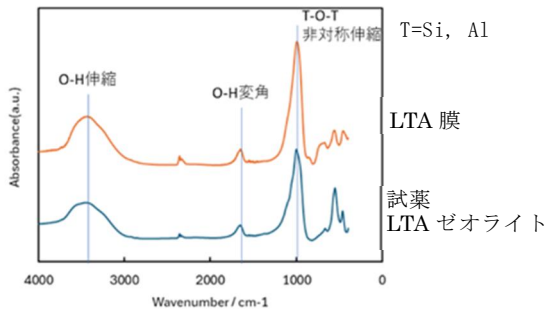


図７　FT-IR 測定結果

図８に LTA 膜の水蒸気吸湿試験結果を、比較対象としてアロフェン粉末の結果と併せて示す。吸湿率は、試料を 110℃で３時間乾燥した後、温度 40℃で相対湿度 40、60、80 %における試料 1 g 当たりの吸湿量から求めた。

アロフェン粉末は、低湿度から高湿度へと相対湿度が上昇するにつれて吸湿率が段階的に増加する。一方、一般的なゼオライトは、低湿度域から吸湿率が高くなり、高湿度域まで特性が維持される。本研究で得られた膜も同様な傾向を示した。このことから得られた膜はゼオライトの特徴を有した膜であることを確認できた。

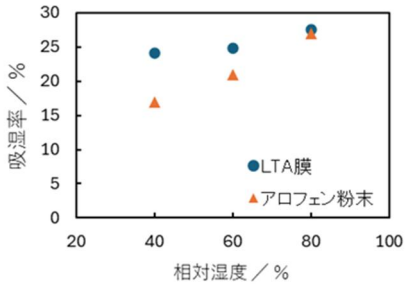


図８　水蒸気吸湿試験結果

３．２　LTA 膜のエタノール／水分離特性評価

試験前の供給液と分離膜を通過した透過液のエタノール濃度を測定した結果を図９に示す。分離試験の結果、エタノール濃度は供給液 48 %から透過液は 2 %へ低下し、水とエタノール混合液の分離特性を確認できた。一方で LTA 膜は、供給開始から約 72 時間で約 20　ml の透過液を回収したが、その後は膜欠陥の発生により膜分離が継続できず、耐久性に課題があることが明らかになった。したがって、エタノール／水分離膜の実用化には、膜の緻密層の厚膜化や LTA 結晶粒子間の緻密化などを図る必要があると考えられる。

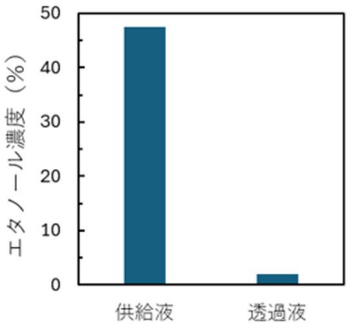


図９　分離膜のエタノール/水混合液に対する PV 試験結果

４　おわりに

本研究ではアロフェン膜シートを用いて、その膜上に水熱合成で LTA 膜を作製し、その膜特性について評価し、以下の結果が得られた。

(1) 合成液組成 15 Na_2O：Al_2O_3：2 SiO_2：800H_2O において、温度 60℃,24 時間の合成条件で単相の LTA 結晶相を有した LTA 膜が得られた。

(2) 得られた LTA ゼオライト膜の水蒸気吸着特性は LTA ゼオライト粉末と同様の傾向を示した。

(3) エタノール／水混合溶液の PV 分離試験により LTA 膜は一定のエタノール／水分離能を有することを確認できた。

参考文献

1）M. Kondo, T. Yamamura, E. Sugimoto and H. Kita：″Trans. Mat. Res. Soc. Japan.″,32(3),709,(2007)

2）T. Kyotani:″ANALYTICAL SCIENCES″,22(6), 961-964, (2006))

3）松本泰治，鈴木宗，飯塚一智，佐伯和彦，明渡純：アロフェン膜複合体、それを用いたシート，及びアロフェン膜複合体の製造方法，JP 6778863,（2020）